KAHRAMANMARAŞ SÜTÇÜ İMAM ÜNİVERSİTESİ

e-ISSN 1309-1751

Mühendislik Bilimleri Dergisi
Journal of Engineering Sciences

2025

SAYI / NUMBER : 2

CİLT / VOLUME : 28

e-ISSN 1308-7751

Kahramanmaraş Sütçü İmam University
Journal of Engineering Sciences

Yazışma Adresi / Corresponding Address

Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi
Mühendislik Bilimleri Dergisi
46050, Onikişubat/Kahramanmaraş
TÜRKİYE

E - Posta

jes@ksu.edu.tr

Web

http://jes.ksu.edu.tr/

Bu dergi hakemli olup yılda 4 kez yayınlanır.
This journal is peer - reviewed and published 4 issues per year.

e-ISSN 1308-1751

Kahramanmaraş Sütçü İmam University
Journal of Engineering Sciences

Sahibi / Owner

Prof.Dr. Alptekin YASIM

KSU Rector

Baş Editör / Editor in Chief

Prof. Dr. Mehmet ÜNSAL

munsal@ksu.edu.tr

Baş Editör Yardımcısı / Vice Editor in Chief

Assoc. Prof. Dr. Zeynep Banu ÖZGER

zeynepozger@ksu.edu.tr

Editörler / Editors

Prof. Dr. Ahmet ALKAN
Electrical and Electronics Eng.
KSU Univ. TURKEY
aalkan@ksu.edu.tr

Prof. Dr. Yücel ÖZMEN
Mechanical Eng.
Karadeniz Teknik Univ. TURKEY
yozmen@ktu.edu.tr

Prof. Dr. Özlem TURGAY
Food Eng.
KSU Univ. TURKEY
ozlem@ksu.edu.tr

Prof. Dr.Tamer RIZAOĞLU
Geological Eng.
KSU Univ., TURKEY
tamer@ksu.edu.tr

Prof. Dr. Tahir Çetin AKINCI
Electrical Eng.
İstanbul Teknik Univ, TURKEY
akincitc@itu.edu.tr

Prof. Dr. Kristina SARIC
Geological Eng.
University of Belgrade, SERBIA
kristina.saric@rgf.bg.ac.rs

Prof. Dr. Ramazan GÖKÇE
Food Eng.
Pamukkale Univ., TURKEY
rgokce@pau.edu.tr

Prof. Dr. A. Mehmet YÜCEER
Chemical Eng.
İnönü Univ., TURKEY
mehmet.yuceer@inonu.edu.tr

Assoc.Prof.Dr. Ö. Fatih KEÇECİOĞLU
Electrical and Electronics Eng.
KSU Univ. TURKEY
fkececioglu@ksu.edu.tr

Assoc.Prof.Dr. Fethullah GÖÇER
Industrial Eng.
KSU Univ. TURKEY
fgocer@ksu.edu.tr

Assoc.Prof.Dr. Erdem SELVER
Textile Eng.
KSU Univ. TURKEY
eselver@ksu.edu.tr

Assoc.Prof.Dr. Pınar CİHAN
Computer Eng.
Namık Kemal Univ. TURKEY
pkaya@nku.edu.tr

Assoc. Prof.Dr. Çağrı UZAY
Mechanical Eng.
KSU Univ., TURKEY
cagriuzay@ksu.edu.tr

Assoc.Prof.Dr. Oğuz DOĞAN
Mechanical Eng.
KSU Univ. TURKEY
oguzdogan@ksu.edu.tr

Assist.Prof.Dr. Ayşe Ruşen DURUCAN
Civil Eng.
Fırat Univ. TURKEY
ardurucan@firat.edu.tr

Assist.Prof.Dr. Yakup CUCİ
Environmental Eng.
KSU Univ. TURKEY
cuci@ksu.edu.tr

Assist. Prof. Dr. Pelin CANBAY
Computer Eng.
KSU Univ. TURKEY
pelincanbay@ksu.edu.tr

Assist. Prof. Dr. F. Tuğçe ÇINAR KILIÇ
Civil Eng.
Adıyaman Univ. TURKEY
fcinar@ksu.edu.tr

Assist. Prof. Dr. Özdeş ÇERMİK
Language Editor
KSU Univ. TURKEY
ozdescermik@ksu.edu.tr

Res. Assist. Sermet AYMAN
Technical Manager
KSU Univ. TURKEY
sayman@ksu.edu.tr

Res. Assist. Yalın YAMAÇ
Technical Manager
KSU Univ. TURKEY
yalinyamac@ksu.edu.tr

Cilt / Volume : 28 Sayı / Number : 2 Yıl / Year : 2025

Res. Assist. Betül PAKÖZ
Technical Manager
KSU Univ. TURKEY
betulpakoz@ksu.edu.tr

Res. Assist. Arif ÇUTAY
Technical Manager
KSU Univ. TURKEY
arifcutay@ksu.edu.tr

Danışma Kurulu / Advisory Board

Prof. Dr. Cetin Kaya KOC
Dep. of Computer Eng.
Univ Of Cal.
Santa Barbara. USA
koc@cs.ucsb.edu

Prof. Dr. Ahmet PINARBAŞI
Dep. of Mechanical Eng.
Alanya Alaaddin Keykubat
Univ. Antalya, TURKEY
apinarbasi@alanya.edu.tr

Prof. Dr. Fan MIZI
Dep. of Civil Eng.
Brunel Univ.
Uxbridge,UK
mizi.fan@brunel.ac.uk

Prof. Dr. Selim AY
Dep. Of Elect. Eng.
YTU Univ.
İstanbul. TURKEY
selimay@yildiz.edu.tr

Prof. Dr. Ayhan ÖZDEMİR
Dep. of Elect. & Elcn Eng.
Sakarya Univ. Sakarya,
TURKEY
aozdemir@sakarya.edu.tr

Prof. Dr. S. Serhat ŞEKER
Dep. Of Elect. Eng.
İTU Univ. İstanbul.
TURKEY
sekers@itu.edu.tr

Prof. Dr. A. Fevzi BABA
Dep. of Elect. & Elcn. Eng.
Marmara Univ. İst.,
TURKEY
fbaba@marmara.edu.tr

Prof. Dr. Musa GÖĞEBAKAN
Dep. of Physics
KSU Univ.
K.Maraş, TURKEY
gogebakan@ksu.edu.tr

Prof. Dr. Hüseyin AKILLI
Dep. of Mechanical Eng.
ÇU Univ.
Adana, TURKEY
hakilli@cu.edu.tr

Prof. Dr. Şerafettin EREL
Dep. of Elect. & Elcn Eng.
YBU Univ.
Ankara, TURKEY
serel@ybu.edu.tr

Dr. Amit CHAUDHRY
Dep. of Microelectronics
Panjab Univ,
Chandigarh, India
amit_chaudhry01@yahoo.com

Prof. Dr. Murat PALA
Dep. of Civil Eng.
Adıyaman Univ.
Adıyaman. TURKEY
pala@adiyaman.edu.tr

Prof. Dr. Mehmet KORÜREK
Dep. Of Elcn & Comm Eng.
İTU Univ.
İstanbul. TURKEY
korurek@itu.edu.tr

Assoc. Prof. Dr. Mustafa ONAT
Dep. of Computer Eng.
Marmara Univ.
İstanbul. TURKEY
monat@marmara.edu.tr

Assoc. Prof. Dr. Nazmi EKREN
Dep. of Elect. & Elcn. Eng.
Marmara Univ.
İstanbul, TURKEY
nekren@marmara.edu.tr

Prof. Dr. İ.Taner OKUMUŞ
Dep. of Computer Eng
KSU Univ.
K.Maraş. TURKEY
iokumus@ksu.edu.tr

Prof. Dr. Yasemin KORKMAZ
Dep. of Textile Eng.
KSU Univ.
TURKEY
ykorkmaz@ksu.edu.tr

Prof. Dr. Eyüp DEBİK
Dep. of Environmental Eng.
Yıldız Technical Univ.
İstanbul. TURKEY
debik@yildiz.edu.tr

Prof. Dr. Mustafa YAZICI
Dep. of Physics Education.
KSU Univ.
K.Maras. TURKEY
yazici@ksu.edu.tr

e-ISSN 1309-4751



Kahramanmaraş Sütçü İmam University
Journal of Engineering Sciences



BU SAYIYA (CİLT 28 SAYI 2) KATKI VEREN HAKEMLER

Arslan SARAL
Özge ÖZTİMUR KARADAĞ
Yavuz CANBAY
Ahmet AKTAŞ
Deniz KORKMAZ
Ramazan SOLMAZ
Hasan Hüseyin BİLGİÇ
İpek ATIK
Muharrem KARAASLAN
Kerim KARADAĞ
Galip Serdar TOMBUL
Mustafa ÖNCEL
Kurban YAŞAR
Dilşat BOZDOĞAN KONUŞKAN
Furkan DİNÇER
Cevdet Emin EKİNCİ
Onur IŞIK
Ömer YEŞİLTEPE
Sabriye Banu İKİZLER
Dilek ÖZKAN
Vahid SİNCAP
Abdullah GÜL
Eser SERT
Mustafa TEKİN
Sedat ÇETİN
Mesut GÖR
Emir ÖZTÜRK
Kübra UYAR

Selami DEMİR
Aytaç ALTAN
Mehmet KURTOĞLU
Yücel ÇETİNCEVİZ
Ümit BUDAK
Hakan TUTUMLU
Hakan AÇIKGÖZ
Ahmet Serdar YILMAZ
Mehmet Ali ÖZÇELİK
Ahmet ALKAN
Çağrı UZAY
Halil Burak KAYBAL
Murat YILMAZTEKİN
Hasan CANGİ
Süleyman ADAK
Mehmet CANBAZ
Hülya CİVELEK YÖRÜKLÜ
Tanay KARADEMİR
Hamza Osman İLHAN
Ekin EKİNCİ
Ömer AYDIN
Yakup AYKUT
Muharrem BALCI
Nevim SAN
Ahmet Talha GEZGİN
Erkan ÖZHAN
Ahmet SAYGILI
Züleyha YILMAZ ACAR

Ahmet Orhan GÖRGÜLÜ
Mehtap TANYOL
Nilgün ÖNCÜL
Melih GÜZEL
Oğuz DOĞAN
Recep ARSLAN
Fethi ŞERMET
Yusuf KARTAL
Gaye KAYA
Ahmet Serhan CANBOLAT
Ergun UZLU
Emine AYDIN
Gamze GENÇ
Fuat TAN
Mustafa Haluk SARAÇOĞLU
Ahmet ŞENOL
Zeynep Neşe KURT ALBAYRAK
Aydan AKSOĞAN KORKMAZ
Utku KOÇ
Ahmet MAVİ
Muharrem KARASLAN
İdil TEKİN
İlker Bekir TOPÇU
Mehmet Zübeyir ÜNLÜ
Fatih UYSAL
Resul ÇÖTELİ
Nesrin AYDIN ATASOY
Arda Burak EKMEN
Bayram ATEŞ
Serkan BAŞLAYICI
Ahmet Serhan CANBOLAT
Halil Nusret BULUŞ
Abdullah ÇALIŞKAN
Yavuz Selim BALCIOĞLU
Devran DENİZ
Hülya SİLAH
Şule TATAR YOLCULAR
Esma Nur GEÇER
Durmuş Can ACER
Ahmet ÇETİN
Sultan ZAVRAK
Veli BAŞARAN
Harun ÇİĞ
Pınar PARLAKYİĞİT
Sezgin ESER
Ali EM
Said DUSAK
Emre Oğuz KÖROĞLU
Zeynep ÜNSAL ASLAN
Emrah ASLAN
Ermedin TOTİÇ
Gamze Gülşen BAKICI
Elif KURTULDU DÖNMEZ
Mesut BALIBEY
Alptekin KISASÖZ
Ayşegül ERDEM
Gökmen TAYFUR
Nadide Gülşah GÜLENÇ
Mehmet Alpaydın ÜSTÜN
Alper KEREM
Funda AKAR
Ünal YILMAZ
Banu YAĞCI
Hakan ATAPEK
Murat ÇATALKAYA
Özlem AYDIN FİDAN
Fidan KAYA GÜLAĞIZ
İbrahim Taner OKUMUŞ
Neilan SOYLU
Serkan AKOGUL

Sema ÖZEN BAYRAKTAR
Altan MESUT
Aydın ALPTEKİN
Kevser CIRIK

e-ISSN 1309-1751

Kahramanmaraş Sütçü İmam University
Journal of Engineering Sciences

İÇİNDEKİLER

ARAŞTIRMA MAKALESİ – RESEARCH ARTICLE

Yüksek Verimli Swift Siklonda Giriş Hızının Etkisinin İncelenmesi
Investigation Of Inlet Velocity Effect On High Efficiency Swift Cyclone **583-591**
Nihan BABAOĞLU, İbrahim ARARAT

Comparative Analysis Of Vision Transformers And Convolutional Neural Networks In Diabetic Retinopathy Diagnosis
Görüntü Transformatörleri Ve Evrişimli Sinir Ağlarının Diyabetik Retinopati Teşhisinde Karşılaştırmalı Analizi **592-600**
Esra YÜZGEÇ ÖZDEMİR, Canan KOÇ, Fatih ÖZYURT

On-Off Ve Değişken On Kontrollü ZVS E-Sınıfı Rezonans Evirici İçin Si-IGBT Ve Sic-Mosfet'in Karşılaştırılması
Comparison Of Si-IGBT And Sic-Mosfet For On-Off And Variable On Controlled ZVS Class-E Resonant Inverter **601-612**
Salih NACAR

Nehir Tipi Santrallerdeki Izgara Kirlilik Oranlarının Makine Öğrenme Yöntemleri İle Tahmini
Prediction Of Grid Pollution Rates In River-Type Power Plants Using Machine Learning Methods **613-629**
Kağan KONU, Osman BİLGİN, Hakan AÇIKGÖZ

Investigation Of Thermodynamic Performance Of Turbofan Engine At Different Fan Pressure And Bypass Ratios Part A: Energy Analysis
Farklı Fan Basıncı Ve Bypass Oranlarında Turbofan Motorunun Termodinamik Performansının İncelenmesi Bölüm A: Enerji Analizi **630-643**
Emine OĞUR, Ali KOÇ, Yıldız KOÇ, Özkan KÖSE, Hüseyin YAĞLI

Farklı Eğim Ve Azimut Açısı Senaryoları Altında Güneş Enerjisi Santralinin Üretim Performanslarının Analizi
Analysing The Generation Performance Of A Solar Power Plant Under Different Tilt And Azimuth Angle Scenarios **644-659**
Furkan DİNÇER, Emre ÖZER

Application Of Dynamic Voltage Restorer To Improve Power Quality In Stand-Alone Wind Power Systems Under Variable Operating Conditions
Bağımsız Rüzgar Enerjisi Sistemlerinde Güç Kalitesini İyileştirmek İçin Değişken Çalışma Koşullarında Dinamik Gerilim Onarıcının Uygulanması **660-673**
Ünal YILMAZ

Drone Tabanlı Tarımsal Operasyonlarda Hız Ve Yüksekliğin Enerji Tüketimine Etkisi
The Impact Of Speed And Altitude On Energy Consumption In Drone-Based Agricultural Operations 674-689
Mevlüt İNAN, Ali KARCİ

Yüksek Yoğunluklu Polietilen Esaslı Kompozitlerde Dolgu Maddesi Olarak Odun Unu Ve Tavuk Tüyü Kullanımının Araştırılması
Research On The Use Of Wood Flour And Chicken Feather As Filler In High Density Polyethylene Based Composites 690-701
Büşra AVCI,İlkay ATAR, Fatih MENGELOĞLU

The Effect Of Apricot Fibre Addition On The Rheological Properties And Mineral Content Of Peanut Butter 702-712
Kayısı Lifi İlavesinin Yer Fıstığı Ezmesinin Reolojik Özelliklerine Ve Mineral Madde İçeriğine Etkisi
Fatma Gül EVCİL, Adnan BOZDOĞAN

Hibrit Üretim Sistemlerinde Karşılaştırmalı Maliyet Analizi
Comparative Cost Analysis In Hybrid Generation Systems 713-720
Rümeysa Aybüke KORKMAZ, Ahmet Serdar YILMAZ

Polipropilen Lifli Mikro Betonlarda Nano Silika Kullanımının Etkisi
Effect Of Using Nano Silica In Polypropylene Fibre Micro Concretes 721-731
Melek AKGÜL

Performance And Efficiency Of Photovoltaic Panels In Erzurum Winter Conditions
Erzurum Kış Koşullarında Fotovoltaik Panellerin Performansı Ve Verimliliği 732-746
Şendoğan KARAGÖZ, Meryem ARAS, Orhan YILDIRIM, Fadime ŞİMŞEK, Ömer ÇOMAKLI

Kahramanmaraş Greenhouse Gases Emission Inventory And Climate Change Action Plans
Kahramanmaraş Sera Gazi Emisyon Envanteri Ve İklim Değişikliği Eylem Planları 747-762
Emre Oğuz KÖROĞLU

Deprem Karakteristik Özelliklerinin Zemin Çivili Duvarların Dinamik Davranışına Etkisi: 3 Boyutlu Sayısal Analiz
The Influence Of Earthquake Characteristics On The Behaviour Of Nailed Walls: 3D Numerical Analyses 763-784
Burcu DIŞKAYA, Akın GÖKGÖZ, Mustafa Kubilay KELEŞOĞLU

Deep Learning Methodologies For Nuclei Segmentation And Mitosis Detection In Histopathological Images Analysis
Histopatolojik Görüntü Analizinde Çekirdek Segmentasyonu Ve Mitoz Tespiti İçin Derin Öğrenme Yöntemleri 785-801
Refik SAMET, Nooshin NEMATİ, Emrah HANÇER, Serpil DİZBAY SAK, Ayca Bilge KİRMİZİ, Zeynep YİLDİRİM

Türkçe Sağlık Danışmanlığında Büyük Dil Modellerinin Hasta-Doktor İletişiminde Kullanım Potansiyeli
The Potential Use Of Large Language Models In Patient-Doctor Communication In Turkish Health Consultation 802-822
Muhammed Kayra BULUT, Banu DİRİ

Kimyasal Modifikasyon Sonrası Termal Olarak Stabilize Edilen Viskoz Rayon Liflerin Yapısal Analizi
Structural Analysis Of Thermally Stabilized Viscose Rayon Fibers After Chemical Modification
Kemal Şahin TUNÇEL
823-834

Hava Görüntülerinin Derin Öğrenmesi Kullanılarak Dağınık Fotovoltaik Pillerin Otomatik Haritalanması Ve Segmentasyonu
Automatic Mapping And Segmentation Of Scattered Photovoltaic Batteries Using Deep Learning Of Aerial Imagery
Sinan ALTUN
835-850

Synthesis Of Polyaniline-Based Catalysts: Photocatalytic Degradation Of Methylene Blue
Polianilin İçerikli Katalizörlerin Sentezi: Metilen Mavisinin Fotokatalitik Degradasyonu
Nazlı TÜRKTEN, Yunus KARATAŞ, Yelda YALÇIN GÜRKAN
851-862

Yüzey Pürüzlülüğünün Ve Kazık Geometrisinin Kazık Davranışı Üzerindeki Etkisinin Arazi Deneyleri Ve Sayısal Analizlerle Araştırılması
Investigation Of The Effect Of Surface Roughness And Pile Geometry On Pile Behavior With Field Tests And Numerical Analyses
Ömer YEŞİLTEPE
863-871

Machine Learning-Based Model Development In Mobile Health Applications And Device-Cloud Integration
Mobil Sağlık Uygulamalarında Makine Öğrenmesi Temelli Model Geliştirme Ve Modelin Cihaz-Bulut Entegrasyonu
Özge ÇİÇEK, Sema CANDEMİR
872-882

Luminance Estimation From Surfaces With Different Color Temperature And Lamp Illumination Angle: A Deep Learning-Based Approach
Farklı Renk Sıcaklığı Ve Aydınlatma Açısı İle Yüzeylerden Parıltı Tahmini: Derin Öğrenme Tabanlı Bir Yaklaşım
Birkan BÜYÜKARIKAN, Erkan ÜLKER
883-896

Turba Çözeltisinin Titanyumun Çukurlaşma Korozyonu Üzerindeki Rolünün Ortaya Çıkarılması
Revealing The Role Of Peat Solution Over The Pitting Corrosion Of Titanium
Ayhan ORHAN, Nurettin ÇEK
897-906

Elazığ İlinde Seçilen Okullarda Gürültü Kirliliğinin Değerlendirilmesi
Evaluation Of Noise Pollution In Selected Schools In Elaziğ Province
Nilüfer NACAR KOÇER, Gülşad USLU ŞENEL
907-913

Hünnap Fenolik Ekstraktı İlavesinin Kefirlerin Bazı Fizikokimyasal Ve Fitokimyasal Özelliklerine Etkisi
Effect Of Jujube Phenolic Extract Addition On Kefirs Some Physicochemical And Phytochemical Properties
Kader TOKATLI, Refia Esma ERKEN, Elif GÜVEN, Moutessim Hassan ZİBER
914-922

A Study On The Mechanical Properties Of PLA+ Samples Manufactured Using 3D Printing With Different Raster Angles
Farklı Yazdırma Açıları İle 3D Yazıcı Kullanılarak Üretilen PLA+ Numunelerinin Mekanik Özellikleri Üzerine Bir Çalışma
Mete Han BOZTEPE
923-932

Innovative Approach To Environmental Waste Classification With Ensemble Learning Models 933-956
Topluluk Öğrenme Modelleri İle Çevresel Atık Sınıflandırmada Yenilikçi Yaklaşım
Mehmet Umut SALUR, Nermin ELMAS

Effect Of Different Vertical Structural Irregularities On Nonlinear Response Of Reinforced Concrete Buildings 957-974
Farklı Düşey Doğrultudaki Yapısal Düzensizliklerin Betonarme Binaların Doğrusal Olmayan Davranışına Etkisi
Rebaz KARİM, Esra Mete GÜNEYİSİ

Exploring The Effectiveness Of Pre-Trained Transformer Models For Turkish Question Answering 975-993
Türkçe Soru Cevaplama İçin Önceden Eğitilmiş Transformer Modellerinin Etkinliğini Keşfetme
Abdullah Talha KABAKUŞ

Kenevir/Pamuk Karışımlı Örme Kumaşların Performans Ve Biyobozunurluk Ve Özelliklerinin Araştırılması 994-1006
Investigation Of Performance And Biodegradability Properties Of Hemp And Cotton Blended Knitted Fabrics
Hatice Kübra KAYNAK, Kübra ÖZŞAHİN

Numerical Investigation Of Thermal And Structural Behavior In Injection-Molded Femur Implants 1007-1019
Enjeksiyon Kalıplama İle Üretilen Femur İmplantlarının Isıl Ve Yapısal Davranışlarının Sayısal Olarak İncelenmesi
Fuat TAN, Ahmet Kerem ALKAN

İklim Değişikliği Etkisi Altında Kıyı Bölgelerinde Aylık Yağış Rejimi Değişimi Ve Gelecek Yağış-Akış Tepkisinin Araştırılması: Rize Ve Antalya Çalışması 1020-1035
Investigation Of Monthly Precipitation Regime Change And Future Rainfall-Runoff Response In Coastal Regions Under The Impact Of Climate Change: A Study Of Rize And Antalya
Hasan Törehan BABACAN

Soğukta Şekil Verilmiş Çelik Gövde Delikli Kesitlerin Burkulma Kapasitelerinin Farklı Yaklaşımlarla İncelenmesi 1036-1048
Buckling Capacity Of Cold-Formed Steel Sections With Web Holes Using Different Approaches
Ramazan ORUÇ

$Ni_{55}Si_{40}M_5$ (M=Co, Fe, Al) Alaşımlarının Ark Ergitme Yöntemi İle Elde Edilmesi Ve Yapısal Ve Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi 1049-1063
Investigation Of Structural And Mechanical Properties Of $Ni_{55}Si_{40}S_5$ (M=Co, Fe, Al) Alloys Obtained By Arc Melting Method
Ömer KARATUTLU, Abdullah ŞİŞMAN, Musa GÖGEBAKAN

Aortik Damarda Farklı Kalp Atım Hızlarının Kan Akış Dinamiği Üzerindeki Etkilerinin Sayısal Analizi 1064-1080
Numerical Analysis Of The Effects Of Different Heart Rates On Blood Flow Dynamics In The Aortic Vessel
Arif ÇUTAY, Özdeş ÇERMİK

Yüksek Mukavemetli Betonarme Kolonların Doğrusal Olmayan Sonlu Elemanlar Analizi 1081-1091
Nonlinear Finite Element Analysis Of High Strength Reinforced Concrete Columns
Kağan SÖĞÜT

Açıklanabilir Yapay Zekâ Yöntemleriyle MR Görüntülerinden Beyin Tümörü Tespiti 1092-1109
Brain Tumor Detection From MRI Images With Explainable Artificial Intelligence Methods
Muhammet Doğukan İLİ, Fatih ÖZYURT

DERLEME MAKALESİ – REVIEW ARTICLE

Applications Of Microbial Calcium Carbonate Precipitation For Soil Improvement: A Review 1110-1122
Zemin İyileştirme İçin Mikrobiyal Kalsiyum Karbonat Çökelimi Uygulamaları: Bir İnceleme
Nurdan BAYKUŞ

Sürdürülebilir Üretim: Kenevir Bitkisi Ve Sıfır Atık Uygulamaları 1123-1142
Sustainable Production: Hemp Plant And Zero Waste Applications
Naciye OLCAY HELVACI, Yasemin KORKMAZ

KSÜ Mühendislik Bilimleri Dergisi, 28(2), 2025
Araştırma Makalesi

KSU J Eng Sci, 28(2), 2025
Research Article

Kahramanmaras Sutcu Imam University
Journal of Engineering Sciences

Geliş Tarihi : 24.07.2024
Kabul Tarihi :19.08.2024

Received Date : 24.07.2024
Accepted Date : 19.08.2024

YÜKSEK VERİMLİ SWIFT SİKLONDA GİRİŞ HIZININ ETKİSİNİN İNCELENMESİ

INVESTIGATION OF INLET VELOCITY EFFECT ON HIGH EFFICIENCY SWIFT CYCLONE

Nihan BABAOĞLU[1]* (ORCID: 0000-0003-3356-9407)
İbrahim ARARAT[1] (ORCID: 0009-0000-1626-1334)

[1] Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Kahramanmaraş, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Nihan BABAOĞLU, nuygur@ksu.edu.tr

ÖZET

Bu çalışmada, yüksek verimli Swift (HE) tipi siklonda giriş hızının toplama verimi ve basınç kayıplarına olan etkileri nümerik yöntemler kullanılarak ortaya koyulmuştur. 10 – 20 m/s aralığında altı farklı giriş hız değerleri için çalışmalar yapılmıştır. Yapılan bu çalışmada daha iyi sonuçlar elde etmek için küçük elemanlar ile gridleme işlemi gerçekleştirilmiştir. Reynolds Stress Model (RSM) türbülanslı akışın çözümlenmesi için kullanılmıştır. Çözümleme her bir giriş hızı için transient olarak 5 ms'lik 1000 adım ile 10000 iterasyon ile gerçekleştirilmiştir. Partiküllerin boyut dağılımlarını belirlemek için Rosin-Rammler metodu kullanılmıştır. Giriş hızının artışı teğetsel hızı artırdığı için partiküle etki eden santrifüj kuvveti artmıştır. Buda partiküllerin siklon duvarına doğru hareket etmesine ve toplama veriminin artmasına neden olmuştur. Giriş hızının artışı ile birlikte, dönen akışın artması dolayısıyla basınç kaybının çok fazla arttığı görülmektedir. Bu değişimin üstel olarak arttığı görülür. Giriş hızının artışıyla birlikte siklon duvarlarında oluşan basınçlar aşırı derecede artmıştır.

Anahtar Kelimeler: Yüksek verimli Swift siklon, basınç kaybı, toplama verimi, giriş hızı, kesme çapı.

ABSTRACT

In this paper, study is performed in order to demonstrate the effect of the inlet velocity on collection efficiency and pressure drop by using numerical methods. Numerical simulation is accomplished for six different inlet velocity at range of 10-20 m/s. Gridding was done with small elements to obtain better results. Turbulent flow is analyzed using Reynolds Stress Model (RSM). Set appropriate time steps to model the transient processes is 1000 for 5 ms with 10000 iterations. Rosin-Ramler size distribution method was used to calculate particle mass fraction. Centrifugal force increased because that for value of inlet velocity increases, the tangential velocity enhances. Based on this situation, it can be concluded that for the particles to move towards the cyclone wall and the collection efficiency increased. It is seen that with the increase in inlet velocity, the pressure drop increases greatly due to the increase in the rotating flow. It is expressed that this change increases as exponentially. It is also observed pressure on cyclone wall markedly increased with the increase inlet velocity.

Keywords: High efficiency Swift cyclone, pressure drop, collection efficiency, inlet velocity, cut-off diameter.

ToCite: BABAOĞLU, N., & ARARAT, İ., (2025). YÜKSEK VERİMLİ SWIFT SİKLONDA GİRİŞ HIZININ ETKİSİNİN İNCELENMESİ. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 28(2), 583-591.

GİRİŞ

Siklon ayırıcılar, merkezkaç kuvvetinin etkisiyle, bir gaz-partikül karışımından partikülleri ayıran toz toplayıcılardır. Başka bir ifade ile yoğunluk farkından dolayı yoğun maddenin hafif olandan ayrılmasına yardımcı olan statik cihazlardır (Brar & Elsayed, 2018). Basit yapısı, ucuz üretim ve bakım maliyetleri ayrıca düşük hızlar da dahil olmak üzere çok çeşitli çalışma ortamlarına yönelik esneklikleri nedeniyle (Yoshida, 2013) siklon ayırıcılar en yaygın olarak kullanılan partikül giderme ekipmanlarıdır. Siklonlarda ayırma çoğunlukla parçacık atalet kuvveti tarafından belirlendiğinden, bu klasik cihazlar, küçük partiküller için daha düşük ayırma verimliliğine sahiptirler (Yang vd., 2023). Endüstrinin birçok dalında siklon ayırıcıların kullanımı oldukça yaygındır. Endüstrilerden kaynaklanan partikül formundaki kirleticilerin ön arıtımında siklonların yeri çok önemlidir. Örneğin, endüstride yanma prosesi yoluyla sıcak buhar üretmek için kazanların kullanılması neticesinde, katı partiküler madde, NO_2 ve SO_2 gibi artık gaz formunda kirleticiler içeren baca gazı emisyonları üretmektedir. Bu yanmadan kalan katı partiküllerin yüzdesi çok yüksektir ve bu da kullanılan yakıtın toplam ağırlığının yaklaşık %5'i kadardır (Gao vd., 2022; Jion vd., 2023). Tüm bu nedenlerden dolayı bu ve benzeri oluşumların ortaya çıktığı özellikle kimyasal prosesler, ilaç endüstrisi, tarım, petrol rafinerileri vb. birçok alanda kullanımları söz konusudur (Babaoğlu vd., 2021).

Siklonlarda basınç düşüşü ve toplama verimliliği olmak üzere iki kritik parametre kullanılarak siklon performansı değerlendirilir. Bu iki parametre ekonomik olma ve verimlilik bakımından toplama verimini temsil ederler ve yine bu parametreler büyük oranda siklon geometrisi ve işletme şartlarına bağlı olmaktadırlar (Sun & Yoon, 2018). Siklon geometrisi ve işletme şartlarının siklon performansı üzerine etkisi siklonlarla ilgili birçok deneysel araştırmada incelenmiştir (Venkatesh vd., 2020; Wasilewski & Brar, 2017).

Literatürde şimdiye kadar yapılmış olan çalışmaların çoğu, siklon girişini, girdap bulucu boyutlarını, siklon tasarımını, silindirik ve konik parçaların uzunluğunu değiştirmeye odaklanmıştır. Ayrıca, bazı çalışmalarda özel olarak siklonun alt bölgelerine yerleştirilen bir karşı koni gibi siklon içine ek sabit elemanların yerleştirilmesi de düşünülmüştür (Wasilewski vd., 2021). Geometrik özellikler ve çalışma faktörlerinin (giriş hızı, akışkan sıcaklığı vb.) performans üzerindeki etkilerini, yani basınç düşüşü ve toplama verimliliğini kapsamlı bir şekilde incelemek için araştırmacılar, siklonlarla ilgili çok sayıda deneysel araştırma ve model çalışmaları yapmışlardır (Leith & Mehta, 1973; Lim vd., 2003). Tüm bunlara ilaveten siklon performansını daha uygun bir şekilde tahmin etmek için, çok büyük deneysel veri setlerine göre önerilmiş olan Lapple modeli (Lapple, 1950), Barth modeli (Barth, 1956), Iozia ve Leith modeli (Iozia & Leith, 1989) ve Muschelknautz modeli (Hoffmann vd., 2003) gibi basit modeller oluşturulmuştur.

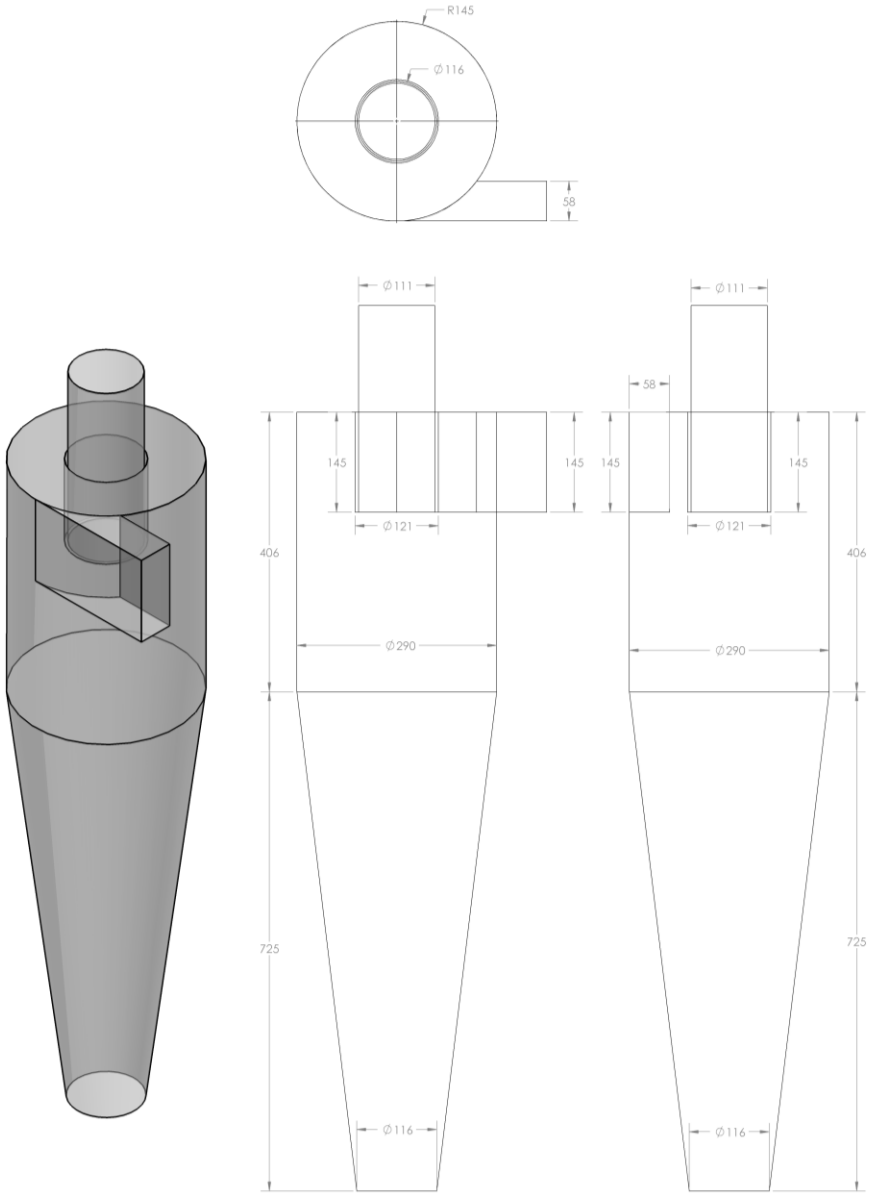
Fakat bu modellerde sınırlayıcı faktörlerin olması, deneysel verilerle karşılaştırıldığında yalnızca kabul edilebilir sonuçları tahmin edebilmeleri, bu modellerin değişken siklon geometrik tasarımlarında kullanılmalarını pek verimli kılmamıştır. Bununla birlikte son zamanlarda, hesaplamalı akışkanlar dinamiği (CFD) tekniği, düşük maliyet, yüksek doğruluk avantajlarıyla siklon performansını tahmin etmek için güçlü bir araç haline gelmiştir (Brar & Elsayed, 2018; Griffiths & Boysan, 1996). Dahası CFD tekniğine ek olarak optimizasyon araçları da kullanılarak optimum siklon geometrileri elde edilmektedir. Örneğin, Safikhani tarafından yapılan çalışmada, çok amaçlı optimizasyon (MOO) süreci için ihtiyaç duyulan veriler CFD teknikleri kullanılarak üretilmiştir. CFD tekniğinin siklonun içindeki akış alanı özelliklerini ve parçacık yörüngelerinin yanı sıra basınç düşüşünü de tahmin etme konusunda büyük bir potansiyele sahip olduğu bu çalışmada belirtilmiştir (Safikhani, 2016).

Raoufi vd. klasik bir siklonda girdap bulucunun simülasyon ve optimizasyonunda CFD tekniğini kullanmışlardır (Raoufi vd., 2008). Yine Zhao ve ark., geleneksel tek girişli (SI) ve spiral çift girişli (DI) olmak üzere farklı iki tip siklonu karakterize etmek için CFD'yi kullanmışlardır (Zhao vd., 2006). Safikhani ve ark. yuvarlak ve kare siklonlarda CFD çalışmaları gerçekleştirmişlerdir(Safikhani vd., 2011). Farklı bir çalışmada ise Elsayed ve Lacor CFD tekniklerini kullanarak siklon ayırıcılarda akış alanının farklı yönlerini ortaya koymuşlardır (Elsayed & Lacor, 2011b, 2011a, 2013).

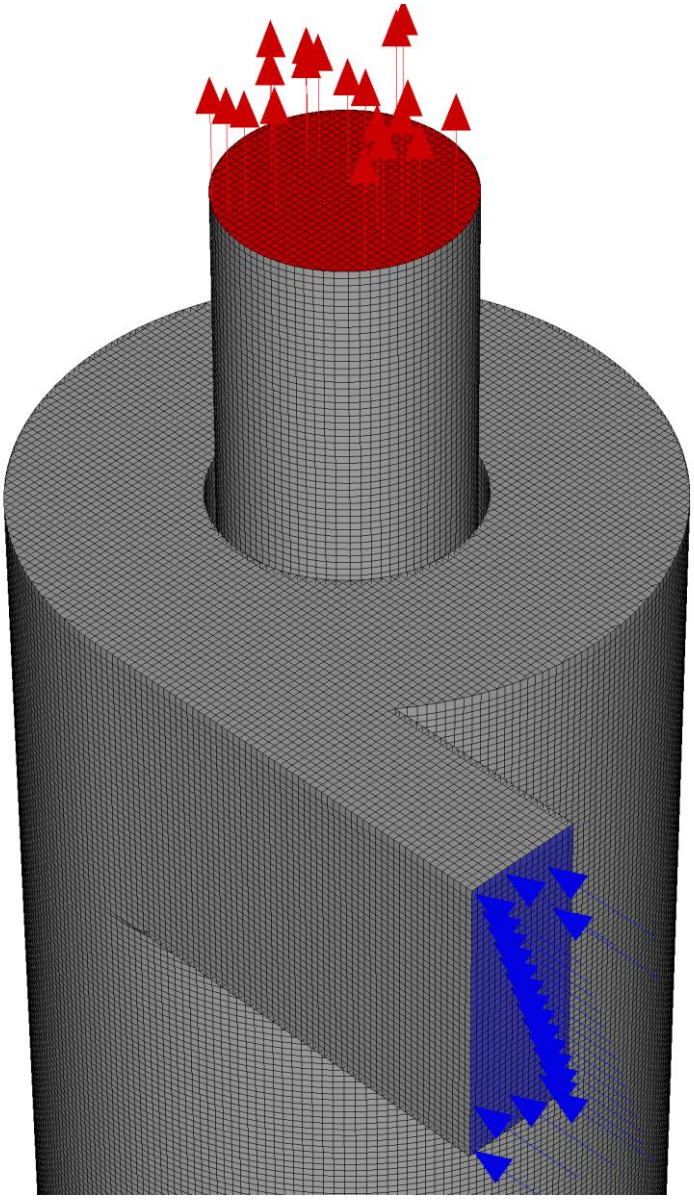
Bu çalışma kapsamından, Yüksek Verimli Swift tipi siklon ayırıcının giriş hızının siklonun ayırma verimi ve basınç kayıplarına olan etkisi incelenmiştir. Çalışma ANSYS Fluent 2019 ortamında 6 yüzlü elemanlar kullanılarak mesh edilerek gerçekleştirilmiştir. Giriş hızı için 10 farklı hızda çalışma yapılarak sonuçlar elde edilmiştir.

MATERYAL VE METOT

Bu çalışma kapsamında 290 mm çapa (D) sahip Swift Yüksek Verimli (HE) siklonda giriş hızının ayırma verimi ve basınç kayıplarına olan etkileri ortaya koyulmuştur. Çalışmada kullanılan siklon geometrisinin izometrik görünümü Şekil 1'de verilmiş olup, temel olarak silindir, koni, giriş ve girdap bulucudan oluştuğu görülmektedir. Giriş hızının toplama verimi ve basınç kayıpları üzerine olan etkisinin ortaya koyulması adına, 10 - 20 m/s hız aralığında altı farklı değer için CFD çalışmaları yapılmıştır. Her bir hız değeri için ANSYS Fluent programında 5 ms'lik adımlarla 1000 adım sonucunda elde edilen sonuçlar sunulmuştur. Gridleme işlemi maksimum skewness değeri 0,7 olan 1339879 adet altı yüzlü elemanlar kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Şekil 2). Böylece elde edilen sonuçların daha doğru olması sağlanmıştır. Akış alanında akışkanın türbülanslı akış özelliklerinin hesaplanması için Reynold Stress Türbülans Model (RSM) kullanılmıştır. Partiküllerin hareketleri için ise Discrete Random Walk (DRW) ve Random Eddy Lifetime (REL) tekniklerine ait ayarlar uygulanmıştır. Sınır koşulları için giriş,çıkış ve diğer yüzeyler için sırasıyla Velocity-Inlet, Pressure-Outlet ve Wall olarak seçilmiştir. Rosin-Ramler boyut dağılımı metodundan yararlanılarak 0,1 µm ile 5 µm arasındaki 200 farklı çap ve 2700 kg/m³ yoğunluklu partiküller akışkan ile aynı hızla giriş yüzeyine dik şekilde siklona giriş yüzeyinden akış alanına dahil edilmiştir. Sınır koşullarının ayrık faz ayarları giriş, çıkış ve toz çıkışı için sırasıyla; Reflect,Escape ve Trap olarak ayarlanmıştır. Her bir geometri için 10000 iterasyon gerçekleştirilmiş ve CFD çalışmalarının süreklilik hatası 10^{-5} 'ten küçüktür. Statik basınç, teğetsel ve eksenel hız profilleri siklon üst yüzeyinden 0,75D kadar aşağıda yatay eksen doğrultusunda elde edilmiştir. Bu profiller Şekil 3, Şekil 4 ve Şekil 5'te sunulmuştur.



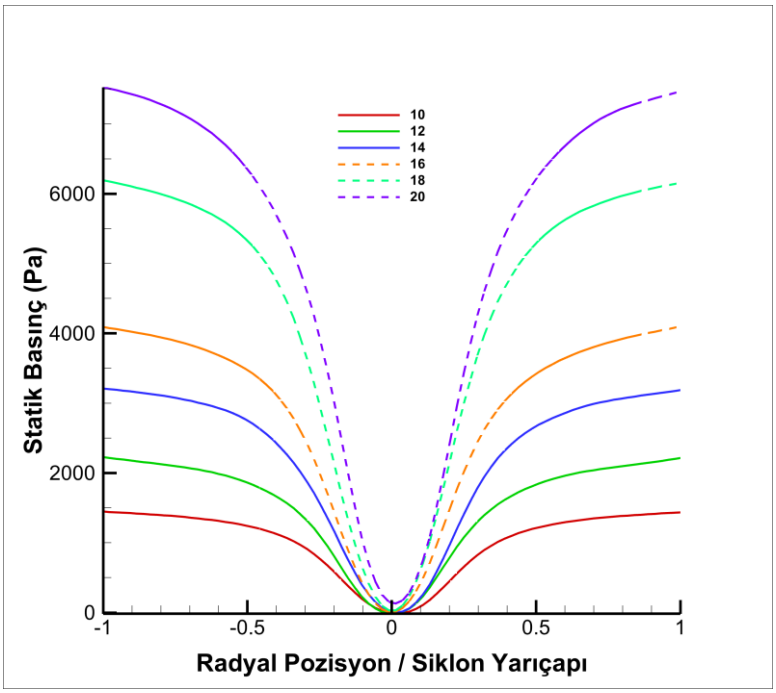
Şekil 1. Swift HE Siklon Geometrisi (Tüm Boyutlar mm)



Şekil 2. Swift HE Siklon Grid Görünümü (1339879 Eleman)

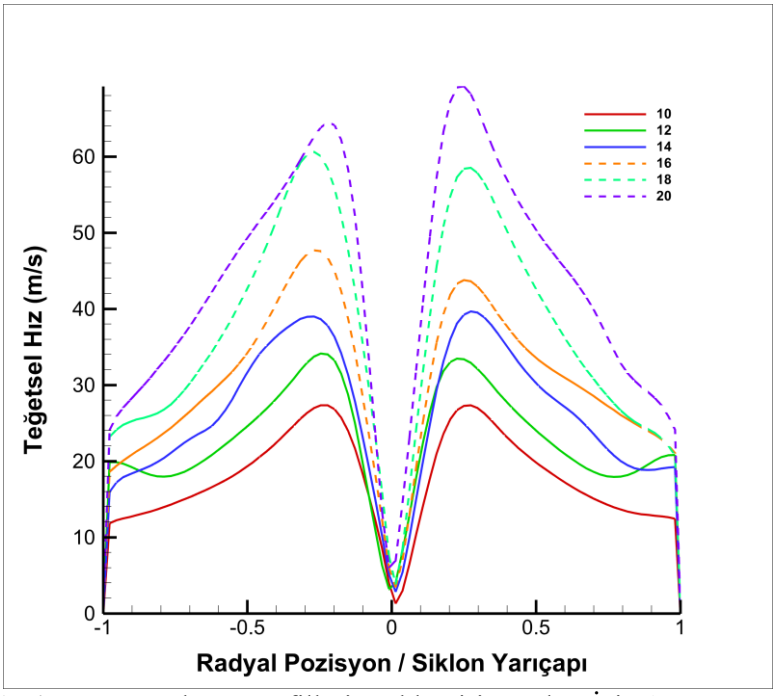
BULGULAR VE TARTIŞMA

Giriş hızı siklon performansının (toplama verimi ve basınç kayıpları) değerlendirilmesinde oldukça önemli bir parametredir (Gimbun vd., 2005; Griffiths & Boysan, 1996). Bu çalışmada Swift HE siklonda giriş hızının toplama verimi ve basınç kayıplarına olan etkisi ortaya koyulmuştur. Bu amaçla siklon çapının %75'i kadar aşağıda siklon merkezinden geçen yatay eksen boyunca alınmış statik basınç, teğetsel ve eksenel hız profilleri Şekil 3, Şekil 4 ve Şekil 5 oluşturulmuştur. Basınç profiline bakıldığında Şekil 3 U şeklinde bir profil gözlemlenirken, bu durum siklon duvarlarından merkeze doğru basıncın düştüğünü ifade eder. Giriş hızının artmasıyla birlikte çok fazla miktarda basınç artışı söz konusu olmuştur. Ancak farklı giriş hızlarındaki basınç profilleri farklı genliklerde benzer trendler sergilemişlerdir. Basınç düşmeleri merkeze doğru artarak azalmıştır, yani merkeze doğru giderken daha çok azalmıştır.



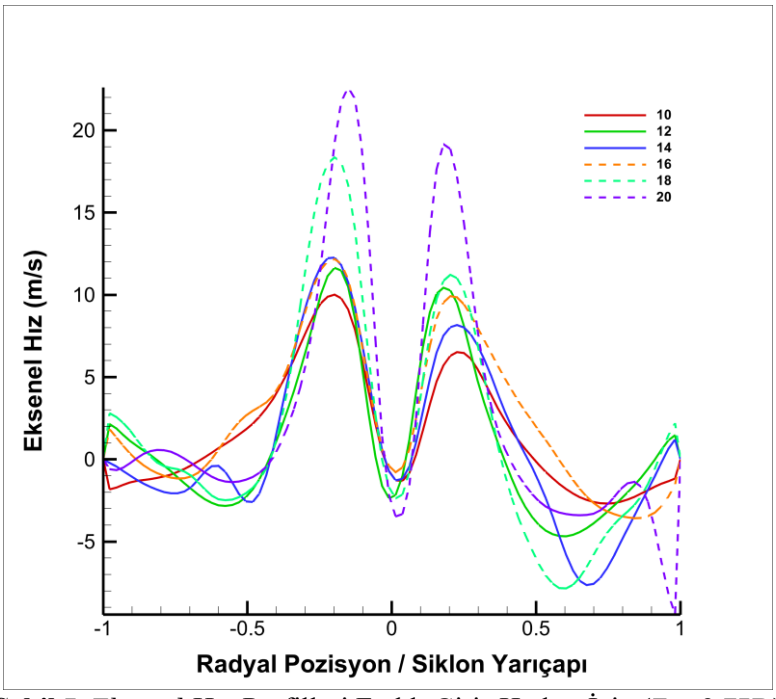
Şekil 3. Statik Basınç Profilleri Farklı Giriş Hızları İçin (Z = 0,75D)

Teğetsel hız profilleri incelendiğinde Şekil 4'te görüldüğü gibi M şeklinde profiller ortaya koyulmuştur. Bu şekilden anlaşılacağı üzere teğetsel hız duvarla akışkan arasındaki sürtünme nedeniyle siklon duvarına doğru sıfıra yaklaşmakta, siklon merkezine doğru gidildikçe önce artış trendine girmekte ve sonra azalarak sıfıra yaklaşmaktadır. Ayrıca giriş hızındaki artış etkisiyle teğetsel hızların daha fazla arttığı gözlemlenir. Buna bağlı olarak teğetsel hız artışıyla birlikte ayırma veriminin de arttığı söylenebilir.



Şekil 4. Teğetsel Hız Profilleri Farklı Giriş Hızları İçin (Z = 0,75D)

Eksenel hız profilleri incelendiğinde Şekil 5, eksenel hızın teğetsel hızla benzer bir davranış sergilediği görülebilir. Burada eksenel ve teğetsel hızların siklon duvarına doğru sıfıra yaklaştığı açıkça görülmektedir. Bu profillerden de anlaşılacağı üzere aşağı yönlü dış vorteks ve yukarı yönlü iç vorteks oluşumları gözlemlenirken, siklonda merkeze doğru aşağı yönlü akışlar mevcuttur. Fakat yukarı yöndeki akışın aşağı yönlü akışa nazaran daha hızlı olduğu söylenebilir. Öte yandan eksenel hız giriş hızında meydana gelen artışlarla birlikte artma eğilimine girmiştir. Giriş hızının 20 m/s olduğu durumda eksenel hızın maksimum değeri elde edilmiştir.

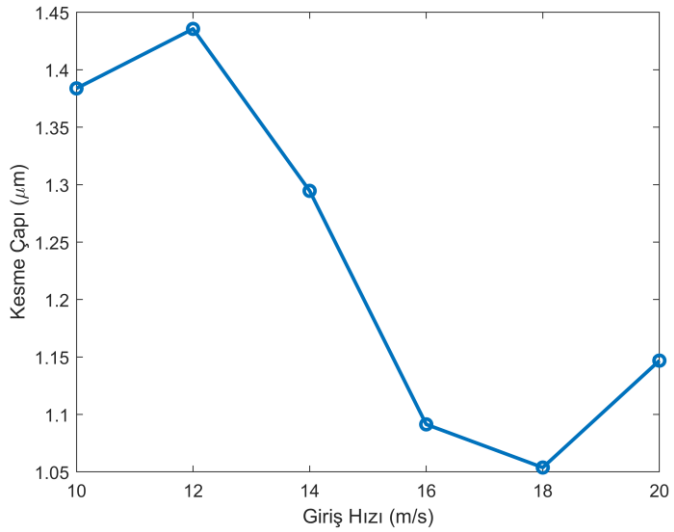


Şekil 5. Eksenel Hız Profilleri Farklı Giriş Hızları İçin (Z = 0,75D)

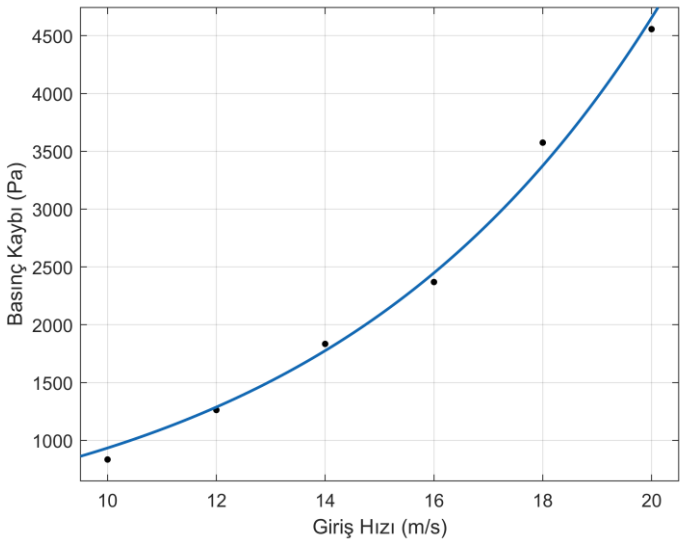
Giriş hızındaki değişimlere bağlı olarak, eksenel ve teğetsel hızlar değişkenlik gösterirken, kesme çapına ve basınç kaybına ait oluşan değişiklikler Tablo 1'de detaylı olarak sunulmuştur. Burada giriş hızının kesme çapını azaltıp, verimi ve basınç kayıplarını arttırdığı açık ve nettir. Şekil 6 incelendiğinde kesme çapının giriş hızındaki değişimden azalan yönde etkilendiği görülebilir. Genel olarak lineer bir azalma şeklinde bir trend oluşmuştur. Bu durum toplama veriminin de arttığını ifade eder. Şekil 7'de ise basınç kayıplarının giriş hızı ile olan ilişkisi verilmiştir. Giriş hızıyla basınç kaybı arasındaki ilişki $\Delta Pa = 187{,}3924\, e^{0{,}1606\, V}$ denklemi kullanılarak ifade edilebilir. Burada bahsi geçen artış üstel olup, sadece artan yönde seyretmektedir. Giriş hızındaki artışların, eksenel ve teğetsel hızları artırdığı düşünüldüğünde, bu durumun basınç kaybı ve toplama verimliliğinde artışlar meydana getirdiği söylenebilir. Yani, teğetsel hız ile eksenel hızların giriş hızının artması neticesindeki artışları toplama veriminin ve basınç kayıplarının da artan yönlü bir trend oluşturmasına neden olmuştur.

Tablo 1. Giriş Hızına Bağlı Kesme Çapı ve Basınç Kayıpları Değerleri.

Giriş Hızı (m/s)	Kesme Çapı (µm)	Basınç Kaybı (Pa)
10	1,384	834,27
12	1,436	1262,37
14	1,295	1834,08
16	1,091	2369,36
18	1,054	3575,03
20	1,147	4556,78



Şekil 6. Giriş Hızına Bağlı Olarak Kesme Çapının Değişimi



Şekil 7. Giriş Hızı Ve Basınç Kaybı İçin Sunulan Denklemin Eğrisi

SONUÇ

Swift HE tipi bir siklonda giriş hızı artışının toplama verimi ve basınç kaybına olan etkileri CFD tekniği kullanılarak araştırılmıştır. Bu siklon türünde, akışkan hareketi ve partikül dinamikleri RSM kullanılarak analiz edilmiştir. CFD tekniği sayesinde siklonlarda partikül hareketlerinin asıl özellikleri ve toplama verimi hesaplanması mümkün olabilmektedir. Öte yandan toplama verimi ve basınç kaybına olan etkilerin analiz edilebilmesi için 6 farklı giriş hızı değeri kullanılmıştır. Bu giriş hızlarında ortaya çıkan değişimler ve bu değişimlere bağlı performans analizleri şöyle sıralanabilir.

- Giriş hızı arttığında teğetsel hız, giriş hızına oranla daha fazla artar.
- Giriş hızının artışı eksenel hız değerlerini artırmaktadır.
- Giriş hızının artması toplama verimini genel olarak artırmaktadır.
- Basınç kayıpları giriş hızının artışıyla birlikte üstel artış göstermektedir.
- Giriş hızının 20 m/s olduğu durumda maksimum eksenel hıza ulaşılmıştır.
- Giriş hızındaki artışlar ile birlikte kesme çapı genel olarak azalmıştır, toplama verimi artmıştır

KAYNAKLAR

Babaoğlu, N., Parvaz, F., Hosseini, S., & Elsayed, K. (2021). Giriş kesit şeklinin çok girişli bir gaz siklonun performansı üzerindeki etkisi. *Powder Technology*.

Barth, W. (1956). Design and Layout of the Cyclone Separator on the Basis of New Investigations. *Brennstow-Wäerme-Kraft (BWK)*, *8*(4), 1–9.

Brar, L. S., & Elsayed, K. (2018). Analysis and optimization of cyclone separators with eccentric vortex finders using large eddy simulation and artificial neural network. *Separation and Purification Technology*, *207*, 269–283. https://doi.org/10.1016/j.seppur.2018.06.013

Elsayed, K., & Lacor, C. (2011a). Modeling, analysis and optimization of aircyclones using artificial neural network, response surface methodology and CFD simulation approaches. *Powder Technology*, *212*(1), 115–133. https://doi.org/10.1016/j.powtec.2011.05.002

Elsayed, K., & Lacor, C. (2011b). Numerical modeling of the flow field and performance in cyclones of different cone-tip diameters. *Computers and Fluids*, *51*(1), 48–59. https://doi.org/10.1016/j.compfluid.2011.07.010

Elsayed, K., & Lacor, C. (2013). The effect of cyclone vortex finder dimensions on the flow pattern and performance using LES. *Computers and Fluids*, *71*, 224–239. https://doi.org/10.1016/j.compfluid.2012.09.027

Gao, Y., Zhang, M., Guo, J., & Xu, L. (2022). Impact of the oxidation of SO2 by NO2 on regional sulfate concentrations over the North China Plain. *Atmospheric Pollution Research*, *13*(3), 101337. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apr.2022.101337

Gimbun, J., Chuah, T. G., Fakhru'l-Razi, A., & Choong, T. S. Y. (2005). The influence of temperature and inlet velocity on cyclone pressure drop: A CFD study. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, *44*(1), 7–12. https://doi.org/10.1016/j.cep.2004.03.005

Griffiths, W. D., & Boysan, F. (1996). Computational fluid dynamics (CFD) and empirical modelling of the performance of a number of cyclone samplers. *Journal of Aerosol Science*, *27*(2), 281–304. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0021-8502(95)00549-8

Hoffmann, A. C., Stein, L. E., & Bradshaw, P. (2003). Gas cyclones and swirl tubes: principles, design and operation. *Appl. Mech. Rev.*, *56*(2), B28--B29.

Iozia, D. L., & Leith, D. (1989). Effect of cyclone dimensions on gas flow pattern and collection efficiency. *Aerosol Science and Technology*, *10*(3), 491–500. https://doi.org/10.1080/02786828908959289

Jion, M. M. M. F., Jannat, J. N., Mia, M. Y., Ali, M. A., Islam, M. S., Ibrahim, S. M., Pal, S. C., Islam, A., Sarker, A., Malafaia, G., Bilal, M., & Islam, A. R. M. T. (2023). A critical review and prospect of NO2 and SO2 pollution over Asia: Hotspots, trends, and sources. *Science of The Total Environment*, *876*, 162851. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.162851

Lapple, C. E. (1950). Gravity and Centrifugal Separation. *American Industrial Hygiene Association Quarterly*, *11*(1), 40–48. https://doi.org/10.1080/00968205009344283

Leith, D., & Mehta, D. (1973). Cyclone performance and design. *Atmospheric Environment (1967)*, *7*(5), 527–549. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0004-6981(73)90006-1

Lim, K. S., Kwon, S. B., & Lee, K. W. (2003). Characteristics of the collection efficiency for a double inlet cyclone with clean air. *Journal of Aerosol Science*, *34*(8), 1085–1095. https://doi.org/10.1016/S0021-8502(03)00079-X

Raoufi, A., Shams, M., Farzaneh, M., & Ebrahimi, R. (2008). Numerical simulation and optimization of fluid flow in cyclone vortex finder. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, *47*(1), 128–137. https://doi.org/10.1016/j.cep.2007.08.004

Safikhani, H. (2016). Modeling and multi-objective Pareto optimization of new cyclone separators using CFD, ANNs and NSGA II algorithm. *Advanced Powder Technology*, *27*(5), 2277–2284. https://doi.org/10.1016/j.apt.2016.08.017

Safikhani, H., Akhavan-Behabadi, M. A., Nariman-Zadeh, N., & Mahmood Abadi, M. J. (2011). Modeling and multi-objective optimization of square cyclones using CFD and neural networks. *Chemical Engineering Research and Design*, *89*(3), 301–309. https://doi.org/10.1016/j.cherd.2010.07.004

Sun, X., & Yoon, J. Y. (2018). Multi-objective optimization of a gas cyclone separator using genetic algorithm and

computational fluid dynamics. *Powder Technology*, *325*, 347–360. https://doi.org/10.1016/j.powtec.2017.11.012

Venkatesh, S., Suresh Kumar, R., Sivapirakasam, S. P., Sakthivel, M., Venkatesh, D., & Yasar Arafath, S. (2020). Multi-objective optimization, experimental and CFD approach for performance analysis in square cyclone separator. *Powder Technology*, *371*, 115–129. https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.05.080

Wasilewski, M., & Brar, L. S. (2017). Optimization of the geometry of cyclone separators used in clinker burning process: A case study. *Powder Technology*, *313*, 293–302. https://doi.org/10.1016/j.powtec.2017.03.025

Wasilewski, M., Singh Brar, L., & Ligus, G. (2021). Effect of the central rod dimensions on the performance of cyclone separators - optimization study. *Separation and Purification Technology*, *274*(May), 119020. https://doi.org/10.1016/j.seppur.2021.119020

Yang, H., Wang, N., Cao, Y., Meng, X., & Yao, L. (2023). Effects of helical fins on the performance of a cyclone separator: A numerical study. *Advanced Powder Technology*, *34*(1), 103929. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apt.2022.103929

Yoshida, H. (2013). Effect of apex cone shape and local fluid flow control method on fine particle classification of gas-cyclone. *Chemical Engineering Science*, *85*, 55–61. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ces.2012.01.060

Zhao, B., Su, Y., & Zhang, J. (2006). Simulation of gas flow pattern and separation efficiency in cyclone with conventional single and spiral double inlet configuration. *Chemical Engineering Research and Design*, *84*(12 A), 1158–1165. https://doi.org/10.1205/cherd06040

KSÜ Mühendislik Bilimleri Dergisi, 28(2), 2025
Araştırma Makalesi

KSU J Eng Sci, 28(2), 2025
Research Article

Kahramanmaras Sutcu Imam University
Journal of Engineering Sciences

Geliş Tarihi : 24.07.2024
Kabul Tarihi :23.01.2025

Received Date : 24.07.2024
Accepted Date : 23.01.2025

COMPARATIVE ANALYSIS OF VISION TRANSFORMERS AND CONVOLUTIONAL NEURAL NETWORKS IN DIABETIC RETINOPATHY DIAGNOSIS

GÖRÜNTÜ TRANSFORMATÖRLERİ VE EVRİŞİMLİ SİNİR AĞLARININ DİYABETİK RETİNOPATİ TEŞHİSİNDE KARŞILAŞTIRMALI ANALİZİ

Esra YÜZGEÇ ÖZDEMİR[1] (ORCID: 0000-0003-2914-2603)
Canan KOÇ[1] (ORCID: 0000-0002-2651-9471)
Fatih ÖZYURT[1](ORCID: 0000-0002-8154-6691)

[1]Firat University, Engineering Faculty, Software Engineering

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Esra YÜZGEÇ ÖZDEMİR, eyuzgec@firat.edu.tr

ABSTRACT

Diabetic retinopathy can lead to significant visual complications and significantly affects individuals' quality of life. This study focuses on comparing the performance of Vision Transformer (ViT) models and Convolutional Neural Networks (CNN) methods in diabetic retinopathy diagnosis and aims to evaluate their potential as an alternative to traditional diagnostic methods. In this study, the performance of four different ViT model architectures and four different convolutional neural network (CNN) models in training and testing phases were comparatively analyzed. ViT models achieved accuracy rates of 97.83%, 98.41%, 95.2%, and 98.26% for "tiny," "base," "small," and "large," respectively. Additionally, models trained with VGG13, ResNet18, ResNet50, and SqueezeNet architectures from CNN techniques achieved accuracy rates of 96.1%, 97.83%, 90.9%, and 93.93%, respectively. ViT architectures achieved higher accuracy rates than CNN architectures. When the results were evaluated, it was concluded that ViT methods were more successful in the diagnosis of diabetic retinopathy.

Keywords: Diabetic retinopathy, vision transformers, deep learning, convolutional neural networks

ÖZET

Diyabetik retinopati, önemli görsel komplikasyonlara yol açabilen ve bireylerin yaşam kalitesini önemli ölçüde etkileyen bir hastalıktır. Bu çalışma, diyabetik retinopatinin erken evrelerde teşhis edilmesinin önemini vurgulamakta, mevcut teşhis yöntemlerinin sınırlılıklarına dikkat çekmekte ve geleneksel yöntemlere alternatif olarak Görüntü Dönüştürücüsü (ViT) modellerinin potansiyelini ele almaktadır. Bu çalışmada, dört farklı ViT model mimarisinin yanı sıra döt farklı evrişimli sinir ağı (CNN) modellerinin eğitim ve test aşamalarındaki performansları karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. ViT modelleri 'tiny', 'base', 'small' ve 'large' sırasıyla %97,83, %98,41, %95,2 ve %98,26 doğruluk oranlarına ulaşmıştır. Ayrıca CNN tekniklerinden VGG13, ResNet18, ResNet50 ve SqueezeNet mimarileri ile eğitilen modeller sırasıyla %96,1, %97,83, %90,9 ve %93,93 doğruluk oranlarına ulaşmıştır. Çalışma sonucunda ViT mimarileri CNN mimarilerine göre daha yüksek doğruluk oranlarına ulaşmıştır. Sonuçlar değerlendirildiğinde ViT yöntemlerinin diyabetik retinopati teşhisinde daha başarılı olduğu sonucuna varılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Diyabetik retinopati, görüntü dönüştürücüleri, derin öğrenme, evrişimli sinir ağları

ToCite: YÜZGEÇ ÖZDEMİR, E., KOÇ, C., & ÖZYURT, F., (2025). COMPARATIVE ANALYSIS OF VISION TRANSFORMERS AND CONVOLUTIONAL NEURAL NETWORKS IN DIABETIC RETINOPATHY DIAGNOSIS. Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 28(2), 592-600.

INTRODUCTION

Diabetic retinopathy is a serious health condition, particularly in people with diabetes, that causes damage to the thin blood vessels behind the eye's retina. This condition occurs when high blood sugar (glucose) levels caused by diabetes damage the microvessels in the inner part of the eye. Diabetes is a chronic metabolic disease characterized by the body's inability to properly use insulin or produce sufficient amounts of insulin, while insulin is a vital hormone that enables the absorption of blood sugar by cells (Uğurlu et.al., 2018) Thus, dysfunction or deficiency of insulin results in persistently high blood sugar levels. These persistently high blood sugar levels can lead to many complications in the body and cause serious damage, especially to the eyes. The retina is a layer at the back of the eye that detects the light that allows us to see. Chronic high glycemia caused by diabetes can disrupt the fine vasculature of the retina, causing vessels to leak, block, or bleed. This damage builds up over the duration of diabetes and can severely impair the function of the retina, leading to vision loss and even blindness.

Diabetic retinopathy occurs in people with diabetes and, without intervention, can lead to visual impairment and even blindness in advanced stages. Diagnosis in the early stages of the disease can be difficult because the symptoms are minimal and nonspecific (Özçelik & Altan, 2021). If the disease remains undiagnosed, abnormalities such as decreased vision, visual field deterioration, floaters, and lightning flashes can be seen in the later stages. At the same time, impaired color perception, difficulties in night vision, increased pressure inside the eye, and pain are prominent symptoms that may occur in the later stages. The doctor diagnoses diabetic retinopathy through comprehensive eye examinations and performs this procedure by evaluating changes in the retina (Rahmanlar et al., 2019). When necessary, laser treatment, intraocular drug infections, and surgery are the treatment methods for the disease diagnosed at an early stage. The aim of these methods is to slow or stop the progression of retinal damage. The main goal is to keep the quality of the patient's vision as high as possible. Experts recommend that people with diabetes have regular eye examinations.

The innovative studies and developments in artificial intelligence and deep learning technologies, especially in the field of healthcare, have led to significant advances in the diagnosis and treatment of diabetic retinopathy. Sunkari et al. developed a model for automatic classification of diabetic retinopathy (Sunkari et al., 2024). In this model, the evaluation was made with the patient's real-time data set. They achieved a 93.51% success rate using ResNet18 and Swish. In another study, In another study, Özçelik and Altan proposed a robust AI-based model utilizing chaotic swarm intelligence optimization and RNN-LSTM architecture to classify diabetic retinopathy into five classes, achieving a success rate of 98.7% and demonstrating the model's ability to handle nonlinear dynamics in fundus images (Özçelik & Altan, 2023). Karthika et al. used a diabetic retinopathy dataset consisting of five classes and performed classification with a model named SE-ResCA-GTNet. In addition to the developed model, they achieved a 99.8% success rate using the Gazelle Optimization algorithm (Karthika & Durgadevi, 2024). These studies reveal the achievements in this field. In another classification study, Fang et al. developed a new DAG network model to classify diabetic retinopathy data (Fang & Qiao, 2022). In this study, three important data features were extracted and combined for classification. The study used the DIARETDB1 dataset and real data from Dalian NO.3 People's Hospital. As a result of the study, 98.7% and 98.5% success rates were obtained. Patil et al. developed an automatic diagnosis method for diabetic retinopathy using transfer learning methods (Patil et al., 2023). ResNet-50 DL model was trained using the APTOS dataset and tested with the EyePACS dataset. Both preprocessing and augmentation were used in the study. Thus, the problem of data imbalance was avoided. As a result, a 98.5% success rate was achieved.

In addition to all these studies, especially ViTs, have led to important steps in the field of eye health (Chen et al., 2021; Wang et al., 2022). In these studies, high-resolution eye scans are analyzed to prevent problems that may occur in human eye work. ViTs and similar image-processing technologies in healthcare offer up-to-date solutions in many studies, from disease classification to treatment planning. The use of these technologies in diagnosing diabetic retinopathy facilitates accurate diagnosis at an early stage and contributes to the preservation of patients' vision with timely intervention.

Huang et al. developed a transducer-based framework for automating retinopathy diagnosis (Huang et al., 2023). In this study, the success of the transducers was demonstrated by improving classification accuracy to 85.49% and report generation performance to a BlEU-1 score of 0.422. Although not much work has been done in ViT in diabetic retinopathy, there have been studies on medical images. Manzari et al. proposed a CNN-Transducer hybrid model for medical image classification using MedMNIST-2D datasets in another study (Manzari et al., 2023). This proposed

model achieved an AUC improvement of 2.3% and 1.1% over AutoML methods on RetinaMNIST and TissueMNIST, respectively. This approach showed high generalizability and outperformed the existing best methods. Lian et al. proposed a model for detecting and classifying white blood cells. The model was innovated by combining YOLO and ViT technologies (Lian & Li, 2024). In addition to the accuracy rate achieved with the model, at the end of the study, 96.449% was obtained from two types of images: white, blood cells and nuclei, and 16 cell classes.

Chintamreddy and Seshasayee conducted a study highlighting the importance of fundus photographs for automatic classification of diabetic retinopathy (DR) severity. In this study, a model is developed that can identify various severity levels of DR. The dataset utilized in the study was sourced from the APTOS-2019 blindness detection dataset and underwent preprocessing through image processing techniques. Furthermore, the Conv-ViT model was taken as a basis and a hybrid structure was developed to increase the effectiveness of this model. This model utilized the feature extraction of Inception-V3, ResNet-50, and Vision Transformer (ViT) models and outperformed other methods in the literature with an accuracy of 93.75% (Chintamreddy & Seshasayee, 2024).

Wu et. al. conducted a study focusing on the application of Vision Transformer (ViT) in the recognition of diabetic retinopathy (DR) severity. In this study, a model that can classify five different severity levels of DR was designed. Fundus images are segmented to be used as input to the ViT model and these segments are processed for classification by adding positional information. The study reported that the 384_L_32 ViT model achieved high performance metrics such as 91.4% accuracy, 92.6% sensitivity, 97.7% specificity and 0.988 AUC. It was reported that this model outperformed traditional Convolutional Neural Network (CNN) based approaches and emphasized the importance of the attention mechanism in DR classification tasks (Wu et al., 2021).

ViT models offer significant advantages compared to traditional Convolutional Neural Networks (CNN) architectures, particularly due to their ability to model long-term dependencies. Despite their ability to recognize local features, CNNs have limited capabilities in modeling global relationships. ViT models, on the other hand, divide images into small patches, process these patches as a sequence, and learn the global relationships of these patches using the transformer mechanism. *The vit model receives image patches, the patch size is fixed for all image parts, it does not vary.* In cases such as diabetic retinopathy, the analysis of retina images requires accurately modeling both local features and structural connections. The global attention mechanism of ViT enables a more in-depth analysis of retinal images, thereby achieving higher accuracy rates. For complex medical imaging problems like diabetic retinopathy, ViT is more suitable due to its parametric flexibility and strong overall performance on large datasets. This study demonstrates that ViT models are a good option for medical image analysis due to their high accuracy rates compared to CNNs.

This study emphasizes diabetic retinopathy using deep learning techniques. In particular, eye images obtained using image processing technologies and Vit methods were used to classify diabetic retinopathy diseases. A two-class process was used to diagnose this disease, and discrimination between images was provided. The "Materials and Methods" section of the study includes the applied dataset, ViT, and detailed descriptions of the deep learning methods. The " Findings and Discussion" section includes the conclusions and discussions of the findings. Finally, the "Conclusion" section summarizes the results obtained and highlights the importance of the study's classification of diabetic retinopathy. Considering that early diagnosis of diabetic retinopathy is essential, this study makes an important contribution to the field.

MATERIALS AND METHODS

Dataset

Diabetic retinopathy is an essential disease to consider for people with diabetes. Early diagnosis and treatment can prevent vision loss and improve outcomes. Moreover, the automatic classification of retinal images for diabetic retinopathy screening has a significant role in this field, as the interpretation of retinal images by the human eye is prone to some errors. Most of the work is done manually, which can lead to inefficiency and inconsistencies in diagnosis. Therefore, there is a need to develop a reliable and robust automatic classifier.

The dataset used in this study is a two-class dataset shared by Parisa Karimi Darabi on the Kaggle platform (Darabi, n.d.). This dataset has two classes, Diabetic Retinopathy and Healthy class, as shown in Figure 1. In the Train dataset, there is a balanced data distribution with 1050 Diabetic Retinopathy and 1026 healthy.

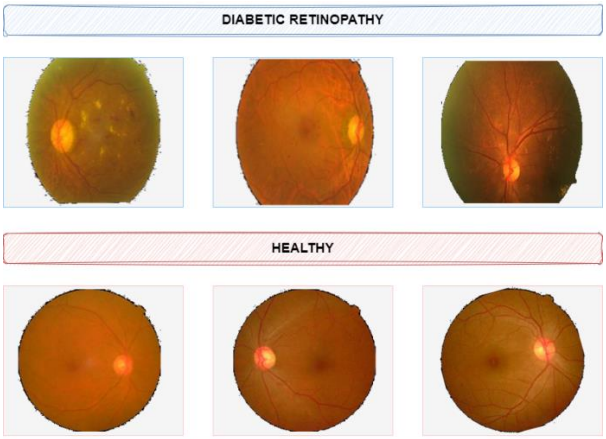


Figure 1. Dataset sample images

This study was conducted using training and test folders from these folders. The dataset consists of a large collection of high-resolution retinal images taken under various imaging conditions. A medical professional assessed the presence of Diabetic Retinopathy in each image, and categories were assigned a rating on a scale from 0 to 1. The obtained images were reduced to 224x224 size and subjected to various pre-processing such as flipping, rotating and zooming in order to increase model success during model training.

Table 1. Numerical Distribution of Data in Dataset

Class Name	Number of Training Images	Number of Test Images
Diabetic Retinopathy	1050	113
Healthy	1026	118

The study applied an extensive hyperparameter tuning to train ViT models. The AdamW optimization algorithm was chosen and the learning rate was 0.001. The models were trained for 100 epochs and a batch size of 16 was used. For each model, images were resized and normalized to 224x224 pixels.
ViT models were initialized using weights pre-trained on the ImageNet-1k dataset. This pre-training helped the models to learn general visual features and helped to achieve better results on limited medical data. Data augmentation techniques such as randomization, rotation, contrast enhancement and zooming were used during the training process.

Vision Transformers (ViTs)
It is based on the fact that for the first time, in 2021, the Image-Based Transformers model was put forward and immediately became widely used, bringing astounding results (Dosovitskiy et al., 2020). In 2022, the model's implementation of ViT showed improved performance compared to the outdated traditional (Zhou et al., 2021). Since then, the disciplines have made a great leap forward, and now they have moved beyond the traditional processing of images since it has been broken. In other words, a vision transformer that rivals CNNs has also gradually been adopted as the new standard.

The specified model ViT has been significantly successful in image classification studies in the last two years and the 2022 ImageNet competition (Wu et al., 2023; Beyer et al., 2022). This competition declared ViT the best image output processing model, proving it can become the leading choice in this field. This result demonstrates that the ViT model is at a remarkable point in image processing and provides many benefits to users with this project. The ViT architecture is an image processing network that uses sequential transformation of images and no convolutional layers. In the first processing step, the images in the dataset are also divided into pieces of different sizes. After this step, low-dimensional linear embeddings are created from these image fragments. A state-of-the-art transform encoder is used for the input sequence. The basic structure of the ViT method is as shown in Figure 2 (Alhawas & Tüfekçi, 2022).

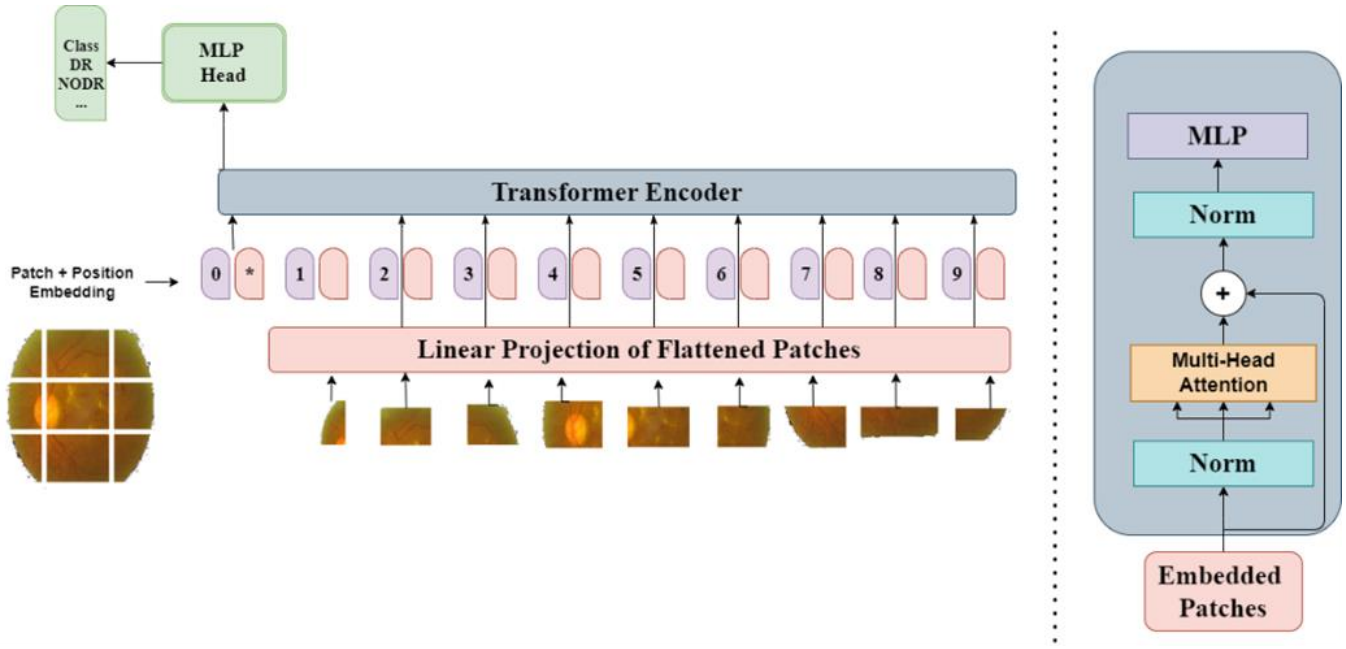


Figure 2. Architectural structure of ViT method

In this study, four different Vision Transformer (ViT) models, namely Tiny, Small, Base and Large, were used for diabetic retinopathy classification. The Tiny ViT model consists of 12 transformer encoder layers, each with 6 attention heads and 192 hidden sizes, and has a total of approximately 5.7 million parameters. The Small ViT model consists of 12 transformer encoder layers, 12 attention heads, 384 hidden sizes and 22 million parameters. Similarly, the Base ViT model consists of 12 transformer encoder layers, 12 attention heads, 768 hidden dimensions and has about 86 million parameters. The Large ViT model is the most complex model, with 24 transformer encoder layers, 16 attention heads, 1024 hidden dimensions and 307 million parameters in total. All of these models have the features given in Table 2 and accept input images resized to 224x224 pixels. These configurations are based on the ViT framework and adapted to the specific requirements of diabetic retinopathy classification (Touvron et al., 2021).

Table 2. Comparison of architectural content of ViT models

Model	Layers	Attention Heads	Hidden Size	Parameters	Input Size
Tiny	12	6	192	5.7M	224x224
Small	12	12	384	22M	224x224
Base	12	12	768	86M	224x224
Large	24	16	1024	307M	224x224

Furthermore, the dataset used in this study contains two folders: training and test. The training data is used to learn the model parameters, while the test data is kept completely independent from the training process as it is in a separate folder. This makes it suitable for evaluating the generalization ability of the model. This separation is important to avoid data leakage and to ensure the reliability of the test results. Keeping the test data set independent allowed an objective measurement of the model's performance on unknown data.

Furthermore, various data augmentation techniques were applied during the training process to increase the diversity of the data set and to support the generalization ability of the models. These techniques included randomization, rotation, contrast adjustments and scaling. This approach allowed the model to be sensitive not only to the training data but also to the variety of possible real-world data.

Findings And Discussion

In this study, the diagnosis and classification of Diabetic Retinopathy have been conducted using Vision Transformer (ViT) models at "tiny," "base," "small," and "large" scales alongside deep learning architectures such as VGG13, ResNet18, ResNet50, and SqueezeNet. During the training phase of the models, the "tiny" model achieved an accuracy rate of 97.83%, the "base" model reached 98.55%, the "large" model attained 99.03%, and the "small" model secured 98.07%. For the deep learning models, during their training phase, the ResNet18 architecture reached

an accuracy rate of 98.07%, ResNet50 achieved 97.83%, SqueezeNet also reached 98.07%, and the VGG13 architecture attained an accuracy rate of 97.59%.

Besides these accuracy rates, confusion matrices representing the models' false predictions on the validation data are given in Figure 3. This detailed evaluation reveals the effectiveness of each model and architecture in accurately diagnosing and classifying Diabetic Retinopathy. It also highlights their strengths and improvement areas based on the performance measurements and error analyses performed.

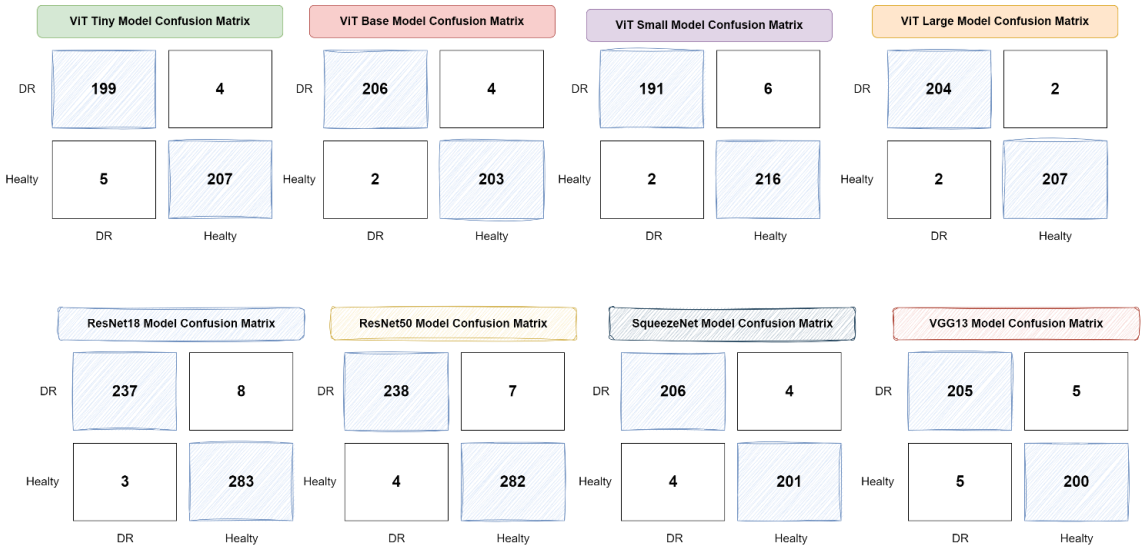


Figure 3. Confusion matrices obtained on validation data of ViT models

In addition, training and validation losses are obtained by estimating the validation data during training. These loss rates are visualized as loss graphs as in Figure 4 and when the loss graphs are examined; it is seen that the training and validation losses are reduced in a balanced manner and no over-fitting or under-fitting problems are encountered during model training.

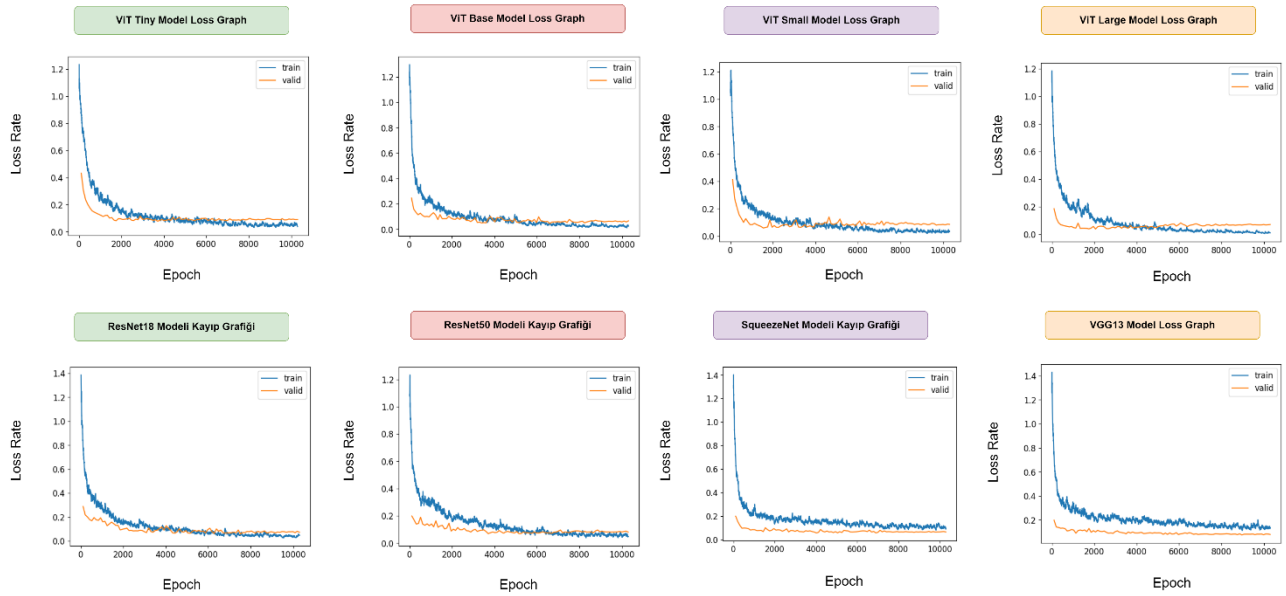


Figure 4. Loss graphs obtained from training ViT models

The confusion matrices and loss graphs given in Figure 3 and Figure 4 above were obtained from the estimations from the validation data used during training. These results were obtained by considering 10% of the data as validation data. The dataset also includes a test folder the model has not encountered before and no examples in the

training data. This test data was used for the classification success of the models after the model training. Test accuracies of 97.83%, 98.41%, 95.2%, and 98.26% were achieved for "tiny", "base", "small," and "large" ViT architectures, respectively. In addition, VGG13, ResNet18, ResNet50, SqueezeNet architectures achieved 96.1%, 97.83%, 90.9%, 93.93% test accuracy respectively. The complexity matrices for the prediction of these test data are given in Figure 5.



Figure 5. Confusion matrices obtained by ViT models on test data

The performance of the models used in our study was examined using evaluation metrics, including accuracy, precision, recall and F1-score (Powers, 2011). These metrics were used to assess both the overall accuracy of the models and the distribution of classification errors. Details of these metrics for each model are shown in Table 3 below.

Table 3. Comparison of Classification Performance Metrics for ViT and CNN Models

Models	Accuracy (%)	Precision (%)	Recall (%)	F1-Score (%)
ViT Tiny	97.83	98.03	97.55	97.79
ViT Base	98.55	98.10	98.07	98.56
ViT Small	98.07	96.95	98.96	97.95
ViT Large	99.03	99.03	99.04	99.03
ResNet18	98.07	96.73	97.25	97.73
ResNet50	97.83	98.58	97.14	97.74
SqueezeNet	98.07	98.05	98.10	98.10
VGG13	97.59	97.62	97.56	97.62

The values shown in the table indicate that the ViT Large model shows the best performance with an accuracy of 99.03%, while the ViT Base and ViT Small models show strong performance with accuracy rates above 98%. ViT models can be considered to perform better, especially in metrics such as sensitivity and F1-score. Although CNN-based models offer competitive results, they are limited compared to ViT's advantage of global relationship modeling due to their focus on learning local features. These results show that ViT models have great potential for medical imaging. It offers a viable alternative for complex imaging problems such as diabetic retinopathy.

CONCLUSION

Diabetic retinopathy is an eye disease that significantly affects the quality of life of patients. Diabetic retinopathy, which severely impairs vision, is of great importance for early diagnosis. If the disease can be detected and classified especially in its early stages, it is possible to stop its progression and develop effective treatment methods. This is of great importance for improving the patient's living standards and developing effective treatment methods.

This study investigates the classification of diabetic retinopathy using deep learning techniques. As an alternative to traditional diagnostic methods and CNN architectures, ViT models are reported to offer promising results in this field. In this study, we have done a comparative study of the ViT models and convolutional neural network models. The findings indicated that the ViT models, particularly the “base” model, achieved high performance when tested

on the allocated test datasets. With these results, it can be inferred that the ViT models, including the "base" model, have great possibility in the diagnosis of diabetic retinopathy. Further research based on our study can be performed. It is also predicted that the performance of the model will be more good if applied to distinct variations of ViT model and actual patient's unique datasets. In conclusion, the use of ViT models offers new and efficient ways to diagnose diabetic retinopathy and promises a promising future for the integration of this technology into clinical applications.

REFERENCES

Alhawas, N., & Tüfekçi, Z. (2022). The Identification of Red-Meat Types using The Fine-Tuned Vision Transformer and MobileNet Models. European Journal of Science and Technology. https://doi.org/10.31590/ejosat.1112892

Beyer, L., Zhai, X., & Kolesnikov, A. I. (2022). Better plain ViT baselines for ImageNet-1k. arXiv (Cornell University). https://doi.org/10.48550/arxiv.2205.01580

Chen, J., He, Y., Frey, E. C., Li, Y., & Du, Y. (2021). VIT-V-Net: Vision Transformer for unsupervised Volumetric Medical Image Registration. arXiv.org. https://arxiv.org/abs/2104.06468

Chintamreddy, D., & Seshasayee, U. R. (2024, June). Detection of Diabetic Retinopathy (DR) Severity from Fundus Photographs using Conv-ViT. In 2024 International Conference on Advancements in Power, Communication and Intelligent Systems (APCI) (pp. 1-6). IEEE.

Darabi, P. K. (n.d.). Competitions Contributor. Kaggle. https://www.kaggle.com/pkdarabi/competitions. Accessed [24.07.2024].

Dosovitskiy, A., et al. (2020). An Image is Worth 16x16 Words: Transformers for Image Recognition at Scale. arXiv.org. https://arxiv.org/abs/2010.11929

Fang, L., & Qiao, H. (2022). Diabetic retinopathy classification using a novel DAG network based on multi-feature of fundus images. Biomedical Signal Processing and Control, 77, 103810. https://doi.org/10.1016/j.bspc.2022.103810

Huang, Y.-H., et al. (2023). Model long-range dependencies for multi-modality and multi-view retinopathy diagnosis through transformers. Knowledge-Based Systems, 271, 110544. https://doi.org/10.1016/j.knosys.2023.110544

Karthika, S., & Durgadevi, M. (2024). Improved ResNet_101 assisted attentional global transformer network for automated detection and classification of diabetic retinopathy disease. Biomedical Signal Processing and Control, 88, 105674. https://doi.org/10.1016/j.bspc.2023.105674

Lian, J., & Li, T. (2024). Lesion identification in fundus images via convolutional neural network-vision transformer. Biomedical Signal Processing and Control, 88, 105607. https://doi.org/10.1016/j.bspc.2023.105607

Manzari, O. N., Ahmadabadi, H., Kashiani, H., Shokouhi, S. B., & Ayatollahi, A. (2023). MedViT: A robust vision transformer for generalized medical image classification. Computers in Biology and Medicine, 157, 106791. https://doi.org/10.1016/j.compbiomed.2023.106791

Özçelik, Y. B., & Altan, A. (2021). Diyabetik Retinopati Teşhisi için Fundus Görüntülerinin Derin Öğrenme Tabanlı Sınıflandırılması. European Journal of Science and Technology. December 2021. https://doi.org/10.31590/ejosat.1011806

Özçelik, Y. B., & Altan, A. (2023). Overcoming nonlinear dynamics in diabetic retinopathy classification: a robust AI-based model with chaotic swarm intelligence optimization and recurrent long short-term memory. Fractal and Fractional, 7(8), 598.

Patil, M. S., Chickerur, S., Abhimalya, C., Naik, A., Kumari, N., & Maurya, S. K. (2023). Effective deep learning data augmentation techniques for diabetic retinopathy classification. Procedia Computer Science, 218, 1156-1165. https://doi.org/10.1016/j.procs.2023.01.094

Powers, D. M. (2020). Evaluation: from precision, recall and F-measure to ROC, informedness, markedness and correlation. arXiv preprint arXiv:2010.16061.

Rahmanlar, H., Atılgan, C. Ü., Çıtırık, M., Yaradilmiş, İ. M., & Gürsöz, H. (2019). Türkiye'de diyabetik retinopati tanısında endikasyon dışı ilaç kullanımı. Sakarya Medical Journal, 9(3), 499-505. https://doi.org/10.31832/smj.543998

Sunkari, S., et al. (2024). A refined ResNet18 architecture with Swish activation function for Diabetic Retinopathy

classification. Biomedical Signal Processing and Control, 88, 105630. https://doi.org/10.1016/j.bspc.2023.105630

Touvron, H., Cord, M., Douze, M., Massa, F., Sablayrolles, A., & Jégou, H. (2021). Training data-efficient image transformers & distillation through attention. arXiv preprint arXiv:2012.12877.

Uğurlu, N., Taşlıpınar, A. G., Yülek, F., Özdemir, D., Ersoy, R., & Çakır, B. (2018). Evaluation of Retinal Microvascular Structures in Type 1 Diabetic Patients without Diabetic Retinopathy. Ankara Medical Journal. December 2018. https://doi.org/10.17098/amj.501136

Wang, Z., Dong, N., & Voiculescu, I. (2022). Computationally-Efficient Vision transformer for medical image semantic segmentation via dual Pseudo-Label supervision. 2022 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP). https://doi.org/10.1109/icip46576.2022.9897482

Wu, J., Hu, R., Xiao, Z., Chen, J., & Liu, J. (2021). Vision Transformer-based recognition of diabetic retinopathy grade. Medical Physics, 48(12), 7850-7863.

Wu, K., et al. (2023). TinyCLIP: CLIP distillation via affinity mimicking and weight inheritance. arXiv.org. https://arxiv.org/abs/2309.12314

Zhou, D., et al. (2021). DeepVIT: Towards Deeper Vision Transformer. arXiv.org. https://arxiv.org/abs/2103.11886

KSÜ Mühendislik Bilimleri Dergisi, 28(2), 2025
Araştırma Makalesi

KSU J Eng Sci, 28(2), 2025
Research Article

Kahramanmaras Sutcu Imam University
Journal of Engineering Sciences

Geliş Tarihi : 29.07.2024
Kabul Tarihi :28.03.2025

Received Date : 29.07.2024
Accepted Date : 28.03.2025

ON-OFF VE DEĞİŞKEN ON KONTROLLÜ ZVS E-SINIFI REZONANS EVİRİCİ İÇİN Si-IGBT ve SiC-MOSFET'in KARŞILAŞTIRILMASI

COMPARISON OF Si-IGBT AND SiC-MOSFET FOR ON-OFF AND VARIABLE ON CONTROLLED ZVS CLASS-E RESONANT INVERTER

Salih NACAR[1*] (ORCID: 0000-0003-4843-9648)

[1] Bandırma Onyedi Eylül Üniversitesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü, Balıkesir, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Salih NACAR, snacar@bandirma.edu.tr

ÖZET

ZVS E-sınıfı rezonans eviricide anahtar streslerinin; farklı kontrol tekniklerine, giriş gerilimine ve çıkış gücüne bağlı olarak değişmesi dayanma gerilimine karşı taşıyabilecekleri akım değeri sınırlı olan Si MOSFET'in güç anahtarı olarak kullanımını sınırlandırmaktadır. Bu sınırlandırmaya karşı Si MOSFET yerine Si IGBT ve SiC MOSFET kullanılmaktadır. Bu çalışmada on-off ve değişken on kontrollü ZVS E-sınıfı rezonans eviricilerin çalışmaları incelenmiştir. İki farklı kontrol tekniği ile kontrol edilen eviricide güç anahtarı olarak Si IGBT ve SiC MOSFET kullanılmıştır. Teorik çalışmaları doğrulamak için giriş gücü 372W olan eviriciden ve kontrol devresinden oluşan deney düzeneği kurulmuştur. Temel çalışma frekansı 24kHz olan on-off ve değişken on kontrollü E-sınıfı rezonans evirici iki farklı güç anahtarı ile ayrı ayrı test edilmiştir. Si IGBT ve SiC MOSFET'in ayrı ayrı kullanıldığı eviricide maksimum çıkış gücü sıra ile 200,77W ve 191,83W iken verim değeri sıra ile %53,93 ve %54,57'dir. On-off kontrollü eviricide minimum çıkış güç değeri 27,48W için verim %22,15 iken değişken on kontrollü eviricide minimum güç değeri 11,69W için verim %65,25'tir. Sonuç olarak on-off kontrollü eviricide azalan çıkış gücü ile evirici veriminin değişken on kontrollü eviriciye göre oldukça fazla azaldığı görülmüştür. Ayrıca her iki kontrol tekniği ile ayrı ayrı kontrol edilen eviricide güç anahtarları Si IGBT ve SiC MOSFET'in evirici verimi yönünden performanslarının birbirine oldukça yakın olduğu gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: ZVS E-sınıfı evirici, Si IGBT, SiC MOSFET, on-off kontrol, değişken on kontrol

ABSTRACT

The variation of switch stresses in ZVS class-E resonant inverters, depending on different control techniques, input voltage, and output power, limits the use of the Si MOSFET as a power switch due to its limited current-carrying capacity against breakdown voltage. Si IGBT and SiC MOSFET are used instead of Si MOSFET to counter this limitation. In this study, the operations of on-off and variable on-controlled ZVS class-E resonant inverters are examined. Si IGBT and SiC MOSFETs are used as power switches in the inverter controlled by two different control techniques. An experimental setup consisting of an input power of 372W inverter, and a control circuit is established to verify the theoretical studies. The on-off and variable on-controlled class-E resonant inverters, operating at a basic frequency of 24kHz, are tested separately using two different power switches. In the inverter where Si IGBT and SiC MOSFET are used separately, the maximum output power is 200.77W and 191.83W, respectively, while the efficiency is 53.93% and 54.57%, respectively. In the on-off controlled inverter, the efficiency is 22.15% for a minimum output power of 27.48W, whereas, in the variable on-time controlled inverter, the efficiency is 65.25% for a minimum output power of 11.69W. As a result, it is observed that the inverter efficiency decreases significantly with decreasing output power in the on-off controlled inverter, compared to the variable on-controlled inverter. Additionally, it is observed that the performance of the power switches, Si IGBT and SiC MOSFET, in terms of inverter efficiency is very close to each other in the inverter controlled separately by both control techniques.

Keywords: ZVS class-E inverter, Si IGBT, SiC MOSFET, on-off control, variable on-control

ToCite: NACAR, S., (2025). ON-OFF VE DEĞİŞKEN ON KONTROLLÜ ZVS E-SINIFI REZONANS EVİRİCİ İÇİN Si-IGBT ve SiC-MOSFET'in KARŞILAŞTIRILMASI. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 28(2), 601-612.

GİRİŞ

E-sınıfı rezonans evirici LED sürücü, indüksiyon ısıtma, maksimum güç noktası izleyici ve kablosuz güç transferi gibi birçok farklı güç elektroniği uygulamalarında kullanılmaktadır (Karafil, 2023; He vd., 2023; Khodadoost vd., 2023; Corti vd., 2021). Bu eviricinin farklı yapıları (Sarnago vd., 2023) olmakla birlikte tek bir rezonans frekansına sahip ve ısıtma bobini rezonans devre elemanlarından olan yapı indüksiyon ısıtma uygulamaları için sıklıkla tercih edilmektedir (Chakkuchan vd., 2024; Oh vd., 2021). İndüksiyon ısıtma sistemlerinde sıkça kullanılan bu yapının geleneksel ZVS E-sınıfı rezonans eviriciye tercih edilmesinin nedeni devre bileşenlerinin az, analizinin ve tasarımının daha kolay olmasıdır. Bununla birlikte genel olarak E-sınıfı rezonans eviricinin yapısı basit ve uygulaması kolaydır. Dahası E-sınıfı rezonans evirici toprak bağlantılı güç anahtarı sayesinde yüksek frekanslarda yumuşak anahtarlama şartlarında çalışabilmektedir. Belirtilen avantajlara karşı E-sınıfı rezonans eviricinin başlıca dezavantajı anahtar stresleridir (Ribas vd., 2018). İndüksiyon ısıtma uygulamaları için tercih edilen yapıda çalışma periyodunun bir kısmında yüke güç aktarımı için kaynaktan güç çekilirken çalışma periyodunun belirli bir kısmında da rezonans durumu oluşmaktadır. Bu kısmi rezonanslı çalışma durumundan dolayı kaynaktan çekilen akımın tepe değeri eviricinin güç değeri göz önüne alındığında oldukça fazladır. Akım streslerinin yanı sıra gerilim stresleri de oldukça fazladır ve giriş gerilim değerinin 5-6 katına kadar çıkabilmektedir. E-sınıfı rezonans eviricinin başlıca dezavantajı olan anahtar stresleri bu eviricinin daha çok düşük giriş gerilimine ve gücüne sahip uygulamalar için tercih edilmesine neden olmaktadır (Nacar vd., 2022; Wang vd., 2019).

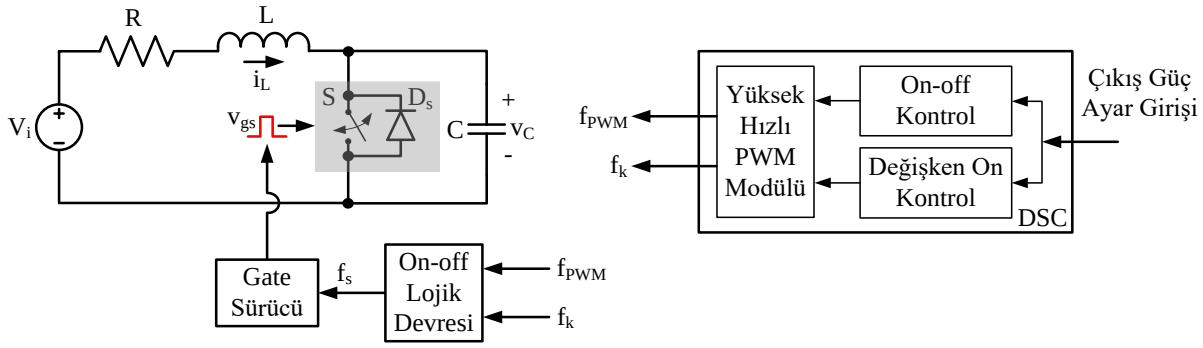
Rezonans evirici ve dönüştürücülerde anahtar stresleri giriş gerilimine ve çıkış gücüne bağlı olmakla birlikte diğer bir etken anahtarın sürülmesinde kullanılan kontrol teknikleridir (Nacar vd., 2021). E-sınıfı rezonans eviricinin kontrolünde sıkça değişken on ve on-off teknikleri kullanılmaktadır (Zhang vd., 2023; Li ve Ruan, 2022; Komiyama vd., 2021). Eviricinin güç anahtarının bu iki farklı kontrol tekniği ile sürülmesiyle anahtar üzerinden oluşan stres değerleri de değişmektedir. Değişken on kontrol basit yapısı ve kolay uygulanabilmesi ile on-off kontrole göre avantajlı olsa da güç kontrolünün ZVS şartlarında geniş bir aralıkta yapılamaması dezavantajıdır. On-off kontrol sabit frekans anahtarlamanın avantajlarından dolayı tercih edilmekle birlikte anahtar stresleri yönünden değişken on kontrole göre dezavantajlıdır. Bunun nedeni on-off kontrolde eviricinin bir çalışma periyodunun belirli bir bölümünde çalıştırılması ve belirli bir kısmında durdurulmasıdır. Dolayısıyla eviricinin çalışma parametreleri her çalışma periyodunun başında başlangıç durumuna dönmekte ve kararlı durum şartları bozulmaktadır. Bunun sonucu olarak çalışma periyodunun başlangıcında yumuşak anahtarlama şartları kaybolduğu gibi anahtar stresleri de artmaktadır (Celentano vd., 2023). Artan anahtar streslerine karşı bu tip uygulamalarda Si MOSFETlerin yerine Si IGBTler veya SiC MOSFETler kullanılmaktadır (Xu vd., 2022; Yamamoto vd., 2017; Niefnecker vd., 2017). Si IGBTler çıkış güç değerlerine göre anahtar stresleri yüksek olan tek anahtarlı evirici veya dönüştürücüler için güç anahtarı olarak seçenek olsa da kuyruk akımları dezavantajlarıdır. Anahtarın kapanması esnasında meydana gelen bu kuyruk akımları anahtarlama kayıplarını artırdığından Si IGBTlerin yüksek anahtarlama frekanslarında çalışmalarını kısıtlamaktadır. SiC MOSFETlerin dayanma gerilimleri ve çalışma akımları göz önünde bulundurulduğunda Si IGBTler ile uygulama alanları örtüşmektedir. Ancak SiC MOFETler hızlı anahtarlanabilme ve düşük anahtarlama kayıpları özellikleriyle Si IGBTlere göre daha yüksek frekanslarda çalışabilmektedirler. Ayrıca SiC MOSFETler daha geniş enerji bant aralığına sahip olduklarından daha yüksek sıcaklıklarda çalışabilmektedirler (Sevim ve Çetin, 2022; Yalçın vd., 2020; Mangkalajarn vd., 2019). Bu iki güç anahtarı farklı birçok çalışmada verim, anahtarlama kayıpları, anahtarlama hızı ve boyut yönünden karşılaştırma işlemine tabii tutulmuşlardır. Karşılaştırma işlemleri tek bir sürme tekniğinin kullanıldığı, giriş geriliminin, çıkış gücünün ve anahtarlama frekansının eşit olduğu sistemler üzerinde gerçekleştirilmiştir. Yapılan karşılaştırma çalışmaları sonucunda SiC MOSFET'in Si IGBT'ye göre anahtarlama hızının daha yüksek ve anahtarlama kayıplarının daha düşük olduğu anlaşılmaktadır. Ayrıca, daha yüksek sistem verim değerlerinin Si IGBTlere göre daha küçük boyutlarda olan SiC MOSFETler ile elde edildiği yine bu çalışmalarda belirtilmektedir. Güç anahtarı olarak Si IGBT ve SiC MOSFET birbirinin yerine kullanılsa da bu iki anahtarı farklı yönlerden karşılaştırmak için gerçekleştirilen çalışmalar SiC MOSFET'in Si IGBT'ye göre birçok avantajı olduğunu ortaya koymaktadır (Zhang vd., 2019; Zhao vd., 2007; Albanna vd., 2016; Sivkov vd., 2018).

Yukarıda da değinildiği üzere tek bir sürme tekniği ile kapı devresi kontrol edilen Si IGBT ve SiC MOSFET eşit şartlar altında farklı yönlerden karşılaştırılmışlardır. Bu çalışmada daha önceki gerçekleştirilen çalışmalardan farklı olarak birbirlerinin alternatifi olabilen Si IGBT ve SiC MOSFET iki farklı sürme tekniği ile kontrol edilerek karşılaştırma işlemine tabii tutulmuşlardır. Karşılaştırma işlemi temel anahtarlama frekansı 24 kHz olan on-off ve değişken on kontrollü ZVS E-sınıfı rezonans evirici kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Çalışmada her iki anahtarı da eşit şartlar altında karşılaştırmak için sistemin çalışma parametreleri ve diğer bileşenleri değiştirilmeyerek sadece

güç anahtarları değiştirilmiştir. On-off kontrollü eviricinin on-off periyodunun görev oranı ve değişken on kontrollü eviricinin iletim süresi değiştirilerek iki güç anahtarı bu iki kontrol tekniği ile ayrı ayrı çalıştırılmıştır. Eviricinin giriş ve çıkış gücü ölçülerek evirici farklı iki anahtar ve kontrol tekniği için verim yönünden karşılaştırılmıştır.

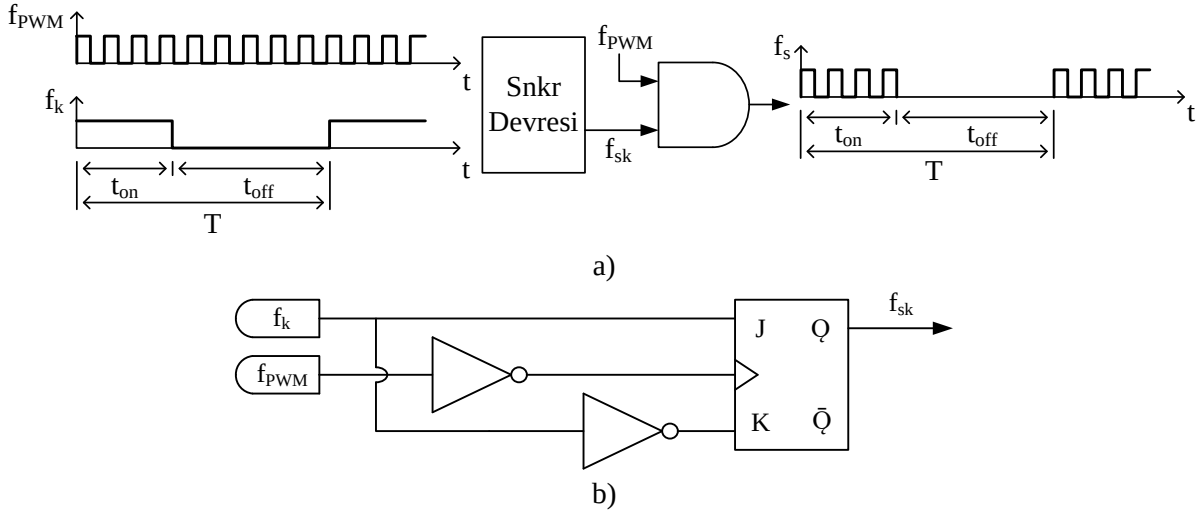
DEĞİŞKEN ON VE ON-OFF KONTROLLÜ ZVS E-SINIFI REZONANS EVİRİCİ

Şekil 1'de iki kontrol tekniğinin ve iki güç anahtarının farklı kombinasyonlarının çalıştırılmasında ve bu çalışma durumlarının evirici verimi yönünden karşılaştırılmasında kullanılan devre yapısı verilmiştir. Devre güç katı olan ZVS E-sınıfı rezonans evirici ve farklı kontrol tekniklerinin kontrol sinyallerinin üretilmesinde kullanılan kontrol devresinden oluşmaktadır. Evirici devresi; çıkış yük direnci R, güç anahtarı S ve güç anahtarının gövde diyotu D_s, rezonans elemanları bobin L ve kondansatör C'den oluşmaktadır. Güç anahtarı S karşılaştırma için kullanılan Si IGBT veya SiC MOSFET'tir.



Şekil 1. Karşılaştırma İçin Kullanılan Devre Yapısı

On-off ve değişken on kontrollü eviricinin güç anahtarının kontrol edilmesini sağlayan f_s sinyalinin elde edilebilmesi için 33fj16gs502 sayısal sinyal denetleyicisi (DSC) ve Şekil 2a'da giriş-çıkış dalga şekilleriyle birlikte verilen on-off lojik devresi kullanılmıştır. On-off lojik devresi; f_{PWM} ve f_k sinyallerinin senkronize edilmesinde kullanılan ve devre şekli Şekil 2b'de verilen senkronizasyon (Snkr) devresinden ve lojik VE kapısından oluşmaktadır. Blok devrenin girişleri f_{PWM} ve f_k sinyalleri DSC'nin hızlı PWM modülü ile üretilmektedir.



Şekil 2. a. Blok Devre **b.** Senkronizasyon Devresi

Şekil 2'deki f_{PWM} sinyali güç anahtarının kontrol edilmesinde kullanılan sinyal iken periyodu T olan f_k sinyalinin Eşitlik 1'de verilen görev oranı D, f_{PWM} sinyalinin ne kadarlık bir bölümünün güç anahtarının kontrolünde kullanılacağını ifade etmektedir. Evirici değişken on kontrol ile kontrol edileceği zaman f_k sinyalinin görev oranı D %100 seçilmektedir. Böylece f_{PWM} sinyalinin tamamı anahtarın sürülmesinde kullanılmaktadır. Değişken on kontrolde f_{PWM} sinyalinin görev oranı dolayısıyla anahtarın iletimde kalması süresi değiştirilerek güç kontrolü gerçekleştirilmektedir. Bu kontrol tekniğinde kontrol değişkeni f_{PWM} sinyalinin frekansıdır. f_{PWM} sinyalinin frekansının azaltılması ile eviricinin çıkış gücü artmakta tersi durumda azalmaktadır. Evirici on-off kontrol ile

kontrol edileceği zaman f_{PWM} sinyalinin frekansı ve görev oranı sabit tutulmakta ve f_k sinyalinin görev oranı D değiştirilerek güç kontrolü gerçekleştirilmektedir. On-off kontrolün bahsedilen çalışma prensibinden ve Eşitlik 1'den anlaşılacağı üzere görev oranı D'nin artırılması ile eviricinin güç anahtarına uygulanacak olan PWM sinyali sayısı artmakta tersi durumda azalmaktadır.

$$D = \frac{t_{on}}{T} \quad (1)$$

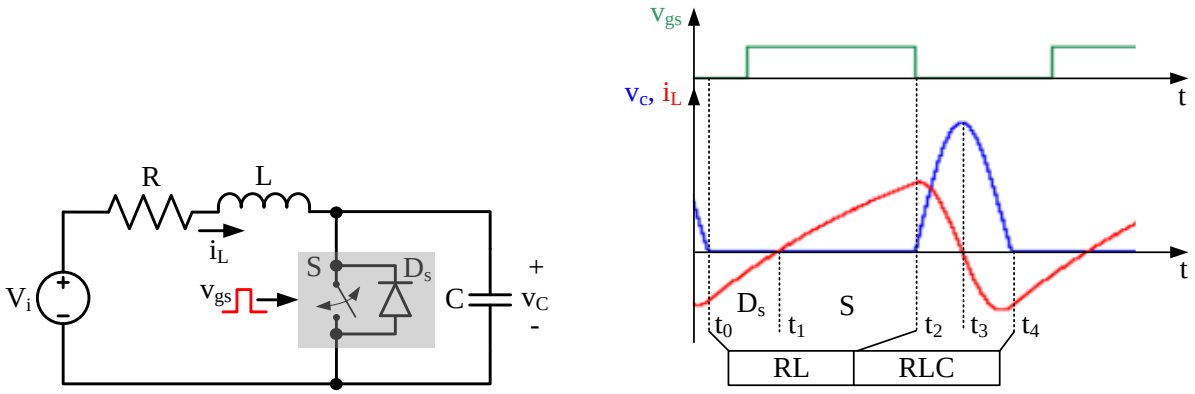
Dolayısıyla on-off kontrollü eviricide kontrol değişkeni D'dir. D'nin artırılması ile eviricinin çıkış gücü artmakta tersi durumda azalmaktadır.

Değişken On Kontrollü Evirici

Tüm devre elemanları ideal kabul edilen ve Şekil 3a'da verilen değişken on kontrollü eviricinin kararlı durum çalışması için dalga şekilleri Şekil 3b'de verildiği gibidir. Eviricinin çalışmasını ve karakteristiğini büyük ölçüde rezonans elemanları L ve C'nin değerleri belirlemektedir. t_0'dan t_4'e kadar olan kararlı durum çalışma aralığından görüleceği üzere güç anahtarı S'nin ZVS şartlarında çalışabilmesi için kondansatör gerilimi v_c'nin 0V veya altına düştükten sonra tekrardan 0V üzerine çıkmadan tetikleme sinyali v_{gs}'nin uygulanması gerekmektedir. Kararlı durum çalışma aralıklardan t_0 dan t_2'ye kadar evirici RL devresi gibi çalışmaktadır. t_0-t_1 çalışma aralığındaki i_L akımının negatif kısmı güç anahtarı S'nin gövde diyotu D_s tarafından iletilirken giriş enerji kaynağından eviricinin çıkışına güç aktarımının gerçekleştirildiği t_1-t_2 aralığındaki pozitif i_L akımı güç anahtarı S tarafından iletilmektedir. t_2 anında anahtarlama sinyalinin kesilmesi ile güç anahtarı S yalıtım durumuna geçmekte ve evirici rezonans frekansı Eşitlik 2'de verilen seri RLC devresine dönüşmektedir.

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2)$$

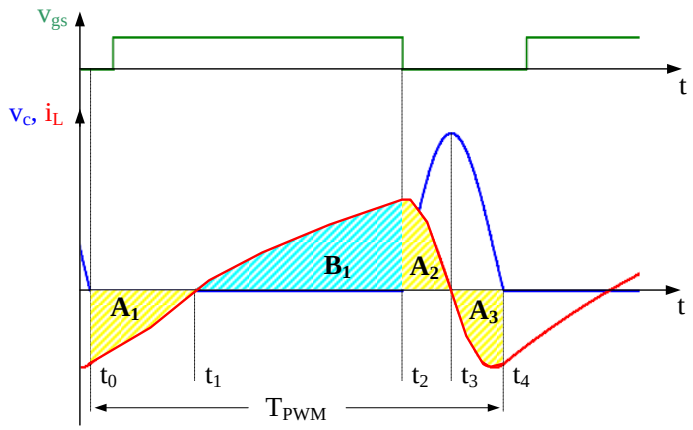
Dolayısıyla evirici sadece t_2 den t_4'e kadar olan zaman aralığında osilasyon durumunda çalışmakta ve L ve C'ye bağlı tek bir rezonans frekansına sahip olmaktadır.



a) b)

Şekil 3.a. Evirici Devresi **b.** Değişken On Kontrollü Eviricinin Çalışma Dalga Şekilleri

Eviricinin yukarıda bahsedilen çalışmasından da anlaşılacağı üzere kaynaktan güç aktarımı sadece t_1-t_2 aralığında gerçekleşmektedir. Dolayısıyla değişken on kontrolde bu zaman aralığı değiştirilerek eviricinin güç kontrolü gerçekleştirilmektedir. Giriş gerilimi ve yük değeri bilinen değişken on kontrollü eviricinin veriminin (η) hesaplanabilmesi için kaynaktan çekilen akımın ortalama değeri I_k ve yük direnci üzerinden geçen aynı zamanda da rezonans akımı i_L olan akımın ortalama değeri I_L'nin bilinmesi gereklidir. Bu ortalama akım değerlerinin bulunabilmesi için değişken on kontrollü eviricinin bir çalışma periyodu T_{PWM} için i_L akımı çalışma aralıkları dikkate alınarak A ve B alanlarına ayrılmış ve Şekil 4'te v_{gs} ve v_c dalga şekilleri ile verilmiştir. t_1-t_2 aralığındaki ve turkuaz renk ile taralı alan B_1, I_k'nın bulunması için kullanılırken t_0 dan t_4'e kadar olan aralıktaki sarı ve turkuaz renkleri ile taralı alanların tamamı I_L'nin bulunmasında kullanılmaktadır.



Şekil 4. Değişken On Kontrollü Eviricinin Kaynak ve Yük Akımının Ortalama Değerinin Bulunmasında Kullanılan Dalga Şekilleri

Şekil 4'te verilen i_L akımının alan değerleri göz önüne alınarak giriş gücü P_i ve çıkış gücü P_o sıra ile Eşitlik 3 ve Eşitlik 4'te verildiği bulunabilir.

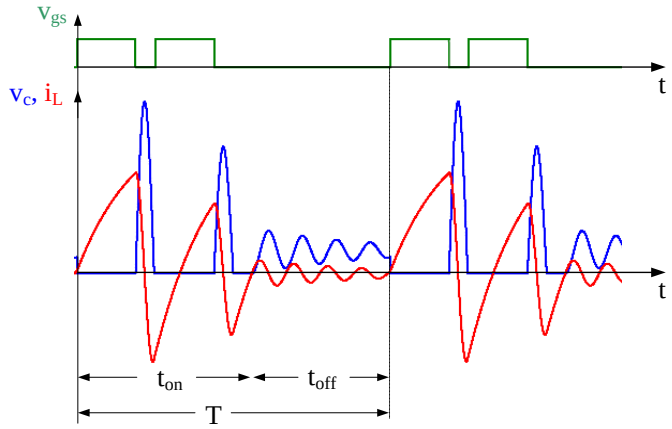
$$P_i = V_i I_k = V_i \frac{B_1}{T_{PWM}} \tag{3}$$

$$P_o = I_L^2 R = \left(\frac{|\sum_{i=1}^{3} A_i| + B_1}{T_{PWM}}\right)^2 R \tag{4}$$

Eşitlik 3'ten de anlaşılacağı üzere giriş gücü P_i; kaynak gerilimi V_i ve kaynaktan çekilen akımın ortalama değeri I_k'nın çarpılması ile elde edilmiştir. Eşitlik 4'te verilen çıkış gücü P_o, çıkış yük direnci üzerinden geçen akımın ortalaması I_L'nin karesi ile yük direnci R'nin çarpılmasıyla bulunmuştur. P_o eşitliğindeki i_L akımının A alanlarının mutlak değerlerinin alınarak toplanmasının sebebi; i_L akımının tam olarak sinüs olmadığı gibi pozitif ve negatif kısımlarının da birbirinin simetriği olmamasıdır.

On-Off Kontrollü Evirici

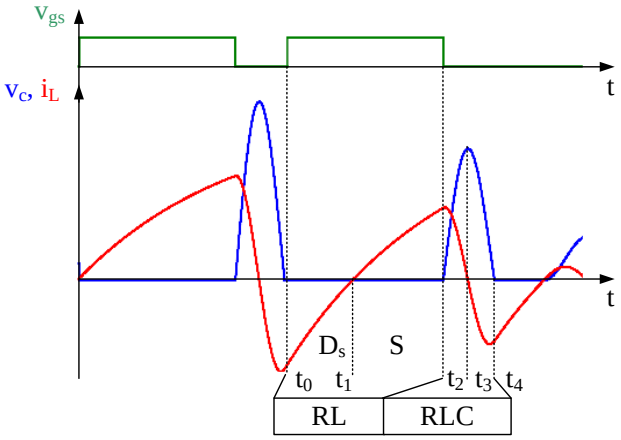
Görev oranı D, %100 iken T çalışma periyodu dört adet PWM sinyalinden oluşan on-off kontrollü eviricinin %50 görev oranı için çalışma dalga şekilleri Şekil 5'te verildiği gibidir.



Şekil 5. %50 Görev Oranı için On-Off Kontrollü Eviricinin Çalışma Dalga Şekilleri

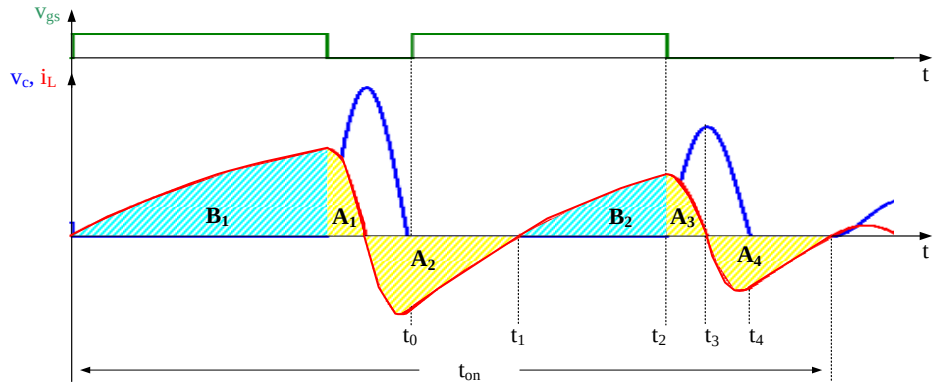
Evirici T periyodunun t_{on} süresince aktif iken periyodun kalan kısmı t_{off} süresince pasif durumdadır. Bu kesikli çalışmanın sonucu olarak ton aralığında kararlı durum çalışma şartlarına ulaşan eviricinin kararlı durum çalışması ton aralığının sona ermesi ve t_{off} çalışma aralığının başlamasıyla sonlanmakta ve eviricinin çalışması bir süre sonra başlangıç şartlarına dönmektedir. Şekil 6'da Şekil 5'teki t_{on} çalışma aralığının ilk iki anahtarlama sinyaline ait dalga şekillerinin açılmış görünümleri verilmiştir. Şekil 6'daki dalga şekillerinden eviricinin karalı durum çalışma şartlarının ikinci anahtarlama sinyalinden sonra başladığı görülmektedir. On-off kontroldeki kararlı durum çalışması

değişken on kontrol ile aynıdır. Ayrıca ilk anahtarlama sinyali için anahtarın akım ve gerilim streslerinin sonraki anahtarlama sinyaline göre daha yüksek olduğu da Şekil 6'dan görülmektedir.



Şekil 6. %50 Görev Oranı ile Çalışan On-Off Kontrollü Eviricinin t_{on} Çalışma Aralığına Ait Dalga Şekilleri

On-off kontrollü eviricinin verim değerinin bulunabilmesi için bir çalışma periyodu T'de kaynaktan çekilen akımın ortalama değeri I_k'nın ve yük direnci R üzerinden geçen akımın ortalama değeri I_L'nin belirlenmesi gerekmektedir. Bu ortalama akım değerlerinin bulunabilmesi için görev oranı %50 olan on-off kontrollü eviricinin ton çalışma aralığı için i_L akımı çalışma aralıkları dikkate alınarak A ve B alanlarına ayrılmış ve Şekil 7'de v_{gs} ve v_c dalga şekilleri ile verilmiştir. t_{on} aralığındaki ve turkuaz renk ile taralı B alanları I_k'nın bulunması için kullanılırken ton aralığındaki sarı ve turkuaz renkleri ile taralı alanların tamamı I_L'nin bulunması için kullanılmıştır.



Şekil 7. On-Off Kontrollü Eviricinin Kaynak ve Yük Akımının Ortalama Değerinin Bulunmasında Kullanılan Dalga Şekilleri

Şekil 7 dikkate alınarak %50 görev oranı ile çalışan on-off kontrollü eviricinin T çalışma periyodu için giriş gücü P_i ve çıkış gücü P_o sıra ile Eşitlik 5 ve Eşitlik 6'da verildiği gibi yazılabilir.

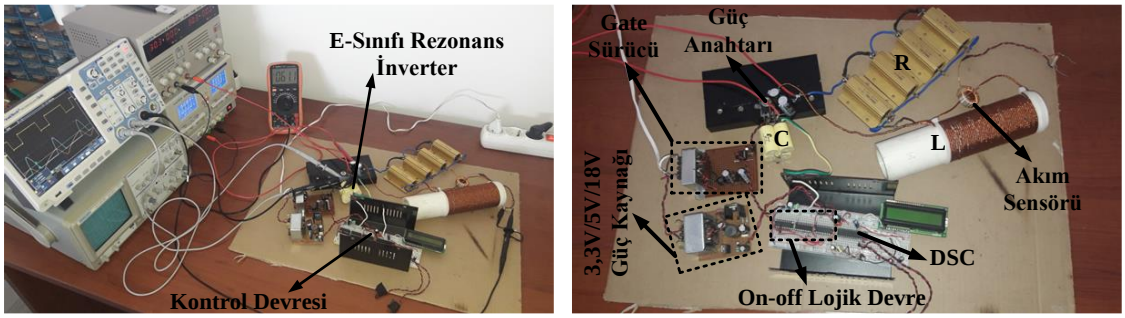
$$P_i = V_i I_k = V_i \frac{\sum_{i=1}^{2} B_i}{T} \tag{5}$$

$$P_o = I_L^2 R = \left(\frac{|\sum_{i=1}^{4} A_i| + \sum_{i=1}^{2} B_i}{T} \right)^2 R \tag{6}$$

Eşitlik 5 ve Eşitlik 6'da verilen sıra ile giriş ve çıkış güç eşitlikleri on-off kontrolün %50 doluluk oranı için yazılmıştır. Doluluk oranı değiştikçe güç anahtarına uygulanacak olan PWM sinyalinin sayısı değişeceğinden i_L akımında A ve B alanları ile ifade edilen alanların sayısı da değişecektir. Bu nedenle eşitliklerde verilen toplamların sınır değerleri doluluk oranı D'ye göre güncellenmelidir. Ayrıca değişken on kontrolde olduğu gibi I_L'nin ortalama değeri bulunurken i_L tam olarak sinüs olmadığından dolayısıyla pozitif ve negatif kısımları da birbirinin simetriği olmadığından A alanlarının mutlak değeri alınarak ortalama değer elde edilmiştir.

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Si IGBT ve SiC MOSFET'in karşılaştırılması için gerçekleştirilen on-off ve değişken on kontrollü E-sınıfı rezonans eviricinin deney düzeneği Şekil 8a'da ve evirici ve kontrol devresi Şekil 8b'de verilmiştir. Eviricinin çıkış yük direnci R, Arcol firmasının h100 modeli olan 100W-10Ω'luk dirençlerden dört tanesinin paralel bağlanması elde edilmiştir. Rezonans kondansatörü C için Alcon Electronics firmasının kp-06-025 modeli olan 0,1µF'lık snubber kondansatörlerinden dört adet kullanılmıştır. Bu kondansatörlerin akım değerinin artırılması için iki adet ikişerli seri gruplar paralel bağlanmıştır. Rezonans bobini L, nüve olarak silindir şeklinde plastik boru ve bobinin sargıları için 0,35mm Litz tel kullanılarak gerçekleştirilmiştir.



a) b)

Şekil 8.a. Deney Düzeneği **b.** Evirici ve Kontrol Devresi

On-off ve değişken on kontrollü E-sınıfı rezonans eviricinin çalışma parametreleri Tablo 1'de verildiği gibidir. On-off ve değişken on kontrol için güç anahtarının kontrol sinyali f_s'nin temel frekansı 24kHz ve on-off kontrolün kontrol sinyali f_k'nın frekansı 6kHz seçilmiştir.

Tablo 1. On-off ve Değişken On Kontrollü Eviricinin Çalışma Parametreleri

V_i	L	C	R	f_r	f_{PWM}	f_k	P_o
60V	45µH	100nF	2,5Ω	75kHz	24kHz	6kHz	200W

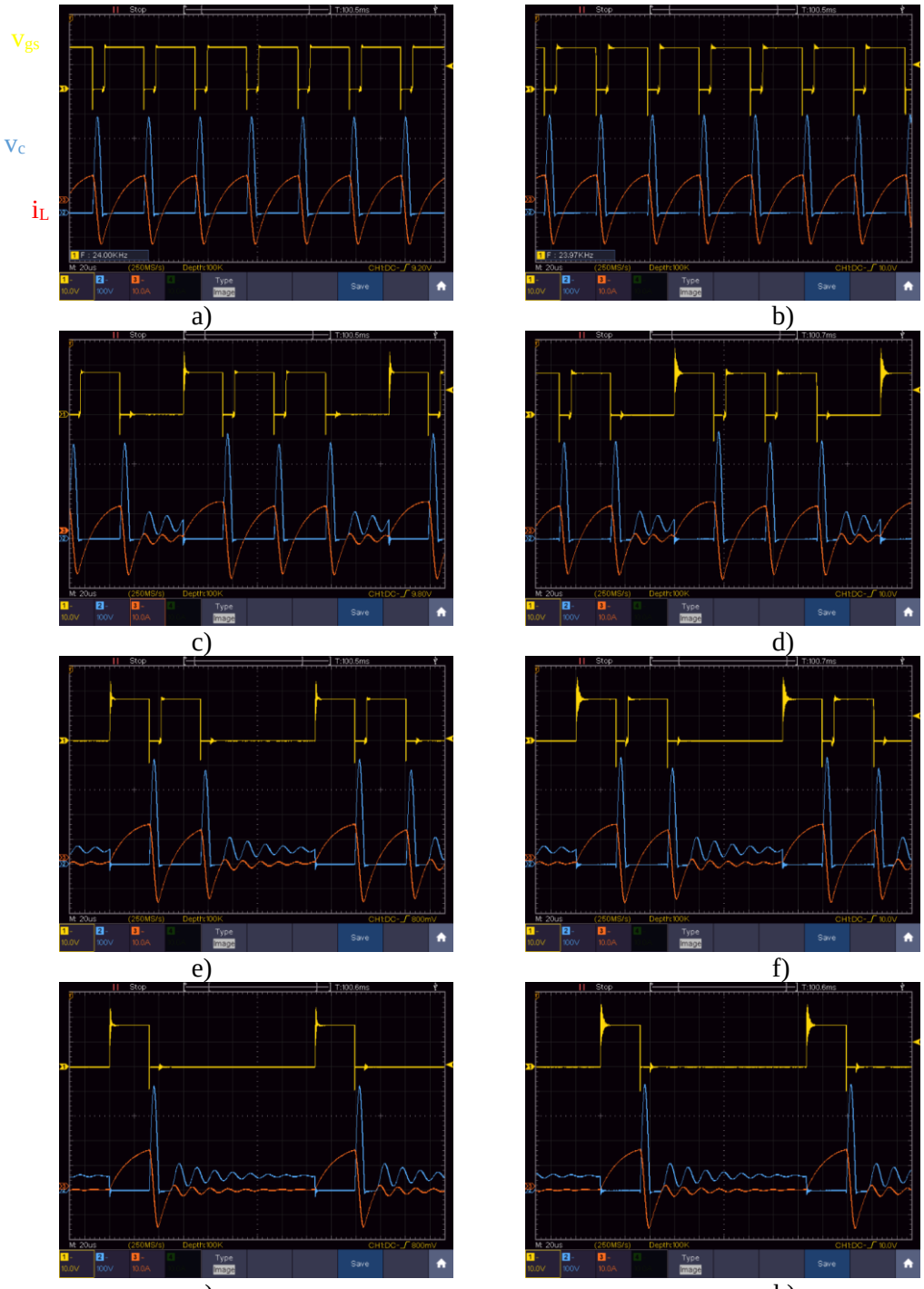
Karşılaştırma işlemi için dayanma gerilimleri ve çalışma akımları birbirine yakın olan Si IGBT IRG4PC40UD ve SiC MOSFET SCT3060AL tercih edilmiştir. 25 ºC kılıf sıcaklığı için çalışma özellikleri Tablo 2'de verilen her iki güç anahtarının da sürülmesi için kaynak besleme gerilimi 18V olan izoleli gate sürücü HCPL3120 tümleşik devresi kullanılmıştır.

Tablo 2. Anahtarların Özellikleri

Parametre	Si IGBT IRG4PC40UD	SiC MOSFET SCT3060AL
Dayanma Gerilimi	600V	650V
Çalışma akımı	40A	39A
İletim Karakteristiği	$V_{CE(on)}$ = 2,15V	$R_{DS(on)}$ = 60mΩ
Termal Direnç (Jonksiyon-Kılıf)	0,77 ^{0}C/W	0,91 ^{0}C/W
Maksimum Güç Tüketimi	160W	165W
Gövde Diyotunun İletim Gerilimi	1,7V	3,2V

On-off kontrollü ZVS E-sınıfı rezonans evirici farklı görev oranları (D) için her iki anahtarla ayrı ayrı çalıştırılmıştır. Her bir anahtar ve farklı görev oranları için eviriciye ait çalışma dalga şekilleri Şekil 9'da verilmiştir. Şekil 9'da verilen dalga şekilleri v_c, i_L ve v_{gs} sırasıyla anahtar gerilimi, bobin akımı ve anahtarın gate sinyalidir. Deneysel çalışmalarda bobin akımı i_L'nin ölçülmesinde 1:100 oranında ve çıkışında 100Ω direnç olan ferrit nüve kullanılmıştır. Sinyallerin görüntülenmesi, kaynaktan çekilen akımın ortalama değeri I_k ve çıkış yük direnci akımının ortalama değeri I_L'nin belirlenmesi için PeakTech firmasının 4 kanallı 100MHz'lik 1341 sayısal osiloskopu kullanılmıştır.

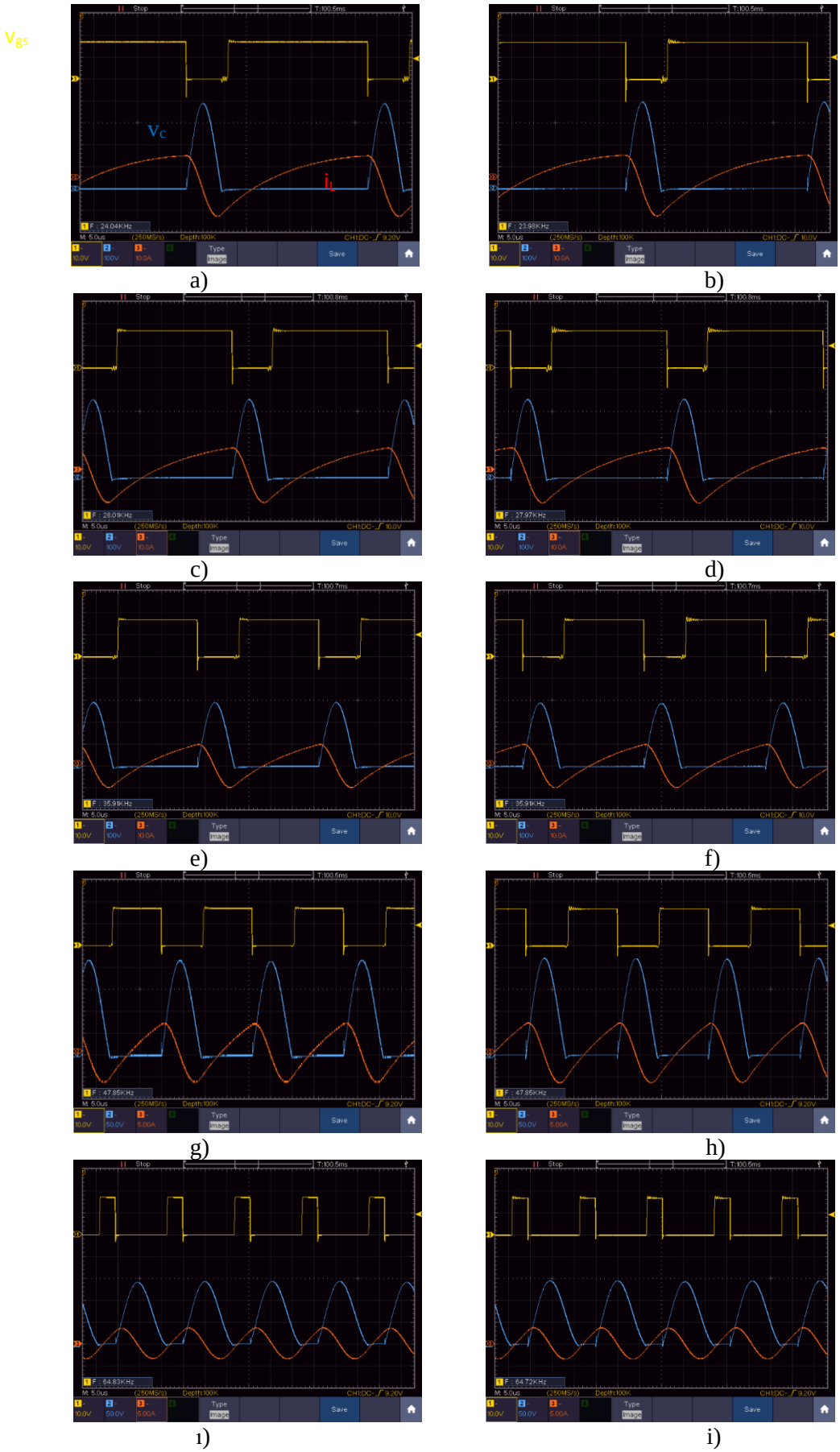
Her iki anahtar ile farklı görev oranlarında çalıştırılan on-off kontrollü eviricinin verim değerlerinin elde edilebilmesi için Şekil 9'daki her bir çalışma durumuna ait dalga şekilleri v_{gs}, v_c ve i_L'nin zaman ve genlik bilgileri osiloskoptan harici USB bellek ile alınmıştır. Bu veriler MATLAB ortamına aktarılarak kaynaktan çekilen akımın ortalama değeri I_k ve yük direnci R üzerinden geçen akımının ortalama değeri I_L on-off kontrolün görev oranları dikkate alınarak hesaplanmıştır.



Şekil 9.a. Si IGBT ve D=%100 **b.** SiC MOSFET ve D=%100 **c.** Si IGBT ve D=%75 **d.** SiC MOSFET ve D=%75 **e.** Si IGBT ve D=%50 **f.** SiC MOSFET ve D=%50 **g.** Si IGBT ve D=%25 **h.** SiC MOSFET ve D=%25

Ölçümler ve hesaplamalar sonucu elde edilen değerler Tablo 3'te verilmiştir. Tablo 3'teki giriş gücü P_i; giriş gerilimi V_i ve I_k'nın çarpılması ile elde edilmiştir. Çıkış gücü P_o, I_L'nin karesi ile yük direnci R'nin çarpılması ile bulunmuştur. Verim değeri η, çıkış gücünün giriş gücüne oranının yüzdelik olarak gösterimidir.

Tablo 3'ten on-off kontrollü evirici veriminin azalan görev oranı ile oldukça fazla azaldığı anlaşılmaktadır. İki ayrı anahtar ile ayrı ayrı çalıştırılan eviricinin verim değerleri birbirine oldukça yakın olsa da SiC MOSFET'in kullanıldığı eviricide verim değerleri biraz daha yüksektir. Şekil 10'da iki anahtarla ayrı ayrı çalıştırılan değişken on kontrollü eviricinin farklı anahtarlama frekans değerleri olan yaklaşık 24kHz, 28kHz, 36kHz, 48kHz ve 65kHz için çalışma dalga şekilleri verilmiştir.



Şekil 10.a. Si IGBT ve f_s=24kHz **b.** SiC MOSFET ve f_s=24kHz **c.** Si IGBT ve f_s=28kHz **d.** SiC MOSFET ve f_s=28kHz **e.** Si IGBT ve f_s=36kHz **f.** SiC MOSFET ve f_s=36kHz **g.** Si IGBT ve f_s=48kHz **h.** SiC MOSFET ve f_s=48kHz **ı.** Si IGBT ve f_s=65kHz **i.** SiC MOSFET ve f_s=65kHz

Tablo 3. On-Off Kontrollü Eviricinin İki Güç Anahtarı için Test Sonuçları

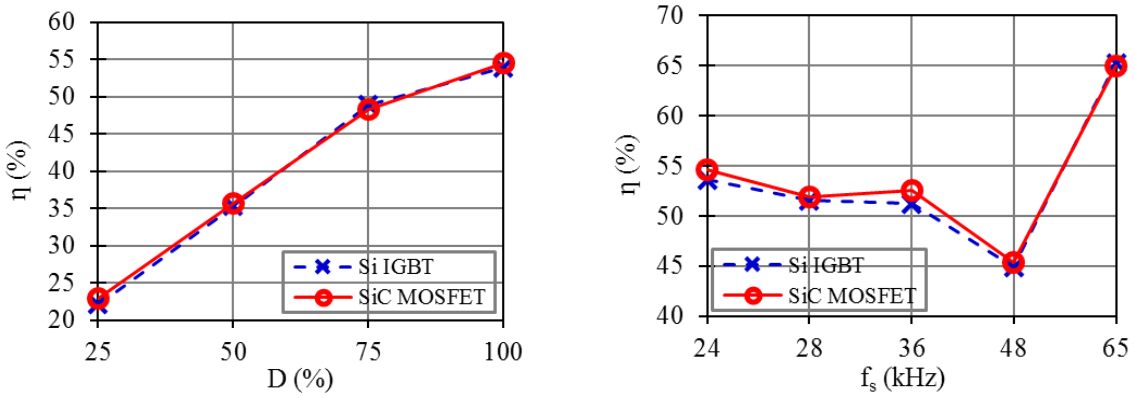
Anahtar	D (%)	V_i (V)	I_k (A)	P_i (W)	I_L (A)	R (Ω)	P_o (W)	η (%)
Si IGBT IRG4PC40UD	25	60,5	2,0543	124,0813	3,3154	2,5	27,4794	22,15
	50	60,4	3,3464	202,1233	5,3445	2,5	71,4091	35,33
	75	60,1	4,4149	265,3336	7,2077	2,5	129,8764	48,95
	100	60,2	6,1947	372,3022	8,9615	2,5	200,7729	53,93
SiC MOSFET SCT3060AL	25	60,3	2,0385	122,9192	3,3567	2,5	28,1691	22,92
	50	60,2	3,3727	203,0342	5,3899	2,5	72,6283	35,77
	75	60	4,5851	275,1058	7,2865	2,5	132,7341	48,25
	100	60	5,859	351,5396	8,7597	2,5	191,8314	54,57

Güç anahtarı olarak ayrı ayrı Si IGBT ve SiC MOSFET'in kullanıldığı ve bu anahtarlardan her birinin beş farklı anahtarlama frekans değeri için test edildiği değişken on kontrollü eviriciye ait ölçüm ve hesaplama sonuçları Tablo 4'te verilmiştir. Tablo 4'teki test sonuçlarından azalan iletim zamanı ile verimin azalsa da rezonans frekans değerine en yakın olan 65kHz anahtarlama frekansı için verim değerinin diğer anahtarlama frekans değerlerine göre oldukça yüksek olduğu anlaşılmaktadır. Ayrıca azalan çıkış gücü ile on-off kontrollü eviricide olduğu gibi verimde aşırı azalmaların olmadığı ve her iki anahtar içinde evirici verim değerlerinin on-off kontrolde olduğu gibi birbirine oldukça yakın olduğu görülmektedir.

Tablo 4. Değişken On Kontrollü Eviricinin Test Sonuçları

Anahtar	f_s (kHz)	V_i (V)	I_k (A)	P_i (W)	I_L (A)	R (Ω)	P_o (W)	η (%)
Si IGBT IRG4PC40UD	24	60,2	6,1947	372,3022	8,9615	2,5	200,7729	53,93
	28	60,2	4,6497	279,9132	7,5989	2,5	144,3575	51,57
	36	60,5	2,4446	147,8986	5,5036	2,5	75,724	51,2
	48	60,5	1,4331	86,7013	3,9475	2,5	38,9575	44,93
	65	60,6	0,2956	17,9145	2,1624	2,5	11,6896	65,25
SiC MOSFET SCT3060AL	24	60	5,859	351,5396	8,7597	2,5	191,8314	54,57
	28	60,1	4,6518	279,5738	7,6178	2,5	145,0782	51,89
	36	60,3	2,4731	149,129	5,6	2,5	78,4	52,57
	48	60,7	1,4092	58,5414	3,942	2,5	38,8485	45,41
	65	60,9	0,2995	18,2382	2,1762	2,5	11,8401	64,92

Si IGBT ve SiC MOSFET'in güç anahtarı olarak kullanıldığı on-off ve değişken on kontrollü eviriciye ait olan test sonuçları Şekil 11'de grafiksel olarak verilmiştir. Şekil 11'deki eğriler her bir kontrol tekniğinin kontrol değişkenine karşı evirici verimindeki değişimi göstermektedir.



a) b)

Şekil 11.a. On-Off Kontrollü Eviricide Kontrol Değişkenine Karşı Evirici Veriminin Değişimi **b.** Değişken On Kontrollü Eviricide Kontrol Değişkenine Karşı Evirici Veriminin Değişimi

Şekil 11'deki eğrilerden iki kontrol tekniğinin ve iki güç anahtarının kombinasyonlarının kullanıldığı eviricide verim değerlerinin birbirine oldukça yakın olduğu görülmektedir.

SONUÇ

ZVS E-sınıfı rezonans evirici yüksek frekanslarda yumuşak anahtarlama şartlarında çalışabilmesinden dolayı tercih edilmekle birlikte başlıca dezavantajı anahtar stresleridir. Bu dezavantaj Si MOSFETlerin güç anahtarı olarak kullanımını özellikle artan güç değerleri için sınırlandırmaktadır. Bu dezavantajın üstesinden gelebilmek için bu evirici yapısında Si IGBT ve SiC MOSFET güç anahtarı olarak kullanılmaktadır. Birbiri yerine kullanılabilen bu iki anahtar giriş güç değeri yaklaşık 122W ile 372W aralığında ve temel frekansı 24kHz olan on-off kontrollü eviricide verim yönünden test edilmiştir. Her iki anahtar içinde on-of kontrollü evirici veriminin azalan görev oranı ile oldukça düştüğü gözlemlemiştir. Ayrıca farklı görev oranlarında her iki anahtar içinde verim değerleri birbirine oldukça yakın olmakla birlikte SiC MOSFET'in kullanıldığı eviricinin verim değerlerinin Si IGBT'ye göre çoğu çıkış güç değeri için daha yüksek olduğu görülmüştür. Benzer şekilde iki anahtar için verim karşılaştırması giriş güç değeri yaklaşık 18-372 W aralığında ve temel frekansı 24kHz olan değişken on kontrollü evirici içinde tekrarlanmıştır. Değişken on kontrollü eviricide azalan iletim zamanı ile evirici verim değeri on-off kontrollü eviricide olduğu gibi çok fazla azalmamaktadır. Farklı iletim zamanları için her iki anahtarla ayrı ayrı çalıştırılan eviricinin verim değerleri on-off kontrollü eviricide olduğu gibi birbirine oldukça yakındır. Dahası güç anahtarı olarak SiC MOSFET'in kullanıldığı değişken on kontrollü eviricinin çoğu çıkış güç değerleri için verimi Si IGBT'li eviriciye göre daha yüksektir. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda kontrol teknikleri güç çözünürlüğü ve çalışma frekansı yönünden değerlendirildiğinde; değişken on kontrolün güç çözünürlüğü yönünden on-off kontrolden daha avantajlı, geniş bir aralıkta değişen çalışma frekansından dolayı ise dezavantajlı olduğu anlaşılmaktadır.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma Bandırma Onyedi Eylül Üniversitesi (BANÜ) Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi tarafından desteklenmiştir (Proje Numarası: BAP-21-1003-011). Değerli destekleri için BANÜ'ye teşekkür ederim.

KAYNAKLAR

Albanna, A., Malburg, A., Anwar, M., Guta, A., & Tiwari, N. (2016, June). Performance comparison and device analysis Between Si IGBT and SiC MOSFET. *2016 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC)* (pp. 1-6). https://doi.org/10.1109/ITEC.2016.7520242

Celentano, A., Pareschi, F., Rovatti, R., & Setti, G. (2023). A zero-transient dual-frequency control for class-E resonant DC-DC converters. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 38 (2), 2105-2114. https://doi.org/10.1109/TPEL.2022.3208816

Chakkuchan, P., Charoenwiangnuea, P., Chudjuarjeen, S., Rattanaudompisut, A., Jaito, K., & Pichaicherd, A. (2024, March). Parallel class-E resonant inverters with a common EMI filter for domestic induction cooker. 2024 International Electrical Engineering Congress (iEECON 2024) (pp. 1-4). IEEE.

Corti, F., Reatti, A., Wu, Y. H., Czarkowski, D., & Musumeci, S. (2021). Zero voltage switching condition in class-E inverter for capacitive wireless power transfer applications. *Energies*, 14 (4), 1-21. https://doi.org/10.3390/en14040911

He, L., Huang, X., & Cheng, B. (2023). Robust class E^2 wireless power transfer system based on parity-time symmetry. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 38 (4), 4279-4288. https://doi.org/10.1109/TPEL.2022.3230852

Karafil, A. (2023). Thinned-out controlled IC MPPT algorithm for class E resonant inverter with PV system. *Ain Shams Engineering Journal*, 14 (2023), 1-9. https://doi.org/10.1016/j.asej.2022.101992

Khodadoost, M., Hayati, M., & Abbasi, H. (2023). Investigation of temperature variations on a class-E inverter and proposing a compensation circuit to prevent harmful effects on biomedical implants. *Scientific Reports*, 4017 (2023), 1-19. https://doi.org/10.1038/s41598-023-31076-y

Komiyama, Y., Matsuhashi, S., Zhu, W., Mishima, T., Ito, Y., Uematsu, T., Nguyen, K., & Sekiya, H. (2021). Frequency-modulation controlled load-independent class-E inverter. *IEEE Access*, 9 (2021), 144600-144613. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3121781

Li, Y., & Ruan, X. (2022). Output current limitation for on-off controlled very-high-frequency class E DC-DC converter. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 69 (11), 11826-11831. https://doi.org/10.1109/TIE.2021.3116594

Mangkalajarn, S., Ekkaravarodome, C., Sukanna, S., Bilsalam, A., Jirasereeamongkul, K., & Higuchi, K. (2019, February). Comparative study of Si IGBT and SiC MOSFET in optimal operation class-E inverter for domestic induction cooker. 2019 Research, Invention, and Innovation Congress (RI^2C 2019) (). IEEE.

Nacar, S., Öncü, S., & Bal, G. (2021). Comparison of control techniques for series resonant converter. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part: C Tasarım ve Teknoloji, 9 (2), 283-296. https://doi.org/10.29109/gujsc.908600

Nacar, S., Öncü, S., & Kayfeci, M. (2022). Induction heated metal hydride tube for hydrogen storage system. *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, 28 (5), 676-680. https://doi.org/10.5505/pajes.2021.97692

Niefnecker, P., Simon, M., Salich, S., & Pforr, J. (2017, November). Comparison of switching devices for a zero-current switched class E based automotive inductive charging converter system. 2017 19th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'17 ECCE Europe) (pp. 1-10). IEEE.

Oh, Y., Yeon, J., Kang, J., Galkin, I., Oh, W., & Cho, K. (2021). Sensorless control of voltage peaks in class-E single-ended resonant inverter for induction heating rice cooker. *Energies*, 14 (4545), 1-12. https://doi.org/10.3390/en14154545

Ribas, J., Quintana-Barcia, P. J., Cardesin, J., Calleja, A. J., & Corominas, E. L. (2018). LED series current regulator based on a modified class-E resonant inverter. IEEE Transactions in Industrial Electronics, 65 (12), 9488-9497. https://doi.org/10.1109/TIE.2018.2822618

Sarnago, H., Burdio, J. S., & Lucia, O. (2023). Dual-output extended-power-range quasi-resonant inverter for induction heating appliances. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 38 (3), 3385-3397. https://doi.org/10.1109/TPEL.2022.3226497

Sevim, E., & Çetin, E. (2022). The performance comparison of the SiC and Si mosfets used in the 3-phase brushless DC motor drives for electric vehicles. *International Journal of Automotive Science and Technology*, 6 (4), 331-339. https://doi.org/10.30939/ijastech

Sivkov, O., Novak, M., & Novak, J. (2018, December). Comparison between Si IGBT and SiC MOSFET Inverters for AC Motor Drive. *2018 18th International Conference on Mechatronics - Mechatronika (ME)*, (pp. 1-5)

Wang, Y., Li, F., Qiu, Y., Gao, S., Guan, Y., & Xu, D. (2019). A single-state LED driver based on flyback and modified class-E resonant converters with low-voltage stress. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 66 (11), 8463-8473. https://doi.org/10.1109/TIE.2018.2890502

Xu, J., Tong, Z., & Rivas-Davila, J. (2022). 1 kW MHz wideband class E power Amplifier. *IEEE Open Journal of Power Electronics*, 3 (2022), 84-92. https://doi.org/10.1109/OJPEL.2022.3146835

Yalçın, S., Göksu, T., Kesler, S., & Bingöl, O. (2020). Determination of conducted EMI in SiC based dual active bridge converter. *International Journal of Applied Mathematics Electronics and Computers*, 8 (4), 241-244. https://doi.org/10.18100/ijamec.801730

Yamamoto, A., Omori, H., Fukuda, K., Michikoshi, H., Kimura, N., Morizane, T., & Nakaoka, M. (2017, October). Optimum design of a new single-ended wireless EV charger and comparative thermal evaluation of SiC-MOSFET and Si-IGBT. *2017 19th International Conference on Electrical Drives and Power Electronics (EDPE)* (pp. 76-81). https://doi.org/10.1109/EDPE.2017.8123259

Zhang, L., Yuan, X., Wu, X., Shi, C., Zhang, J., & Zhang, Y. (2019). Performance evaluation of high-power SiC MOSFET modules in comparison to Si IGBT modules. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 34 (2), 1181-1196. https://doi.org/10.1109/TPEL.2018.2834345

Zhang, D., Lu, L., Song, W., Min, R., Tong, Q., Zhang, Q., Peng, H., & Zhou, K. (2023). Optimal duty ratio assisted PFM control for VHF isolated class E DC-DC converter. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 38 (12), 15467-15480. https://doi.org/10.1109/TPEL.2023.3317910

Zhao, T., Wang, J., Huang, A. Q., & Agarwal, A. (2007, September). Comparisons of SiC MOSFET and Si IGBT based motor drive systems. *2007 IEEE Industry Applications Annual Meeting* (pp. 331-335). https://doi.org/10.1109/07IAS.2007.51

KSÜ Mühendislik Bilimleri Dergisi, 28(2), 2025
Araştırma Makalesi

KSU J Eng Sci, 28(2), 2025
Research Article

Kahramanmaras Sutcu Imam University
Journal of Engineering Sciences

Geliş Tarihi : 20.10.2024
Kabul Tarihi :17.01.2025

Received Date : 20.10.2024
Accepted Date : 17.01.2025

NEHİR TİPİ SANTRALLERDEKİ IZGARA KİRLİLİK ORANLARININ MAKİNE ÖĞRENME YÖNTEMLERİ İLE TAHMİNİ

PREDICTION OF GRID POLLUTION RATES IN RIVER-TYPE POWER PLANTS USING MACHINE LEARNING METHODS

Kağan KONU[1], (ORCID: 0009-0002-6466-0799)*
Prof. Dr. Osman BİLGİN[2], (ORCID: 0000-0002-4576-0113)
Doç. Dr. Hakan AÇIKGÖZ[3], (ORCID: 0000-0002-6432-7243)

1 Gaziantep İslam Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, Elektrik-elektronik Mühendisliği Bölümü, Gaziantep, Türkiye
2 Gaziantep İslam Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, Elektrik-elektronik Mühendisliği Bölümü, Gaziantep, Türkiye
3 Kahramanmaraş İstiklal Üniversitesi Yazılım Mühendisliği Bölümü, Kahramanmaraş, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Kağan KONU, kagankonuu@gmail.com

ÖZET

Izgara kirlilik değeri farklı konumlara yerleştirilen sensörlerin ölçtüğü basınç değerlerinden elde edilmektedir. Sensörlerin kalibrasyonunun bozulması veya çevresel faktörlerle hatalı ölçümler yapılması ünitelerin verimsiz ve sağlıksız çalışmalarına neden olmaktadır. Bu çalışmada, ilk olarak Karkamış hidroelektrik santralinin SCADA sisteminden alınan örneklerden oluşan bir veri seti toplanmıştır. Bu veri seti sensörlerden alınan debi, güç, düşü ve ızgara kirliliğine ait ölçümlerden oluşmaktadır. Izgara kirlilik tahminini gerçekleştirmek için toplanan veri seti eğitim, doğrulama ve test alt setlerine ayrılmıştır. Eğitim verileri ile makine öğrenme yöntemleri için eğitim çalışması gerçekleştirilmiştir. Daha sonra ise ızgara kirlilik tahmini için makine öğrenme yöntemlerinin performansları test veri seti üzerinde farklı ünitelerde karşılaştırılmıştır. Gerçekleştirilen çalışmalardan, ince ağaç modeli ile en iyi korelasyon katsayısı (R) değerlerini ünite-1 için 0.9833, ünite-2 için 0.9716, ünite-4 için 0.9792 ve ünite-5 içinde 0.9810 ile sağlamıştır. Elde edilen sonuçlardan makine öğrenme yöntemleri ile ızgara kirlilik tahminin etkin bir şekilde yapılabileceği açıkça gözlemlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Izgara kirlilik tahmini, makine öğrenmesi, karar ağaçları, destek vektör makineleri

ABSTRACT

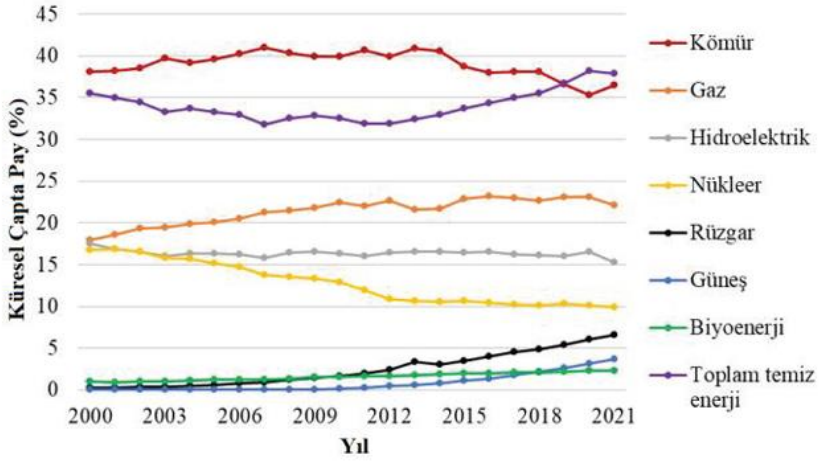
The grid pollution value is obtained from the pressure values measured by sensors placed at different locations. Deterioration of the calibration of the sensors or incorrect measurements due to environmental factors cause the units to operate inefficiently and unhealthily. In this study, firstly, a dataset consisting of samples taken from the SCADA system of Karkamış hydroelectric power plant are collected. This dataset consists of flow, power, head and grid pollution measurements taken from the sensors. The collected dataset is divided into training, validation and test subsets to perform grid pollution prediction. Training study is realized for machine learning methods with training data. Then, the performances of machine learning methods for grid pollution prediction are compared on different units on the testing dataset. From the studies, the best correlation coefficient (R) values are provided with the thin tree model as 0.9833 for unit-1, 0.9716 for unit-2, 0.9792 for unit-4 and 0.9810 for unit-5. It is clearly observed from the obtained results that grid pollution prediction can be done effectively with machine learning methods.

Keywords: Grid pollution prediction, machine learning, decision trees, support vector machines

ToCite: : KONU, K., & BİLGİN, O., AÇIKGÖZ, H., (2025). NEHİR TİPİ SANTRALLERDEKİ IZGARA KİRLİLİK ORANLARININ MAKİNE ÖĞRENME YÖNTEMLERİ İLE TAHMİNİ. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 28(2), 613-629.

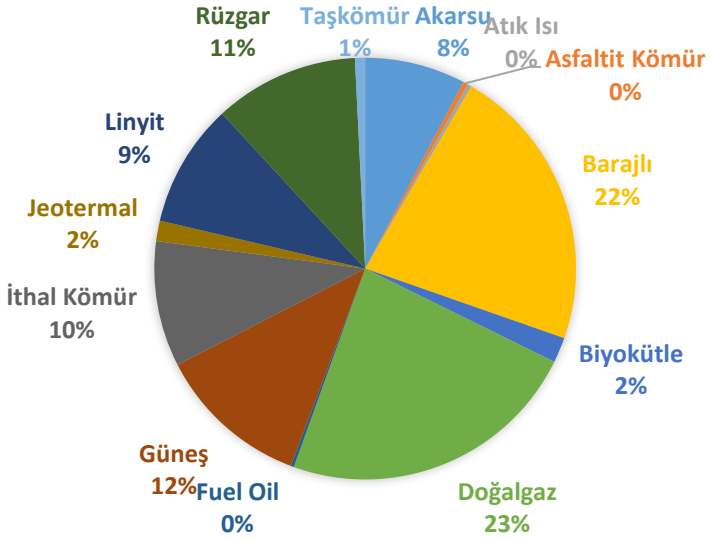
GİRİŞ

Enerji insanlığın hayatını devam ettirebilmesi için en temel unsurlardan biridir. Pamir, enerjiyi "işe dönüştürülen şey" olarak tanımlamaktadır. Enerjinin fizikteki kullanımı ise bir fiziksel sistemin ne kadar iş yapabileceğini ya da ne kadar ısı transferi yapabileceğini göstermektedir (Pamir, 2017). Tüm maddelerin bir enerjisi mevcuttur. Maddelerin enerjisi fiziksel veya kimyasal olarak dönüştürülüp ekonomik olarak kullanılabiliyorsa bu maddeler enerji kaynakları tanımına girmektedir (Coşkun, O & Doğanay, H,2020). Enerji kaynakları kullanışlarına ve dönüştürülebilmelerine göre yenilenebilir ve yenilenemez enerji kaynakları olmak üzere iki ana başlık altında ele alınmaktadır (Koç & Şenel,2013). Yenilenemez enerji kaynaklarının çevreye verdiği zarar çok fazladır. Bu zararı azaltmak ve önlemek için yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı her geçen gün hızlanarak artmaktadır. Şekil 1'de küresel çapta enerji kaynaklarından elde edilen elektrik enerjisine ait üretiminin değişimi yıllara göre sunulmuştur (Özbektaş vd., 2023).



Şekil 1. Küresel çapta yıllara göre farklı enerji kaynaklarından elde edilen elektrik enerjisi üretim miktarları

Hidroelektrik santraller (HES'ler), suyun hidrolik akım enerjisini elektrik enerjisine dönüştürmek ve sudan elektrik enerjisi üretmek amacı ile kurulan tesislerdir. Santraller kurulacağı yerin topografik durumuna göre çeşitli şekillerde yapılabilmektedir. Bununla birlikte hidrolik santraller; düşü, güç, havza, yapı, çalışma ve depolama özelliklerine göre sınıflandırabilmektedir (Başeşme, 2003). 2024 yılının mart ayı verilerine göre ülkemizin elektrik üretimi kurulu gücünün 107.959 MW' a ulaştığı görülmektedir.



Şekil 2. Türkiye elektrik üretimi Mart ayı sonu itibarıyla kurulu gücümüzün kaynaklara göre dağılımı

2024 yılı mart ayı sonu itibarıyla kurulu gücümüzün kaynaklara göre dağılımı ayrıntılı olarak Şekil 2 de verilmiştir. Şekilde de görüleceği gibi kaynakların yaklaşık %29,6'sı hidrolik enerji, %23,2'si doğal gaz, %20,2'si kömür, %11,2'si rüzgâr, %11,7'si güneş, %1,6'sı jeotermal ve %2,5'i ise diğer kaynaklar şeklinde sıralanmaktadır. Ayrıca ülkemizde elektrik enerjisi üretim santrallerinin sayısı, 2024 yılı mart ayı sonu itibarıyla 18.231'e (Lisanssız santraller dâhil) ulaşmıştır. Mevcut santrallerin 757 adedi hidroelektrik, 69 adedi kömür, 364 adedi rüzgâr, 63 adedi jeotermal, 363 adedi doğal gaz, 16.144 adedi güneş, 471 adedi ise diğer kaynaklı santrallerdir (T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı, 2024). Bu doğrultuda nehir tipi santrallerin genelinde yapılacak verim artışı toplam üretime büyük katkı sağlayacaktır. Böylece daha az fosil yakıt kullanılmış olacaktır.

Literatürde HES'lerde verimliliği ele alan ve yapay zekâ ile analiz edilen pek çok çalışma vardır. Ülkemizde yapılan çalışmalarda suyun mevsimsel değişimleri araştırılarak üretilecek enerji ve verim tahmini yapılmıştır. Benzer olarak iklimsel değişikliklerin verime olan etkisinin incelenmesine dair çalışmalarda bulunmaktadır. Çalışmaların ortak özelliği çalışma koşulları veri olarak girilip üretim ve verimlilik tahmininin yapılmasıdır. Çalışmalarda genellikle göl havza kapasitesi ve üretim ilişkisi ele alınmaktadır (İnallı vd., 2014; Karakus ve Altun, 2014; Makas ve Karaatlı, 2016; Emeç vd., 2019). Literatürde yapılan çalışmaların bir kısmında ise ızgara kirliliğinin verimle olan ilişkisinin ele alındığı görülmüştür. Bununla birlikte ızgara tasarımı, kirliliğin akışa ve düşüye olan etkisi üzerinden verimlilik çalışmaları gerçekleştirilmiştir (Hammid ve ark., 2016; Walczak vd, 2020; Bragalli vd., 2023). Bu çalışmalarda hem deneysel hem de sahada uygulamalı olarak kirliliğin oluşturduğu düşü kayıplarına odaklanılmıştır.

Izgara kirliliği verim ilişkisine dair yapılan çalışmalarda Hribernik yıl içerisindeki kirlilik durumlarını takip ederek kirlilik tahmin çalışması gerçekleştirmiştir. Yapmış olduğu çalışmada kirliliğin 20 MWh enerji kaybına yol açtığını tespit etmiştir. Bu çalışmada Hribernik tarafından kirliliğin mevsimsel olarak değiştiği de tespit edilmiştir. Ayrıca yazar, ızgara kirliliğinin temizlik periyotlarını değiştirerek ızgara kirlilik durumlarına göre optimum verimi sağlamaya çalışmıştır. Çalışmada yapılan kirlilik tahmin modelinin %97 doğruluk oranı ile yüksek performanslı bir sonuç verdiği tespit edilmiştir (Hribernik, 2020).

Walczak vd., hidrolik kanalda ızgaraya yerleştirilmiş bir kuvvet ölçer ile su üzerinde bulunan buzların su akışını etkilediğine dair farklı bir çalışma yapmıştır. Yapılan araştırmalar, küçük hidrolik santrallerde ızgarada biriken buzun üretimi olumsuz etkileyebileceğini, buna bağlı olarak verimin sürükleme kuvvetinin artmasıyla (düşü kayıplarının artmasıyla) ilişkili olduğunu göstermiştir. Çalışmada ayrıca ızgaralardaki buz görünümünün düşü kayıplarını %14'e kadar arttırdığı tespitinde bulunulmuştur (Walczak vd, 2020).

Himreen yaptığı çalışmada hidroelektrik santralinde hidrolik net düşü, verimlilik, su debisi gibi değişkenler üzerinden santralin üretim değerlerini yapay sinir ağları (ileri yayılım-geri beslemeli) yardımıyla tahmin etmiştir. Buna bağlı olarak üretim talebinin karşılanmasında YSA modelinin kullanılması üretimin daha doğru ve etkili şekilde yapılmasını sağlamıştır (Hammid vd., 2016).

Karakaya Hidroelektrik Santralinin verim ve elektrik üretimi değerlerinin tahmini yapay sinir ağları ile çalışılmıştır. Yapay sinir ağlarının girdileri olarak; ortalama nem (%), yağış miktarı (mm), açık yüzey buharlaşma miktarı, ortalama basınç (hPa), ortalama bulutluluk ve ortalama sıcaklık (°C), özgül su sarfiyatı (m^3/ kWh), ortalama net düşü (m), gelen suyun debisi (m^3/ sn) değerlerini kullanmışlardır. Yapay sinir ağlarının çıkış verileri ise, yüzdelik verim ve üretim değeri olarak alınmıştır. Yapay sinir ağlarının oluşturulmasında MATLAB programı kullanılmıştır. Çalışma sonucunda Karakaya Hidroelektrik Santralinin aktif elektrik üretim değeri ve santralin enerji verimi yüksek bir performans ve çok düşük hatalarla tahmin edilmiştir (İnallı vd., 2014).

2014 yılında Karakuş ve Altun, Hirfanlı barajı örneğinde yapay sinir ağları ile hidroelektrik santralinin verim- üretim tahminini yapmışlardır. Bu araştırmada meteorolojiden alınan buharlaşma, yağış miktarı vb. veriler alınarak verim ve üretim tahmini yapılmıştır. Çalışmada sonuç olarak hidroelektrik santralinin verimlilik tahmini için iklimsel faktörlerin etkisi olduğu tespitinde bulunulmuştur (Karakus ve Altun, 2014).

2016 yılında ise Makas ve Karaatlı yapmış oldukları çalışmada, Isparta ili Aksu ilçesinde yer alan kaynağını Yenice deresinden alan bir hidroelektrik santralin bir yıllık elektrik üretimi tahminini yapmışlardır. Aylık ortalama olarak

alınan yağış, nem ve debi verileri Yapay Sinir Ağlarına (YSA) girdi olarak alınmıştır. 2007-2013 tarihlerinde alınan veriler arasındaki ilişki ileri beslemeli geri yayınım sinir ağı yöntemi ile analiz edilip 2014 yılı için yüksek doğrulukta üretim tahmininde bulunmuşlardır. Sonrasında aynı çalışmaya 2014 verileri eklenerek aynı YSA modeli ile 2015 yılı elektrik üretimi tahmin edilmiştir (Makas ve Karaatlı, 2016).
Emeç vd., Türkiye'deki Hidroelektrik Santrallerin Etkinliklerinin Veri Zarflama Analizi ile Değerlendirilmesi adlı çalışmasında 51 HES'in analizini yapmışlardır. Çalışmada kurulu güç, üretim kapasitesi (yıllık), harcanması gereken su miktarı girdi olarak alınmıştır. Ne kadar üretim yapıldığı ve üretim ile kaç insan-hanenin elektrik ihtiyacının karşılandığı bilgisi çıktı olarak alınmıştır. Buradan hareketle etkin santral oranı %19.1 olarak tespit edilmiştir (Emeç vd., 2019).

Diniz ve ark., Brezilya'da bulunan iki hidroelektrik santral için, ortalama birim verimlilik faktörü ve elde edilen üretim ile ünitenin çalışma koşullarına göre verimlilik değişimi üzerinden yapılan üretim arasında bir değerlendirme yapmışlar. Bu çalışmada iki farklı matematiksel model geliştirilmiş ve türbin generatör verimi analiz edilmiştir. Çalışmada ünite verimlilik eğrilerine bağlı kalınarak üretimin planlı şekilde yapılması ve düşünün dikkate alınmasıyla çalışmanın fayda vereceği öngörülmüştür (Diniz vd., 2007).

Bragalli vd., net düş ve verimlilik dalgalanmalarının birleşik etkisini göstermek için küresel verimlilik kavramını kullanmışlardır. Deşarj alanındaki kaybolan enerjinin işlenmiş akış hızıyla ilişkilendirilmesi yaklaşımını benimsemişlerdir. Bu yaklaşım, Bologna'nın (İtalya) merkezinde yer alan mevcut Cavaticcio nehir tipi santralinde uygulanmıştır. Sonuçlar, deşarj sırasında kaybolan enerjideki dalgalanmaların, net yük değerini yukarı akış kayıplarından daha fazla etkileyebileceğini göstermektedir (Bragalli vd., 2023).

Alatas vd., Mikro hidroelektrik santrali girişinde çöp tıkanmasını en aza indirmek için yatay çöp rafı yönlendirici sistem çalışması ile İlgili bir çalışma yapmışlar. Bu çalışmada Endenozya da Yogyacarta da bulunan 8 adet mini HES'in ortak problemi olan ızgara kirliliğinin santral çalışmasına olumsuz etkisini problem olarak belirlemiştir. Problem çözümü için ızgara tasarımını değiştirerek bu kirliliğin üretime olan olumsuz etkisini mümkün olduğunca ortadan kaldırılması amaçlanmıştır. Çalışmada kirliliğin etkisini azaltmak için Yatay Çöp Rafı Yönlendirici Çöp Kutusu ile uygun teknoloji yeniliğine ihtiyaç olduğunu belirtmişlerdir. (Alatas vd., 2022).

Nehir tipi hidrolik santraller; nehir üzerinde kurulu, göl kapasitesi olmayan ya da çok az olan yapılardır. Su tutma kapasitelerinin az olması nedeni ile gelen suyun bir an önce üretime çevrilmesi gerekmektedir. Bu tip santrallerde genellikle ızgara kirlilik problemi yaşanmaktadır ve bu durum üretim kaybına yol açmaktadır. Bu çalışmada, ızgara kirliliğinin tespiti veya tespitindeki hataların ortadan kaldırılması için makine öğrenmesi temelli bir tahmin sistemi geliştirilmiştir. İlk olarak, çalışma sahası olarak 189 MW kurulu güce sahip olan Karkamış HES seçilmiştir. Santralden alınan güç, debi, düşü ve ızgara kirlilik örneklerinden oluşan bir veri seti toplanarak makine öğrenme yöntemlerine giriş olarak uygulanmıştır. Daha sonra ise farklı üniteler için test çalışmaları gerçekleştirilerek detaylı bir analiz gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın diğer kısımları ise kısaca şu şekilde özetlenebilir. 2. Bölüm Karkamış HES'ten elde edilen veri seti hakkında genel bilgileri içermektedir. 3. Bölümde kullanılan makine öğrenme yöntemlerinin detaylı açıklamaları sunulmuştur. 4. Bölümde ise deneysel çalışmalar sunulmuştur. Son olarak, elde edilen sonuçlar ışığında genel bir değerlendirme ise 5. Bölümde gerçekleştirilmiştir.

VERİ SETİNİN TOPLANMA AŞAMALARI

Karkamış Hidroelektrik Santrali; Gaziantep ilinin Karkamış ilçesine 14 km mesafede yer almaktadır. Güneydoğu Anadolu Projesi (GAP) kapsamında Fırat Nehri üzerinde inşa edilmiş son barajdır. Karkamış HES 6 adet ünitesinin herbiri 31,5 MW enerji kapasitesi ile toplam 189 MW kurulu güce sahiptir. Yıllık üretim kapasitesi 652 milyon kWh olarak hesaplanmaktadır. Fırat Havzası'nda bulunan Karkamış Barajı ve Hidroelektrik Santrali'nin inşaatına 07.12.1995 tarihinde başlanmış ve 1999 yılında tamamlanarak işletmeye alınmıştır. Kil çekirdekli dolgu tipinde inşa edilen barajın gövde hacmi 2.100.000 m^3, dere yatağından yüksekliği 29 m, gövde uzunluğu ise 1.608 m'dir. Gölün hacmi 156,9 hm^3, normal su seviyesindeki gölalanı ise 28,4 km^2'dir (EÜAŞ,2024). Karkamış HES'e ait fotoğraf ise Şekil 3'te verilmiştir.



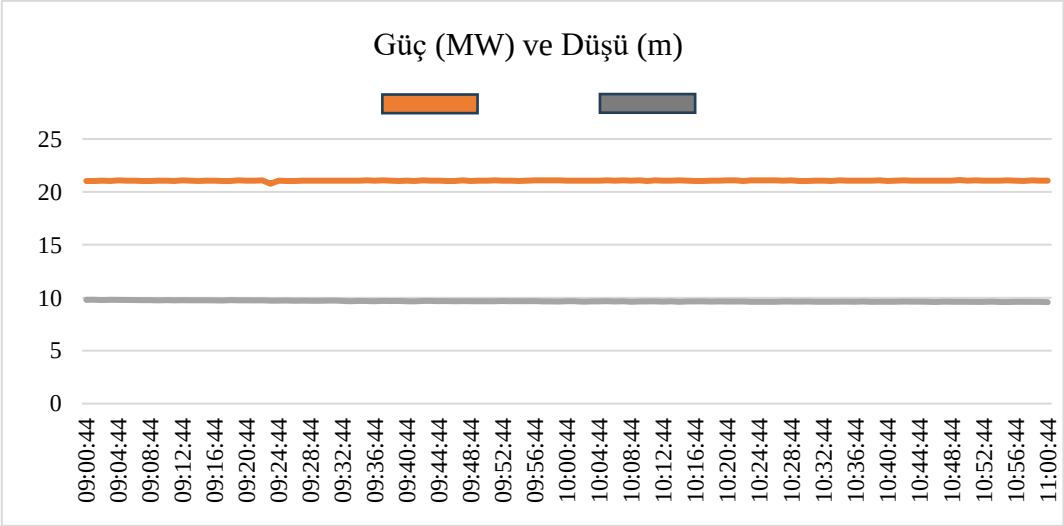
Şekil 3. Karkamış Hidroelektrik Santrali

Nehir tipi ve yatay kaplan bir santral olan Karkamış HES'inde kronik problemleri arasında ızgara kirliliği yer almaktadır. Yosun ve çevresel atıklar ızgarada birikip su akışını engellemektedir. Bu durum; ızgara temizken üretilen enerjiyi, ızgara kirliyken üretmeye çalıştığımızda çok daha fazla su kullanmamıza ve verimsiz çalışmaya neden olmaktadır. Santralin ızgara temizliğinin yapılmasına ait çalışma ise Şekil 4'te gösterilmiştir.

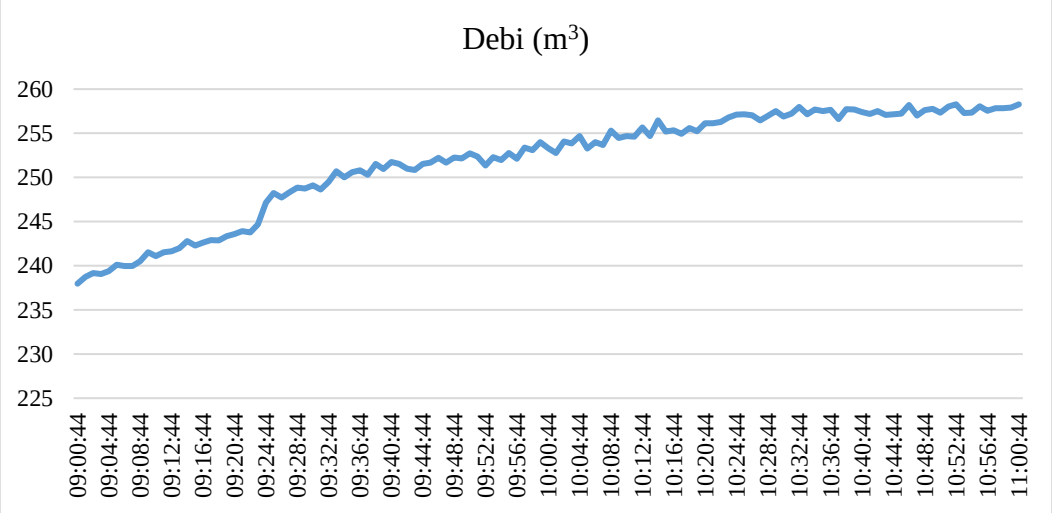


Şekil 4. Karkamış HES ızgara temizlik çalışması

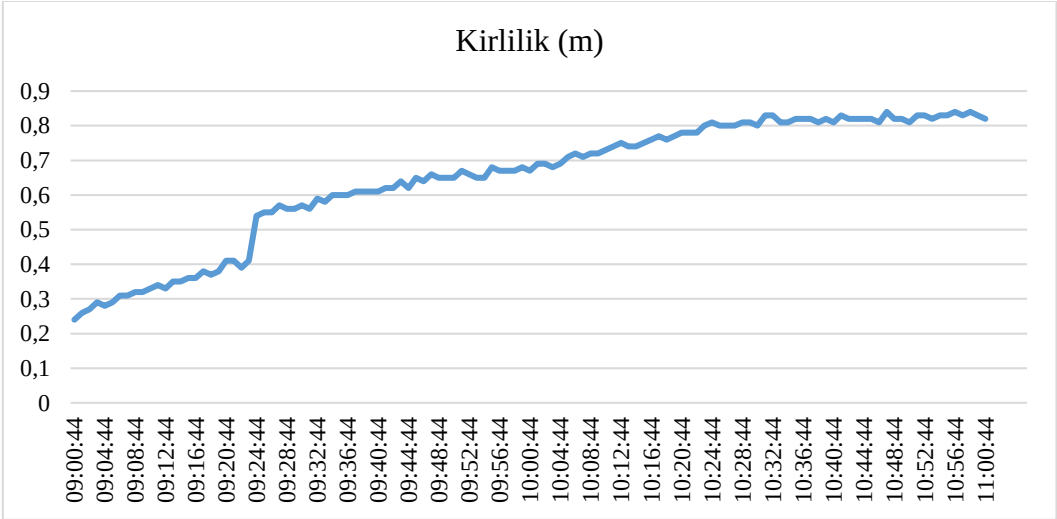
Karkamış HES'in 5. Ünitesinde bu durumun örneği aşağıdaki grafiklerle anlatılmıştır. Karkamış HES Ünite-5 için 2 saat içerisinde ızgara kirliliğinin artması ile debi miktarındaki değişim örneğini aşağıda verilmiştir.



Şekil 5. Karkamış HES Ünite-5'e ait güç ve düşü grafiği

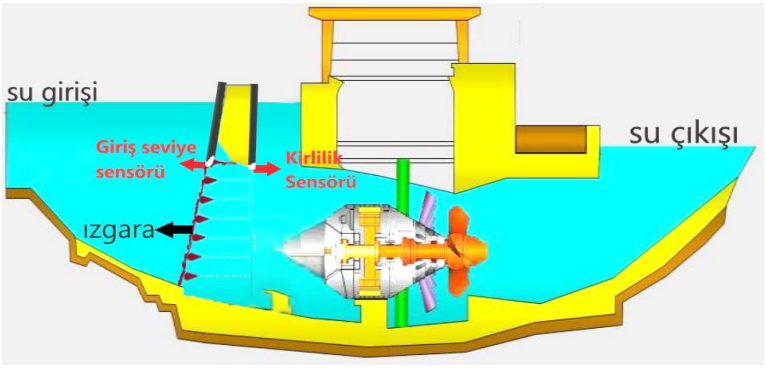


Şekil 6. Karkamış HES Ünite-5 için debi grafiği



Şekil 7. Karkamış HES Ünite-5 kirlilik grafiği

Bu örnekte üretim değerlerinin sabit tutulması için artan debi miktarı görülmektedir. Bu durum verimsiz çalışmayı göstermektedir. Çalışma başlangıcından sonuna kadar 21 MW üretim yapıldığı ve düşü miktarının da değişmediği Şekil 5' te görülmektedir. Ancak üretim ve düşü sabitken kullanılan su miktarı ile ızgara kirliliğinin doğru orantılı olarak arttığı Şekil 6-7'de görülmektedir. Izgara kirliliğindeki artış su kullanımında %19 artış yaşanmasına neden olmuştur. Bu durum ızgara kirliliğinin oluşturduğu verimsiz çalışmaya bir örnektir.



Şekil 8. Kirlilik ölçüm sensörlerinin santraldeki konumları

Izgara kirlilik tespiti, Şekil 8'de gösterilen ızgara girişine ve ızgara sonrasında dinlenme havuzu olarak adlandırılan konuma yerleştirilen basınç sensörleri ile yapılır. Bu basınç ölçüm değerleri SCADA sisteminde kot bilgisi olarak gösterilir. İki sensör arasındaki fark kirliliği verir. Bu sistemde daldırma tip basınç sensörleri kullanılmaktadır. Basınç sensörleri statik basınç değişimlerini ölçerler. Kablolar yardımıyla basınç değişimleri kumanda odasındaki SCADA sistemine aktarılır. Sensörün sabitlendiği yerin kot bilgisi yazılıma girilir. Sensör su yüksekliğine göre basınç bilgisini okur ve sisteme bir değer olarak aktarır. Bu değer yazılımda mevcut kot değerleri ile toplanır ve su seviye bilgisi elde edilir. Kullanılan sensöre ait teknik özellikler Tablo 1'de verilmiştir. Şekil 9'da arızalı ölçüm yapan bir sensör fotoğrafı verilmiştir.

Tablo 1. Seviye ölçüm sensör özellikleri

Özellikler	Teknik Açıklama
Kulandan kısım	Izgara kirliliği seviye ölçüm sensörleri
Tipi	Hidrostatik daldırma tip basınç sensörü
Çalışma aralığı	0-3 bar - 0-30 metre su sütunu
Hassasiyet	± % 0,1
Çalışma akımı	4-20 mA



Şekil 9. Arızalı seviye ölçüm sensörü

MAKİNE ÖĞRENME YÖNTEMLERİ

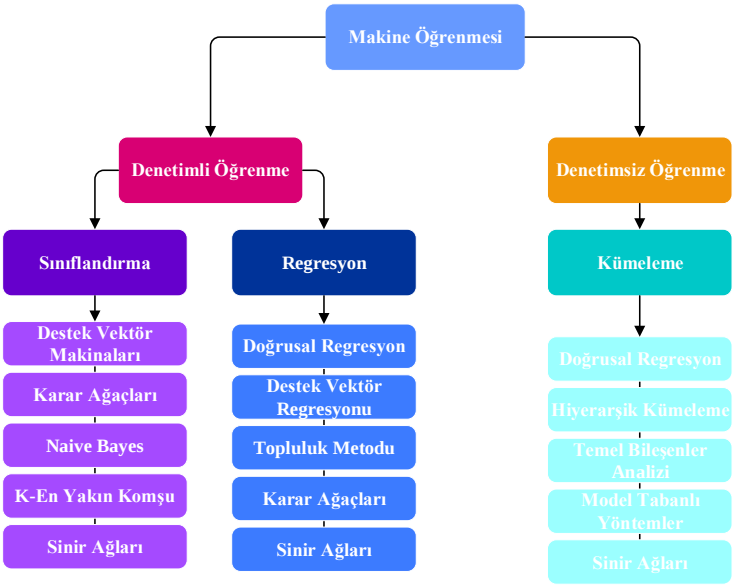
Bilgisayarda bir problemi çözmek için uygun bir algoritmaya ihtiyaç duyulmaktadır. Algoritma, sonuca ulaşabilmek için mevcut verilere kural ve formüllerin uygulanmasıdır. Veri setinde bulunan girdi-çıktı arasında bağlantının karmaşık olmaması durumlarında algoritma ile problem çözülür. Ancak algoritmanın oluşturulamadığı veya yeterli olamadığı durumlarda örnek veriler kullanılarak makine öğrenmesi ile sonuca ulaşılması hedeflenir. Makine öğrenimi ile eğitim gerçekleştirmek için istatistik teorisinden yararlanarak matematiksel modeller oluşturarak örneklerden çıkarım yapılmaktadır (Alpaydın, 2014). Bu çalışmada ise makine öğrenim programlarının eğitimi için MATLAB'da bulunan Regression Learner kütüphanesinden yararlanılmıştır.

Makine öğrenme yöntemleri sınıflandırılması; denetimli öğrenme, denetimsiz öğrenme ve destekleyici öğrenme olmak üzere üç başlık altında yapılmaktadır. Literatürde genellikle öğrenme yöntemleri denetimli ve denetimsiz olmak üzere iki grupta sunulmaktadır. Denetimli öğrenme modellerinde sınıflandırma ve regresyon kullanılırken denetimsiz öğrenme modelleri ise kümeleme uygulamalarında kullanılmaktadır (Metlek ve Kayaalp,2020).

Denetimli öğrenme, girdi ve çıktı verilerine dayalı bir tahmin modelidir. Denetimli öğrenme algoritmaları; sınıflandırma ve regresyon algoritmalarını içermektedir. Denetimli öğrenmede çıktı, sınırlı bir değer kümesiyle sınırlandırıldığında sınıflandırma ile öğrenme yapılmaktadır. Ancak çıktı bir aralık içinde herhangi bir sayısal değere sahip olduğunda ise regresyon algoritmaları kullanılmaktadır (Ray, 2019).

Denetimsiz (gözetimsiz, eğiticisiz) öğrenme, istenen çıktı sonucu için özel bir tanımlama/etiketleme/sınıflandırma yapılmadığında veya belirsizlik durumu söz konusu olduğunda veri kümesindeki gizli kalmış ilişki ve örüntüleri

tanımlamak için algoritmaların kullanılması anlamına gelmektedir. Diğer bir deyişle, bir hedef değişken (çıktı değeri) bulunmayıp verileri ilişkisel yapıya göre kümeye ayırma hali söz konusu olmaktadır. Algoritmaların dışardan bir rehberliğe sahip olmadan, kendi kendine veri noktalarını gruplamasına olanak tanınır. Denetimsiz yöntemler veriyi tanımlamak amacıyla kullanılır. Denetimsiz makine öğrenmesi kümeleme yöntemleri olarak incelenir. Regresyon, üzerinde durulan yanıt değişkeni ile ilişkili olabileceği düşünülen açıklayıcı değişkenlerin bir fonksiyonu olarak ifade edilmektedir. Değişkenler arasındaki ilişkinin fonksiyonel şekli regresyon modelleri ile incelenmektedir (Arı ve Önder, 2013). Makine öğrenme modellerinin sınıflandırılması Şekil 10'daki gibidir.

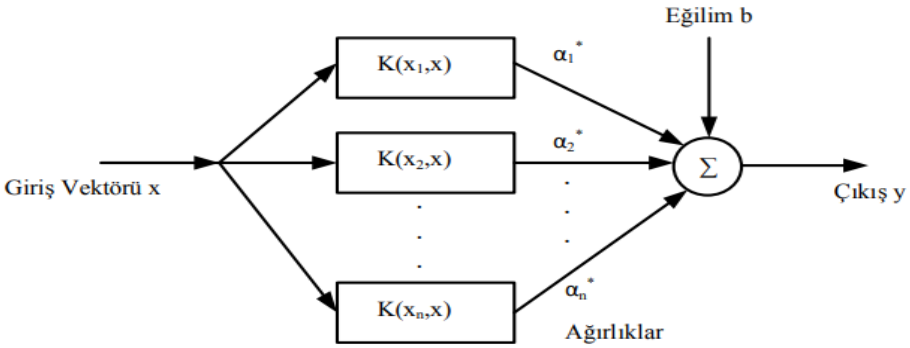


Şekil 10. Makine Öğrenme Modelleri

Bu çalışmada kullanılan veri setindeki girdi- çıktıların ilişkili olması ve çıktıların sayısal bir değere sahip olması gibi etkenlerden dolayı denetimli öğrenme modeli kullanılmıştır. Denetimli öğrenme içerisinden yüksek boyutlu veri setinde başarılı olan destek vektör makineleri ve yüksek öğrenim performansı gösteren karar ağaç modelleri ile çalışılmıştır.

Destek Vektör Makineleri

Makine öğrenim yöntemi modellerinden destek vektör makinaları (DVM), sınıflandırma ve regresyon problemlerinde çokça kullanılır. DVM, ilk olarak Vladimir Vabnik ve Alexey Shervonenikis'in çalışmaları ile ortaya çıkmıştır (Daş vd., 2019). Destek vektörü regresyonu, veri setindeki etiketli değerler ile sürekli yeni değer üretimini sağlayan bir model kullanan denetimli öğrenme algoritmasıdır. Geleneksel olarak yapılan regresyon modellerinde hedef hatayı en aza indirecek bir fonksiyonla algoritmayı oluşturmaktır. Bunun yanı sıra DVM regresyonu, veri setindeki değerlerden çıkan sonuçların marjı yüksek olanlar için toleranslı bir algoritma da oluşturur (Bekçioğulları vd., 2021). Destek vektör makinalarının genel yapısı Şekil 11'de gösterildiği gibidir.



Şekil 11. Destek vektör makinalarının genel yapısı

Bu durum destek vektör regresyonlarının diğer yöntemlere nazaran genel hata ve uygulama hatalarının üst sınırı aşağı çekerek hata riskini düşürür. Veri setinde bulunan ve doğrusal olmayan giriş-çıkış verilerinin kümesi T = $\{(xi, yi)$: $i = 1, 2, \dots, N\}$ gösterilmektedir. Tahmin değerini gösterecek fonksiyon ise $f(x) = wx + b$ seklinde ifade edilir. Burada kullanılan w ve b değerleri hata oranını minimize etmek için kullanılan çeşitli fonksiyonlarla hesaplanır. Bu fonksiyonlar gerçek değer ile hesaplanan tahmin değeri arasındaki farkı azaltacak yöntemleri içerir (Yoldaş, 2023).

$$|y - f(x)| = \max\{0|y - f(x)| - \varepsilon\}\ , \varepsilon > 0 \quad (1)$$

$$\min_{w,b} \frac{1}{2} w^T . w + c \sum_{i=1}^{i} (\xi_i + \xi_i^*) \quad (2)$$

Denklem 2'de c sabit olup dengeleme ve düzgünleştirme yapar. Bu formülde kısıt, hata değerinin gerçek değerle hedef değer arasındaki farktan mutlak manada küçük olmasıdır. Doğrusal olmayan durumlarda uygulanan denklem ise aşağıda verilmiştir.

$$maks \frac{1}{2} \sum_{i=1}^{N} \sum_{j=1}^{N} (a_i^+ - a_i^-)(a_j^+ - a_j^-) k(x_i^+ . x_j^-) - \varepsilon \sum_{i=1}^{N} (a_i^+ - a_i^-) - \sum_{i=1}^{N} yi(a_i^+ - a_i^-) \quad (3)$$

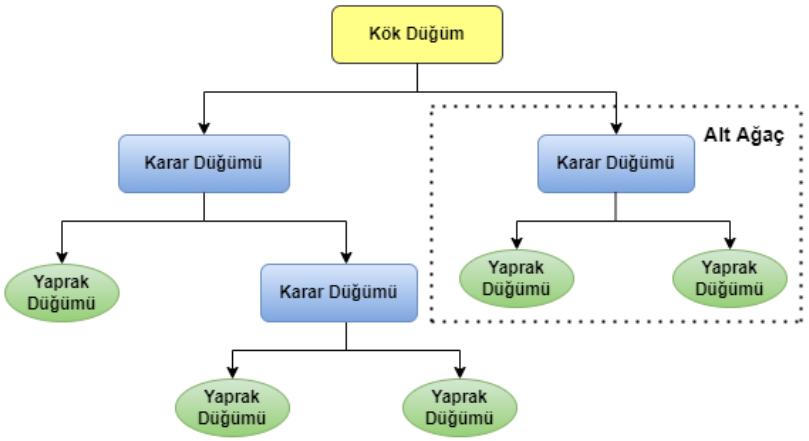
Denklem 4 ile ana fonksiyon denklemleri gösterilmiştir. Denklem 5'te ise ağırlık çarpan değerlerini elde edilmektedir.

$$f(x) = \sum_{i=1}^{N} (a_j^+ - a_j^-) k(x_i x_j) + b \quad (4)$$

$$w = \sum_{i=1}^{N} (a_j^+ - a_j^-) \phi(x_i) \quad (5)$$

Karar Ağaçları

Karar ağaçları, çok değişkenli analizin basit ama güçlü bir şeklidir. Verileri dal benzeri bölümlere ayırmanın çeşitli yollarını tanımlayan algoritmalar tarafından üretilirler. Karar ağaçları, verileri girdi değişkenlerinin kategorilerine göre alt kümelere bölerek birinin karar yolunu anlamanıza yardımcı olur (Karakuş, 2001). Karar ağaçları veri setindeki ilişkileri çözerek ağaç diyagramları ile gösterebilmektedir. Karar ağaçlarının kolay ve anlaşılabilir olmasından dolayı, birçok makine öğrenme uygulamasında kullanılmaktadır. Girdi ve çıktı veri setlerinden oluşan KA denetimli bir öğrenme yöntemi ile çalışmaktadır. Bu denetimli yapıda KA, girdi ve çıktı arasındaki bağlantıyı tespit etmektedir (Metlek ve Kayaalp, 2020).



Şekil 12. Karar Ağaç Grafiği

Şekil 12'de karar ağaç modelinin oluşmasına ait bir grafik verilmiştir. Grafikte görüleceği üzere modelin oluşturduğu ağacın tepesinde yer alan eleman kök düğüm olarak isimlendirilmektedir. Kök düğümün altında yer alan her alt düğümün oluşması belirgin bir özellik değerinin farklılığına bağlıdır. Ağaç son düğümlerin oluşmasıyla

tamamlanacak olup bu son düğümlere yaprak adı verilir. Ana kök düğüm ile yaprak arasında kalan kısma dal denilir. Tüm veriler için model uygulanıp yaprak düğümlerinin bitimi ile sonlanır (Daş ve Türkoğlu, 2014).

Karar ağacı ile yapılan regresyon, bir bağlı değişkenin diğer değişkenlerin ilişkisine göre değerlendirip olası değişiklikleri tahmini için uygulanan bir algoritmadır (Kingsford ve Salzberg, 2008). Karar ağacı oluşturmak için kullanılan AID (Automatic Interaction Detector - Otomatik Değişken Seçimi Algoritması), ID3 (Iterative Dichotomiser 3), C4.5, C5, CART (ya da C&RT), CHAID, MARS, SLIQ, SPRINT ve QUEST algoritmalarıdır. Karar ağaç modellerinde en çok kullanılan modellerden CART ve CHAID algoritmaları Denklem 6 ve 7'de verilen eşitlik ile ifade edilebilir. CART algoritmasında her veri, dal dediğimiz iki kısma ayrıldıktan sonra ilk kısımdakiler kendi içerisinde ikinci kısımdakiler ise kendi içerisinde ayrılır. CART algoritmasında tüm değişkenler iki dalın bir yanında yer alırken soldaki grup a ve sağdaki b olarak gösterilir.

$$Gini_a = 1 - \sum_{i=1}^{k} \left(\frac{a_i}{Toplam_a}\right)^2 \quad Gini_b = 1 - \sum_{i=1}^{k} \left(\frac{b_i}{Toplam_b}\right)^2 \tag{6}$$

Sonrasında aşağıda verilen formül ile her bir değişken için ağırlıklandırılma yani $Ginij$ değerleri elde edilir.

$$\mathrm{Gini_{ij}} = \frac{1}{\mathrm{n}}(\mathrm{Toplama} * \mathrm{Gini_a} + \mathrm{Toplamb} * \mathrm{Gini_b}) \tag{7}$$

Gini değeri en düşük olan değer düğüme yerleştirilir ve bölünmeye başlanır. Yeni düğümlerle tekrar eden bu süreç sonlanıp yapraklar bitene kadar devam eder. CHAID (Ki-Kare Otomatik Etkileşim Dedektörü) algoritması CART' tan farklı olarak ikiden fazla dal üretebilmektedir. Eğitim verileri üzerinden hedef değişken ile bağımsız değişkenler arasında ikili olarak çapraz tablolar oluşturulur. Oluşturulan tüm ikili değerler için Denklem 8 kullanılır ve değerler hesaplanır. Bu değerler içerisinde en büyük değere sahip hedef değerle bağlantısı en kuvvetli olan değişken kök düğüme yerleştirilir. Sonrasında ayrılacak dal kalmayana kadar bölünme devam eder (Gacar, 2023).

$$X^2 = \sum_{i=1}^{k} \left(\frac{(Gözlenen\ değer - Beklenen\ değer)^2}{Beklenen\ değer}\right) \tag{8}$$

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Bu bölümde, makine öğrenme yöntemleri ile ızgara kirlilik tahmini için deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. İlk olarak, Karkamış HES SCADA sisteminden 2022 ve 2023 yıllarına ait güç, debi, düşü ve ızgara kirlilik örneklerine ait sayısal değerler toplanmıştır. Toplanan veri setindeki ölçüm ve haberleşme hatalarının oluşturduğu anlamsız değerler tespit edilip filtreden geçirilerek veri setinden çıkarılmıştır. Böylece veri seti hatalardan ve anlamsız değerlerden arındırılmış olarak deneysel çalışma için hazır hale getirilmiştir. Veri setindeki tüm örneklerin %70'i eğitim, %15'i doğrulama ve %15'i de test için ayrılmıştır. Eğitim için ayrılan veri seti makine öğrenme yöntemlerine giriş olarak uygulanarak sonuçlar elde edilmiştir. Makine öğrenme yöntemi olarak ise Karar Ağacı ve DVM tercih edilmiştir. Çalışmada kullanılan makine öğrenme yöntemleri MATLAB/Regression Learner kütüphanesinde bulunan hazır modellerden elde edilmiştir. Tahmin işlemi için yazılan tüm kodlar MATLAB ortamında yazılarak Intel(R) Core(TM) i7-7700HQ CPU@ 2.80GHz, NVIDIA GeForce GTX 1050 ve16 GB RAM özellikli bir iş istasyonu üzerinden gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, deneysel çalışmalardan elde edilen sonuçların değerlendirilebilmesi için, korelasyon katsayısı (R), hataların karesinin ortalamasının karekökü (RMSE) ve hataların mutlak değerlerinin ortalaması (MAE) gibi performans ölçütleri kullanılmıştır. Bu ölçütler kısaca şu şekilde açıklanabilir:

RMSE, uygulanan bir model sonucunda elde edilen tahminler ile gerçek değerler arasındaki sapmayı yani hatayı gösterir. RMSE, tahmin ile gerçek değer arasındaki farkları değerlendirmek için çok yaygın olarak kullanılan hata ölçüm tekniğidir. RMSE değerlerinin sıfıra yakın olması uygulanan modelin performansının yüksek olduğunu gösterir. RMSE, Denklem 9'daki gibi hesaplanabilir (Artuğer & Özkaynak, 2022).

$$\mathrm{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n}\left(P_k^p - \hat{P}_k\right)} \tag{9}$$

R ise bir modelin veri setindeki değişkenliği ne kadar iyi açıkladığını ölçer. 1'e yaklaştıkça, model veriyi daha iyi açıklar. R değeri, verilerin regresyon hattına ne kadar yakın olduğunun istatistiksel bir ölçütüdür ve aşağıdaki gibi matematiksel olarak ifade edilebilir (Zilyas & Yılmaz, 2023).

$$R= \frac{\sum_{k=1}^{n}[(P_k^p-\hat{P}_k^p)(P_k-\hat{P}_k)]}{\sqrt{\sum_{k=1}^{n}(P_k^p-\hat{P}_k^p)^2 \sum_{k=1}^{n}(P_k-\hat{P}_k)}} \quad (10)$$

MAE (Ortalama Mutlak Hata), hatanın mutlak ortalamasıdır. Gerçek değerler ile tahmin sonucu bulunan değerlerin farklarının ortalaması alınarak hesaplanmaktadır. Tahminler ile gerçek değerler arasındaki mutlak farkların ortalamasıdır. MAE değerinin formülü Denklem 11'deki gibi verilebilir.

$$MAE = \frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n}\left(P_k^p - P_k\right) \quad (11)$$

Yukarıda verilen denklemlerde, P_k ve P_k^p ölçülen ve tahmin edilen güçtür. $\hat{P}_k$ ve $\hat{P}_k^p$ ise ölçülen ve tahmin edilen gücün ortalamasıdır.

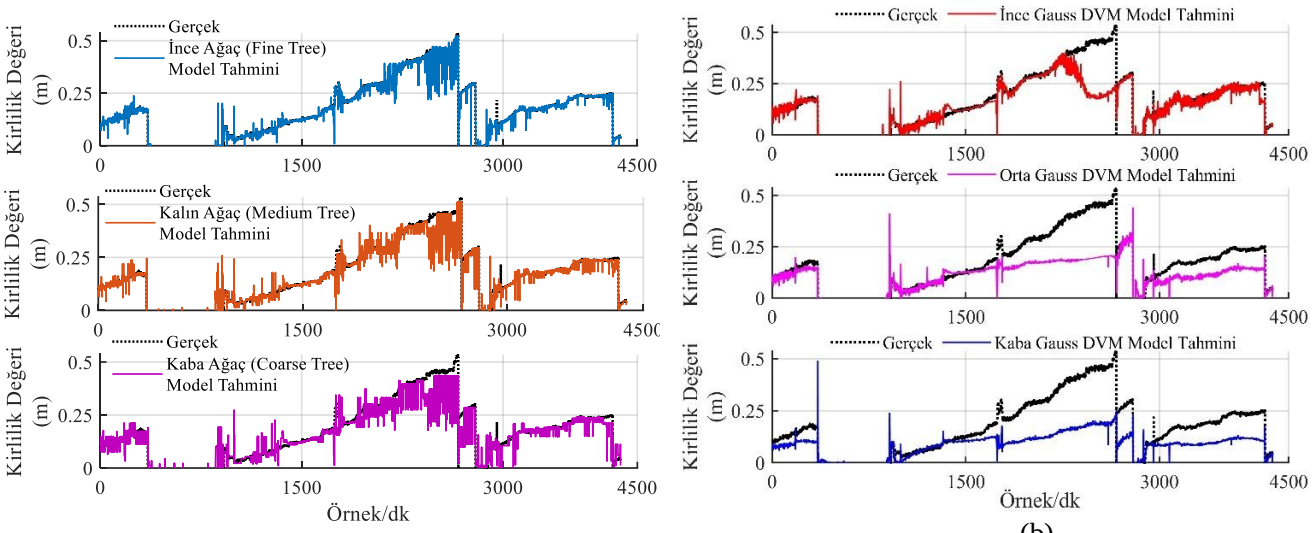
Deneysel Çalışma-1: Ünite-1 İçin Izgara Kirlilik Tahmin Performanslarının İncelenmesi

Bu bölümde, Karkamış HES'te bulunan Ünite-1 için tahmin çalışması gerçekleştirilmiştir. Veri seti olarak üniteye ait güç, debi, düşü ve ızgara kirliliğinden oluşan 90.000 örnek ile bir veri toplanmıştır. Bu veriler üzerinde yapılan filtrelemeler sonucu 16.376 örnek içeren veri seti elde edilmiştir. Ünite-1'in üretim yaptığı zamanlarda ölçülen ızgara kirlilik değerlerinin en değişken olduğu aralık veri setini belirlemede diğer bir etken olmuştur. Yapılan çalışmalar sonucundaki ölçüt değerleri Tablo 2'de listelenmiştir. Tabloda yer alan en iyi sonuçlar koyu renk ile belirtilmiştir. Ünite-1 için yapılan çalışmada kullanılan tüm makine öğrenim modellerine ait tahmin sonuçları Şekil 13'de sunulmuştur.

Tablo 2. Makine öğrenme yöntemlerinin Ünite-1'deki ölçüt sonuçları

Metot	R	RMSE	MAE
İnce Ağaç Modeli	**0.9833**	**0.0266**	**0.0103**
Kaba Ağaç Modeli	0,9691	0,0365	0,0170
Kalın Ağaç Modeli	0,9405	0,0512	0,0283
İnce Gauss DVM Modeli	0,8803	0,0734	0,0327
Orta Gauss DVM Modeli	0,6738	0,0680	0,1016
Kaba Gauss DVM Modeli	0,6042	0,0920	0,1220

Tablo 2'deki sayısal sonuçlar incelendiğinde, Ünite-1 için en iyi R değerini 0.9833 ile İnce Ağaç modeli verirken, en kötü R değerini 0.6042 ile Kaba Gauss DVM modeli vermiştir. Diğer performans ölçütü olan RMSE değeri kıyaslandığında aynı şekilde 0.0266 değeri ile ince ağaç modeli en iyi sonucu vermiştir. Diğer modellerin R performans ölçüt değerleri ise kaba ağaç modeli için 0.9691, kalın ağaç modeli için 0.9405, İnce Gauss DVM modeli için 0.8803 ve Orta Gauss DVM modeli için 0.6738 olarak hesaplanmıştır. Ünite-1 için yapılan çalışmada en iyi tahmin sonuçlarını veren model ince ağaç ile en kötü tahminde bulunan model Kaba Gauss DVM modeli R performans ölçütü açısından kıyaslandığında %62.74 daha iyi performans göstermiştir. Şekil 13'te görüleceği üzere Karar ağaçları ile elde edilen sonuçlar hem daha iyi hem de daha güvenilirdir. Burada, Karar ağaçlarının ızgara kirlilik tahmininde daha iyi bir genelleme yeteneğine sahip oldukları ifade edilebilir.



Şekil 13. Ünite-1 için karşılaştırma sonuçlarının gösterimi a) Karar Ağaç Modelleri b) Destek Vektör Makineleri

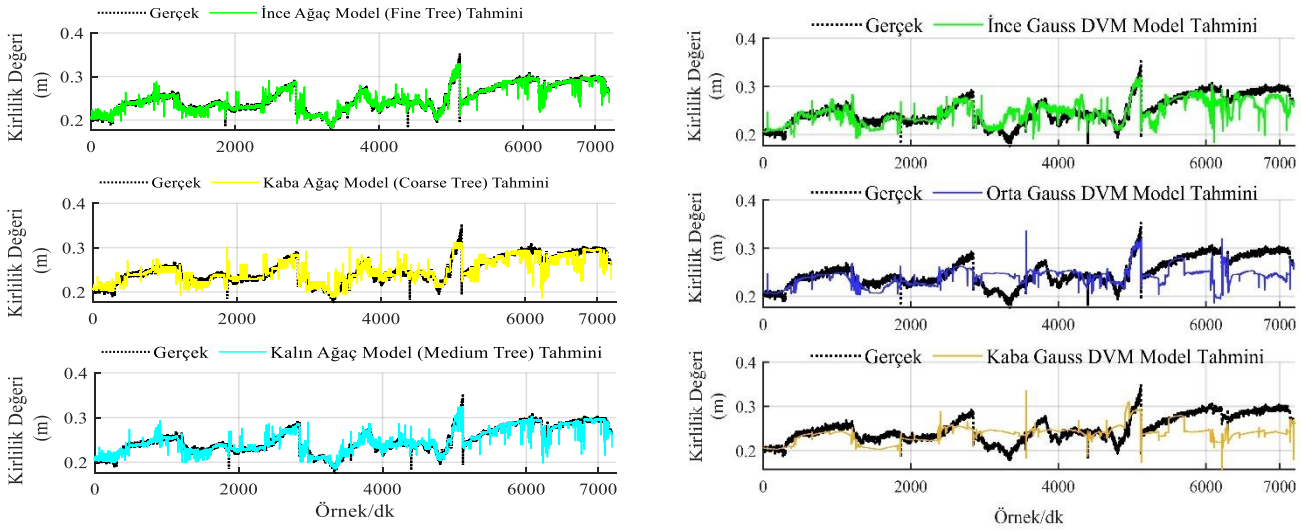
Deneysel Çalışma-2: Ünite-2 İçin Izgara Kirlilik Tahmin Performanslarının İncelenmesi

Karkamış HES'in 2. Ünitesi için ızgara kirlilik tahmin çalışması gerçekleştirilmiştir. Veri seti için Karkamış HES SCADA sisteminden alınmış 78.962 örnek filtrelenmiş 47. 000 satırlık veri seti elde edilmiştir. Bu veriler güç, debi, düşü ve kirlilik değerlerinden oluşmaktadır. Ünite-2'nin ölçülen ızgara kirlilik değer değişimi ünite 1'e göre daha düşük ancak veri setindeki örnek sayısı daha yüksektir. Yapılan çalışmalar sonucundaki ölçüt değerleri Tablo 3'te listelenmiştir. Listede yer alan en iyi sonuçlar koyu renk ile belirtilmiştir. Ünite-2 için yapılan çalışmada kullanılan tüm makine öğrenme modellerine ait tahmin sonuçları Şekil 14'te sunulmuştur

Tablo 3. Makine öğrenme yöntemlerinin Ünite-2'deki ölçüt sonuçları

Metot	R	RMSE	MAE
İnce Ağaç Modeli	**0,9716**	**0,0069**	**0,0040**
Kaba Ağaç Modeli	0,9071	0,0123	0,0078
Kalın Ağaç Modeli	0,9486	0,0092	0,0056
İnce Gauss DVM Modeli	0,7751	0,0186	0,0129
Orta Gauss DVM Modeli	0,4746	0,0276	0,0200
Kaba Gauss DVM Modeli	0,4200	0,0292	0,0222

Ünite-2'ye ait çalışmalar için performans değerlerini içeren Tablo 3 incelendiğinde ince ağaç modeli R (0.9716), RMSE (0.0069) ve MAE (0.0040) değerleri ile tüm ölçütlerde en iyi sonucu vermiştir. Çalışmanın en kötü sonucu Kaba Gauss DVM Modeli; R için 0.4200, RMSE için 0.0292 ve MAE için 0.0222 değerleriyle vermiştir. R ölçüt değerleri Kaba ağaç modelinde 0.9071, Kalın ağaç modelinde 0.9486, İnce Gauss DVM Modeli modelinde 0.7751 ve Orta Gauss DVM Modeli modelinde 0.4746 olarak hesaplanmıştır. Çalışmanın en iyi sonuç veren modeli ile en kötü modeli Ünite-1 ile aynı modellerdir. Ünite-2 için yapılan çalışmada en iyi tahmin sonuçları veren model ince ağaç ile en kötü tahminde bulunan model Kaba Gauss DVM Modeli R performans ölçütü açısından kıyaslandığında %231.3 daha iyi performans elde edilmiştir. Şekil 14'te görüleceği üzere Karar ağaçları ile elde edilen sonuçlar daha başarılıdır.



(a) (b)

Şekil 14. Ünite-2 için karşılaştırma sonuçlarının gösterimi a) Karar Ağaç Modelleri b) Destek Vektör Makineleri

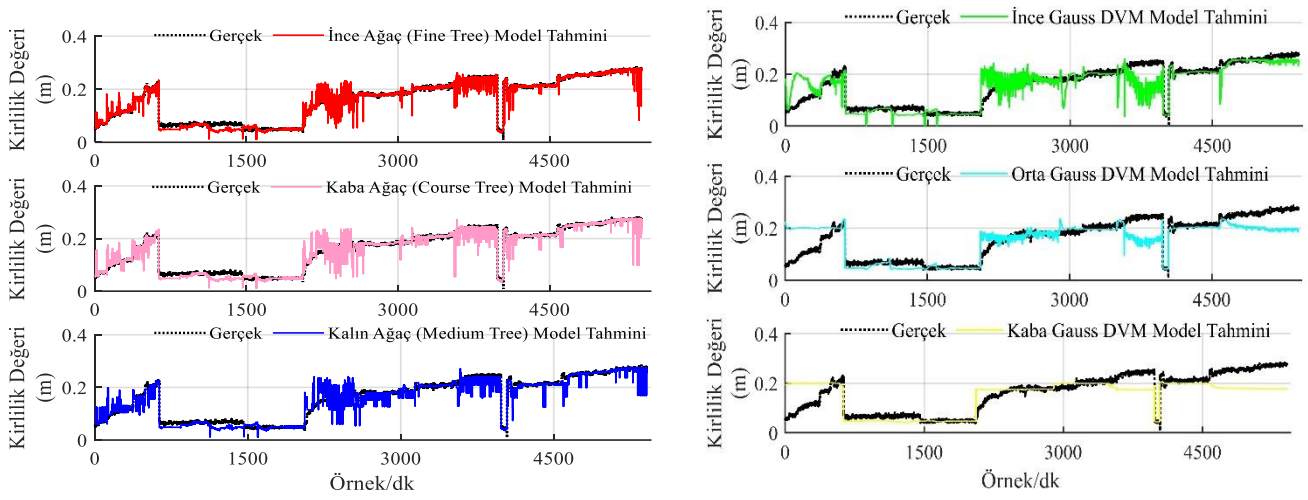
Deneysel Çalışma-3: Ünite-4 İçin Izgara Kirlilik Tahmin Performanslarının İncelenmesi

Ünite-4 için yapılan çalışmanın verileri SCADA sisteminden alınan güç, debi, düşü ve kirlilik değerlerinden oluşan örneklerdir. Bu örnekler incelenip filtreden geçirildikten sonra 36.087 örnek içeren veri seti elde edilmiştir. Ünite 4 veri seti örnek miktarı Ünite-1'den fazla Ünite-2'den düşüktür. Çalışma neticesinde elde edilen performans ölçüt değerleri liste şeklinde Tablo 4'te verilmiştir. Listede yer alan en iyi değerler koyu renk ile gösterilmiştir. Makine öğrenme yöntemlerinin sonuçları Şekil 15'te sunulmuştur.

Tablo 4. Makine öğrenme yöntemlerinin Ünite-4'teki ölçüt sonuçları

Metot	R	RMSE	MAE
İnce Ağaç Modeli	**0,9792**	**0,0164**	**0,0088**
Kaba Ağaç Modeli	0,9673	0,0203	0,0114
Kalın Ağaç Modeli	0,9563	0,0234	0,0140
İnce Gauss DVM Modeli	0,8612	0,0403	0,0246
Orta Gauss DVM Modeli	0,8015	0,0470	0,0323
Kaba Gauss DVM Modeli	0,7799	0,0497	0,0351

Tablo 4 verilen sayısal sonuçlar incelendiğinde, Ünite-4 için en iyi R değerini 0.9792 ile İnce Ağaç modeli verirken, en kötü R değerini 0.7799 ile Kaba Gauss DVM Modeli vermiştir. Diğer performans ölçütü olan RMSE değeri kıyaslandığında aynı şekilde 0.0164 değeri ile ince ağaç modeli en iyi sonucu vermiştir. Diğer modellerin R performans ölçüt değerleri ise 0.9673 ile kaba ağaç modeli, 0.9563 değeri ile kalın ağaç modeli, 0.8612 değeri ile İnce Gauss DVM Modeli ve 0.8015 değeri ile Orta Gauss DVM Modeli olarak hesaplanmıştır. En iyi sonuçların alındığı ince ağaç modelinin cevapları Kaba Gauss DVM Modeli ile kıyaslandığında %25.55 oranında daha iyi bir performans göstermiştir. DVM modellerinin ve karar ağaç modellerinin performans ölçütleri Ünite-2'den daha başarılıdır.



(a) (b)

Şekil 15. Ünite-4 için karşılaştırma sonuçlarının gösterimi a) Karar Ağaç Modelleri b) Destek Vektör Makineleri

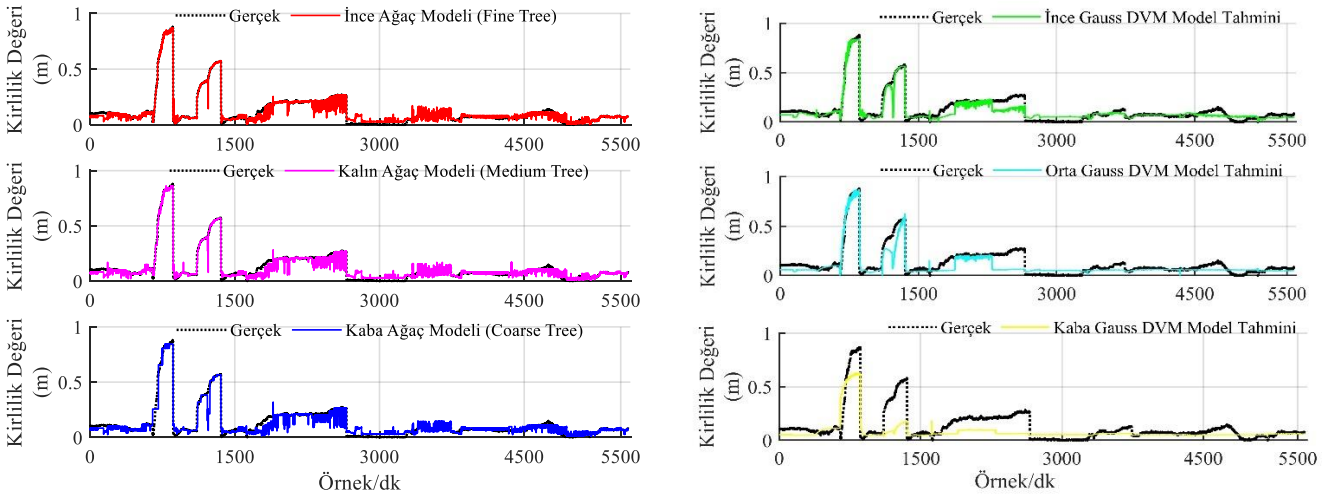
Deneysel Çalışma-4: Ünite-5 İçin Izgara Kirlilik Tahmin Performanslarının İncelenmesi

Bu bölümde; ünite 5 için yapılan tahmin çalışmada Ünite-5'e ait güç, debi, düşü ve ızgara kirlilik değerlerini içeren 144.000 örneğin toplandığı bir veri havuzu oluşturulmuştur. Bu veri miktarı filtrelenerek 36285 örneği içeren veri setine dönüşmüştür. Ünite-5 için hazırlanan veri seti Ünite-4'ün veri setine sayısal olarak benzerlik göstermektedir. Veri seti oluşturulurken ızgara kirliliğinin en değişken olduğu aralık önemli bir etken olmuştur. Elde edilen sayısal sonuçlar Tablo 5'de listelenmiştir. Tablo 5'de en iyi performans ölçütü koyu renk ile gösterilmiştir. Ayrıca, makine öğrenme yöntemlerinin tüm çeşitlerine ait tahmin cevapları Şekil 16'da sunulmuştur.

Tablo 5. Makine öğrenme yöntemlerinin Ünite-5'deki ölçüt sonuçları

Metot	R	RMSE	MAE
İnce Ağaç Modeli	**0,9810**	**0,0296**	**0,0018**
Kaba Ağaç Modeli	0,9769	0,0326	0,0203
Kalın Ağaç Modeli	0,9627	0,0414	0,0241
İnce Gauss DVM Modeli	0,9525	0,0480	0,0328
Orta Gauss DVM Modeli	0,9119	0,0675	0,0448
Kaba Gauss DVM Modeli	0,7839	0,1063	0,0669

Tablo 5'deki istatistiksel sonuçlar incelendiğinde, Ünite-5 için en iyi R değerini 0.9810 ile ince ağaç modeli verirken aynı ölçütteki en kötü sonucu 0.7839 değeri ile Kaba Gauss DVM Modeli vermiştir. Diğer performans ölçütü olan RMSE için ise yine en iyi sonucu ince ağaç modeli 0.0296 değeri ile sağlamıştır. Kaba ağaç modeli, kalın ağaç modeli, İnce Gauss DVM Modeli ve Orta Gauss DVM Modeli için R değerleri ise sırasıyla 0.9769, 0.9627, 0.9525 ve 0.9119 olarak hesaplanmıştır. Burada, en iyi sonucu veren ince ağaç modelinin R değeri en kötü performansa sahip Kaba Gauss DVM Modelinden %25.14 daha iyi sonuçlanmıştır. Grafikte görüldüğü gibi kirlilik değeri 1 m'ye yaklaşmıştır. Diğer ünitelerdeki tahmin çalışmalarının performans ölçütleri ile kıyaslandığında DVM modellerinin en başarılı sonucu bu çalışmada alınmıştır.



Şekil 16. Ünite-5 için karşılaştırma sonuçlarının gösterimi a) Karar Ağaç Modelleri b) Destek Vektör Makineleri

SONUÇ

Dünyada ve ülkemizde elektrik tüketimi ve buna bağlı olarak elektrik ihtiyacı sürekli artmaktadır. Enerji ihtiyacı için kullanılan fosil enerji kaynakları çevre kirliliğinin ve küresel ısınmanın artmasına sebep olmaktadır. Fosil enerji kaynaklarının kullanımının azaltılıp yerine çevre dostu yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı yaygınlaştırılmalıdır. Yenilenebilir enerji kaynaklarının etkin ve verimli şekilde kullanılması ihtiyaç olan enerjide fosile olan bağımlılığı azaltacaktır. Bu sebeple yenilenebilir enerji kaynaklarının küresel olarak üretim kapasitesinin en büyük payını oluşturan Hidrolik kaynaklarda yapılacak verimlilik çalışmaları büyük katkı sağlayacaktır. Bu çalışmada HES'lerde makine öğrenme metotları kullanılarak arızaları tespit etmek, daha verimli üretim yapabilmek ve mevcut sistemlere alternatif yöntemler oluşturmak amaçlanmıştır. Izgara kirliliğinin, sensörlerin basınç farkı ile tespitindeki hataların üretime olan olumsuz etkilerini tespit etmek önemlidir. Bu sebeple Karkamış HES özelinde; ızgara kirliliğinin, üretim ve üretime bağlı diğer değerlerden oluşan veri seti kullanılarak farklı makine öğrenme modelleri ile tahminler yapılmıştır. Yapılan tahminlerin performansları detaylı olarak analiz edilmiştir.

Karkamış HES verileri ile gerçekleşen makine öğrenmesinde kullanılan Karar Ağaç modelleri yüksek performans göstermiş olup en başarılı modeli 0.9833 doğruluk değeri ile İnce Ağaç modelidir. Diğer ağaç modellerinde de başarılı bir öğrenme gerçekleşmiş olup doğruluk oranları genellikle 0.90 üzerinde görülmüştür. Hata oranları genellikle çok küçük değerlerde çıkmıştır. Bu durum karar ağaçlarının veri setlerindeki değişimin kirlilik oranlarındaki farklılıkları tespit ettiğini ve ayrılmış geniş test verileri için gerçekçi tahminler yaptığını göstermektedir. DVM modeli ile yapılan makine öğrenmelerinde genel olarak Karar Ağaç modellerine nazaran başarısız bir eğitim gerçekleşmiştir. DVM modelleri içerisinden en başarılı olanı İnce Gauss modelidir. En başarılı tahmin performansını 0.9525'lik R değeri ile Ünite-5 için sağlamıştır. En başarısız tahmin performansı ise Ünite-2'de görülmüştür. Sonuç olarak, makine öğrenme yöntemleriyle ızgara kirlilik tahminin başarılı bir şekilde gerçekleştirilebileceği ve yüksek başarımın elde edilebileceği yapılan deneysel çalışmalarla doğrulanmıştır. İleriki çalışmalarda ise, derin öğrenme modellerinin kullanılması düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

Acar, G. (2022). Zaman serisi yöntemleri ve xgboost algoritması ile kömür satış tahmini: türkiye tarım kredi kooperatifleri uygulaması.Yüksek Lisans Tezi. Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Bilişim Sistemleri Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Sakarya 72s.

Alatas, M.,Susilowati E.,Theresia M., Budiastuti S., Gunawan T., Setyono P. (2022). Horizontal Trash Rack Diverter Trash (HTDT) to Minimize Trash Clogging at the Intake of Micro-Hydro Power Plant. *International Journalof Sustainable Developmentand Planning*, Vol.17,No.6,October.1713-1720. https://doi.org/10.18280/ijsdp.170604

Artuğer, F & Özkaynak, F (2022). Görüntü Sıkıştırma Algoritmalarının Performans Analizi İçin Değerlendirme Rehberi.*Munzur Üniversitesi Dergisi*, 8(1).102-110. https://doi.org/10.29132/ijpas.1012013

Alpaydin, E. (2014). Introduction to machine learning . The MIT press. (4th ed.)

Arı, A & Önder, H. (2013). Farklı Veri Yapılarında Kullanılabilecek Regrasyon Yöntemleri. *Anadolu Tarım Bilim Dergisi*, 28 (3), 168-174. https://doi.org/10.7161/anajas.2013.28.3.168

Bragalli C. , Micocci D. , Naldi G. (2023).On the influence of net head and efficiency fluctuations over the performance of existing run-of-river hydropower plants, Volume 206, April 2023. 1170-1179.

Başeşme, Hidayet (2003). Hidroelektrik santrallar ve hidroelektrik santral esisleri, EÜAŞ Genel Müdürlüğü Hidrolik Santraller Dairesi Başkanlığı.

Bekçioğulları, M. F., Dikici, B., Açıkgöz, H., Keçecioğlu, Ö. F. (2021). Güneş Enerjisinin Kısa-Dönem Tahmininde Farklı Makine Öğrenme Yöntemlerinin Karşılaştırılması. EMO Bilimsel Dergi, 11(22), 37-45.

Coşkun, O & Doğanay,H (2020). Enerji kaynakları. İstanbul: Pegem Akademi.

Daş, M., Balpetek, N., Kavak Akpınar, E., & Akpınar, S. (2019). Investigation of wind energy potential of different provinces found in Turkey and establishment of predictive model using support vector machine regression with the obtained results. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*. 34(4). 2203-2212. https://doi.org/10.17341/gazimmfd.432590

Daş, B & Türkoğlu İ. (2014 Kasım). DNA dizilimlerinin sınıflandırılmasında karar

ağacı algoritmalarının karşılaştırılması, Eleco 2014 Elektrik- Elektronik Bilgisayar ve Biyomedikal Mühendisliği Sempozyumu.

Diniz, A.L, Esteves P. P. and Sagastizabal C. A. (2007). "A Mathematical Model for the Efficiency Curves of Hydroelectric units," 2007 IEEE Power Engineering Society General Meeting, Tampa, FL, USA. 1-7.

Emeç, Ş., Adar, T., Akkaya, G. & Delice, E. K. (2019). Efficiency Assessment of Hydroelectric Power Plant in Turkey by Data Envelopment Analysis (DEA). *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (Özel Sayı), 34-45. https://doi.org/10.31590/ejosat.594716

EÜAŞ (2024). Karkamış HES. (Erişim Tarihi:18.12.2023) https://www.euas.gov.tr/en-US/power-plants/karkamis-hepp

Gacar, Kocarık, B. (2023). Fonksiyonel veri analizinin karar ağaçlarında kullanımı. Doktora Tezi. Dokuz Eylül Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Ekonometri Anabilim Dalı. İzmir 186s.

Hribernik, A. (2020).Evaluation of Clogged Hydropower Plant Trash Rack Losses. *Journal of Mechanical Engineering.* 66(2020)2,142-152 http://doi.org/10.5545/sv-jme.2019.6313

Hammid, A. T, Sulaiman, M. H.,Abdalla, A. N., (2017). Prediction of Small Hydropower Plant Power Production in Himreen Lake dam (HLD) using artificial neural network, *Alexandria Engineering Journal*, 57 (1). https://doi.org/10.1016/j.aej.2016.12.011

İnallı, K., Işık, E. & Dağtekin, İ. (2014). Karakaya HES'de verim ve üretim parametrelerinin yapay sinir ağı ile tahmini. *Dicle Üniversitesi Mühendislik Dergisi*. 5(1),59-68.

Koç, E., Şenel, M. C.(2013). Dünyada ve Türkiye'de Enerji Durumu - Genel Değerlendirme. *Mühendis ve rea*, 54(639), 32-44.

Kingsford, C., & Salzberg, S. L. (2008). *What are decision trees?. Nature biotechnology*. 26(9).1011-1013

Karakuş,C.(2001).MakineÖğrenmesiAlgoritmalarıhttps://ckk.com.tr/ders/ML/ML%2001%20Makine%20%C3%96%C4%9Frenmesi%20Algoritmalar%C4%B1.pdf

Makas, Y & Karaatlı, M. (2016).Yapay Sinir Ağlarıyla Hidroelektrik Enerji Üretiminin Çok Dönemli Tahmini, *Süleyman Demirel Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 23(3).757-772.

Metlek, S & Kayalp, K. (2020). Makine Öğrenmesinde Teoriden Örnek Matlab Uygulamalarına Kadar Destek Vektör Makineleri, Ankara: İksad Yayınları.

Özbektaş, S., Şenel M.C., Sungur B. (2023). Dünya'da ve Türkiye'de Yenilenebilir Enerji Durumu ve Kurulum Maliyetleri, Mühendis ve Makina/ Engineer and Machinery, 64(711),317-351.

Pamir, N. (2017). Enerjinin iktidarı. İstanbul: Hayy Kitap Yayınları

Ray, S. (2019, February). A quick review of machine learning algorithms. In 2019 International conference on machine learning, big data, cloud and parallel computing (COMITCon). 35-39).

T.C. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı (2024). https://enerji.gov.tr/bilgi-merkezi-enerji-elektrik/ Erişim Tarihi 18.03.2024.

Walczak, N& Walczak, Z& Niec J. (2020), Assesment of the Resistance Value of Trash Racks at a Small Hydropower plant operating at low temperature energies. Energies 2020, 13(7),1775 https://doi. org/10.3390/en13071775

Yoldaş, Y.B. (2023). Fotovoltaik güç santrali ile desteklenen güç sisteminde zayıf kaynak besleme koşullarında destek vektör makinalarıyla mesafe korumanın geliştirilmesi.Yüksek Lisans Tezi.Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Mühendisliği Ana Bilim Dalı, İstanbul 105s.

Zilyas, D. & Yılmaz, A. (2023). Makine Öğrenmesi Yöntemleri ile Eğitim Başarısının Tahmini Modeli. *Dicle University Journal of Engineering Dergisi,* 14 (3), 437-447. https://doi.org/10.24012/dumf.1322273

KSÜ Mühendislik Bilimleri Dergisi, 28(2), 2025
Araştırma Makalesi

KSU J Eng Sci, 28(2), 2025
Research Article

Kahramanmaras Sutcu Imam University
Journal of Engineering Sciences

Geliş Tarihi : 20.11.2024
Kabul Tarihi :22.04.2025

Received Date : 20.11.2024
Accepted Date : 22.04.2025

INVESTIGATION OF THERMODYNAMIC PERFORMANCE OF TURBOFAN ENGINE AT DIFFERENT FAN PRESSURE AND BYPASS RATIOS PART A: ENERGY ANALYSIS

FARKLI FAN BASINCI VE BYPASS ORANLARINDA TURBOFAN MOTORUNUN TERMODİNAMİK PERFORMANSININ İNCELENMESİ BÖLÜM A: ENERJİ ANALİZİ

Emine OĞUR[1] (ORCID:0000-0001-8020-9477)
Ali KOÇ[2]* (ORCID: 0000-0002-7388-2628)
Yıldız KOÇ[2] (ORCID: 0000-0002-2219-645X)
Özkan KÖSE[2] (ORCID: 0000-0002-9069-1989)
Hüseyin YAĞLI[3] (ORCID: 0000-0002-9777-0698)

[1]Iskenderun Technical University, Institute of Graduate Studies, Hatay, Türkiye
[2] Iskenderun Technical University, Department of Mechanical Engineering, Hatay, Türkiye
[3]Gaziantep University, Department of Mechanical Engineering, Hatay, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Ali KOÇ, ali.koc@iste.edu.tr

ABSTRACT

This research is focused on analysing the thermodynamic performance results of the GE90 turbofan engine with different fan pressures and bypass air ratios. The paper analyses thrust force, thrust efficiency, thrust power, specific fuel consumption, heat input, fuel flow rate, fuel cost rates, emission amount, and cost. Accordingly, the thrust force of the turbofan engine increased as the fan pressure ratio increased, and the highest FBR is obtained as: 1.98 = 573.98 kN. While the highest thrust efficiency value is obtained at 37.22% at the FPR:1.66-BPR:7.4 ratios, the energy efficiency reached its maximum at 45.91% at the same values at the FPR:1.66-BPR:7.4 ratios. At the same rates, specific fuel consumption is calculated as 27.87 kg/kN.h, with its lowest value. The emission release amount of the turbofan engine and the cost of this amount are 49.48 tonCO_2/h and 74.21 \$/tonCO_2.h at the highest FPR:1.98-BPR:4.4 rates.

Keywords: turbofan, pressure ratio, energy, economy, emission

ÖZET

Bu araştırma, farklı fan basınçları ve baypas hava oranları ile GE90 turbofan motorunun termodinamik performans sonuçlarının analizine odaklanmıştır. Analizde itme kuvveti, itme verimliliği, itme gücü, özgül yakıt tüketimi, ısı girişi, yakıt akış hızı, yakıt maliyet oranları, emisyon miktarı ve maliyet analiz edilmiştir. Buna göre, turbofan motorunun itme kuvveti, fan basınç oranı arttıkça artmış ve en yüksek FBR; 1,98 = 573,98 kN olarak elde edilmiştir. En yüksek itme verimliliği değeri FPR:1,66-BPR:7,4 oranlarında %37,22 ile elde edilirken, enerji verimliliği aynı değerlerde FPR:1,66-BPR:7,4 oranlarında %45,91 ile maksimum değerine ulaşmıştır. Aynı oranlarda özgül yakıt tüketimi en düşük değeri ile 27,87 kg/kN.h olarak hesaplanmıştır. Turbofan motorunun emisyon salınım miktarı ve bu miktarın maliyeti en yüksek FPR:1.98-BPR:4.4 değerlerinde 49.48 tonCO_2/h ve 74.21 \$/tonCO_2.h olarak gerçekleşmektedir.

Anahtar Kelimeler: turbofan, basınç oranı, enerji, ekonomi, emisyon

ToCite: OĞUR, E., KOÇ, A., KOÇ, Y., KÖSE, Ö., & YAĞLI, H., (2025). INVESTIGATION OF THERMODYNAMIC PERFORMANCE OF TURBOFAN ENGINE AT DIFFERENT FAN PRESSURE AND BYPASS RATIOS PART A: ENERGY ANALYSIS. *Kahramanmaras Sutcu Imam University Journal of Engineering Sciences*, 28(2), 630-643.

INTRODUCTION

The most general operating principle of turbofan engines is to produce kinetic energy by burning the air/fuel mixture. This kinetic energy is converted into power in the turbine and creates the necessary thrust force for the aircraft (Liew, 2005). The most costly part of air transportation for airline companies comes from fuel. Costs for airline companies are increasing, especially for commercial aircraft that transport passengers and cargo on long-distance flights. Engineers and researchers are conducting many studies to improve engine performance by investigating the factors affecting the amount of fuel in turbofan engines (Dankanich and Peters, 2017). The main aim of aircraft design companies and scientists in these studies is to create a higher thrust force with lower specific fuel consumption. This means being able to produce maximum engine performance with lower fuel flow. Reducing fuel consumption is an important parameter not only for economic reasons but also to reduce the amount of emissions released into the environment. Additionally, the aircraft uses a smaller fuel tank with reduced fuel consumption. Accordingly, aircraft weight decreases, and a smaller engine may be needed. This reduces both noise and operating costs. Important thermodynamic values to increase the thermodynamic performance of an aircraft are thrust efficiency, thermal efficiency, and specific fuel consumption. In many studies, studies are carried out with parameters such as bypass air ratio (BPR), fan pressure ratio (FBR), high-pressure compressor pressure ratio (HPCPR), turbine inlet temperature (TIT) and Mach number (Ma), which have been determined to greatly affect these values (Xue et al., 2019). To increase thrust efficiency, engineers are trying to reduce the kinetic energy of the burned gas by providing a higher bypass air. However, these studies are limited in terms of today's engine technology and aircraft body weight. To increase thermal efficiency, they have approached making the material durability of high-pressure turbine blades suitable for high temperatures. However, this situation is limited in terms of material properties (Andriani, et al., 2022). There are many studies in the literature with similar results. Some of these are those Sabzehali et al. (2022) in a fighter plane examined the effect of Mach number on air mass flow rate, thrust force, thrust efficiency, specific fuel consumption, and exergy efficiency. For this purpose, they made a mathematical cycle model of the F135 PW100 engine. In the first stage, the authors determined the Mach number to be 2.5 and the flight distance to be 30000 m to enable supersonic aircraft to fly at high altitudes and to use hydrogen fuel to create a high thrust force. Accordingly, they are calculated for specific fuel consumption, thrust efficiency, thrust force, and exergy efficiency. Fan pressure ratio, bypass air ratio, turbine inlet temperature, and pressure ratio of the high-pressure turbine are used in the calculations. According to the results, the error rate is 5.02% in thrust force, 1.43% in specific fuel consumption, and 2.92% in exergy efficiency. Xue et al. (2019) examined the effect of fan pressure ratio and bypass air on Trent-XWB turbofan engine performance. The results are determined by first changing the bypass air and then the fan pressure air on the same engine. They determined that by changing the bypass ratios, they could obtain a high thrust force with a lower specific fuel consumption. However, the authors drew attention to drawbacks such as friction and aircraft weight during the design phase. Najjar et al. (2015) determined the turbine inlet temperature and compressor pressure as variables in a turbojet engine and argued that these variables affect thrust and specific fuel consumption. They have used a computer program called General Algebraic Modeling System (GAMS) in the calculations. They determined that the turbine inlet temperature significantly affected the specific fuel consumption and that there was a 10% decrease in the turbine inlet temperature. They calculated that specific fuel consumption decreased by 6.8% and thrust decreased by 6.7%. They showed that the compressor pressure ratio decreased by 11.43%. Under the operating conditions of the Turbojet engine at an altitude of 13000 m, Ma = 0.8 and turbine inlet temperature of 1700 K, the most appropriate compressor rust ratio is obtained as 14. Yucer. (2016) Exergy and energy analyses of the turbojet engine are carried out in a laboratory environment at different loads: idle, partial load, two partial loads, and full load. Parameters such as energy efficiency, specific fuel consumption, exergy destruction, and exergy recovery rate are examined separately under the influence of these four loads. According to the results, it reaches its maximum with values of 79.4% at partial load and 67.8% at idle load. The maximum value of exergy efficiency in the combustion chamber at full load is determined as 80.6%, and at partial load, two is determined as 81%. The exergy destruction rate in the combustion chamber, where the exergy loss is highest, is presented in the article as 35 kW at idle, 40.3 kW at partial load, 36.6 kW at partial load, and 47.9 kW at full load. Su et al. (2022) examined the thermodynamic analysis of a turbojet engine, a kerosene-fueled turbofan engine, and a hybrid turbofan engine at different pressure ratios. Parameters such as thrust force, energy efficiency, and fuel flow are examined. Two methods were tried in the study. In the first method, the combustion chamber pressure ratio was examined by keeping the total pressure constant. It was observed that the thrust force gave better results if the fuel consumption was reduced below 30% at high pressure. In the second method, the combustion chamber pressure ratio was examined by keeping the compressor pressure constant. In this section, the fuel flow rate was reduced by 20% or more, and thus, it was reported that lower energy was provided with higher thrust force. Zaid et al. (2018) An extensive literature study on the development process of the turbofan engine is presented. The authors then created software in the MATLAB program

for the parameters that determine the performance analysis of the Rolls-Royce Trent 1000-A turbofan engine. The study wanted to determine the pressure ratio that would obtain maximum thrust, thrust, and energy efficiency with less specific fuel consumption by changing the fan pressure ratio, bypass ratio, Mach number, and turbine inlet temperature, based on take-off and cruise situations. Dankanich and Peters. (2017) investigated how changing the bypass ratio would affect the thermodynamic performance of a high-bypass turbofan engine. In addition, a low bypass turbofan engine consuming the same fuel was compared with a high bypass engine. A mathematical model was created, and calculations were made on this. It was shown how SFC decreases with increasing bypass ratio. Fuel costs were calculated accordingly. The range of BPR=0-12, turbine temperature, and compressor pressure ratio were kept constant. While the thrust force was 30,000 lbf at BPR=0, the thrust force was obtained as 60,000 lbf at BPR=12. SFC decreases as BPR increases. These values were calculated as 1.316 at BPR=0 and =0.695 at BPR=12. Fuel costs for the turbojet engine were calculated as 6.78 $/h. The actual fuel cost for this 5-hour flight is $71,640, while the engine cost is $122,040. Akdeniz and Balli. (2021a). examined the exergic analysis of the turbofan engine used in the JT3D-3B military aircraft with varying bypass air. They change it in the range of BPR = 1.30-145. According to the results, the highest energy efficiency is calculated as 27.93% at BPR = 1.45, and the lowest is 26.97% at BPR = 1.30. By increasing the bypass ratio by 0.04 in the range of 135 -1.45, the energy and exergy efficiency and exergy destruction rate increased, while the exergy improvement potential, fuel exergy waste rate, and efficiency deficiency rate decreased. The authors argued that the study will contribute to the future turbofan engine design.

When the studies in the literature were analysed, there were limited studies on analysing the effect of fan pressure ratio and bypass air on the system performance. Also, it was observed from the literature that there is a need for a comprehensive analysis of the effect of fan pressure on specific fuel consumption. In addition to all these, considering emission together with performance-affecting parameters will be a key study for the literature. This article examines how the thermodynamic performance of a turbofan engine is affected when the fan pressure ratio and bypass air of a turbofan engine change. In addition, the effect of the change in fan and bypass pressure ratios on the specific fuel consumption and thrust force of the kerosene-fueled turbofan engine is observed. Then, the effect of the change in pressure ratio on emissions and emission costs is evaluated. As a result of the analysis, the best FBR and BPR rates and their environmental impact are examined.

SYSTEM DESCRIPTION

GE Aviation'ın aldığı GE90 turbofan motoru, 2 motorlu, baypas havası oranı: 8.4, itme gücü 375.30 kN olan yüksek bypasslı ticari bir uçak motorudur. The turbofan engine is an axial flow turbofan engine consisting of a fan drawing 1350 kg of air flow, a 3-phase low-pressure compressor, a 10-phase high-pressure compressor, a 2-phase low-pressure turbine, and a 6-phase high-pressure turbine. These engines stand out as environmentally friendly engines with low fuel consumption, high efficiency, quiet operation of the fan, and low carbon emissions (General Electric, 1997). Engine data of the turbofan engine obtained from the literature are presented in Table 1.

Table 1. GE90 Turbofan Engine Specifications (General Electric, 1997; EASA, 2019)

Thrust force	375.30 kN	HPT inlet temperature	1592 K
Bypass air rate	8:4	SFC	7.91 mg/Ns
Engine Total Pressure ratio (OPR)	39.97	Compressor isentropic efficiency ($\eta_{s,c}$)	0.91
LPC pressure ratio (Pr)	1.10	Turbine isentropic efficiency ($\eta_{s,t}$)	0.93
HPC Pressure ratio (Pr)	23	Mechanical efficiency ($\eta_{s,m}$)	0.99
Fan pressure ratio (Pr)	1.58	Fuel combustion efficiency ($\eta_{s,cc}$)	0.99
Air mass flow	1350 kg/s	Combustion pressure loss (ΔP_{fd})	0.05
Fuel flow	2.968 kg/s	Isentropic nozzle efficiency ($\eta_{s,n}$)	0.95
Fan isentropic efficiency ($\eta_{s,f}$)	0.93		

A simplified schematic diagram and parameter descriptions of the turbofan engine are given in Figure 1.

Mathematical Modeling

The first law of thermodynamics is taken as the basis for the in terms of thermodynamic study of turbofan engines. Atmospheric conditions are acceptable for gas turbine engines, which are a closed system. The cycle analysis of each component for the simplified turbofan engine shown in Figure 1 is presented below (Akdeniz, 2021b; Arslan, 2022; Artaş, 2023; Balli, 2017; Coban, 2017; Çengel, 2011; Çoban, 2018; Ekrataleshian, 2020; Fetahi, 2020; Küçük, 2023; Oğur, 2023; Ping, 2021; Sürer, 2024; Yapicioglu, 2018);

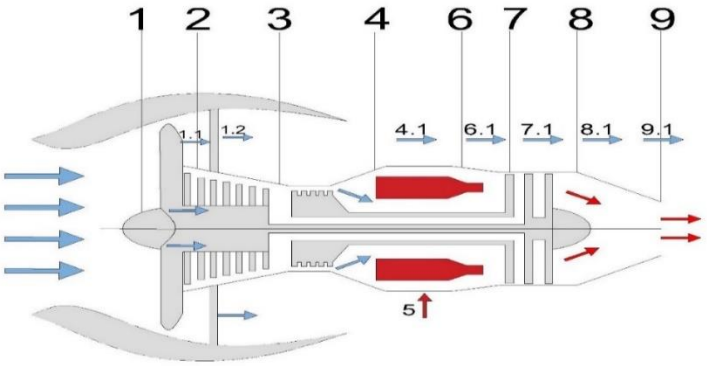


Figure 1. Cutaway Diagram of GE90 Turbofan Engine

Fan (1-2);

$$T_1 = T_{atm} \quad (1)$$

$$P_1 = P_{atm} \quad (2)$$

$$T_2 = T_1 * Pr^{\frac{k-1}{k}} \quad (3)$$

$$P_2 = P_1 * Pr_{fan} \quad (4)$$

$$T_2 = T_{1.1} \qquad P_2 = P_{1.1} \quad (5)$$

$$\dot{W}_{FAN} = \dot{m}_1 * (Cp_2 * T_2 - Cp_1 * T_1) \quad (6)$$

Fan Duct (1.1-1.2);

$$P_{1.2} = P_{1.1} * (1 - \Delta P_{fd}) \quad (7)$$

$$T_{1.2} = T_{1.1} * (\frac{P_{1.2}}{P_{1.2}})^{\frac{k-1}{k}} \quad (8)$$

Low-Pressure Compressor (2-3);

$$T_3 = [1 + \left(\frac{Pr^{\frac{k-1}{k}} - 1}{\eta_{s,c}}\right)] * T_2 \quad (9)$$

$$P_3 = P_2 * Pr_{lpc} \quad (10)$$

$$\dot{W}_{LPC} = \dot{m}_2 * (Cp_3 * T_3 - Cp_2 * T_2) \quad (11)$$

High-Pressure Compressor (3-4);

$$T_4 = [1 + \left(\frac{Pr^{\frac{k-1}{k}} - 1}{\eta_{s,c}}\right)] * T_3 \quad (12)$$

$$T_4 = T_{4.1}; P_4 = P_{4.1} \quad (13)$$

$$P_4 = P_3 * Pr_{hpc} \quad (14)$$

$$\dot{W}_{HPC} = \dot{m}_3 * (Cp_4 * T_4 - Cp_3 * T_3) \quad (15)$$

Combustion chamber (4-6-5F);

$$\dot{Q} = [(\dot{m}_6 * Cp_6 * T_6 + (\dot{m}_{6.1} * Cp_{6.1} * T_{6.1})] - [(\dot{m}_4 * Cp_4 * T_4 + (\dot{m}_{4.1} * Cp_{4.1} * T_{4.1})] \quad (16)$$

$$\dot{Q} = \dot{m}_5 * LHV * \eta_{s,cc} \quad (17)$$

$$\mathrm{P}_6 = \mathrm{P}_4 * (1 - \Delta \mathrm{P}_{\mathrm{fd}}) \quad (18)$$

$$P_6 = P_{6.1} \quad (19)$$

High Pressure Turbine (6-7);

$$T_7 = T_6 - \left(\frac{\dot{\mathrm{W}}_{HPC}}{\dot{m}_6 * Cp_6 * \eta_{s,m}}\right) \quad (20)$$

$$P_7 = P_6 * \left(1 - \left(\frac{T_6 - T_7}{T_6}\right) * \left(\frac{1}{\eta_{s,t}}\right)^{\frac{kg}{kg-1}}\right) \quad (21)$$

$$T_7 = T_{7.1} \qquad P_7 = P_{7.1} \quad (22)$$

$$\dot{\mathrm{W}}_{HPC} = \dot{\mathrm{W}}_{HPT} * \eta_{s,m} \quad (23)$$

Low Pressure Turbine (7-8);

$$T_8 = T_7 - \left(\frac{\dot{\mathrm{W}}_{LPC}}{\dot{m}_7 * Cp_7 * \eta_{s,m}}\right) \quad (24)$$

$$P_8 = P_7 * \left(1 - \left(\frac{T_7 - T_8}{T_7}\right) * \left(\frac{1}{\eta_{s,t}}\right)^{\frac{kg}{kg-1}}\right) \quad (25)$$

$$T_8 = T_{8.1} \qquad P_8 = P_{8.1} \quad (26)$$

$$(\dot{\mathrm{W}}_{LPC} + \dot{\mathrm{W}}_{FAN}) = \dot{\mathrm{W}}_{LPT} * \eta_{s,m} \quad (27)$$

Exhaust Duct (8-9);

$$\mathrm{T}_9 = \mathrm{T}_8 \quad (28)$$

$$\mathrm{P}_9 = \mathrm{P}_8 * (1 - \Delta \mathrm{P}_{\mathrm{ed}}) \quad (29)$$

If the exhaust duct is choked, the pressure ratio is calculated as follows;

$$P_{ch} = \left(\frac{kg+1}{2}\right)^{\frac{kg}{kg-1}} \quad (30)$$

$$P_{9s} = \frac{P_9}{P_{ch}} \quad (31)$$

Here, P_{9s} is the exhaust duct outlet static pressure. If $\frac{\mathrm{P}_9}{\mathrm{P}_{\mathrm{atm}}} > \mathrm{P}_{\mathrm{ch}}$, the exhaust duct is choked. Thus, the output becomes Mach=1. Accordingly, the static temperature is expressed as follows;

$$T_{9s} = \left(\frac{T_9}{1 + \frac{kg-1}{2}}\right) \quad (32)$$

Cp values of exhaust gas and air temperature at the inlet and outlet points of turbofan engine components are calculated as follows;

$$C_{12}H_{23} + \delta\left(17.75 * (O_2 + 3.762N_2)\right) \rightarrow 12CO_2 + 11.5H_2O + (\delta - 1) * (17.75O_2) + \delta * 17.75 * 3{,}762N_2 \quad (33)$$

The kerosene combustion equation given above includes %75.76 N_2, %4.65 CO_2, %13.29 O_2, and %6.30 H_2O. Depending on the gas percentages in the fuel component of kerosene fuel, the specific heat capacity values of air and fuel are determined according to the equations taken from (Çengel, 2011)

$$C_p = a + bT + cT^2 + dT^3 \quad (34)$$

The specific heat capacity of air is shown by the following equation (Oğur, 2023);

$$C_{p.air=}1.04841 - \left(\frac{3.83719.T}{10^4}\right) * \left(\frac{9.45378T^3}{10^7}\right) - \left(\frac{5.49031T^2}{10^{10}}\right) + \left(\frac{7.92981T^4}{10^{14}}\right) \quad (35)$$

The following formula is used to calculate thrust force in turbofan engines (Ballı and Çalışkan, 2021b);

$$ET = \dot{m}_{1.2} * (V_{1.2} - V_1) + (\dot{m}_9 + \dot{m}_{9.1}) * (V_9 - V_1) + A_{1.2} * (P_{1.2} - P_1) + A_9 * (P_9 - P_1) \quad (36)$$

The thrust force is written with the following formula (Akdeniz and Ballı, 2021a);

$$\dot{W}_p = ET * V_1 \quad (37)$$

Thrust efficiency, which has a significant impact on determining the performance of the turbofan engine, is expressed as follows (Oğur, 2023);

$$\eta_{ET} = \frac{\dot{W}_p}{\dot{Q}_{in}} \quad (38)$$

The energy efficiency of a turbofan engine expresses the ratio of kinetic energy to heat input and is written as follows (Akdeniz, 2021a; Ballı, 2017; Andriani, 2011; Tiwari, 2024);

$$\eta_{th} = \frac{\dot{W}_p + E_{KN}}{\dot{Q}_{in}} \quad (39)$$

$$E_{KN} = \dot{m}_1 * \frac{V_1^2}{2} \quad (40)$$

Specific fuel consumption is the amount of fuel consumed per unit thrust force and is an important parameter for businesses. Specific fuel consumption is expressed as follows (Yüksel, 2020; Ballı, 2021b);

$$SFC = \frac{\dot{m}_5}{ET} \quad (41)$$

Energetic and exergic fuel costs are calculated as follows (Ekrataleshian, 2020; Aygün, 2020; Atilgan, 2020; Dişlitaş, 2021;Ballı, 2021b; Kocaman, 2022; Köse, 2021; Oğur, 2024);

$$C_{en} = PR * \dot{m}_f * 3600 * \lambda \quad (42)$$

$$C_{ex} = \frac{C_{en} * LCV}{ex_{fuel}^{ch} * \lambda} \quad (43)$$

$$ex_{fuel}^{-ch} = -(AG)_f + \sum_P n_k (ex_{k,P}^{-ch}) - \sum_R n_k (ex_{k,R}^{-ch} \quad (44)$$

$$\Delta G_{fuel} = \sum_P \dot{n}_{k,P} \Delta g_{fuel,k,P} - \sum_R \dot{n}_{k,R} \Delta g_{fuel,k,R} \quad (45)$$

Emission gases, which contribute greatly to global warming, have been the subject of many studies in the aviation sector, as in all sectors. Engine companies have made advances to reduce emissions. But these are still insufficient. Some formulas obtained from the studies are presented below (Caliskan, 2015; Kanbur, 2018; Koc, 2020; Tuzcu, 2020; Atilgan, 2020; Dişlitaş, 2021; Ballı, 2021b; Köse, 2021; Oğur, 2025a, Oğur, 2025b).

$$XCO_2 = YCO_2 * \dot{m}_5 \quad (46)$$

Cost of the amount of carbon released by the fuel (CCO_2);

$$CCO_2 = XCO_2 * NCO_2 \quad (47)$$

NCO_2 is Turkey's CO_2 price per ton and is accepted as 1.5$ (Kyoto Protocol).

RESULTS AND DISCUSSIONS

This article aims to investigate the changes in the performance of a turbofan engine using kerosene fuel by changing the fan pressure ratio in the range of 1.26-1.98 and the bypass air ratio in the range of 4.4-11.6. In the study, firstly, mathematical modeling is made for the thermodynamic analysis of the GE90 turbofan engine using data obtained from the literature. In the first stage, thrust force, thrust efficiency, specific fuel consumption, thrust power, energy efficiency, heat input, and fuel flow rate are calculated. Then, fuel costs, environmental impact, and its cost to the business, which are important for businesses, are examined. These results are presented in Table 2. In the last stage of the study, the fan pressure ratio and bypass air ratio are changed in the above-mentioned ratios, and the results are compared with the calculated values obtained from the engine's literature data. Accordingly, the graphs of the thrust efficiency, thrust force, and specific fuel consumption of the turbofan engine are presented in Figure 2.

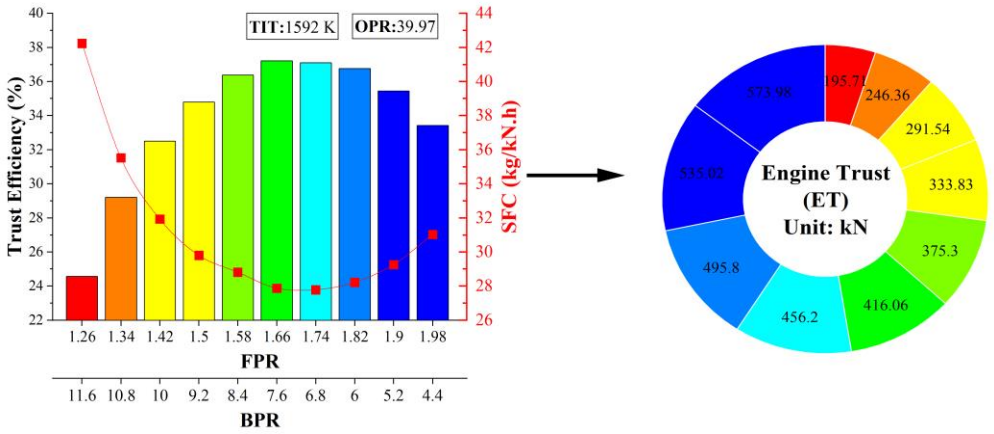


Figure 2. Change in Specific Fuel Consumption, Thrust Efficiency and Thrust of the Turbofan Engine

Fan pressure ratio is obtained by dividing the ratio of the highest pressure to the lowest pressure of the general pressure ratio, which expresses the part from the fan inlet to the outlet of the high-pressure compressor. Fan pressure ratio is an important parameter in turbofan engines. Because the suction pressure decreases in a small diameter fan, it draws in less air. The fan pressure ratio increases, and the speed of the air fluid increases. However, in a large diameter fan, a lower fan pressure ratio is achieved with a higher air flow rate. This is where bypass air comes into play. Approximately 80% of the thrust force is provided by bypass air. Another 10% is used to cool the engine core. To move a large amount of air, the fan needs the fan blades to rotate at a higher speed, which creates high tension on the blades and causes friction. Another negative effect is that as the fan diameter increases, the weight of the fan increases. As seen in Figure 2, as the fan pressure ratio increased, the thrust force increased. However, thrust efficiency does not increase in the same way. While the highest thrust efficiency of 37.22% is achieved at the ratios FPR:1.66-BPR:7.6, the thrust force at this point is calculated as 416.06 kN. After this value, thrust efficiency decreased with increasing fan pressure ratio. After this value, thrust efficiency decreased with increasing fan pressure ratio. While the highest thrust force is obtained as 573.98 kN at the FPR:1.98 BPR:7.6 ratios, the thrust efficiency decreased to 33.43%. Bypass air is an important parameter in specific fuel consumption. While the specific fuel consumption reaches its highest value of 42.23 kg/kN.h at the ratios of FPR:1.26-BPR:11.6, the decrease at this point is the high energy consumption to provide the decreasing thrust force as a result of the low fan pressure ratio. In the

study, the most ideal specific fuel consumption is calculated as 27.87 kg/kN.h with the ratios FPR:1.66-BPR:7.6. In high bypass air, it uses a higher amount of air around the engine, using less air for expansion within the engine core. It is more suitable for specific fuel consumption due to the combination of less fuel flow and more air flow. Thrust force can be produced from the sum of a higher air flow rate and a lower fuel flow rate. The thrust power and energy efficiency results of the turbofan engine are presented in Figure 3.

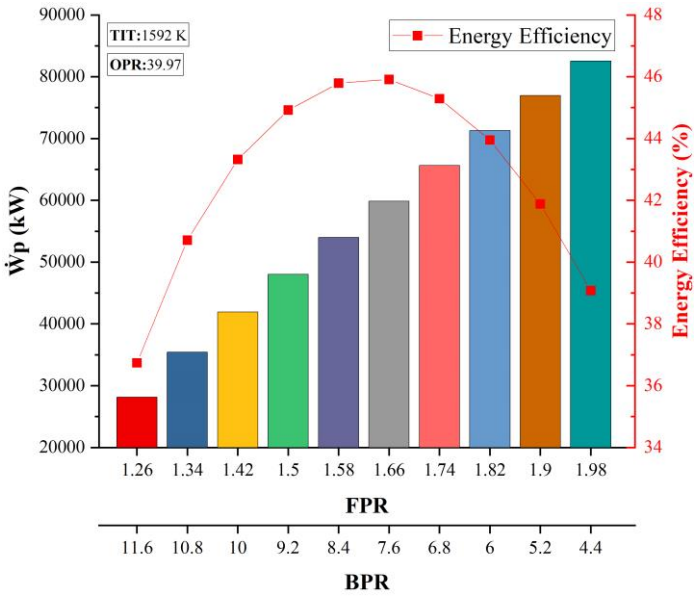


Figure 3. Thrust Power and Thermal Efficiency Change of the Turbofan Engine

In the thrust power and energy efficiency values presented in Figure 3, the highest thrust power is calculated as 82546.5 kW at the ratios FPR: .98-BPR:4.4. As the fan pressure ratio increased, the thrust power increased. While the energy efficiency reached the highest value with 45.91% at the ratios of FPR: 1.66-BPR:4.4, it started to decrease after this value as the BPR decreased. Bypass air has a high impact on energy efficiency. While most of the bypass air is used for thrust force, some of it passes through the engine combustion chamber and turbine blades, allowing the engine to cool, thus providing a higher efficiency. However, as the fan diameter increases, friction occurs on the end surfaces of the blades as a result of the increase in rotation speed. This has a limited increasing effect on efficiency. The fuel flow rate and heat input results of the turbofan engine are presented in Figure 4.

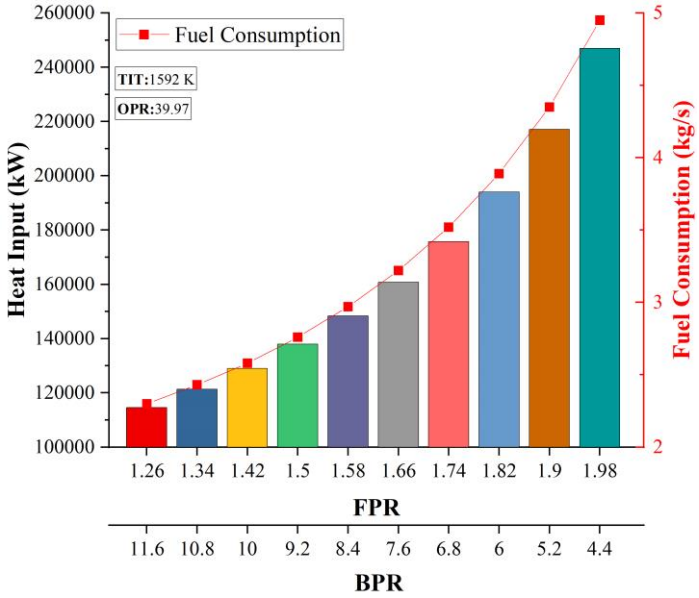


Figure 4. Heat Input and Fuel Flow Change of the Turbofan Engine

The heat input and fuel flow rate presented in Figure 4 increased with the increase of the fan pressure ratio. Accordingly, it is calculated as 246959.62 kW at the highest FPR:1.98-BPR:4.4 ratios. The fuel flow rate calculated based on heat input increased in the same direction as the fan pressure ratio increased. These values are highest at 4.95 kg/s at FPR:1.98-BPR:4.4 rates and lowest at 2.30 kg/s at FPR:1.26-BPR:11.6 rates. Although increasing the fan pressure ratio increases the amount of heat produced, this situation has negative aspects. A higher fan housing means a higher fan speed. This requires a higher turbine body due to the low-pressure turbine shaft to which it is connected. There is a certain limit to both the composite fan blade material and the turbine blade materials that will produce high power. This situation is not compatible with the engine design. The results of the energetic and exergetic fuel cost ratios determined according to the fuel flow rate of the turbofan engine are presented in Figure 5.

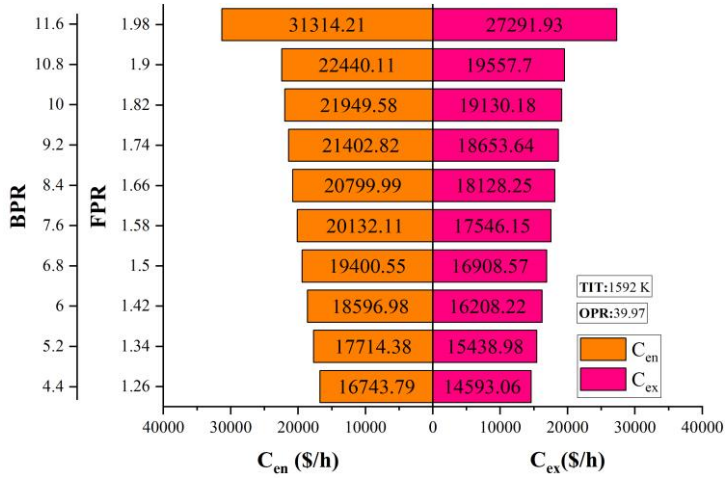


Figure 5. Energetic and Exergetic Fuel Cost Variation of the Turbofan Engine

As seen in Figure 5, as the fan pressure ratio increases, fuel cost also increases due to the increasing fuel flow rate. The highest fuel cost is calculated as C_{en}: 31314.21$/h and C_{ex}: 27291.93$/h at the rates FPR:1.98-BPR:4.4. The lowest values are obtained as C_{en}:16743.79$/h and C_{ex}:14593.06$/h at the rates FPR:1.26-BPR:11.6. As the fan pressure ratio increases, higher engine power and therefore higher heat production is required. Considering today's fuel costs, high values are a great burden for businesses. Increasing fan diameter is also a negative factor in that it increases fuel costs. The calculated emission release amount, depending on the fuel flow rate of the turbofan engine and the cost of this released emission amount, is presented in Figure 6.

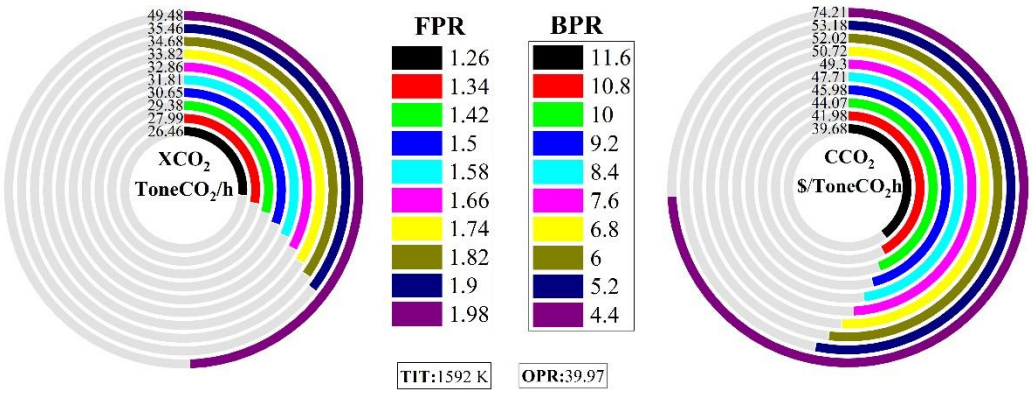


Figure 6. Change in Emission Amount and the Emission Cost of the Turbofan Engine

As seen in Figure 6, the amount of emissions sent to the atmosphere from a kerosene-fueled turbofan engine increases with the increase in the fan pressure ratio. The highest value is calculated as 49.48 tonCO_2/h and 74.21 $/ton$CO_2$.h in the ratios of FPR:1.98-BPR:4.4. The lowest emission release amount and cost at FPR:1.26-BPR:11.6 rates are calculated as 26.46 tonsCO_2/h and 39.68 $/ton$CO_2$.h.Considering the damage that greenhouse gases cause to the planet and living things, all businesses and researchers accept how important it is to reduce these gases and are working on reducing them. There are certain limits for increasing or decreasing the fan pressure ratio and bypass air. Taking these values into consideration, businesses and engineers make their calculations. The change in exhaust gas

outlet temperature depending on the fan pressure ratio and bypass air change of the turbofan engine is presented in Figure 7.

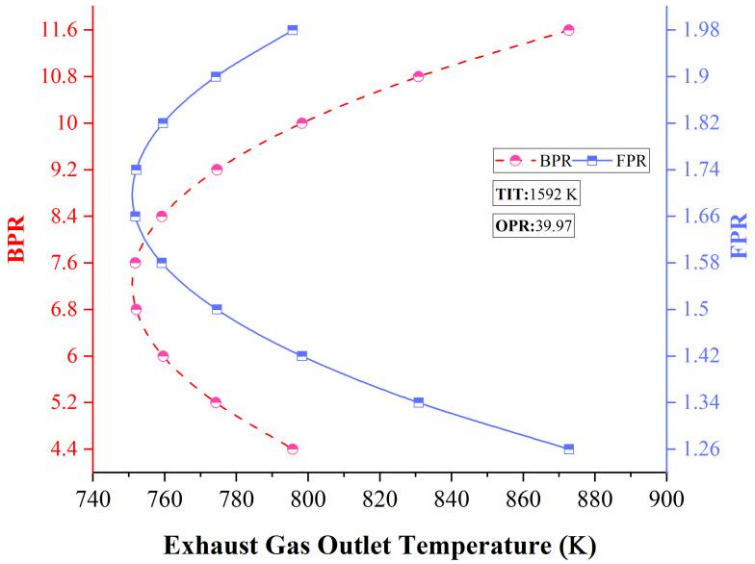


Figure 7. Exhaust Gas Outlet Temperature Change of the Turbofan Engine

As seen in Figure 7, the exhaust gas outlet temperature decreased with the increase of the fan pressure ratio. The highest value is obtained as 872.74 K at the ratios FPR:1.98-BPR:4.4. The lowest value is 751.8 K at the rates FPR:1.74-BPR:7.6 has been calculated. Depending on the fan pressure ratio reduced to increase the bypass air, the pressure ratio of the high-pressure compressor increases. This ensures that the air and fuel flow entering the combustion chamber are mixed in better proportions. This high pressure occurring in the combustion chamber increases the expansion of the burned gas and converts a higher amount of the enthalpy of this gas into kinetic energy, allowing the engine to operate at a high efficiency. This also causes the exhaust gas to exit the exhaust duct at a higher speed, thus creating a high thrust force. Thermodynamic parameters for each point and thermodynamic performance results of the turbofan engine are given in Tables 2 and 3, respectively.

Table 2. Thermodynamic Parameters for Each Point in the Turbofan Engine: FBR:1.58-BPR:8.4

No	Fluid type	T (K)	P (kPa)	ṁ (kg/s)	Cp (kJ/kg.K)
1	Fan air input	288.15	101.33	1350	1.0040
1.1	Fan duct air input	331.41	160.10	1206.38	1.0060
1.2	Fan duct air output	330.50	158.50	1206.38	1.0060
2	Low-pressure compressor air input	331.41	160.10	143.62	1.0060
3	High-pressure compressor air input	341.46	176.11	143.62	1.0068
4	Combustion chamber air input	885.34	4050.57	129.26	1.1174
5	Fuel	298.15	2500.00	2.97	-
6	High-pressure turbine exhaust gas inlet input	1592	3807.53	132.23	1.3343
7	Low-pressure turbine exhaust gas inlet input	1103.36	766.18	132.23	1.2493
8	Exhaust duct exhaust gas inlet	759.18	149.27	132.23	1.1672
9	Exhaust duct exhaust gas outlet	759.18	141.81	132.23	1.1672
4.1	Combustion chamber cold air input	885.34	4050.57	14.36	1.1174
6.1	High-pressure compressor cold air input	973.87	3807.53	14.36	1.1355
7.1	Low-pressure compressor cold air input	1103.36	766.18	14.36	1.1559
8.1	Exhaust duct cold air input	759.18	149.27	14.36	1.0881
9.1	Exhaust duct cold air outlet	759.18	141.81	14.36	1.0881

Table 3. Thermodynamic Performance Results of the Turbofan Engine

$\dot{Q}_{in}$ kW	$\dot{W}p$ kW	ET kN	SFC kg/kN.h	η_{ET} %	η_{th} %	C_{en} $/h	C_{ex} $.h	XCO_2 ton.CO_2/h	CCO_2 $/ton$CO_2$.h
148369.21	53973.83	375.30	28.81	36.38	45.79	20132.11	17546.15	31.81	47.71

CONCLUSION

In this work, the performance of the turbofan engine was investigated by changing the fan pressure ratio and bypass air ratio of the GE90 turbofan engine. The conclusions obtained from the performance analysis results of the turbofan engine are as follows;

- The highest thrust efficiency of the engine is obtained as 37.22% at FPR: 1.66-BPR: 7.6 ratios. As the fan pressure ratio increased, the thrust force increased. The lowest thrust efficiency is obtained as % 24.56 at the ratios FPR:1.26-BPR:11.6.
- The highest specific fuel consumption of the engine is 42.23 kg/kN. h at FPR: 1.26-BPR: 11.6, while the lowest value is 31.03 kg/kN.h at FPR: 1.74-BPR: 6.8.
- The highest thermal efficiency of the engine was obtained as 45.91% at FPR:1.66-BPR:7.6 rates.
- The fuel cost obtained in the turbofan engine was obtained as the highest with C_{en} :31314.21 $/h and C_{ex} :27291.93 $/h at FPR:1.98-BPR:4.4 rates, and the lowest with C_{en}:16743.79 $/h and C_{ex} : 14593.06 $/h at FPR:1.26-BPR:11.6 rates.
- The amount of emissions released and the cost of this amount were calculated as 49.48 tons.CO_2/h and 74.21 $/tonCO2.h at the highest rates of FPR: 1.98-BPR: 4.4. The lowest emission release amount and cost values are obtained as 26.46 ton.CO_2/h and 39.68 $/ton$CO_2$.h in the ratios of FPR:1.26-BPR:11.6.

Engine manufacturing companies want to produce the most suitable engine in terms of both design and thermodynamic performance. Thermodynamic performance parameters increase with increasing fan pressure ratio, but engine designs suitable for these conditions may be limited. As fan pressure increases, bypass air decreases. To increase the fan pressure, it is necessary to reduce the fan diameter. This causes less air fluid to be taken in. The air fluid begins to rotate faster at a higher pressure rate, which increases the fluid speed. This creates a high friction resistance within the fan duct. As the fan pressure ratio increases, the fuel flow rate increases, but there may not be a good mixture due to the low amount of air trapped in the engine core. Therefore, it may not be an inefficient combustion. Increasing bypass air increases thrust and reduces the fuel flow rate used. However, to get a high amount of airflow, we need to increase the fan diameter. This means greater power production.

To produce this high power, a large-diameter turbine is required. These situations both cause the engine to operate noisily and increase the weight of the engine. This article provides important data to the literature in terms of design parameters and operating performance in aircraft engine studies. It will contribute to the environmental and economic analysis of exergy, exergy sustainability for aircraft engines in future studies.

NOMENCLATURE

BPR	bypass air rate
C_p	specific heat capacity (kJ/kgK)
CCO_2	emission Cost ($/ton$CO_2$. h)
ET	engine thrust (kN)
E_{KN}	kinetic energy
FPR	fan pressure ratio
g	gravity (m/s^2)
$\dot{m}$	mass flow rate (kg/s)
P_0	atmospheric pressure (kPa)
P	pressure (kPa)
PLR	productivity lack rate (%)
R	gas constant (kj/kgK)
SEF	sustainability efficiency factor (-)
PR	engine fuel cost ($)
$\dot{Q}$	heat flow (kW)
T_0	atmospheric temperature (K)
T	temperature (K)
V	velocity (m/s)
$\dot{W}$	power (kW)
XCO_2	amount of released carbon (tonCO_2/h)

Greek letters

η	efficiency (%)

Subscripts

atm	atmosphere
ch	chemical
in	input
k	the kth component
nk	mole value of the ideal gas
out	output
P	product
ph	physical
R	reactant
t	working hour
th	thrust

REFERENCES

Akdeniz, H. Y., & Balli, O. (2021a). Effects of bypass ratio change trend on performance in a military aircraft turbofan engine with comparative assessment. *Journal of Energy Resources Technology*, *143*(12), 120905..

Akdeniz, H. Y., & Balli, O. (2021b). Energetic and exergetic assessment of operating biofuel, hydrogen and conventional JP-8 in a J69 type of aircraft turbojet engine. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, *146*(4), 1709-1721.

Andriani, R., Gamma, F., & Ghezzi, U. (2011). Numerical analysis of intercooled and recuperated turbofan engine.

Arslan, O., Acikkalp, E., & Genc, G. (2022). A multi-generation system for hydrogen production through the high-temperature solid oxide electrolyzer integrated to 150 MW coal-fired steam boiler. *Fuel*, *315*, 123201.

Artaş, S. B., Kocaman, E., Bilgiç, H. H., Tutumlu, H., Yağlı, H., & Yumrutaş, R. (2023). Why PV panels must be recycled at the end of their economic life span? A case study on recycling together with the global situation. *Process Safety and Environmental Protection*, *174*, 63-78.

Asoliman, I. M., Ehab, M., Mahrous, A. M., El-Sayed, A., & Emeara, M. (2018, July). Performance Analysis of High Bypass Turbofan Engine Trent 1000-A. In *3rd IUGRC International Undergraduate Research Conference*.

Atilgan, R., & Turan, O. (2020). Economy and exergy of aircraft turboprop engine at dynamic loads. *Energy*, *213*, 118827.

Balli, O. (2017). Exergy modeling for evaluating sustainability level of a high by-pass turbofan engine used on commercial aircrafts. *Applied Thermal Engineering*, *123*, 138-155.

Balli, O., Ekici, S., & Karakoc, T. H. (2021a). TF33 Turbofan engine in every respect: Performance, environmental, and sustainability assessment. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, *40*(3), e13578..

Balli, O., & Caliskan, H. (2021b). Turbofan engine performances from aviation, thermodynamic and environmental perspectives. *Energy*, *232*, 121031.

Caliskan, H. (2015). Novel approaches to exergy and economy based enhanced environmental analyses for energy systems. *Energy conversion and management*, *89*, 156-161.

Coban, K., Colpan, C. O., & Karakoc, T. H. (2017). Application of thermodynamic laws on a military helicopter engine. *Energy*, *140*, 1427-1436.

Cengel, Y. A., & Boles, M. A. (2011). Thermodynamics: An Engineering Approach Seventh Edition in SI Units.

Çoban K. (2018). Energy, Exergy and Sustainability Analysis of Turbojet Engine Working with Different Fuels in Unmanned Aerial Vehicles. PhD Dissertation, Eskisehir Anadolu University Institute of Science August 2018.

Dankanich, A., & Peters, D. (2017). Turbofan engine bypass ratio as a function of thrust and fuel flow.

Dişlitaş, A. N., & Çeper, B. A. (2021). Examination of parametric cycle analysis of a turbofan engine with Python code. *International Journal of Energy Applications and Technologies*, *8*(4), 203-210.

Ekrataleshian, A., Pourfayaz, F., & Ahmadi, M. H. (2021). Thermodynamic and thermoeconomic analyses and energetic and exergetic optimization of a turbojet engine. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, *145*, 909-923.

Fetahi, K. (2020). *A Parametric Analysis of a Turbofan Engine with an Auxiliary Bypass Combustion Chamber: The Turboaux Engine* (Master's thesis, Old Dominion University).

GEnx-ib76 turbofan engine. General Electric/Aero-Engines: Usa. April 1997.

Kanbur, B. B., Xiang, L., Dubey, S., Choo, F. H., & Duan, F. (2018). Mitigation of carbon dioxide emission using liquefied natural gas cold energy in small scale power generation systems. *Journal of Cleaner Production*, *200*, 982-995.

Kocaman, E., Karakuş, C., Yağlı, H., Koç, Y., Yumrutaş, R., & Koç, A. (2022). Pinch point determination and Multi-Objective optimization for working parameters of an ORC by using numerical analyses optimization method. *Energy Conversion and Management*, *271*, 116301.

Koç, A., Yağlı, H., Bilgic, H. H., Koç, Y., & Özdemir, A. (2020). Performance analysis of a novel organic fluid filled regenerative heat exchanger used heat recovery ventilation (OHeX-HRV) system. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, *41*, 100787.

Köse, Ö., Koç, Y., & Yağlı, H. (2021). Energy, exergy, economy and environmental (4E) analysis and optimization of single, dual and triple configurations of the power systems: Rankine Cycle/Kalina Cycle, driven by a gas turbine. *Energy conversion and management*, *227*, 113604.

Özdemir Küçük, E., & Kılıç, M. (2023). Exergoeconomic and exergetic sustainability analysis of a combined dual-pressure organic rankine cycle and vapor compression refrigeration cycle. *Sustainability*, *15*(8), 6987.

Marek, C. J., Liew, K. H., Urip, E., & Yang, S. L. (2005, June). A Parametric Cycle Analysis of a Separate-Flow Turbofan With Interstage Turbine Burner. In *41st Aerospace Sciences Meeting and Exhibit* (No. NASA/CR-2005-213657).

Najjar, Y. S., & Balawneh, I. A. (2015). Optimization of gas turbines for sustainable turbojet propulsion. *Propulsion and Power Research*, *4*(2), 114-121.

Oğur, E., Koç, A., Yağlı, H., Koç, Y., & Köse, Ö. (2024). Thermodynamic, economic, and environmental analysis of a hydrogen-powered turbofan engine at varying altitudes. *International Journal of Hydrogen Energy*, *55*, 1203-1216.

Oğur, E., Koç, A., Köse, Ö., Koç, Y., & Yağlı, H. (2024). Performance assessment of ammonia as a turbofan engine fuel during various altitude levels. *Energy*, *308*, 132714.

Oğur, E., Koç, A., Köse, Ö., Yağlı, H., & Koç, Y. (2025a). Energy, exergy, exergoeconomic, exergy sustainability and exergoenvironmental analyses (5E) of a turbofan engine: A comparative study of hydrogen and kerosene fuels. *Fuel*, *381*, 133324.

Oğur, E., Koç, A., Yağlı, H., Köse, Ö., & Koç, Y. (2025b). Shifting to lower carbon emission for aircraft: An alternative fuel evaluation. *Energy*, *316*, 134426.

Ping, X., Yao, B., Zhang, H., & Yang, F. (2021). Thermodynamic analysis and high-dimensional evolutionary many-objective optimization of dual loop organic Rankine cycle (DORC) for CNG engine waste heat recovery. *Energy*, *236*, 121508.

Sabzehali, M., Rabiee, A. H., Alibeigi, M., & Mosavi, A. (2022). Predicting the energy and exergy performance of F135 PW100 turbofan engine via deep learning approach. *Energy Conversion and Management*, *265*, 115775.

Su, L., Wen, F., Wang, S., & Wang, Z. (2022). Analysis of energy saving and thrust characteristics of rotating detonation turbine engine. *Aerospace Science and Technology*, *124*, 107555.

Sürer, M. G., & Arat, H. T. (2024). Energy and exergy analysis of hydrogen production from seawater using waste heat recovery system on a model ship. *International Journal of Exergy*, *44*(1), 53-64.

Tiwari, D. (2024). Improved evacuated and compound parabolic collector-driven ORC/VCR system: a thermodynamic analysis. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, *149*(15), 8539-8553.

Type-certıfıcate data sheet. No. IM. E.002 for GE90 Series Engines Type Certificate Holder General Electric Company GE Aviation 1 Neumann Way Cincinnati, OH 45215-6310 USA. 18 December 2019.

Tuzcu, H., Sohret, Y., & Caliskan, H. (2021). Energy, environment and enviroeconomic analyses and assessments of the turbofan engine used in aviation industry. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, *40*(3), e13547.

Xue, R., Jiang, J., & Jackson, A. (2019). Effect of bypass ratio on optimal fan outer pressure ratio and performance for turbofan engines. *International Journal of Aeronautical and Space Sciences*, *20*, 157-164.

Yapicioglu, A., & Dincer, I. (2018). Performance assesment of hydrogen and ammonia combustion with various fuels for power generators. *International Journal of Hydrogen Energy*, *43*(45), 21037-21048.

Yucer, C. T. (2016). Thermodynamic analysis of the part load performance for a small scale gas turbine jet engine by using exergy analysis method. *Energy*, *111*, 251-259.

Yuksel, B., Balli, O., Gunerhan, H., & Hepbasli, A. (2020). Comparative performance metric assessment of a military turbojet engine utilizing hydrogen and kerosene fuels through advanced exergy analysis method. *Energies*, *13*(5), 1205.

KSÜ Mühendislik Bilimleri Dergisi, 28(2), 2025
Araştırma Makalesi

KSU J Eng Sci, 28(2), 2025
Research Article

Kahramanmaras Sutcu Imam University
Journal of Engineering Sciences

Geliş Tarihi : 02.12.2024
Kabul Tarihi :14.02.2025

Received Date : 02.12.2024
Accepted Date : 14.02.2025

FARKLI EĞİM VE AZİMUT AÇISI SENARYOLARI ALTINDA GÜNEŞ ENERJİSİ SANTRALİNİN ÜRETİM PERFORMANSLARININ ANALİZİ

ANALYSING THE GENERATION PERFORMANCE OF A SOLAR POWER PLANT UNDER DIFFERENT TILT AND AZIMUTH ANGLE SCENARIOS

Furkan DİNÇER[1*] (ORCID: 0000-0001-6787-0850)
Emre ÖZER[2] (ORCID: 0000-0001-5881-2253)

[1] Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Kahramanmaraş, Türkiye
[2] Gaziantep İslam Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, Gaziantep, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Furkan Dincer, furkandincer@ksu.edu.tr

ÖZET

Bu çalışmada, 14,82 kWp / 10 kWe gücündeki bir güneş enerji santralinin farklı eğim ve azimut açısı senaryoları altında üretim performansı detaylı olarak analiz edilmiştir. Santralin yıllık elektrik enerjisi üretimi bilgisayar destekli analiz programı kullanılarak hesaplanmıştır. İlgili mevzuatlar gereği; günün belirli saatlerinde üretilen güç, sözleşme gücünü aştığında şebekeye enerji verilmesi sınırlandırılmakta ve güç çıkışı kısıtlanmaktadır. Yapılan simülasyon çalışmasında santralin panel kapasitesi elektrik bağlantı gücünden %48,2 daha yüksek olacak şekilde tasarlanmış ve farklı yüklenme senaryoları değerlendirilmiştir. Çalışmada, farklı eğim ve yönlendirme kombinasyonlarını içeren dokuz panel yerleşim senaryosu analiz edilmiştir. En uygun konfigürasyon, panellerin %10 doğu (10°), %10 batı (10°) ve %80 güney (20°) yönlü yerleştirilmesi olarak belirlenmiş ve yıllık net 23.831 kWh elektrik enerjisi üretimi sağlanmıştır. Ayrıca, enerji üretiminin çevresel etkileri değerlendirilmiş ve en iyi senaryoda yılda 15,12 ton CO_2 salınımının önlendiği hesaplanmıştır. Bu çalışma, fotovoltaik santrallerde panel yerleşim optimizasyonunun enerji üretim verimini artırmada ve güç kısıtlamalarını en aza indirmede kritik bir rol oynadığını ortaya koymaktadır.

Anahtar Kelimeler: Fotovoltaik, panel yerleşimi, azimut, eğim, enerji üretim performansı

ABSTRACT

In this study, the production performance of a 14.82 kWp / 10 kWe solar power plant was analyzed in detail under different tilt and azimuth angle scenarios. The plant's annual electricity generation was calculated using a computer-aided analysis program. As per relevant regulations, when the generated power exceeds the contract power during certain hours of the day, energy injection into the grid is restricted, and the power output is limited. In the simulation study, the panel capacity of the plant was designed to be 48.2% higher than the electrical connection capacity, and different loading scenarios were evaluated. The study analyzed nine panel layout scenarios, considering various tilt and orientation combinations. The optimal configuration was determined as 10% of the panels facing east (10°), 10% facing west (10°), and 80% facing south (20°), resulting in an annual net electricity generation of 23,831 kWh. Additionally, the environmental impacts of energy production were assessed, and it was calculated that the best scenario prevents 15.12 tons of CO_2 emissions per year. This study highlights the critical role of panel placement optimization in photovoltaic power plants to enhance energy production efficiency and minimize power limitations.

Keywords: Photovoltaic, panel placement, azimuth, tilt, energy generation performance

GİRİŞ

ToCite: DİNÇER, F., & ÖZER, E., (2025). FARKLI EĞİM VE AZİMUT AÇISI SENARYOLARI ALTINDA GÜNEŞ ENERJİ SANTRALİNİN ÜRETİM PERFORMANSLARININ ANALİZİ. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 28(2), 644-659.

Dünya genelinde günden güne artan elektrik enerjisi ihtiyacını karşılamak için yenilenebilir enerji kaynaklarından elektrik enerjisi üretimine yönelik talep giderek artmaktadır. Yenilenebilir enerji kaynaklarından elektrik enerjisi üretimi yöntemleri içerisinde güneş enerjisi kaynağı önemli bir yer tutar. Güneş enerjisinden elektrik enerjisi ise güneş panelleri (fotovoltaik paneller) ile üretilir. Ancak güneş panellerinin üreteceği elektrik enerjisi miktarı panel özellikleri, bulutluluk, tozluluk gibi çevresel faktörler, kurulum yeri özellikleri, panel eğimi ve panellerin yerleşim şekli gibi kuramsal birçok faktörlere bağlı olarak değişmektedir (Boztepe, 2017; Ogundimu vd., 2019).

Güneş enerji santrallerinde sisteme sağlaması istenilen belli bir sınır güç değeri bulunmaktadır. Buna sözleşme gücü veya bağlantı anlaşma gücü de denilmektedir. Santral kurulumu yapılırken bağlantı anlaşma gücü baz alınarak belirli bir oranda da sözleşme gücü üzerinde fotovoltaik panel yüklemesi yapılmaktadır. Çünkü, panelin elektrik enerjisi üretimi çevresel faktörlere göre değişmektedir. Bağlantı anlaşma gücü değerinin aşımında sistem, şebekenin dengesi ve güvenilirliği için kesime veya kıpmaya gider. Belirlenen sınır değerin altında sistem enerji üretimine devam ederken bu değerin aşımında kesintiye girerek ekipman ve şebeke üzerinde oluşabilecek sorunlar önlenir. İlgili dağıtım veya iletim şirketi ile de bağlantı anlaşma gücü üzerinden sözleşme yapılmaktadır. Bundan ötürü bu gücün aşılması durumunda santralin çeşitli yaptırımlara maruz kalması söz konusu olabilir. Bundan ötürü bağlantı anlaşma gücü üzerinde fotovoltaik panel yüklemesi yapılan santrallerde yüklenme değeri önem arz etmektedir.

Güneş enerjisi santrallerinin veriminin artırılmasında panellerin eğim ve azimut değerinin optimal şekilde belirlenmesi kritik öneme sahiptir. Literatürde panel eğim derecesi ve yönü (azimut açısı) üzerine birçok farklı çalışmalar mevcuttur (Hafez ve vd., 2019; Geliş vd., 2020). Atlım vd. (2019) Balıkesir ilinde güney yönlü farklı iki santralin panel açısından verimliliklerinin karşılaştırılması yapmıştır ve 29º de en yüksek verim elde edilmiştir. Yağlı ve Koç (2020), panel eğim açısının üretilen enerji miktarına etkisini Gaziantep bölgesi için incelemiş ve optimum açının 31º olduğunu belirtmiştir. En iyi eğim açısını sırasıyla Kaçan ve Ülgen (2012) İzmir için 30,3º, Koçer vd. (2016) Ankara için 34º ve Bakirci (2012) ise Erzurum için 34,3º olarak belirlemiştir. Çalışmalarda Türkiye genelinde en iyi eğim açısı 30º ile 34º arasında değişmektedir. Panel yerleşimi genellikle kuzey yarımkürede güneye yönünde yönlendirilmiştir (Rowlands vd., 2011). Arslan ve Çunkaş (2024), Konya'da kurdukları sistemle panelleri doğu-batı yönünde 0° ila 60° arasında 10 derecelik artışlarla hareket ettirerek sistem performansını incelemişlerdir. Optimum eğimi 32.08° olarak belirlemişlerdir. Hussein vd., (2004), Kahire için en iyi eğim açısı ve yönelimi panellerin güneye yönlü ve 20°-30° arası olduğu durumda elde etmiştir. Ayrıca Dünya genelinde farklı lokasyonlar için eğim ve azimut açısı değişiminin fotovoltaik modüllerinin yüzeyine düşen ışınıma dolayısıyla enerji üretimine etkisini araştıran yakın zamanlı birçok çalışmaya rastlamak mümkündür. Bu kapsamda Çin (Lu & Qin, 2024), İtalya ve Fransa (Memme ve Fossa, 2022), Uganda (Mukisa ve Zamora, 2022), kuzey yarımkürede yer alan Kolombiya, Tayland Meksika, Pakistan, Mısır, İspanya Kanada, Avusturya, Almanya ve Finlandiya ülkelerinde yer alan on farklı şehrin (Barbón vd., 2022) incelendiği araştırmalar dikkat çekicidir.

Türkiye jeopolitik konumu itibariyle güneşten elektrik enerjisi elde etme potansiyeli yüksek bir ülkedir (Dincer ve Ozer, 2023). Güneş enerjisiyle elektrik enerjisi üretimi Haziran 2022 sonu itibariyle 8.479 MW kurulu güce ulaşmış ve toplam kurulu güç içerisindeki oranı %8,35 e gelmiştir (ETKB, 2024a). Doğu Akdeniz'de yer alan Kahramanmaraş ili de, bu çalışmada referans lokasyon olarak seçilmiştir ki yüksek enerji potansiyeline sahiptir (Yilmaz vd., 2015). Bu nedenle Kahramanmaraş'ta fotovoltaik yatırımlar giderek daha fazla ilgi görmektedir. Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu tarafından yayınlanan aylık elektrik piyasası sektör raporuna göre 2024 yılı Eylül ayı itibariyle Türkiye' de toplam lisanslı elektrik kurulu gücü 96.548,15 MW olup, Kahramanmaraş ili 4.411,92 MW ile bu üretimin % 4,57 'lik kısmını oluşturmaktadır. Ayrıca 2024 Eylül sonu itibariyle 17.666,97 MW lisanssız elektrik kurulu gücünün % 96,02'si güneş kaynaklı olup Kahramanmaraş ili özelinde de güneş kaynaklı 501,53 MW lisanssız üretim gerçekleşmektedir (EPDK, 2024).

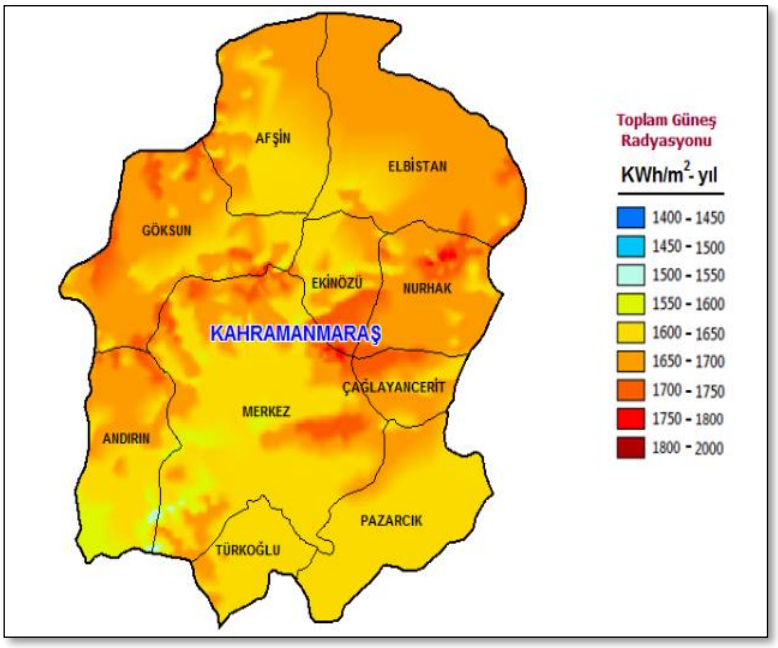
Güneş enerjisi santralleri kurulmadan önce kurulacak sistemlerinin simülasyon programları yardımıyla bilgisayar destekli analizinin yapılması zaman ve maliyet tasarrufunun yanı sıra olası hataların da minimize edilmesi sağlanır. Çünkü, fotovoltaik panel yüklemeleri belirlenirken detaylı bir analiz yapılmamaktadır. Çevresel faktörlere göre üretilen elektrik enerjisi bağlantı anlaşma gücü değerinde limitlenmekte ve limit üstü üretilen elektrik enerjisi boşa gitmektedir. Dolayısı ile fotovoltaik panel yüklenme değerleri optimum ölçüde belirlenmelidir. Bu çalışmada, Kahramanmaraş ilinde kurulacak bir santralin bağlantı anlaşma gücünün üzerinde yüklü durumda iken optimum panel yönelimi ve açısının belirlenmesi ile birlikte farklı üretim senaryoları detaylı olarak analiz edilmiştir. Gelecekte kurulacak güneş enerjisi santrallerinin fotovoltaik panel yüklenme değerleri konusunda önemli bir rol taşımaktadır. Bu çalışmanın literatüre olan ana katkısı, 14,82 kWp / 10 kWe kapasiteli bir güneş enerji santrali için farklı eğim ve azimut açısı senaryolarının analiz edilerek en verimli panel yerleşiminin belirlenmesi olmuştur. %10 doğu (10°), %10

batı (10°) ve %80 güney (20°) yönlendirme ile yıllık net 23.831 kWh enerji üretildiği gösterilmiştir. Panel yüklenme oranlarının enerji üretimi ve şebeke entegrasyonu üzerindeki etkileri detaylı şekilde incelenmiş, bağlantı anlaşma gücünü aşan üretim nedeniyle oluşan enerji kayıpları belirlenerek optimum sistem tasarımı önerilmiştir. Ayrıca, en iyi panel yerleşimi ile yıllık 15,12 ton CO_2 salınımının önlenebileceği hesaplanarak çevresel etkiler ortaya konmuştur. Huawei FusionSolar analiz programı (Fusionsolar, 2025) kullanılarak yapılan bilgisayar destekli performans değerlendirmesi, fotovoltaik santrallerin daha verimli tasarlanmasına ve güç kısıtlamalarının minimize edilmesine yönelik bilimsel bir rehber sunmaktadır. Bu bulgular, Akdeniz ve Güneydoğu Anadolu gibi yüksek güneş potansiyeline sahip bölgelerde santral tasarımına katkı sağlayacaktır.

Bu makale çalışması giriş, materyal ve metot, bulgular ve tartışma, sonuç ve öneriler bölümlerinden meydana gelmektedir. Çalışmanın materyal ve metot bölümünde, kullanılan simülasyon analiz programı, meteorolojik veriler ve panel yerleşim senaryoları detaylandırılmıştır. Bulgular ve tartışma bölümünde, farklı panel yönlendirme ve yüklenme oranlarının elektrik enerjisi üretimi üzerindeki etkileri karşılaştırılmış, bağlantı anlaşma gücünün aşılması durumunda oluşan enerji kayıpları incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre, en verimli senaryo olarak %10 doğu (10°), %10 batı (10°) ve %80 güney (20°) konfigürasyonunun yıllık net 23.831 kWh elektrik enerjisi üretimi sağladığı belirlenmiştir. Sonuç ve öneriler bölümünde, optimum panel yerleşimi için yönlendirme stratejileri sunulmuş, karbon salınımının azaltılmasına yönelik çevresel katkılar vurgulanmış ve gelecekteki saha uygulamaları için önerilerde bulunulmuştur.

MATARYEL VE METOT

Bu çalışmada, analizlerin gerçekleştirileceği lokasyon olarak Kahramanmaraş ili tercih edilmiştir. Analizler, Huawei FusionSolar programında gerçekleştirilmiştir (Fusionsolar, 2025). Bilgisayar destekli analizlerin yapılabilmesi için belirli bir lokasyonun seçilmesi gerekmektedir. Kahramanmaraş, Türkiye'nin güneyinde ve Akdeniz bölgesinin doğusunda yer alır. Bu sebeple yaz aylarında ortalama 27,2 °C ile hava sıcak ve kurak, kış aylarında ise 5,9°C ile soğuk ve nemlidir. En yüksek ve en düşük sıcaklık sırasıyla 14 Ağustos 2023 te 47,2 °C ve 6 Şubat 1997' de sıfırın altında 9,6 °C olarak ölçülmüştür (MGM, 2024). Tablo 1'de görüleceği üzere Kahramanmaraş ili özellikle yaz aylarında (Haziran-Temmuz-Ağustos) ortalama günlük 6,53 kWh/m^2 radyasyon ve 11,66 saat güneşlenme süresi ile yüksek güneş enerjisi potansiyeline sahiptir. Kahramanmaraş iline ait Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı tarafından hazırlanan yıllık toplam güneş radyasyonu bilgisini içeren Güneş Enerjisi Potansiyeli Atlası Şekil 1'de gösterilmiştir (GEPA, 2024).



Şekil 1. Kahramanmaraş Toplam Güneş Işınım Radyasyonu Dağılımı Atlası (GEPA, 2024)

Tablo 1. Kahramanmaraş İli Aylık Global Radyasyon Değerleri ve Güneşlenme Süreleri (GEPA, 2024)

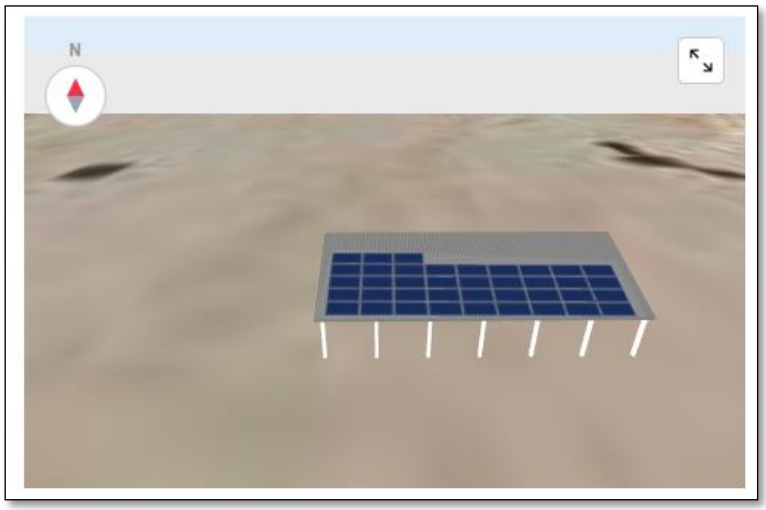
Aylar	Global Radyasyon Değerleri (kWh/m^2-gün)	Güneşlenme Süreleri (Saat)
Ocak	1,99	4,21
Şubat	2,58	5,47
Mart	4,17	6,61
Nisan	5,09	7,85
Mayıs	6,29	9,57
Haziran	6,81	11,49
Temmuz	6,77	12,07
Ağustos	6,00	11,43
Eylül	5,06	10,13
Ekim	3,78	7,55
Kasım	2,40	5,56
Aralık	1,81	3,86

Bu çalışmada, güneş enerjisi santralinin farklı eğim ve azimut açıları altındaki üretim performansını analiz etmek için bilgisayar destekli analiz gerçekleştirilmiştir. Huawei FusionSolar, Huawei tarafından geliştirilen bir güneş enerjisi yönetim ve simülasyon platformu olup, fotovoltaik sistemlerin tasarım, izleme, performans analizi ve yönetimi için kapsamlı çözümler sunmaktadır. Çalışmada, bu yazılım aracılığıyla farklı panel eğim ve yönlendirme senaryoları simüle edilmiştir. Yıllık elektrik enerjisi üretim tahminleri hesaplanmış ve en verimli panel konfigürasyonu belirlenmiştir. Ayrıca, santral tasarımında enerji kayıplarının analizi yapılmış, güç çıkışını optimize etmek için çeşitli yüklenme oranları test edilmiştir (Fusionsolar, 2025).

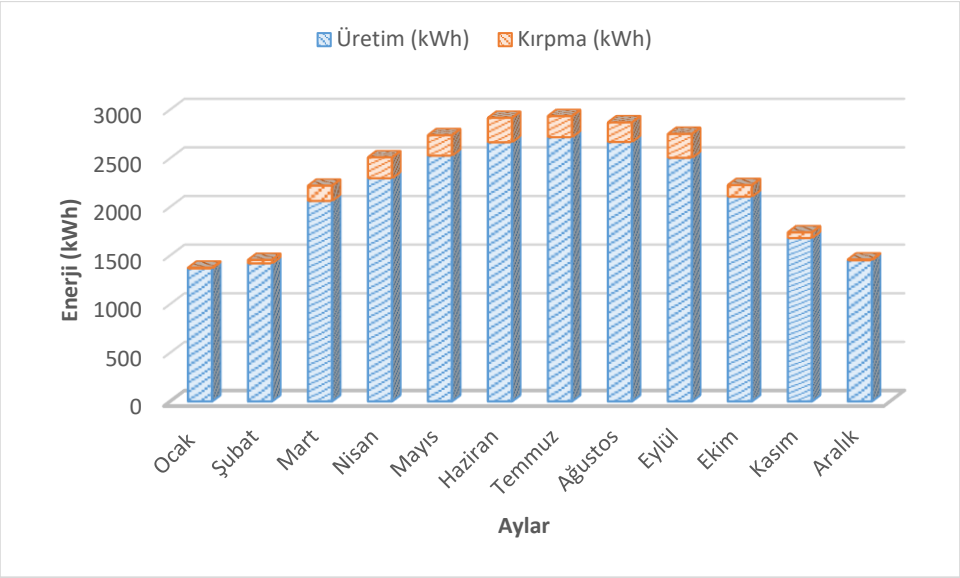
BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde, farklı panel yerleşimleri ve yüklenme oranları altında elde edilen sonuçlar sunulmuştur. Tüm elektrik enerjisi üretim senaryolarında, sistemin %48,2 oranında yüklü olduğu; yani daha yüksek elektrik enerjisi üretimi durumunda şebekeye enerji verilemediği ve güç çıkışının sınırlandırıldığı kabul edilmiştir.

İlk senaryoda Şekil 2'de görüldüğü gibi panellerin tamamı 20° açıyla güneye bakmaktadır. Bu yerleşim senaryosunda 25.463 kWh elektrik enerjisi üretimine karşılık 1.724 kWh enerji kırpılmaktadır ve sonuç olarak net 23.739 kWh enerji üretilmektedir. Aylık üretilen ve kırpılan enerji miktarları Şekil 3 (a)' da grafik ve (b)' de tablo halinde verilmiştir.



Şekil 2. Bütün Paneller (%100) Güney Yüklenmede



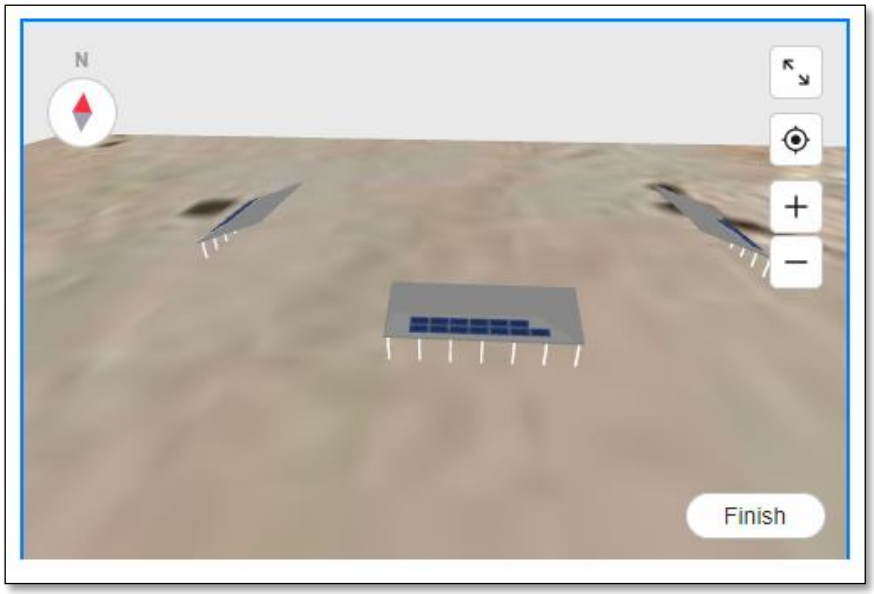
(a)

	Ocak	Şubat	Mart	Nisan	Mayıs	Haziran	Temmuz	Ağustos	Eylül	Ekim	Kasım	Aralık	Toplam	(%)
Üretim (kWh)	1367	1419	2062	2295	2527	2665	2717	2668	2505	2106	1680	1452	25.463	
Kırpma (kWh)	7,8	36,4	156	214,5	210,6	250,9	217,1	201,5	245,7	118,3	58,5	6,5	1.724	6,770

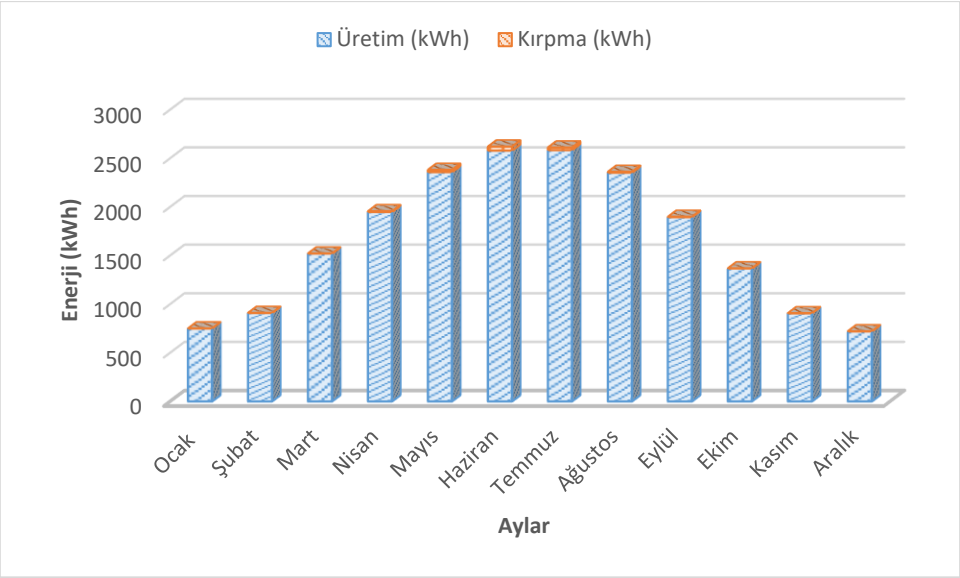
(b)

Şekil 3. %100 Güney Yüklenmede Aylık Üretim ve Kırpma Miktarları (a) Grafik (b) Tablo

İkinci senaryo panellerin doğu, batı ve güney cephelere bakacak şekilde ve 3 yönde de eşit yüklendiği durum göz önüne alınmıştır. Şekil 4'te görüldüğü gibi 20° açıyla paneller % 33'ü doğu, % 33'ü batı ve % 33'ü güney yüklenmede olacak şekilde sahaya yerleştirilmiştir. Yıllık net 19.781 kWh enerji üretilmektedir. Şekil 5'te grafik ve tablo halinde aylık üretilen ve kırpılan enerji miktarları verilmiştir.



Şekil 4. % 33 Doğu , % 33 Batı ve % 33 Güney Yüklenmede Panel Yerleşimi



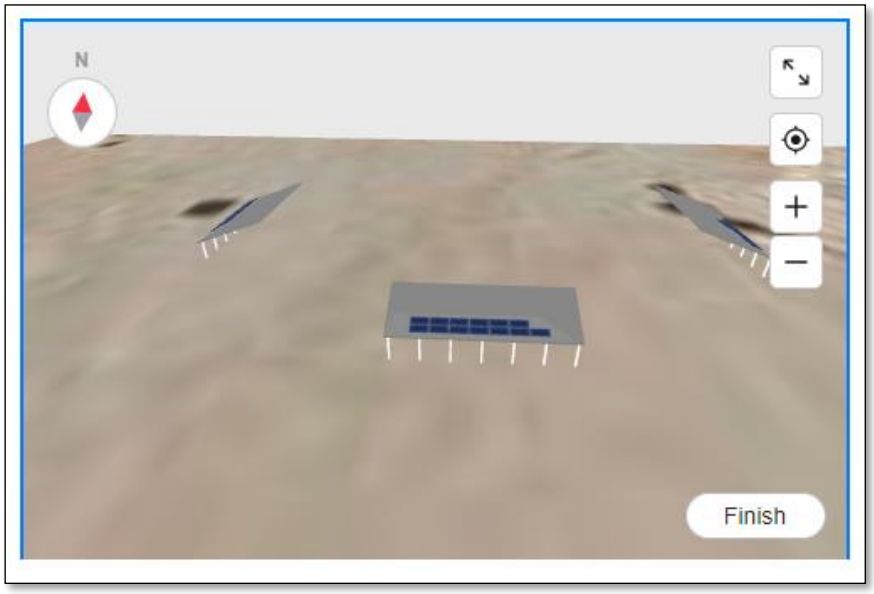
(a)

	Ocak	Şubat	Mart	Nisan	Mayıs	Haziran	Temmuz	Ağustos	Eylül	Ekim	Kasım	Aralık	Toplam	(%)
Üretim (kWh)	750	909	1520	1948	2358	2579	2584	2352	1895	1367	906	720	19.888	
Kırpma (kWh)	0	0	0	7	22	41	26	8	3	0	0	0	107	0,538

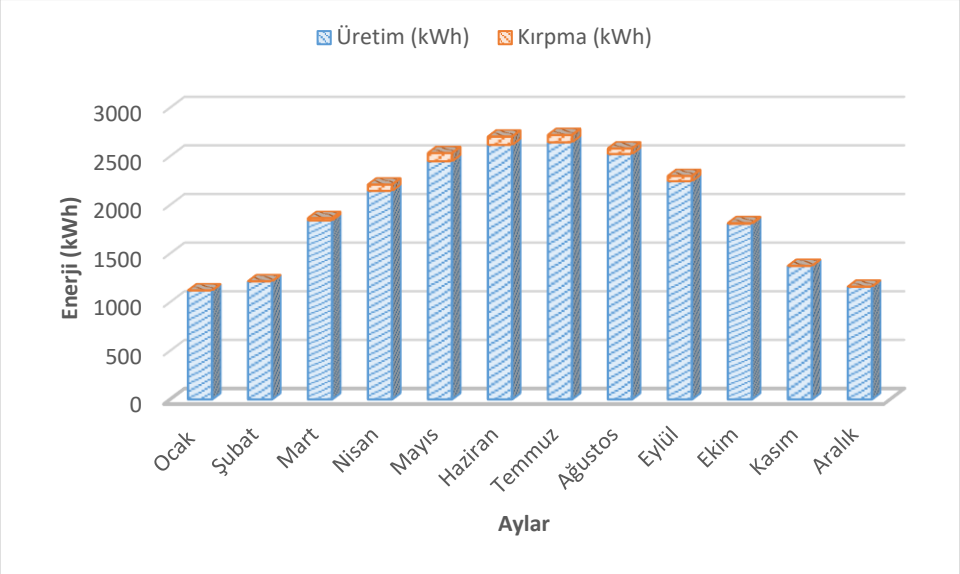
(b)

Şekil 5. % 33 Doğu , % 33 Batı ve % 33 Güney Yüklenmede Aylık Üretim ve Kırpma Miktarları (a) Grafik (b) Tablo

Üçüncü senaryoda panellerin yarısının güney yönlü yüklenmede, kalanların doğu ve batı eşit yüklenmede olacak şekilde yerleştirilmiştir. Şekil 6'da görüldüğü gibi paneller 20° açıyla %25 Doğu, %25 Batı ve %50 Güney yüklenme şeklinde yerleştirilmiştir. Bu senaryoda yıllık toplam 22.687 kWh net enerji üretilmektedir. Şekil 7'de grafik ve tablo halinde aylık üretilen ve kırpılan enerji miktarları verilmiştir.



Şekil 6. % 25 Doğu ,% 25 Batı ve % 50 Güney Yüklenmede Panel Yerleşimi



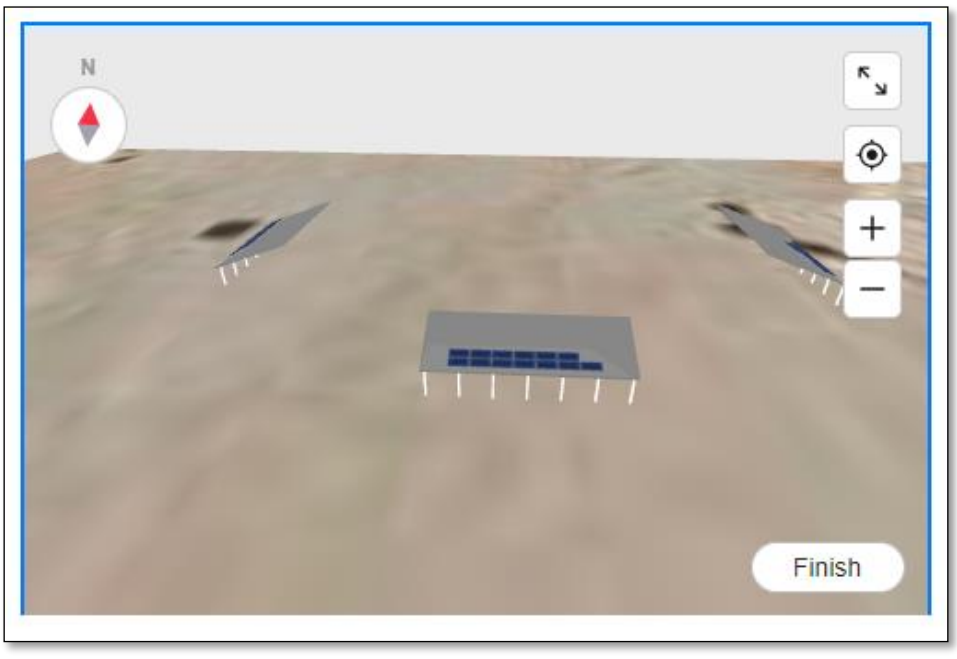
(a)

	Ocak	Şubat	Mart	Nisan	Mayıs	Haziran	Temmuz	Ağustos	Eylül	Ekim	Kasım	Aralık	Toplam	(%)
Üretim (kWh)	1120	1214	1840	2145	2449	2617	2644	2524	2244	1806	1372	1159	23.134	
Kırpma (kWh)	0	0	24	64	84	85	75	56	53	6	0	0	447	1,932

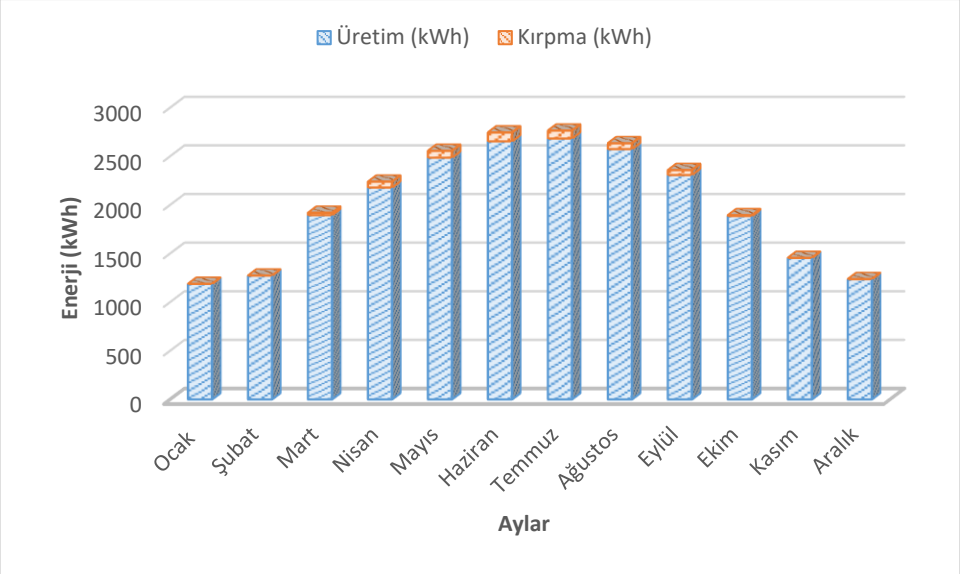
(b)

Şekil 7. % 25 Doğu ,% 25 Batı ve % 50 Güney Yüklenmede Aylık Üretim ve Kırpma Miktarları (a) Grafik (b) Tablo

Dördüncü senaryoda Şekil 8'de görüldüğü gibi paneller % 20 doğu, % 20 batı ve % 60 güney yüklenme altında 20° açıyla yerleştirilmiştir. Bu durumda yıllık üretilen net enerji 23.374 kWh'dır. Şekil 9'da bu senaryoya ait aylık üretilen ve kırpılan enerji miktarları grafik ve tablo halinde verilmiştir.



Şekil 8. % 20 Doğu ,% 20 Batı ve % 60 Güney Yüklenmede Panel Yerleşimi



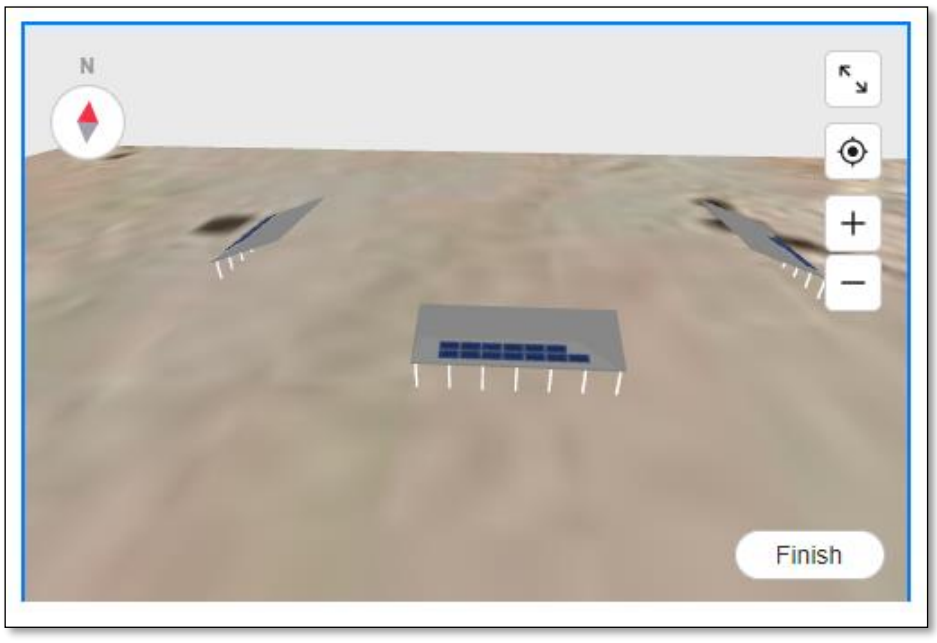
(a)

	Ocak	Şubat	Mart	Nisan	Mayıs	Haziran	Temmuz	Ağustos	Eylül	Ekim	Kasım	Aralık	Toplam	(%)
Üretim (kWh)	1188	1273	1895	2179	2486	2654	2683	2574	2308	1886	1455	1237	23.818	
Kırpma (kWh)	0	0	24	60	70	91	81	60	50	8	0	0	444	1,864

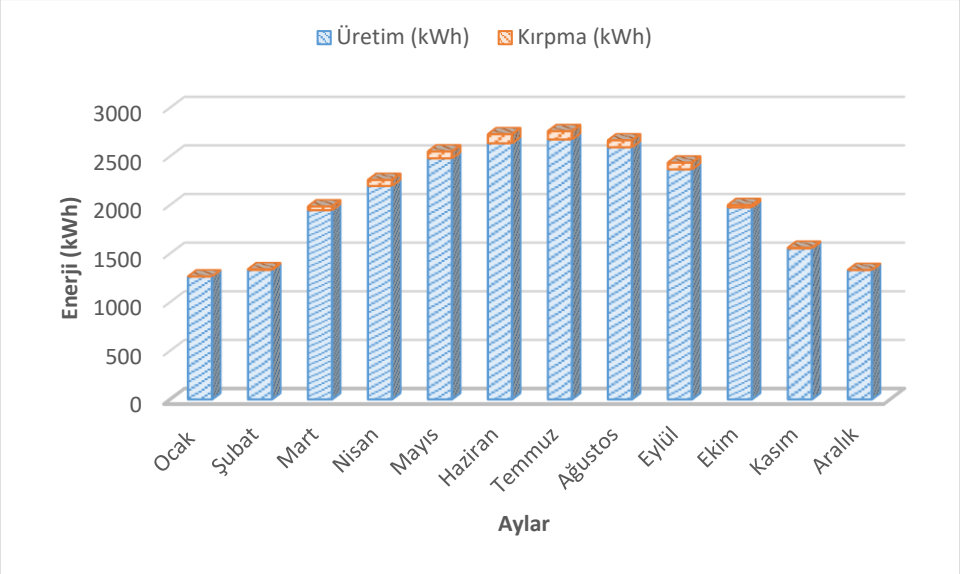
(b)

Şekil 9. % 20 Doğu ,% 20 Batı ve % 60 Güney Yüklenmede Aylık Üretim ve Kırpma Miktarları (a) Grafik (b) Tablo

Beşinci senaryoda paneller % 10 doğu, % 10 batı, % 80 güney yüklenmede şeklinde 20° açıyla Şekil 10'da görüldüğü gibi yerleştirilmiştir. Bu durumda yıllık üretilen net enerji 23.813 kWh'dır. Şekil 11'de bu senaryoya ait aylık üretilen ve kırpılan enerji miktarları grafik ve tablo halinde verilmiştir.



Şekil 10. % 10 Doğu ,% 10 Batı ve % 80 Güney Yüklenmede Panel Yerleşimi



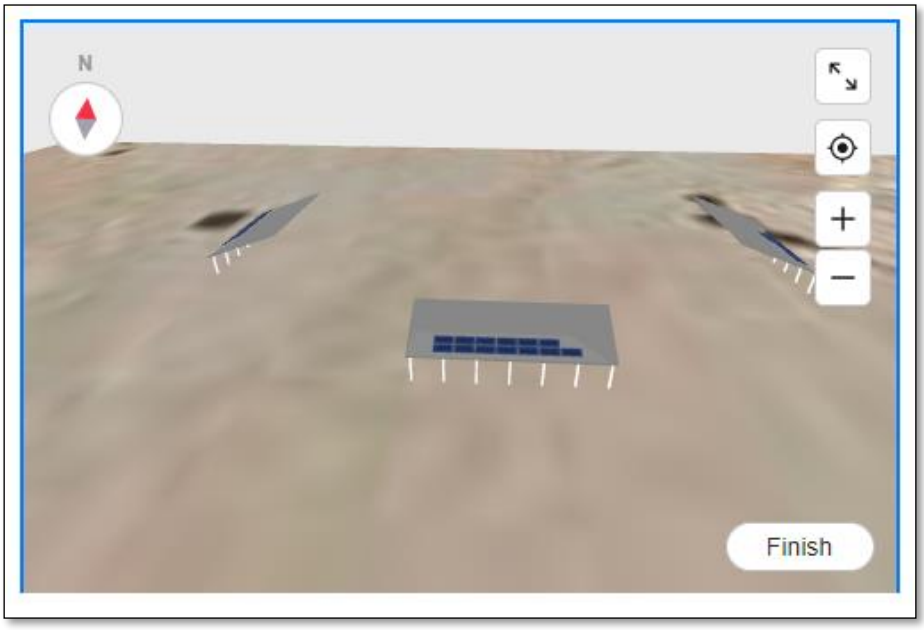
(a)

	Ocak	Şubat	Mart	Nisan	Mayıs	Haziran	Temmuz	Ağustos	Eylül	Ekim	Kasım	Aralık	Toplam	(%)
Üretim (kWh)	1264	1332	1946	2195	2479	2634	2673	2593	2366	1974	1553	1330	24.339	
Kırpma (kWh)	0	6	38	62	71	93	85	71	69	25	6	0	526	2,161

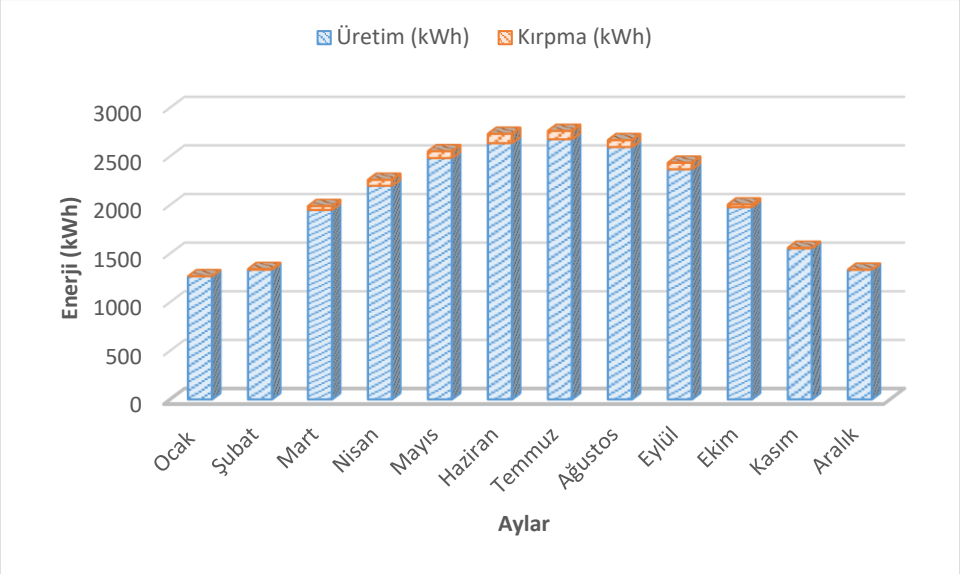
(b)

Şekil 11. % 10 Doğu ,% 10 Batı ve % 80 Güney Yönlü Panel Yerleşiminde Aylık Üretim ve Kırpma Miktarları (a) Grafik (b) Tablo

Altıncı senaryoda paneller 10° açıyla % 10 doğu, % 10 batı yüklenmede ve 20° açıyla % 80 güney yüklenmede şeklinde Şekil 12'de görüldüğü gibi yerleştirilmiştir. Bu durumda yıllık üretilen net enerji 23.831 kWh'dır. Şekil 13'te bu senaryoya ait aylık üretilen ve kırpılan enerji miktarları grafik ve tablo halinde verilmiştir.



Şekil 12. % 10 Doğu (10°) ,% 10 Batı (10°) ve % 80 Güney (20°) Yüklenmede Panel Yerleşimi



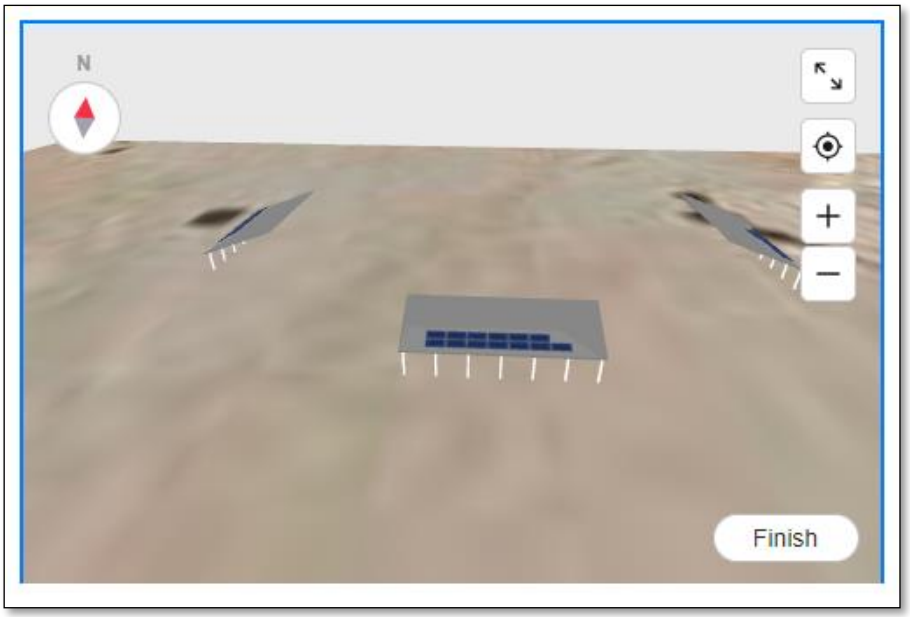
(a)

	Ocak	Şubat	Mart	Nisan	Mayıs	Haziran	Temmuz	Ağustos	Eylül	Ekim	Kasım	Aralık	Toplam	(%)
Üretim (kWh)	1266	1334	1948	2197	2482	2635	2675	2595	2367	1976	1553	1333	24.361	
Kırpma (kWh)	0	6	40	61	70	96	86	71	67	28	5	0	530	2,176

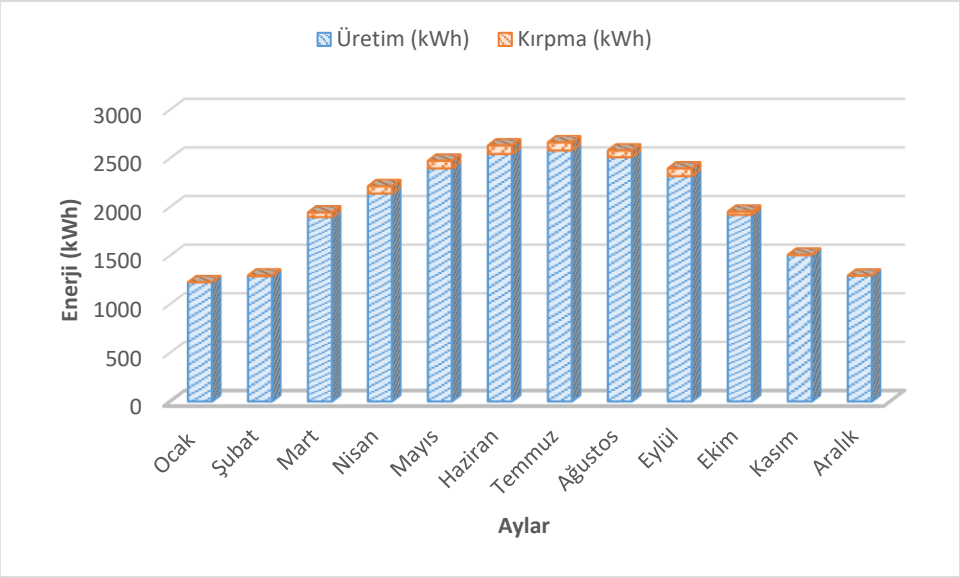
(b)

Şekil 13. % 10 Doğu (10°) ,% 10 Batı (10°) ve % 80 Güney (20°) Yüklenmede Aylık Üretim ve Kırpma Miktarları (a) Grafik (b) Tablo

Yedinci senaryoda paneller 10° açıyla % 7,5 doğu , % 7,5 batı yüklenmede ve 20° açıyla % 85 güney yüklenmede olacak şekilde Şekil 14'te görüldüğü gibi yerleştirilmiştir. Böylece, 6. senaryoda kıyasla doğu ve batı yönlü panel yüklenmesinin %2,5 oranında azaltılmasının etkileri araştırılmıştır. Bu durumda yıllık üretilen net enerji 23.046 kWh'dır. Şekil 15'te bu senaryoya ait aylık üretilen ve kırpılan enerji miktarları grafik ve tablo halinde verilmiştir. Ancak, doğu ve batı yönlü panel yüklenmesinin %10'un altına düşürülmesi enerji üretimine olan katkıyı azalttığı için önerilmemektedir.



Şekil 14. % 7,5 Doğu (10°) ,% 7,5 Batı (10°) ve % 85 Güney (20°) Yüklenmede Panel Yerleşimi



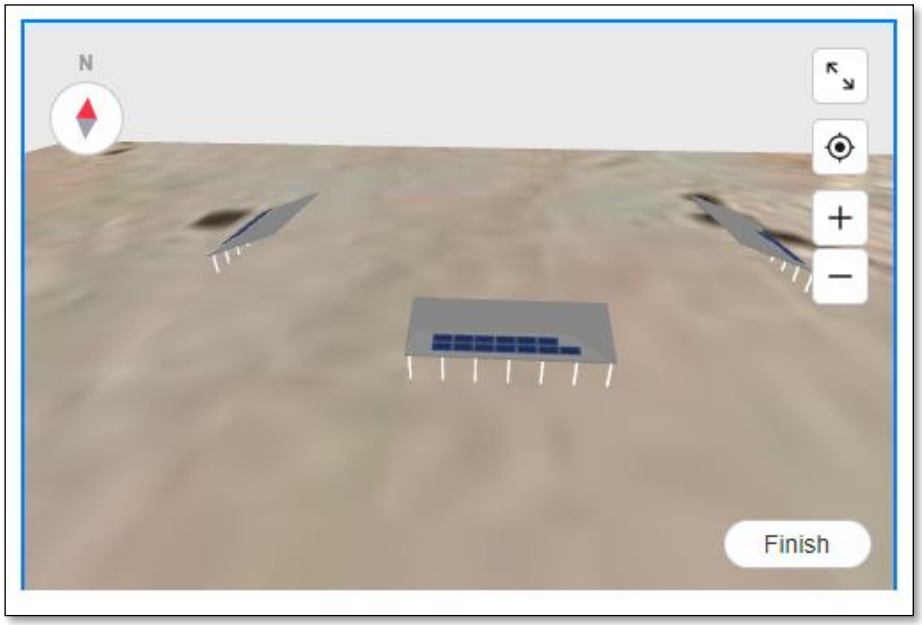
(a)

	Ocak	Şubat	Mart	Nisan	Mayıs	Haziran	Temmuz	Ağustos	Eylül	Ekim	Kasım	Aralık	Toplam	(%)
Üretim (kWh)	1225	1288	1895	2138	2396	2544	2580	2511	2316	1919	1505	1293	23.610	
Kırpma (kWh)	0	6	48	75	79	88	84	69	80	32	3	0	564	2,389

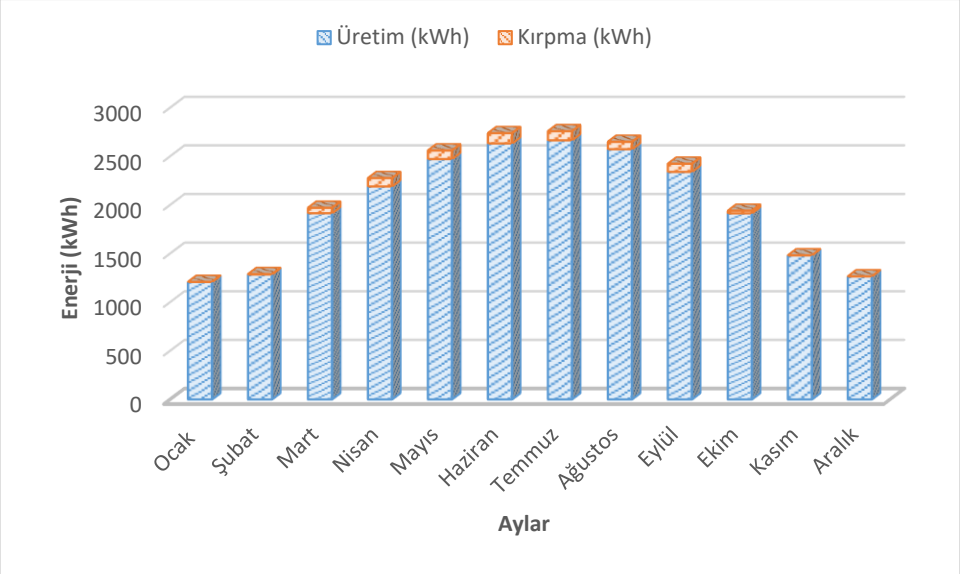
(b)

Şekil 15. % 7,5 Doğu (10°) ,% 7,5 Batı (10°) ve % 85 Güney (20°) Yüklenmede Aylık Üretim ve Kırpma Miktarları (a) Grafik (b) Tablo

Sekizinci senaryoda paneller 10° açıyla % 15 doğu , % 15 batı yüklenmede ve 20° açıyla % 70 güney yüklenmede şeklinde Şekil 16'da görüldüğü gibi yerleştirilmiştir. Bu durumda yıllık üretilen net enerji 23.323 kWh'dır. Şekil 17'de bu senaryoya ait aylık üretilen ve kırpılan enerji miktarları grafik ve tablo halinde verilmiştir.



Şekil 16. % 15 Doğu (10°) ,% 15 Batı (10°) ve % 70 Güney (20°) Yüklenmede Panel Yerleşimi



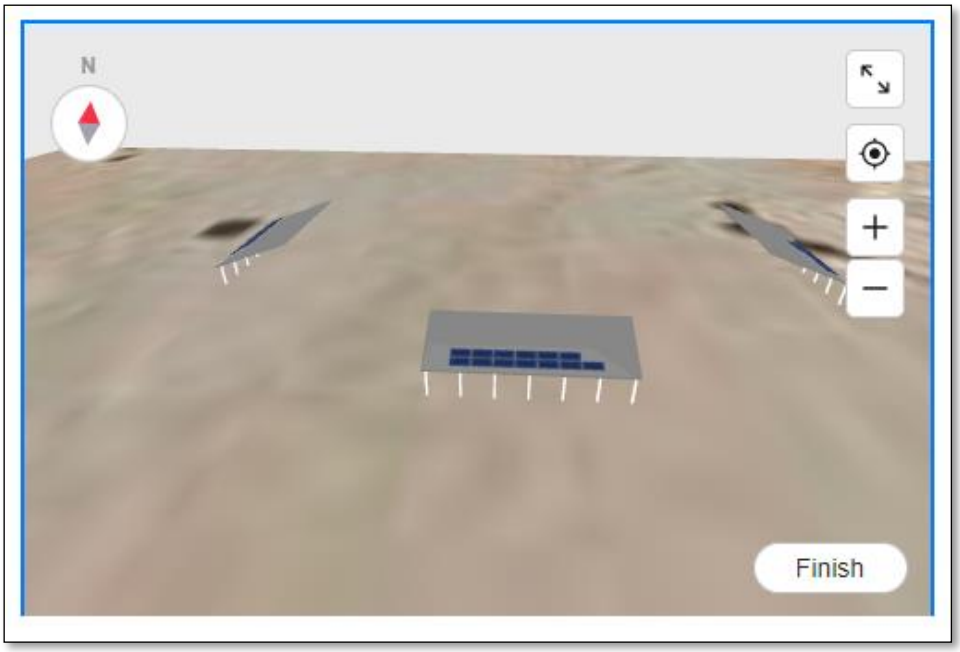
(a)

	Ocak	Şubat	Mart	Nisan	Mayıs	Haziran	Temmuz	Ağustos	Eylül	Ekim	Kasım	Aralık	Toplam	(%)
Üretim (kWh)	1208	1285	1915	2190	2472	2632	2665	2573	2340	1914	1481	1265	23.940	
Kırpma (kWh)	0	3	55	86	88	106	93	76	84	26	0	0	617	2,577

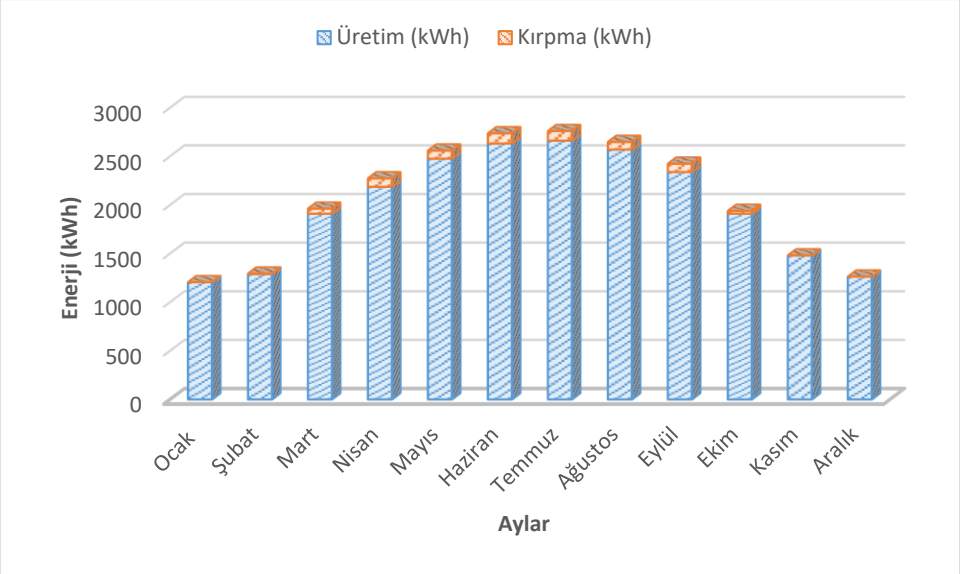
(b)

Şekil 17. % 15 Doğu (10°) ,% 15 Batı (10°) ve % 70 Güney (20°) Yüklenmede Aylık Üretim ve Kırpma Miktarları (a) Grafik (b) Tablo

Son olarak dokuzuncu senaryoda paneller 20° açıyla % 15 doğu , % 15 batı ve % 70 güney yüklenmede Şekil 18'de görüldüğü gibi yerleştirilmiştir. Bu durumda yıllık üretilen toplam enerji 23.298 kWh'dır. Şekil 19'da bu senaryoya ait aylık üretilen ve kırpılan enerji miktarları grafik ve tablo halinde verilmiştir.



Şekil 18. % 15 Doğu (20°) ,% 15 Batı (20°) ve % 70 Güney (20°) Yüklenmede Panel Yerleşimi



(a)

	Ocak	Şubat	Mart	Nisan	Mayıs	Haziran	Temmuz	Ağustos	Eylül	Ekim	Kasım	Aralık	Toplam	(%)
Üretim (kWh)	1205	1288	1910	2187	2467	2631	2661	2569	2338	1910	1480	1262	23.908	
Kırpma (kWh)	0	5	51	86	82	105	98	78	86	28	0		619	2,589

(b)

Şekil 19. % 15 Doğu (20°) ,% 15 Batı (20°) ve % 70 Güney (20°) Yüklenmede Aylık Üretim ve Kırpma Miktarları (a) Grafik (b) Tablo

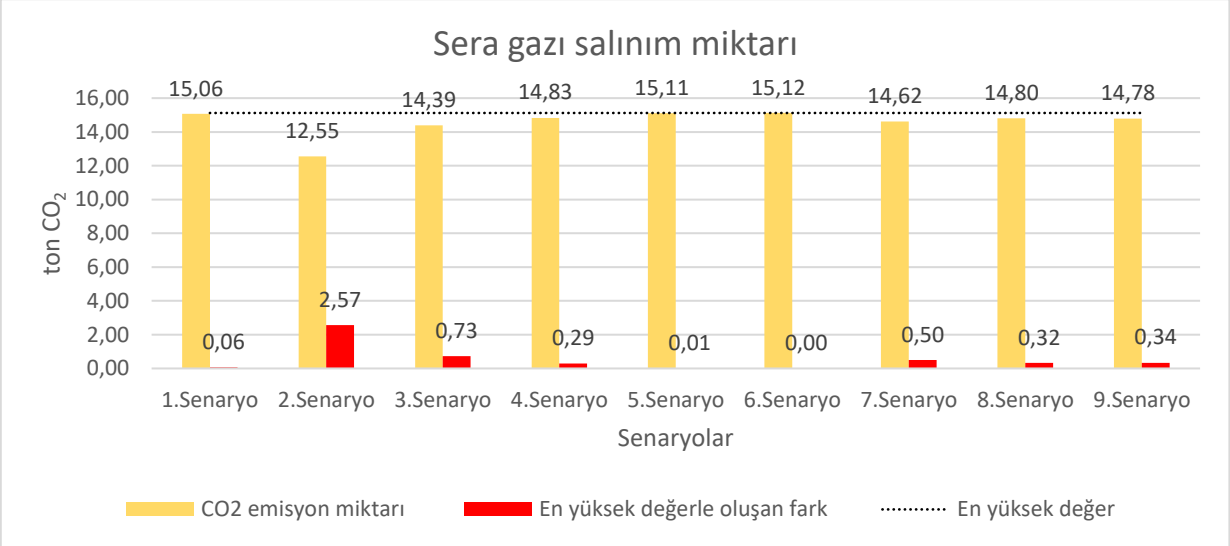
Tablo 2'de farklı panel eğimi, yönü ve yüklenme oranı için üretilen elektrik enerjisi miktarları ve karşılaştırması sunulmuştur. Sonuçlar, tüm panellerin sadece güneye yönlendirilmesinin (Senaryo 1) her zaman en yüksek enerji üretimini garanti etmediğini göstermektedir. En yüksek net enerji üretimi, %10 doğu (10°), %10 batı (10°) ve %80 güney (20°) yönelimli paneller ile 23.831 kWh olarak elde edilmiştir (Senaryo 6). Bu bulgu, güneşin gün doğumu ve gün batımındaki ışınımından daha iyi yararlanmak için doğu ve batı yönlü panel kullanımının belirli oranlarda dahil edilmesi gerektiğini göstermektedir. Yalnızca güneye yönlendirilmiş panellerin (Senaryo 1) üretimi 23.739 kWh ile üçüncü sırada yer alırken, doğu-batı ve güney yönlerine eşit dağılımla tasarlanan sistem (Senaryo 2) 19.781 kWh ile en düşük üretimi sağlamıştır.

Bu sonuçlar, güneş enerji santrallerinin tasarımında yüklenme oranlarının dikkatlice belirlenmesi gerektiğini ve panellerin yalnızca tek bir yöne yönlendirilmesinin en verimli seçenek olmayabileceğini ortaya koymaktadır. Özellikle, optimum enerji üretimi için doğu ve batı yönelimli panellerin %10-15 oranında kullanılması önerilmektedir. Ayrıca, bağlantı anlaşma gücü üzerindeki yüklenme nedeniyle şebekeye verilemeyen enerjinin (kırpılan enerji) minimize edilmesi için stratejik panel yerleşiminin kritik olduğu görülmüştür. Bu çalışma, güneş enerji santrallerinde panel yönlendirme stratejilerinin enerji üretim verimliliğini doğrudan etkilediğini ve en uygun konfigürasyonların belirlenmesinin ekonomik ve çevresel katkılar sağlayacağını ortaya koymaktadır.

Tablo 2. Farklı Panel Eğimi, Yönü ve Yüklenme Oranı için Üretilen Elektrik Enerjisi Miktarları ve Karşılaştırması

Senaryo	Panel Yüklenme Oranı	Panel Yönü Ve Açısı	Üretilen Enerji	Sıralama
1	% 100	Güney (20º)	23.739 kWh	3
2	% 33 , % 33 ,% 33	Doğu (20º), Batı (20º), Güney (20º)	19.781 kWh	9
3	% 25 , % 25 ,% 50	Doğu (20º), Batı (20º), Güney (20º)	22.687 kWh	8
4	% 20 , % 20 ,% 60	Doğu (20º), Batı (20º), Güney (20º)	23.374 kWh	4
5	% 10 , % 10 ,% 80	Doğu (20º), Batı (20º), Güney (20º)	23.813 kWh	2
6	% 10 , % 10 ,% 80	Doğu (10º), Batı (10º), Güney (20º)	23.831 kWh	1
7	% 7,5 , % 7,5 ,% 85	Doğu (10º), Batı (10º), Güney (20º)	23.046 kWh	7
8	% 15 , % 15 ,% 70	Doğu (10º), Batı (10º), Güney (20º)	23.323 kWh	5
9	% 15 , % 15 ,% 70	Doğu (20º), Batı (20º), Güney (20º)	23.298 kWh	6

Ayrıca, bilindiği üzere yenilenebilir enerji kaynakları ile elektrik enerjisi üretimi sera gazı salınımının azaltılmasında önemli rol oynar. Sera gazı salınım miktarı ise birleşik marj emisyon faktörü değeriyle hesaplanabilir. Bu değer güneş için 0,6345 tCO_2/MWh olup güneş santralleri tarafından üretilen her 1 MWh'lik elektrik için 0,6345 ton CO_2 emisyondan kaçınıldığını ifade eder (ETKB, 2024b). Buna göre en iyi senaryoda güneşten üretilen 23.831 kWh elektrik enerjisiyle 15,12 ton CO_2 salınımı engellenir. Şekil 20'de tüm senaryolar için CO_2 salınım miktarları ve en iyi senaryo ile aradaki fark gösterilmiştir. Buna göre en iyi senaryoda, en kötü senaryoya kıyasla 2,57 ton daha fazla CO_2 salınım engellenir.



Şekil 20. Sera Gazı Salınım Miktarları

SONUÇ VE ÖNERİLER

Güneş enerji santrallerinde panellerin yerleşim yönü, eğimi ve bağlantı anlaşma güçlerine göre yüklenme oranı elektrik enerjisi üretimini etkileyen önemli etmenlerdir. Bu çalışmada, bu önemli kriterlerin etkisine detaylı olarak odaklanılmıştır. Panellerin tamamının tek yönlü yerleşimi yani güney yöne bakması enerji üretiminin en yüksek olacağını garantilemez. En önemli hususlardan biri de budur. Normal şartlarda uygulamada paneller tamamen güney yönünde olacak şekilde rastgele panel yüklenme oranları belirlenmektedir. Panellerin en yüksek ışınımı alacağı temel yön olan güney yönünden uzaklaşmak ve farklı yükleme oranları altında Senaryo 2'de görüleceği gibi elektrik enerjisi üretimini ciddi miktarda düşürmüştür. Bu sebeple, panellerin büyük çoğunluğu güney yönlü yerleştirilmelidir. Panellerin güneşin doğumu ve batımında daha yoğun ışımaya maruz kalacağı dolayısıyla enerji üretimine katkı

sağladığı durum olan panellerin doğu-batı yerleşiminde %10 ile %20 arasında yükleme oranı belirlenmesinin enerji üretimine olumlu katkı sağladığı gözlenmiştir. Panellerin eğiminin azalması üzerlerine düşen ışımanın artmasına dolayısıyla elektrik enerjisi üretiminin artmasını sağlamaktadır. Dolayısı ile bağlantı anlaşma gücü üzerinde fotovoltaik panel yüklemesi yapılırken sadece güney yönünde değil, belirli bir oranın üzerinde fotovoltaik panel yüklenmelerinde ek olarak sadece doğu ve batı şeklinde de yüklenmeler göz önünde bulundurulmalıdır. Neticede, güneş enerjisi santralleri gün doğumu ile elektrik enerjisi üretimine başlarken, öğle vakitlerinde en yüksek üretim, demand, değerine, gün batımına doğru ise düşerek bir çan eğrisi şeklinde elektrik enerjisi üretimi yapmaktadırlar. Bundan ötürü çan eğrisi düşünüldüğünde eğrinin sağ ve solu da göz önünde bulundurulmalı ve olabildiğince maksimum performansta çalışacak güneş enerjisi santralleri tasarlanmalıdır. Böylece, bağlantı anlaşma gücü üzerinde şebekeye elektrik enerjisi verilemediği için güç limitlemesinden ötürü boşa giden elektrik enerjisi kullanılabilecek durumda olacaktır.

Çalışmada elde edilen sonuçlara göre 6. senaryoda belirtilen panellerin 10˚ açıyla %10 doğu , %10 batı ve 20˚ açıyla %80 güney yön ve yüklenmelerle yerleşimi; 2. senaryoda belirtilen 20˚ açıyla doğu, batı ve güney ve %33 yüklenmelere kıyasla % 20.47 daha fazla, ilk senaryoda belirtilen panellerin 20˚ açıyla tamamının güney yönlü yüklendiği senaryoya kıyasla ise %0.39 fazla enerji üretmektedir. Buradan şu sonuca ulaşılabilir; panelleri tek (sadece güney) yönlü yerleştirmek yerine doğu, batı ve güney şeklinde yerleştirmek enerji üretimine katkı sağlamaktadır.

Fotovoltaik santralin üreteceği elektrik enerjisinin belirlenen her lokasyonun meteorolojik özelliklerine bağlı olarak farklı olacağı göz önünde bulundurulduğunda çalışma sonuçlarının birebir diğer lokasyonlar için aynı olmayacağı açıktır. Ayrıca kullanılan program diğer iller için de seçim yapılmasına izin verdiğinden benzer analizler istenilen lokasyonlar için hızlıca gerçekleştirilebilir. Ancak çalışma bulgularının şu şekilde yorumlanması faydalı olacaktır: Akdeniz bölgesinde yer alan benzer meteorolojik özelliklere ve yakın enlem değerine sahip yakın illerde yakın sonuçlar elde edilecektir. Bu sebeple yüksek enerji potansiyeline sahip bu bölgede kurulacak güneş enerji santrallerinde bağlantı anlaşma gücü üzerinde fotovoltaik panel yüklenme oranı, panel yönü ve açısı belirlenirken tek yön ve açı tercih etmek yerine çalışmanın özellikle 5. veya 6. senaryosu kullanılarak belirlenmesi elektrik enerjisi üretimine ciddi katkı sağlayacaktır.

KAYNAKLAR

Arslan, M., & Çunkaş, M. (2024). An experimental study on determination of optimal tilt and orientation angles in photovoltaic systems. *Journal of Engineering Research*.(Article in Press) https://doi.org/10.1016/j.jer.2024.07.015 .

Atlım, F., Esen, B., & Demirtaş, M. (2019). Balıkesir ilinde farklı iki GES tesisinin panel yerleşimi açısından verimliliklerinin karşılaştırılması. *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 21(2), 679-696. DOI: 10.25092/baunfbed.636967.

Bakirci, K. (2012). Correlations for optimum tilt angles of solar collectors: a case study in Erzurum, Turkey. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 34(11), 983-993. DOI: 10.1080/15567031003735279.

Barbón, A., Bayón-Cueli, C., Bayón, L., & Rodríguez-Suanzes, C. (2022). Analysis of the tilt and azimuth angles of photovoltaic systems in non-ideal positions for urban applications. Applied Energy, 305, 117802. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117802

Boztepe, M. (2017). Fotovoltaik güç sistemlerinde verimliliği etkileyen parametreler. *EMO İzmir Şubesi Aylık Bülteni*, 321, 13-17.

Dincer, F. , & Ozer, E. (2023). Assessing the potential of a rooftop grid-connected photovoltaic system for Gaziantep Islamic Science and Technology University/Turkey. *Jordan Journal of Electrical Engineering*, 9(2), 149-165. http://doi.org/10.5455/jjee.204-1670146602 .

EPDK (Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu) . Elektrik Piyasası Aylık Sektör Raporu Listesi-2024 Yılı Elektrik Piyasası Eylül Ayı Sektör Raporu. (2024). https://www.epdk.gov.tr/Detay/Icerik/3-0-23/aylik-sektor-raporu Erişim tarihi: 28.11.2024

ETKB (Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı). Bilgi Merkezi- Güneş. (2024a). https://enerji.gov.tr/bilgi-merkezi-enerji-gunes Erişim tarihi: 05.11.2024

ETKB (Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı). Çevre ve iklim, Türkiye Ulusal Elektrik Şebekesi Emisyon Faktörü. (2024b). https://enerji.gov.tr/evced-cevre-ve-iklim-turkiye-ulusal-elektrik-sebekesi-emisyon-faktoru Erişim tarihi: 22.11.2024

Fusionsolar. Web sayfası. (2025). https://eu5.smartdesign.huawei.com/ Erişim tarihi: 29.01.2025

Geliş, K., Akyürek, E. F., & Yoladı, M. (2020). Panel konumu ve açısının fotovoltaik panel karakteristiği üzerine etkisi. *Journal of the Institute of Science and Technology*, 10(3), 1899-1908. DOI: 10.21597/jist.686478.

GEPA. (2024). Enerji İşleri Genel Müdürlüğü, Güneş Enerjisi Potansiyel Atlası-Kahramanmaraş. https://gepa.enerji.gov.tr/pages/46.aspx Erişim tarihi: 22.11.2024

Hafez, A. Z., Soliman, A., El-Metwally, K. A., & Ismail, I. M. (2017). Tilt and azimuth angles in solar energy applications–A review. *Renewable and sustainable energy reviews*, 77, 147-168. http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.131.

Hussein, H. M. S., Ahmad, G. E., & El-Ghetany, H. H. (2004). Performance evaluation of photovoltaic modules at different tilt angles and orientations. *Energy conversion and management*, 45(15-16), 2441-2452. doi:10.1016/j.enconman.2003.11.013.

Kaçan, E., & Ülgen, K. (2012). Güneş Enerjisi Toplayıcılarında Eğim Ve Yönlendirmenin Yararlanabilirliğe Etkisi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 27(4) , 837-846.

Koçer, A., Şevik, S., & Güngör, A. (2016). Ankara ve İlçeleri için Güneş Kolektörü Optimum Eğim Açisinin Belirlenmesi. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 21(1), 63-78. DOI: 10.17482/uujfe.80088.

Lu, N., & Qin, J. (2024). Optimization of tilt angle for PV in China with long-term hourly surface solar radiation. Renewable Energy, 229, 120741. https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.120741

Memme, S., & Fossa, M. (2022). Maximum energy yield of PV surfaces in France and Italy from climate based equations for optimum tilt at different azimuth angles. Renewable Energy, 200, 845-866. https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.10.019

MGM (Meteoroloji Genel Müdürlüğü) . Resmi İklim İstatistikleri. (2024). https://www.mgm.gov.tr/veridegerlendirme/il-ve-ilceler-istatistik.aspx?k=A&m=KAHRAMANMARAS Erişim tarihi: 05.11.2024

Mukisa, N., & Zamora, R. (2022). Optimal tilt angle for solar photovoltaic modules on pitched rooftops: A case of low latitude equatorial region. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 50, 101821. https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101821

Ogundimu, E. O., Akinlabi, E. T., & Mgbemene, C. A. (2019, December). Maximizing the output power harvest of a Pv panel: a critical review. In Journal of Physics: Conference Series (Vol. 1378, No. 3, p. 032054). IOP Publishing. doi:10.1088/1742-6596/1378/3/032054.

Rowlands, I. H., Kemery, B. P., & Beausoleil-Morrison, I. (2011). Optimal solar-PV tilt angle and azimuth: An Ontario (Canada) case-study. *Energy Policy*, 39(3), 1397-1409. doi:10.1016/j.enpol.2010.12.012.

Yağlı, H., & Koç, Y. (2020). Gaziantep Bölgesi İçin Güneş Enerjisinden Elektrik Üretiminde Kurulacak Panellerin Optimum Eğim Açılarının Belirlenmesi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (19), 475-483. DOI: 10.31590/ejosat.733530.

Yilmaz, S., Ozcalik, H. R., Kesler, S., Dincer, F., & Yelmen, B. (2015). The analysis of different PV power systems for the determination of optimal PV panels and system installation—A case study in Kahramanmaras, Turkey. *Renewable and sustainable energy reviews*, 52, 1015-1024. http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.07.146.

KSÜ Mühendislik Bilimleri Dergisi, 28(2), 2025
Araştırma Makalesi

KSU J Eng Sci, 28(2), 2025
Research Article

Kahramanmaras Sutcu Imam University
Journal of Engineering Sciences

Geliş Tarihi : 04.12.2024
Kabul Tarihi :24.05.2025

Received Date : 04.12.2024
Accepted Date : 24.04.2025

APPLICATION OF DYNAMIC VOLTAGE RESTORER TO IMPROVE POWER QUALITY IN STAND-ALONE WIND POWER SYSTEMS UNDER VARIABLE OPERATING CONDITIONS

BAĞIMSIZ RÜZGAR ENERJİSİ SİSTEMLERİNDE GÜÇ KALİTESİNİ İYİLEŞTİRMEK İÇİN DEĞİŞKEN ÇALIŞMA KOŞULLARINDA DİNAMİK GERİLİM ONARICININ UYGULANMASI

Ünal YILMAZ[1*] (ORCID: 0000-0003-3993-9309)

[1] Harran Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Şanlıurfa, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Ünal YILMAZ, uyilmaz@harran.edu.tr

ABSTRACT

In power systems where sensitive loads are supplied by renewable energy sources, voltage fluctuations and power outages may result in the voltage demanded by the load not being met or the load being supplied with a voltage with high harmonic distortion. This may damage the sensitive load after a while or even cause the load to become inoperable. In this study, a dynamic voltage restorer (DVR) was implemented in a stand-alone wind turbine power system to improve the power quality. DVR technology continuously monitors the power system and injects series voltage as needed in case of possible voltage sags, swells, or fluctuations. The aim of this study is to increase system reliability and quality by ensuring the load voltage performs at nominal operating conditions even in the event of unexpected electrical faults between the source and the load. The proposed application was tested at different loads (linear and non-linear), wind speeds (14 -16 m/s), phase voltage faults, and source frequencies. In different operating conditions, the THD of the load voltage was kept at <5% (compliant with IEEE-519 standards). Additionally, voltage sags and swells have been successfully compensated and confirming the system stability and reliability.

Keywords: DVR, wind power, power quality, stand-alone systems

ÖZET

Hassas yüklerin yenilenebilir enerji kaynaklarından beslendiği güç sistemlerinde, gerilim dalgalanmaları ve elektrik kesintileri, yükün talep ettiği gerilimin karşılanmaması veya yükün yüksek harmonik bozulmaya sahip bir gerilimle beslenmesiyle sonuçlanabilir. Bu durum, bir süre sonra hassas yüke zarar verebilir hatta yükün çalışamaz hale gelmesine neden olabilir. Bu çalışmada, güç kalitesini iyileştirmek için bağımsız bir rüzgar türbini güç sistemine dinamik gerilim onarıcı (DVR) uygulanmıştır. DVR teknolojisi, güç sistemini sürekli olarak izler ve olası gerilim düşüşleri, yükselmeleri veya dalgalanmaları durumunda sistemin ihtiyaç duyduğu gerilimi belirleyerek, sisteme seri bağlı şekilde enjekte eder. Bu çalışmanın amacı, kaynak ve yük arasında beklenmeyen elektriksel arızalar olması durumunda yük geriliminin nominal çalışma koşullarında performans göstermesini sağlayarak sistem güvenilirliğini ve kalitesini artırmaktır. Önerilen uygulama farklı yüklerde (doğrusal ve doğrusal olmayan), rüzgar hızlarında (14 - 16 m/s), faz gerilim arızalarında ve kaynak frekanslarında test edilmiştir. Farklı çalışma koşullarında, yük geriliminin THD'si <%5'te tutulmuştur (IEEE-519 standartlarına uygun). Ayrıca, gerilim düşüşleri ve yükselmeleri başarıyla telafi edilerek sistemin kararlılığı ve güvenilirliği teyit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: DVR, rüzgar güç sistemi, güç kalitesi, bağımsız yenilenebilir enerji sistemleri

ToCite: YILMAZ, Ü., (2025). APPLICATION OF DYNAMIC VOLTAGE RESTORER TO IMPROVE POWER QUALITY IN STAND-ALONE WIND POWER SYSTEMS UNDER VARIABLE OPERATING CONDITIONS. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 28(2), 660-673.

INTRODUCTION

Advances in electrical generators and power electronics technology have seen the global installed capacity of wind turbines increase rapidly over the past few years, making this energy source competitive in terms of cost per kilowatt compared to traditional fossil fuel based power plants. (Bubshait et al., 2017). In addition, with the developing technology, the increase in power demand in electric power systems has emerged as a natural result, and this causes increase in undesirable situations such as voltage sags, swells, fluctuations and power outages which are defined as negative factors affect the efficiency, reliability and stability of power systems (Eltamaly et al., 2018). However, DVR is an effective power device method for improving power quality and protecting sensitive loads by effectively compensating voltage imbalances and harmonics, with its short-time response to possible unexpected faults, reliability, and low-cost design. In addition, the DVR is a voltage source converter that dynamically controls the system by connecting in series with the power supply, and performs voltage injection by detecting the possible scale error between the source and load voltage with the PI-based control method (Ganthia et al., 2016). Voltage-related issues affecting stability and performance in power systems include swells, sags, flicker and unbalance, while frequency changes, which can lead to system instability and trigger harmonic distortions, typically transients and surges caused by events such as lightning or switching operations, present short-term but potentially harmful disturbances (Parida et al., 2024). However, in this study, voltage sags, swells, frequency differences and harmonic distortions are mostly discussed In addition, energy flow was initiated to the wind turbine with a permanent magnet synchronous generator (PMSG) connection and also, LCL filter was designed and source connection was realized to suppress harmonic distortion that will occur on the source side due to the load connection. In addition, stable and reliable power transfer was realized for linear and non-linear loads by connecting the DVR in series between the load and the point of common coupling (PCC). The proposed system structure and waveforms are detailed in Figure 1.

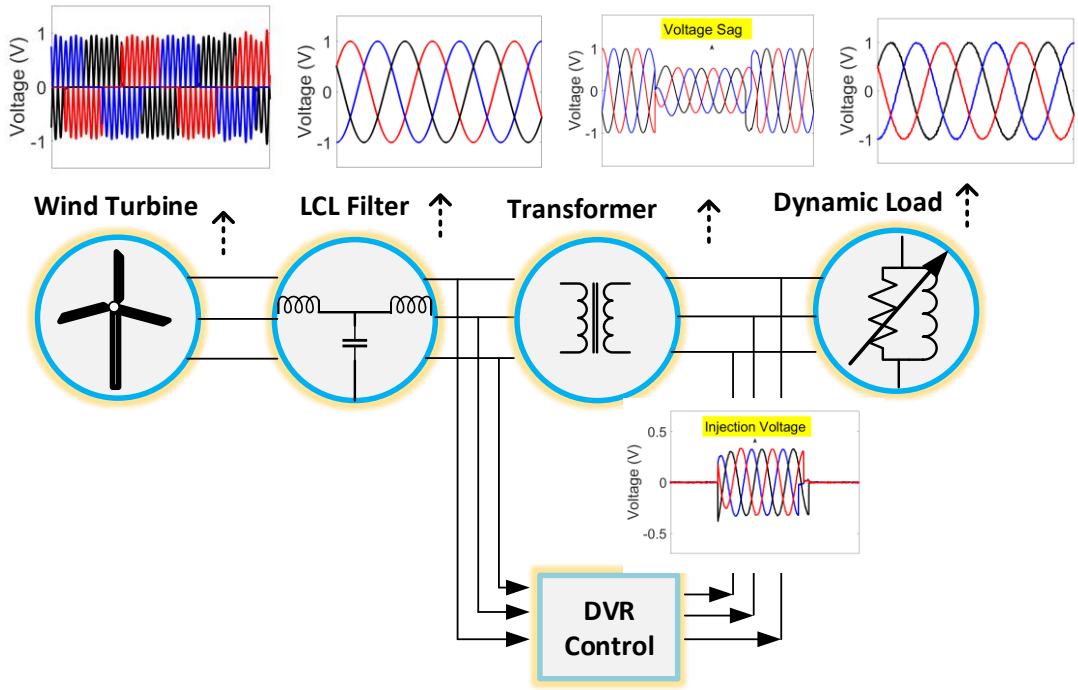


Figure 1. Proposed System Structure and Waveforms

Bubshait et al. proposed a conservative power theory based control method that is used for grid connected wind turbine power system. The power quality is improved by reducing the THD of the grid current. Passive filters are excluded, and a more compact, flexible, and reliable structure of smart grid based control is proposed (Bubshait et al., 2017). Nasrollahi et al. Proposed a control system based on three-phase three-wire dynamic voltage restorer and sliding mode control (SMC) to compensate for the voltage sag and swell. The DVR system presented in the study includes a separate AC/AC converter design for each phase without the need for energy storage and DC link connection. The proposed system has been tested on a 20kW prototype, and its effectiveness in THD suppression has been emphasized (Nasrollahi et al., 2022). Parida et al. propose an approach that aims to improve power quality in grid-connected PV systems by embedding a Type II Fuzzy Logic Controller (FLC) within a Dynamic Voltage Restorer (DVR). It is argued that the proposed work provides improvements in power quality, including voltage sags

and swells (THD) (Parida et al., 2024). In addition, similar studies in the literature and the system features suggested in this study are presented together in Table 1.

Table 1. Literature Overview and Proposed Study

Reference	Power Source	Load	Objective
Tu et al., 2018	Grid	Sensitive Load	A new fault current limiter based on a dynamic voltage restorer is proposed to limit the fault current with reduced size and cost compared to traditional methods.
Babu et al., 2021	Hybrid (Grid and PV)	Linear-Non Linear	Realization of low harmonic distortion, high power factor, and voltage fault regulation by means of Predictive Space Vector Transform (PSVT)-PR control based DVR method.
Ye et al., 2019	Grid	Critical Load	correction of the power factor (PF) at the source side using voltage compensation method based on elliptical restoration through a single phase dynamic voltage recovery device (DVR).
Rao et al., 2015	PV System	Resistive Load	Fuzzy-DVR design and also using photovoltaic system instead of traditional dc storage system as the power source of DVR to compensate voltage drops and swells
Prasad & Dhanamjayulu, 2022	Grid	Resistive Inductive	Development of a solar PV-integrated DVR employing a rotating dq reference frame controller to enhance power quality by mitigating issues like voltage sags, swells, and high harmonic distortion
Proposed	Wind Power System	Linear-Non Linear	Improve power quality problems such as voltage sags and swells, harmonic distortion, and also to test the system under linear, non-linear loads and different wind speeds.

SYSTEM DESIGN AND ANALYSIS

Power circuits are needed for system design that prevents voltage changes that may occur in the stand-alone wind turbine system, where sensitive loads are fed from damaging the load and ensure that the load operates at nominal voltage without being affected by variable operating conditions. In this study, wind turbine and PMSG determination stages and features for source modeling, LCL filter design for stable and reliable power transfer at low harmonic distortion were realized. In addition, the DVR structure that continuously controls the system and detects unexpected errors such as sudden voltage drops, increases, frequency changes, and non-linear dynamic feeding, and injects voltage at the reference value, ensuring the load operates at the nominal load was modeled. In addition, PLL structure that monitors and locks the phase and frequency of the source voltage and thus ensures synchronous operation of DVR and load voltage was designed.

Wind Turbine and PMSG

The blades of the horizontal axis wind turbine, which is used to convert the kinetic energy of atmospheric wind, are connected to the turbine shaft and combined with the multi-pole three-phase PMSG machine to produce electrical energy from kinetic energy. PMSG-based wind power systems constitute the power source structure of three-phase connection stand-alone power systems (Mayilsamy et al., 2022).
The aerodynamic power of the wind turbine can be measured by the following mathematical model:

$$P = \frac{1}{2}\rho A V_{\omega}^{3} C_p \tag{1}$$

$$\lambda = \frac{\omega_m V}{R} \tag{2}$$

Where, p is air density, V_ω is the velocity of the wind, A is the area covered by the blades, λ is the tip speed ratio. C_p is the power coefficient of the wind turbine ($A=\pi R^2$), R is the radius of the blade, and ω_m is the turbine rotor speed. Additionally, PMSG equations are usually defined on the d−q axis and expressed as follows.

$$\begin{cases} v_{md} = R_s I_{md} + L_{md}\frac{di_{md}}{dt} - w_e L_{mq} i_{mq} \\ v_{mq} = R_s I_{mq} + L_{mq}\frac{di_{mq}}{dt} - w_e L_{md} i_{md} + w_e \Psi_f \end{cases} \tag{3}$$

The electromagnetic torque generated in the PMSG can be found from the following equation.

$$T_e = 1.5P\Psi_f i_{mq} \quad (4)$$

Where R_s is stator winding resistance, L_{md} and L_{mq} are stator winding inductances, Ψ_f is airgap flux, w_e is angular frequency of stator voltages, and I_{md}, I_{mq}, V_{md}, V_{mq} are stator winding currents and voltages respectively, P is pole pair number of PMSG.
The electrical properties, parameters, and values of the wind turbine and PMSG used in this study are presented in Table 2.

Table 2. Wind Turbine and PMSG Parameters

Wind Turbine		PMSG	
Parameter	**Value**	**Parameter**	**Value**
Nominal mechanical output power (W)	12kW	Number of Phases	3
Base power of the electrical generator (VA)	12VA/0.9	Stator phase resistance Rs (Ohm)	0.0485
Base wind speed (m/s)	12m/s	Armature inductance (H)	0.000395
Maximum power at base wind speed (pu of nominal mechanical power)	0.85	Flux linkage	0.1194
Base rotational speed (p.u. of base generator speed)	1.2	Initial conditions	0
Pitch angle beta to display wind-turbine power characteristics (beta >=0) (deg)	0	Pole Pairs	4

LCL Filter design

There are harmonic suppression filters such as L, LC, and LCL in the literature. L filter is larger in size than LC and LCL filters, and voltage drop can be a problem in this filter; and it is not as effective as LCL filter in harmonic suppression. LC filter is also larger in size compared to LCL filter and takes up more space (Ranjan & Giribabu, 2023; Göncü & Yılmaz, 2023). In this study, LCL filter design is realized for harmonic suppression between the load and PMSG. The LCL filter equivalent circuit is presented in Figure 2.
The current and voltage based transfer function and resonant frequency of the LCL filter are defined as follows.

$$\frac{I_{Tr}}{V_{PMSG}} = \frac{1}{L_1L_2C_1s^3+(L_1+L_2)s} \quad (5)$$

$$f_{resonant} = \frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{L_1+L_2}{L_1L_2C_1}} \quad (6)$$

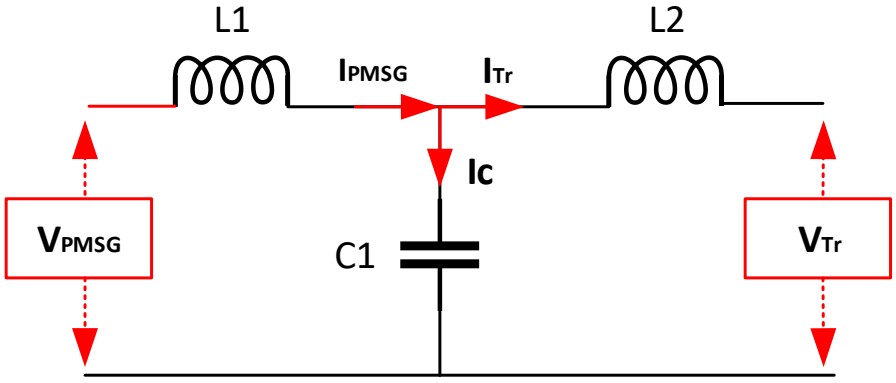


Figure 2. LCL Filter Equivalent Circuit

The Bode diagram of the designed LCL filter, which includes the magnitude and phase responses of the frequency and the resonance frequency, is presented in Figure 3.

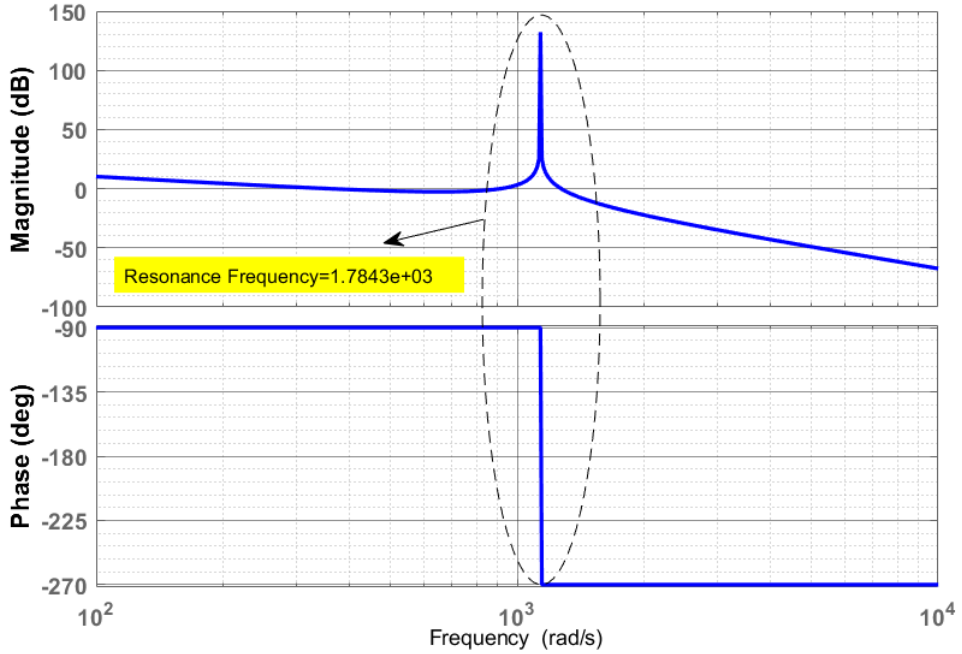


Figure 3. LCL Filter Bode Diagram

Harmonic distortion or THD absorbed by the designed filter is expressed as the ratio of all harmonic components of a quantity (voltage, current) to the fundamental component. Therefore, Voltage THD is expressed by the following equation.

$$V_{THD} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{N} V_h^2}}{V_1} \quad (7)$$

V_{THD} denotes the total harmonic distortion of the voltage, where V_1 is the fundamental frequency voltage, N is the highest harmonic order included in the analysis, h represents the harmonic order, and V_h is the voltage harmonic corresponding to the h-th order (Kavitha et al., 2023).

Analysis of DVR and PLL technologies

The DVR is a forced-commutated voltage source converter that dynamically regulates bus voltage through a booster transformer, injecting a series voltage to maintain a stable load voltage during fluctuations in the source voltage (Singh & Winston, 2023; Ganthia et al., 2016). Control structures that perform PWM generation play a critical role in DVR applications. Detection of voltage changes and generation of a new reference voltage depending on this change are the main tasks of the control structure within the DVR (Janardhanan & Mulla, 2024; Mbuli, 2023). In this study, the PI-based control method is employed to regulate the pulse-width modulation (PWM) signals governing the semiconductor switches of the inverter, which is connected to a DC power source. Harmonic attenuation is achieved through the implementation of an LC filter, ensuring that the voltage delivered to the load remains consistent with the source. The DVR configuration developed for a stand-alone wind power system is depicted in Figure 4.

The first step of the PI based control method will be to define the three phase signal on the d-q axis by applying Park's d-q-0 transform to the load voltage (Parida et al., 2024; Nasrollahi et al., 2022).

$$V_d = \frac{2}{3}\left((V_a sin(wt) + V_b sin\left(wt - \frac{2\pi}{3}\right) + V_c \sin\left(wt + \frac{2\pi}{3}\right)\right) \quad (8)$$

$$V_q = \frac{2}{3}\left((V_a cos(wt) + V_b cos\left(wt - \frac{2\pi}{3}\right) + V_c \cos\left(wt + \frac{2\pi}{3}\right)\right) \quad (9)$$

$$V_0 = \frac{1}{3}(V_a + V_b + V_c) \tag{10}$$

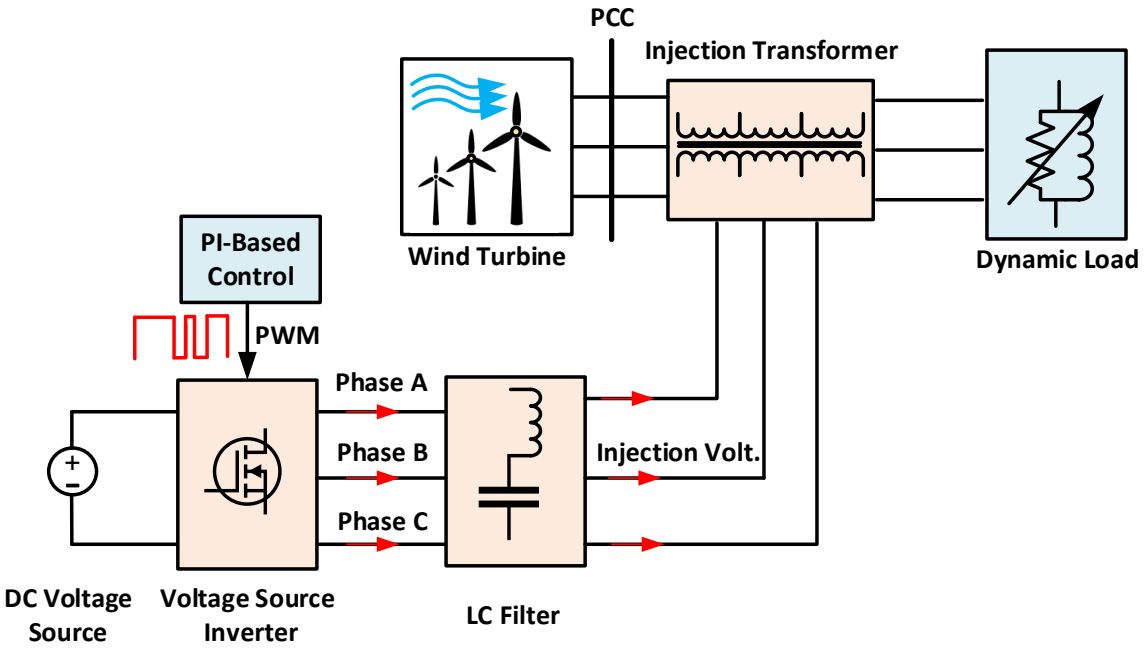


Figure 4. PI Control Based DVR Structure

Possible distortions in the signals transferred to the dq axis are calculated by comparing them with the reference value, then they will be converted back to the three-phase abc system. In addition, a phase-locked loop (PLL) is used to coordinate the frequencies of the load voltage and the voltage to be injected. The error between the actual values of the dq voltage and the reference values is used as the input of the PI controller, and its output supports the generation of PWM for the switching elements (Muktiadji & Oladigbolu, 2021; Mosaad et al., 2019).

$$\begin{cases} e_d = V_{d\,(ref)} - V_d \\ e_q = V_{q\,(ref)} - V_q \end{cases} \tag{11}$$

In addition, the DVR power required to compensate for possible voltage sags and swells in the source voltage is defined by the following equation.

$$P_{dvr} = \left(\frac{V_1 - V_2}{V_1}\right) P_{Load} \tag{12}$$

Where V_1 is the nominal voltage, V_2 is the faulty voltage (sag or swell), and P_{load} is the load power. The block structures of the PI-based control method used for the DVR are presented in detail in Figure 5.

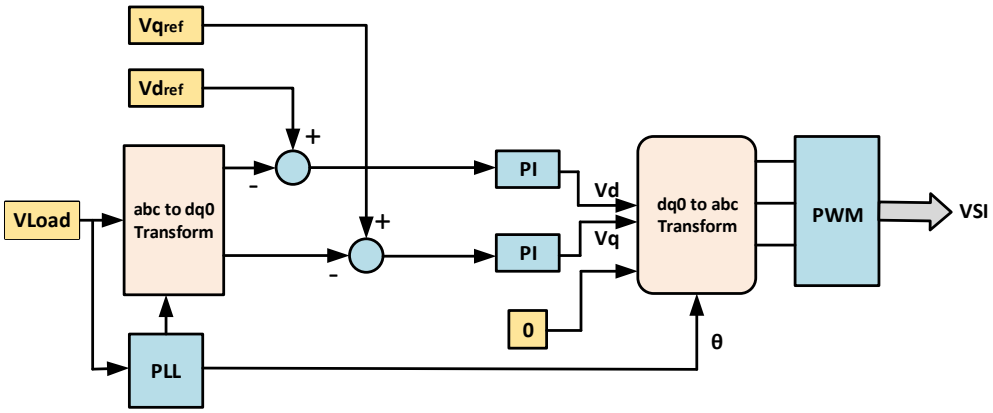


Figure 5. Structure of the PI-based Control in DVR

The applied DVR compensation method (pre-fault) continuously monitors the supply voltage and if it detects any disturbance in this voltage, it injects the difference voltage between the sags or swells in PCC and the ideal pre-fault condition. The Phase Lock Loop (PLL) regulates the load angle and the supply angle transmitted to the PCC, resulting in θ being aligned with the supply voltage. In this way, the load voltage can be returned to pre-fault conditions, and compensation is provided for voltage drops in a load that is sensitive to both phase angle and amplitude (Soomro et al., 2021; Molla & Kuo, 2020). The phasor diagram of the pre-fault compensation method is presented in Figure 6.

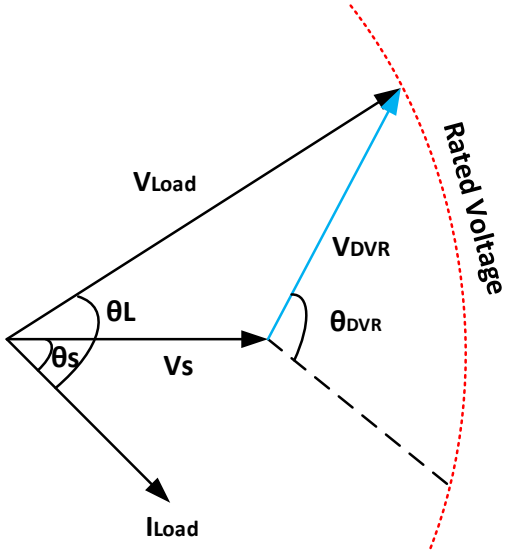


Figure 6. Phasor Diagram of Pre-Fault Compensation

In case of sudden changes in the voltage supplied to sensitive loads, the DVR needs to inject a voltage vector that is the difference between the reference load voltage and the source voltage so that the load voltage amplitude and phase angle are restored to the pre-fault value. The injected apparent power $S_{inj.}$ and injected active power $P_{inj.}$ are as follows (Liu et al., 2024; Tavighi et al., 2013; Moreno-Munoz et al., 2006).

$$S_{inj.} = I_{Load}V_{DVR} = I_{Load}\sqrt{V_{Load}^2 + V_S^2 - 2V_{Load}V_S(\theta_L - \theta_S)} \quad (13)$$

$$P_{inj.} = I_{Load}(V_{Load}Cos\theta_L - V_SCos\theta_S) \quad (14)$$

To restore the load voltage in terms of maintaining power quality, the magnitude and angle of the voltage to be injected are as follows.

$$V_{DVR} = \sqrt{V_{Load}^2 + V_S^2 - 2V_{Load}V_S(\theta_L - \theta_S)} \quad (15)$$

$$\theta_{DVR} = tan^{-1}\left(\frac{V_{Load}Sin\theta_L - V_SSin\theta_S}{V_{Load}Cos\theta_L - V_SCos\theta_S}\right) \quad (16)$$

Here, I_{Load} is the load current, V_{Load} is the load voltage angle, V_{DVR} is the injected voltage, θ_{DVR} is the injected voltage angle, θ_L is the load voltage angle, and θ_s is the voltage angle at PCC.

PLL is a closed loop system that controls a voltage controlled oscillator and serves as one of the basic structures of the DVR method (as presented in Figure 5). It aims to maintain the frequency and phase of the external periodic signal using a feedback loop; however, in the case of feeding sensitive loads from power electronics based systems, it is common to encounter problems such as voltage drops and rises, phase loss, and frequency changes. PLL should be capable of rejecting these errors and maintaining phase lock to the source voltage. The quantities that vary depending on time in three-phase systems are as follows (Panchal et al., 2025; Natesan & Venkatesan, 2016).

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = V \begin{bmatrix} Cos(wt) \\ Cos(wt - \frac{2\pi}{3}) \\ Cos(wt - \frac{4\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (17)$$

The first step in transforming three-phase voltages to the rotating reference frame is to transfer the initial projected quantities onto the orthogonal axis (Clarke transform) and is expressed as follows

$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \\ 0 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & Cos(\frac{2\pi}{3}) & Cos(\frac{4\pi}{3}) \\ 0 & Sin(\frac{2\pi}{3}) & Sin(\frac{4\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = V \begin{bmatrix} Cos(wt) \\ Sin(wt) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (18)$$

Here, alpha (α) and beta (β) components are the stationary reference frame variables. As presented in Figure 7, the net voltage vector forms an angle θ with the orthogonal axis and rotates at an angular frequency ω. By projecting the components of the stationary reference frame onto this rotating reference frame (Park Transform), the system can be transformed into a DC equivalent and expressed as follows.

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \\ V_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Cos(\theta) & Sin(\theta) & 0 \\ -Sin(\theta) & Cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \\ V_0 \end{bmatrix} \quad (19)$$

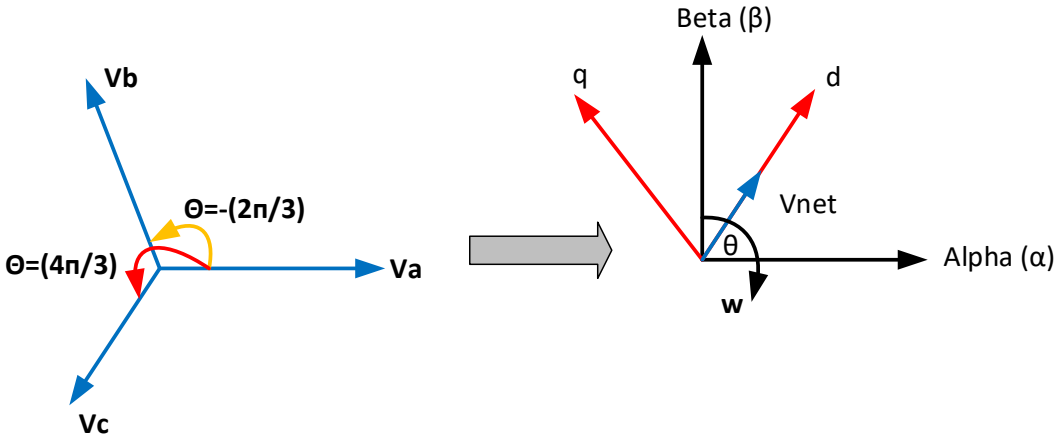


Figure 7. Transforming the Three-phase (abc) Signal into the Dq0 Rotating Reference Frame

Using trigonometric identities, equation 17 can be expanded as follows.

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \\ V_o \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} Cos(\theta) & Sin(\theta) & 0 \\ -Sin(\theta) & Cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} x \begin{bmatrix} Cos(wt) \\ Sin(wt) \\ 0 \end{bmatrix} V \quad (20)$$

When the difference between the angle of the real voltage vector and the angle tracked by the PLL (ωt- θ) is close to zero, sin(wt- θ ≈ wt- θ). Subsequently, when the PLL completes the locking process, it is observed that the q-axis component in the rotating reference frame of a balanced three-phase system drops to zero, in which case, a small error is observed if the locking process does not occur.

$$V_q \approx (wt - \theta) \quad (21)$$

In three-phase systems, the q component is used as the value at which the phase is detected while the voltage quantity is converted to the rotating reference frame. Then, PI controller is used to eliminate the steady-state error. The electrical and modeling parameters of the proposed study are presented in Table 3 along with their values.

Table 3. Parameters and Values of The System Structure

Parameter	Value	Parameter	Value
$L_{1Filter}$	1.55 mH	R_{Load}	200 Ω
$C_{1\ Filter}$	1mF	L_{Load}	8 mH
$L_{2Filter}$	1.55 mH	K_{pd}	32
Load Voltage	400 V_{dc}	K_{id}	124
Frequency	50 Hz	K_{pq}	21
DC Voltage	200 V_{dc}	K_{iq}	250

CASE STUDIES AND RESULTS

In the proposed study, tests were performed under different conditions, including phase-to-ground fault application, different wind speeds, different source frequencies, and dynamic (non-linear load), and the results were analyzed. Figure 8 presents the injected voltage changes and load voltage status through DVR application when the load and source are at the same and different frequencies. While the injected voltage is evident with small oscillations when the source and load are at the same frequency, the voltage injection is performed by taking into account the phase difference between the signals when the load and source are at different frequencies.

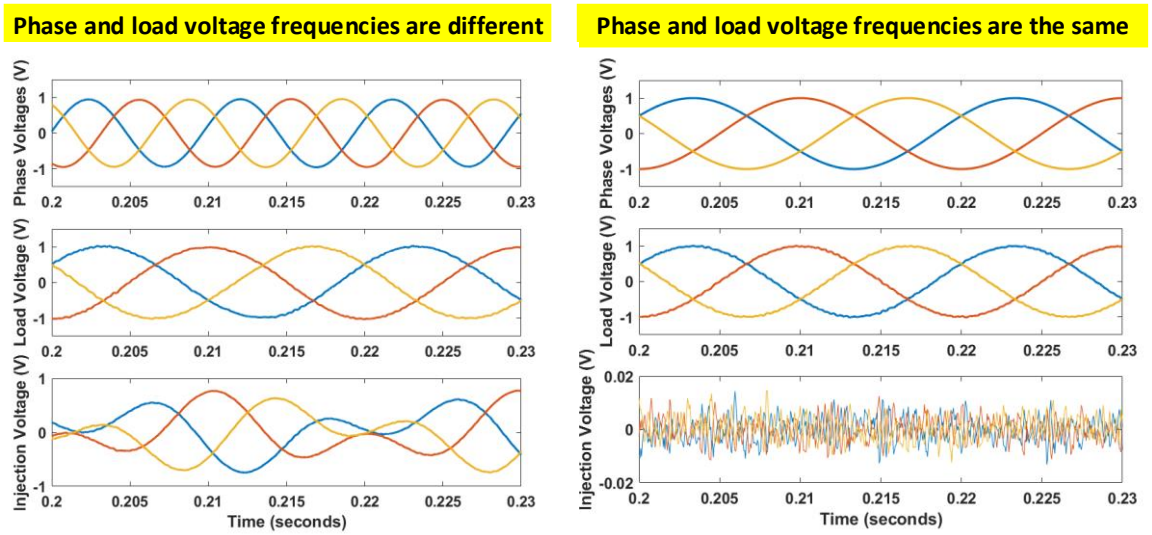


Figure 8. Frequency Based Phase, Load and Injected Voltages

In Figure 9, a fault was applied only between phase a and ground, and thus, the DVR detected the fault in phase a and adjusted the voltage to be injected. In the last case, the load voltage was not affected by the phase fault and continued to be supplied according to the situation before the fault.

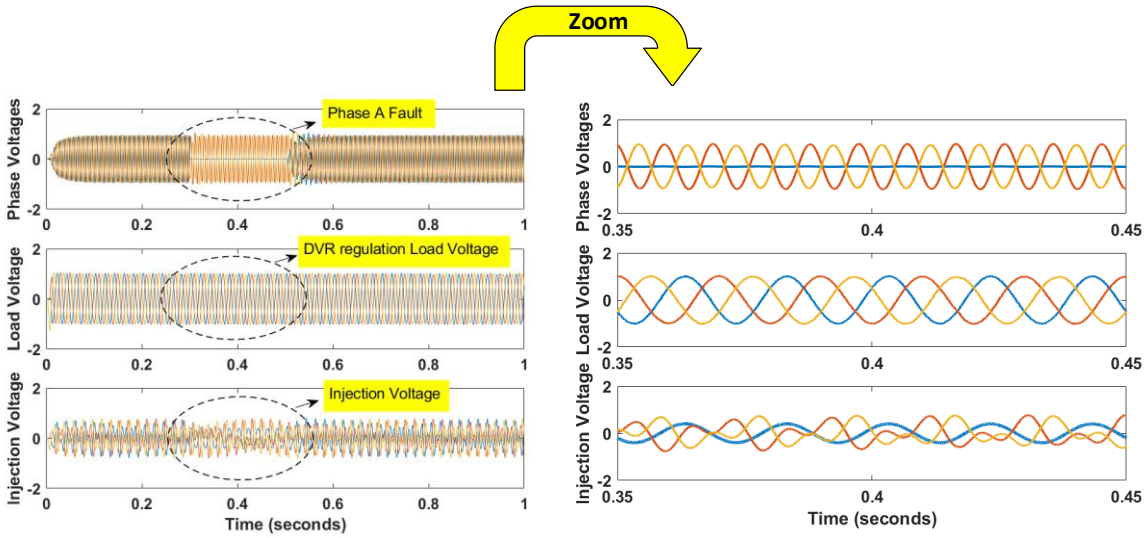


Figure 9. Phase- Ground Fault Basis Voltages

In Figure 10, a fault was applied between all three phases and ground, and the voltages dropped to almost zero for a certain period of time (0.3s- 0.5s). However, the DVR detected the fault between the phases and ground and injected a series voltage and ensured that the load voltage continued to be supplied without changing.

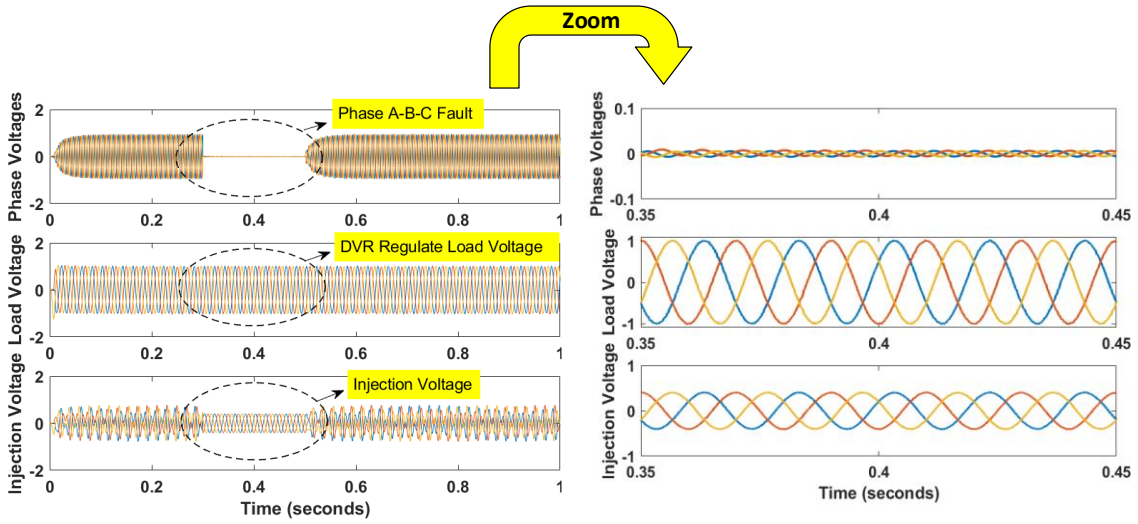


Figure 10. Phase-to-Ground Basis Fault and Its Effect on Load Voltage

In Figure 11, the dynamic and nonlinear load is connected to the system, and the phase load and injected voltages are examined in the cases without DVR and with DVR. In the case without DVR, the effect of the nonlinear load on the source voltage is directly transferred to the load and causes the load to be fed with high harmonic voltage. However, after the DVR is applied to the system, the effect of the nonlinear load is damped, and the series voltage injected into the system ensures that the load continues to be fed with low harmonic voltage.

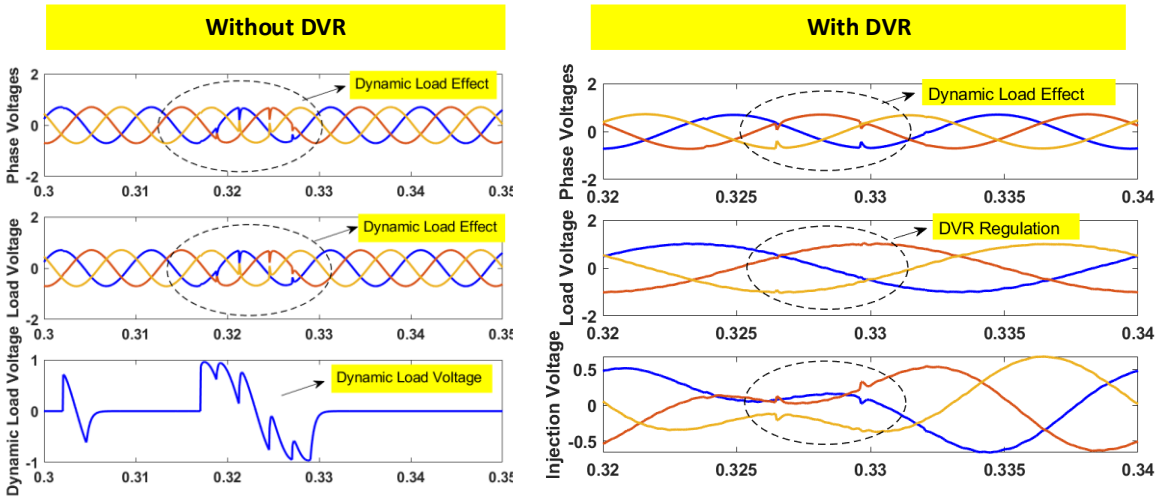
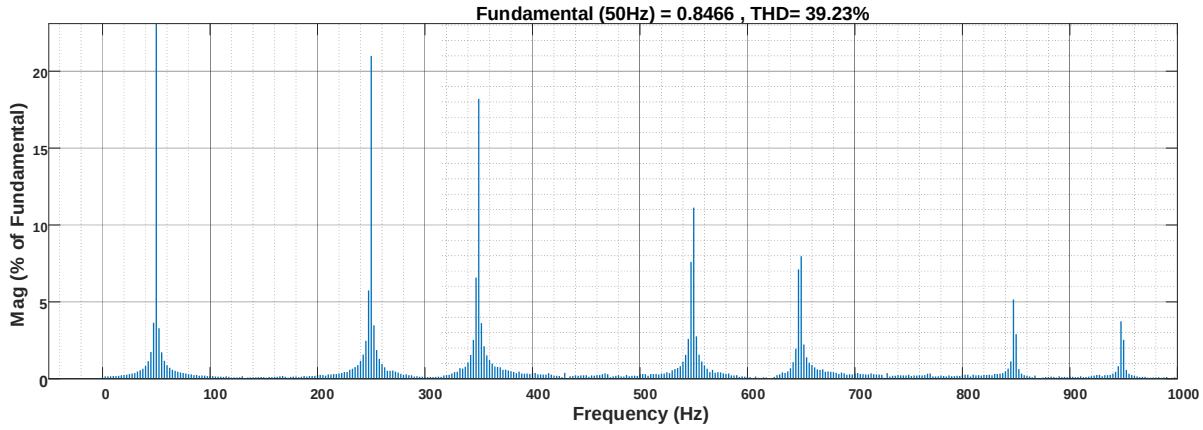
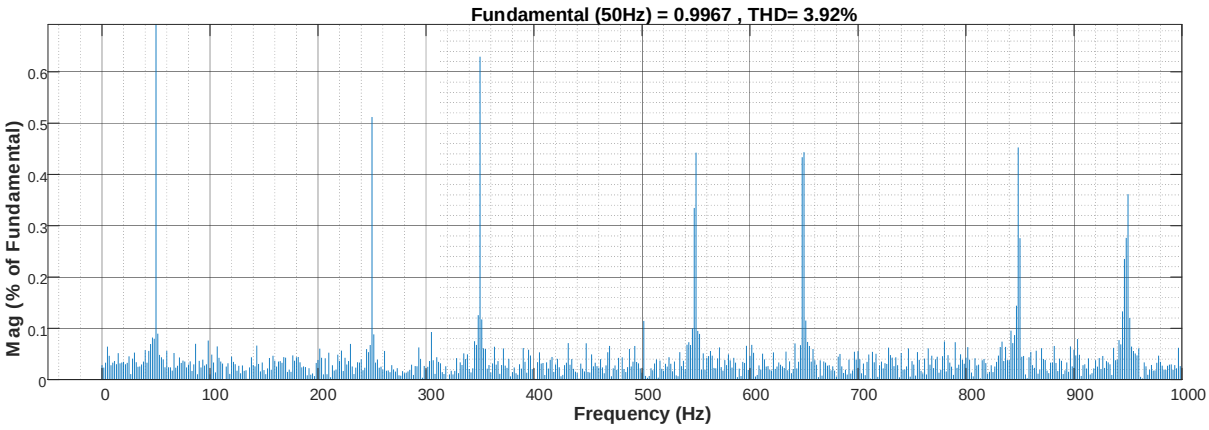


Figure 11. Effect of Dynamic Nonlinear Load on Voltages and DVR

Although the total harmonic distortion (THD) of the load voltage exceeded 39% with the dynamic nonlinear load connected to the system (Figure 12a), it was reduced to 3.92% after the DVR was applied and the compensating voltage was injected (Figure 12b). In Figure 12, "Fundamentals (50 Hz)" denotes the value of the fundamental frequency voltage (refer to Equation 7 and Table 4). Additionally, Table 4 presents the impact of both the dynamic nonlinear load connection and the DVR application on the load voltage THD and other operating parameters.



(a)



(b)

Figure 12. a. Load Voltage THD Without DVR, **b.** Load Voltage THD with DVR

Table 4. DVR Effect on Voltage Harmonics Under Dynamic Load

Operation Parameters	Without DVR	With DVR
Sampling Time (s)	5.10^{-5}	5.10^{-5}
Samples Per Cycle	400	400
Fundamental Frequency Voltage (Per Unit)	0.8466	0.9967
Total Harmonic Distortion (THD)	39.23%	3.92%

In Figure 13, different wind speeds were applied to the wind turbine (14ms-16ms), and the response of the DVR was tested by providing source voltage sags and swells. To prevent the load voltage from being affected by the source voltage fluctuations at different wind speeds, the DVR injected series voltage into the system.

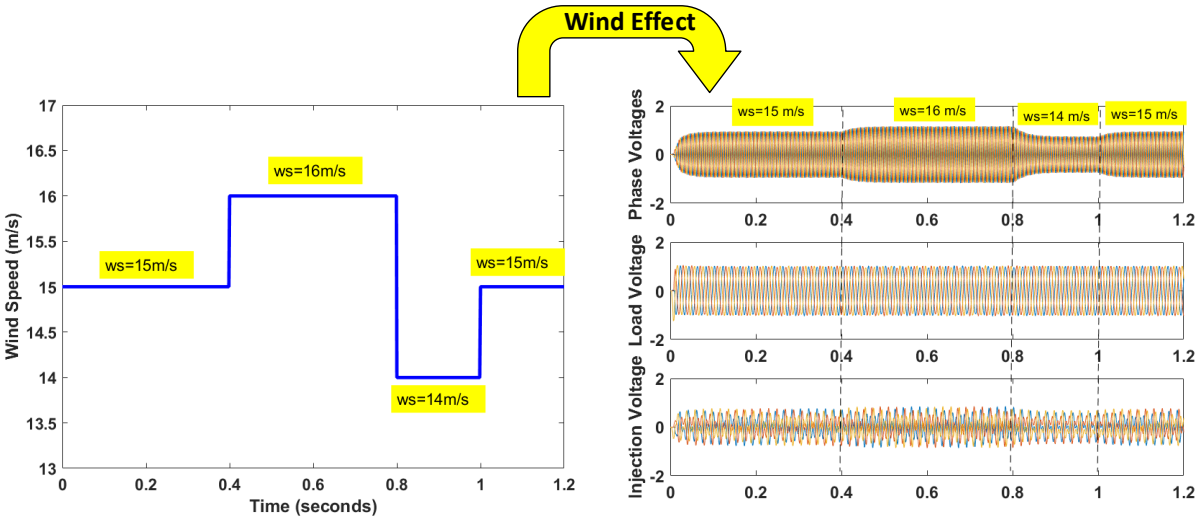


Figure 13. Variable Wind Speeds and Voltage Responses

The harmonic distortion caused by the faults applied between phase and ground (P, means phase, G, means ground) in the load voltage and the THD damping results after DVR application are presented in Table 5.

Table 5. Load Voltage THD With DVR and Without DVR After Phase-to-Ground Fault

Fault Types	Without DVR (THD %)	With DVR (THD %)
P-G	13.53 %	1.56 %
P-P-G	14.41 %	1.59 %
P-P-P-G	13.58 %	1.56 %

CONCLUSION

While stand-alone wind turbine systems provide sustainable energy production, the variable and unpredictable nature of the wind can cause serious problems in terms of power quality. Especially in environments with sensitive loads (such as medical devices, communication systems, and automation systems), sudden voltage fluctuations, harmonics, and frequency deviations can negatively affect sensitive load performance. In this study, a stand-alone wind turbine system is presented with DVR technology to feed sensitive loads (Figure 1). The DVR technology modelled in this study includes phase-locked loop (PLL), a dc-voltage source, and a harmonic filter connected to an inverter for series voltage injection into the power circuit (Figures 4 and 5). The Dynamic Voltage Restorer (DVR) used in the study aims to ensure the safety of sensitive loads by effectively balancing voltage sags, swells, or temporary disturbances that may occur in the independent wind turbine. However, Phase-Locked Loop (PLL) structure is used to precisely monitor the phase angle and frequency of the ac voltage obtained from the wind turbine and to ensure the synchronization of the DVR. The study separately considers the cases of different wind speeds (Figure 13), phase-ground faults (Figures 9 and 10), source and load with different frequencies (Figure 8), including linear and non-linear loads (Figure 11), and ensures the load voltage performs at nominal value even in the specified cases. In addition, under dynamic non-linear load, the DVR ensured compliance with IEEE-519 standards by reducing the load voltage harmonics from 39.23%2 to 3.92% (Figure 12 and Table 4). In addition, the load voltage THD was suppressed under phase-ground fault conditions to ensure the load operates at nominal voltage (Table 5). As a result, the security of sensitive loads and energy continuity in stand-alone wind turbine systems is made possible by advanced power electronic solutions such as DVR and PLL. The integration of these structures not only improves power quality but also ensures that renewable energy systems can be used safely in critical applications. In this study, MATLAB/Simulink program was used for system modeling, analysis, and implementation.

REFERENCES

Babu, V., Ahmed, K. S., Shuaib, Y. M. & Manikandan, M. (2021). Power Quality Enhancement Using Dynamic Voltage Restorer (DVR)-Based Predictive Space Vector Transformation (PSVT) With Proportional Resonant (PR)-Controller. *IEEE Access*, 9, 155380-155392. doi: 10.1109/ACCESS.2021.3129096

Bubshait, A. S., Mortezaei, A., Simões M.G., & Busarello, T.D.C. (2017). Power Quality Enhancement for a Grid Connected Wind Turbine Energy System. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 53(3), 2495-2505. doi: 10.1109/TIA.2017.2657482.

Eltamaly, A.M., Mohamed, Y.S., El-Sayed, A.H.M., & Abd Elghaffar, A.N. (2018). Enhancement of Power System Quality Using PI Control Technique with DVR for Mitigation Voltage Sag. 2018 Twentieth International Middle East Power Systems Conference (MEPCON), Cairo, Egypt, pp. 116-121, doi: 10.1109/MEPCON.2018.8635221.

Ganthia, B.P., Mohanty, S., Rana, P.K., & Sahu, P.K. (2016). Compensation of voltage sag using DVR with PI controller. 2016 International Conference on Electrical, Electronics, and Optimization Techniques (ICEEOT), Chennai, India, pp. 2138-2142. doi: 10.1109/ICEEOT.2016.7755068.

Göncü, B., & Yılmaz Ü. (2023). Different DC-Link Control Methods with Multilevel Inverter for Low Harmonic and Efficient Power Transfer in Grid-Tied Hydrogen Fuel Cell Systems. *DÜMF MD*, 14(2), 289-304. doi: 10.24012/dumf.1293293

Janardhanan, S., & Mulla, M. A. (2024). Implementation of Voltage Imbalance Mitigation Using SOGI Based PV-DVR System. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 60(5), 7858-7868. doi: 10.1109/TIA.2024.3427048.

Kavitha R., Premalatha, K., Kumar, M.M., Kumutha, S., & Manimaran, T.N. (2023). Line Voltage THD Minimization in Multilevel Inverter using Particle Swarm Optimization. 2023 Fifth International Conference on Electrical, Computer and Communication Technologies (ICECCT), Erode, India, 2023, pp. 1-5, doi: 10.1109/ICECCT56650.2023.10179791.

Liu, D., Zhang, H., Liang, X., & Deng, S. (2024). Model Predictive Control for Three-Phase, Four-Leg Dynamic Voltage Restorer. *Energies*, *17*, 5622. https://doi.org/10.3390/en17225622

Mayilsamy, G., Palanimuthu, K., Venkateswaran, R., Antonysamy, R.P., Lee, S.R., Song, D., & Joo, Y.H. (2023). A Review of State Estimation Techniques for Grid-Connected PMSG-Based Wind Turbine Systems. *Energies*, 16(2), 634. https://doi.org/10.3390/en16020634

Mbuli, N. (2023). Dynamic Voltage Restorer as a Solution to Voltage Problems in Power Systems: Focus on Sags, Swells and Steady Fluctuations. *Energies*, 16, 6946. https://doi.org/10.3390/en16196946

Molla, E.M., & Kuo, C.-C. (2020). Voltage Quality Enhancement of Grid-Integrated PV System Using Battery-Based Dynamic Voltage Restorer. *Energies* 2020, 13(21), 5742. https://doi.org/10.3390/en13215742

Moreno-Munoz, A., Oterino, D., Gonzalez, M., Olivencia, F. A., & Gonzalez-de-la-Rosa, J. J. (2006). Study of sag compensation with DVR. MELECON 2006 - 2006 IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference, Malaga, Spain, 2006, pp. 990-993, doi: 10.1109/MELCON.2006.1653265.

Mosaad, M.I., El-Raouf, M. O. A., Al-Ahmar, M. A., & Bendary, F. M. (2019). Optimal PI controller of DVR to enhance the performance of hybrid power system feeding a remote area in Egypt. *Sustainable Cities and Society*, 47, 101469. https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101469

Muktiadji R. F., & Oladigbolu, J.O. (2021). Design of Dynamic Voltage Restorer Utilizing Adaptive Control to Mitigate Voltage Sag. 2021 Fourth International Conference on Vocational Education and Electrical Engineering (ICVEE), Surabaya, Indonesia, 2021, pp. 1-5, doi: 10.1109/ICVEE54186.2021.9649714.

Nasrollahi, R., Farahani, H. F., Asadi, M., & Kangarlu, M.F. (2022). Sliding mode control of a dynamic voltage restorer based on PWM AC chopper in three-phase three-wire systems. *Electrical Power and Energy Systems*, 134, 107480. https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2021.107480

Natesan, S., & Venkatesan, J. (2016). A SRF-PLL Control Scheme for DVR to Achieve Grid Synchronization and PQ Issues Mitigation in PV Fed Grid Connected System. *Circuits and Systems*, **7**, 2996-3015. http://dx.doi.org/10.4236/cs.2016.710256

Panchal, A., Jaglan, A., Saroha, S., Singla, P., & Maitra, S.K. (2025). Implementation of SOGI-EPLL for DVR Control Under Unbalanced and Distorted Grid Conditions. *Smart Grids and Energy*, 10(3), 1-19. https://doi.org/10.1007/s40866-024-00238-w

Parida, S., Behera, M. P., & Sahu, M. K. (2024). Power Quality Enhancement In Grid-Connected PV Systems Using Gaussian Membership Function Type II Fuzzy Logic Controller And Dynamic Voltage Restorer. *Library Progress International*, 44 (2), 1950-1970. https://doi.org/10.48165/bapas.2024.44.2.1

Prasad, D., & Dhanamjayulu, C. (2022). Solar PV integrated dynamic voltage restorer for enhancing the power quality under distorted grid conditions. *Electric Power Systems Research*, 213, 108746, https://doi.org/10.1016/j.epsr.2022.108746

Ranjan A., & Giribabu, D. (2023). Design of LCL Filter For Grid Connected Three Phase Three Level Inverter to Meet IEEE 519 Standards. IEEE International Students' Conference on Electrical, Electronics and Computer Science (SCEECS), Bhopal, India, pp. 1-6, doi: 10.1109/SCEECS57921.2023.10061817.

Rao, N. S., Priyadharson, A. S. M., & J. Praveen, j. (2015). Simulation of Artificial Intelligent Controller based DVR for Power Quality Improvement. *Procedia Computer Science*, 47, 153-167. https://doi.org/10.1016/j.procs.2015.03.194.

Singh, O.J., & Winston, D.P. (2023) .Enhanced Method of Mitigating Voltage Sags and Swells Using Optimized Fuzzy Controlled DVR. *Iran J Sci Technol Trans Electr Eng*, 47, 147–158. https://doi.org/10.1007/s40998-022-00556-8

Soomro, A. H., Larik, A. S., Mahar, M. A., Sahito, A. A., Soomro, A. M., & Kaloi, G. S. (2021). Dynamic Voltage Restorer—A comprehensive review. *Energy Reports*, 7, 6786–6805. https://doi.org/10.1016/j.egyr.2021.09.004

Tavighi, A., Abdollahzadeh H., & Martí, J. (2013). Fast response DVR control strategy design to compensate unbalanced voltage sags and swells in distribution systems. IEEE Power & Energy Society General Meeting, Vancouver, BC, Canada, 2013, pp. 1-5, doi: 10.1109/PESMG.2013.6672748.

Tu, C., Guo, Q., Jiang, F., Shuai, Z., & He, X. (2018). Analysis and control of bridge-type fault current limiter integrated with the dynamic voltage restorer. *Electrical Power and Energy Systems*, 95, 315–326. https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2017.08.031

Ye, J., Gooi, H. B., Wang, B., Li, Y., & Liu, Y. (2019). Elliptical restoration based single-phase dynamic voltage restorer for source power factor correction. *Electric Power Systems Research*, 166, 199–209. https://doi.org/10.1016/j.epsr.2018.10.011

KSÜ Mühendislik Bilimleri Dergisi, 28(2), 2025
Araştırma Makalesi

KSU J Eng Sci, 28(2), 2025
Research Article

Kahramanmaras Sutcu Imam University
Journal of Engineering Sciences

Geliş Tarihi : 04.12.2024
Kabul Tarihi : 22.04.2025

Received Date : 04.12.2024
Accepted Date : 22.04.2025

DRONE TABANLI TARIMSAL OPERASYONLARDA HIZ VE YÜKSEKLİĞİN ENERJİ TÜKETİMİNE ETKİSİ

THE IMPACT OF SPEED AND ALTITUDE ON ENERGY CONSUMPTION IN DRONE-BASED AGRICULTURAL OPERATIONS

Mevlüt İNAN[1*] (ORCID: 0000-0002-9840-8404)
Ali KARCI[2] (ORCID: 0000-0002-8489-8617)

[1] Van Yüzüncü Yıl Üniversitesi, Başkale Meslek Yüksekokulu Bilgisayar Programcılığı Bölümü, Van, Türkiye
[2] İnönü Üniversitesi, Yazılım Mühendisliği Bölümü, Malatya, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Mevlüt İNAN, mevlutinan@yyu.edu.tr

ÖZET

Bu çalışma, tarımsal ve endüstriyel uygulamalarda operasyonel verimliliği optimize etme amacıyla, 5 litrelik yük taşıyan bir drone'nun enerji tüketimi üzerinde hız ve uçuş yüksekliğinin etkisini araştırmaktadır. Kontrollü çevre koşulları altında 1 hektarlık bir tarım arazisinde yürütülen çalışmada, farklı hız (2, 5, 8 m/s) ve yükseklik (5, 10, 15 m) parametrelerini birleştiren dokuz senaryoyu simüle etmek için bir dört pervaneli drone (quadcopter drone) kullanılmıştır. Kalibre edilmiş sensörler kullanılarak 600 veri noktasında enerji tüketimi verileri toplanmıştır. Sonuçlar, hız, yükseklik ve enerji tüketimi arasında net bir ilişki olduğunu ortaya koymuştur. Daha yüksek hızlar enerji tüketimini önemli ölçüde artırmış, değerler 2 m/s'de 66,67 W'tan 8 m/s'de 121,90 W'a yükselmiştir. Yükseklik değişimlerinin enerji tüketimi üzerindeki etkisi, hızın etkisine kıyasla daha sınırlı olmasına rağmen, yine de dikkate değer bir katkı sağlamıştır. Özellikle yükseklik 5 metreden 15 metreye çıkarıldığında, enerji tüketiminde %10 ila %15 arasında bir artış gözlemlenmiştir. Bu da hızın enerji tüketimi üzerinde yükseklikten daha baskın bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir. Bu bulgular, enerji verimliliği elde etmek için hız ve yükseklik parametrelerini dikkatlice optimize etme ihtiyacını vurgulamaktadır. Bu çalışma, uzun süreli operasyonlar için düşük hız(2 m/s) ve orta yükseklik kombinasyonlarını ve yalnızca zamana duyarlı görevler için yüksek hız ayarlarını önererek, droneların tasarımı ve işletimi için uygulanabilir iç görüler sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: İHA, tarım, enerji tüketimi, hız ve yükseklik, enerji verimliliği

ABSTRACT

This study investigates the impact of speed and flight altitude on the energy consumption of a drone carrying a 5-liter payload, with the aim of optimizing operational efficiency in agricultural and industrial applications. Conducted on a 1-hectare agricultural field under controlled environmental conditions, the study utilized a quadcopter drone to simulate nine scenarios combining different speed(2, 5, 8 m/s) and altitude(5, 10, 15 m) parameters. Energy consumption data were collected at 600 data points using calibrated sensors. The results revealed a clear relationship between speed, altitude, and energy consumption. Higher speeds significantly increased energy consumption, rising from 66.67 W at 2 m/s to 121.90 W at 8 m/s. Although the effect of altitude variations on energy consumption was less pronounced compared to speed, it still contributed notably; raising the altitude from 5 meters to 15 meters resulted in a 10% to 15% increase in energy consumption. This indicates that speed has a more dominant influence on energy consumption than altitude. The findings highlight the need to carefully optimize speed and altitude parameters to achieve energy efficiency. The study provides actionable insights for drone design and operation, recommending low-speed and mid-altitude combinations for long-duration operations and high-speed settings for time-sensitive tasks.

Keywords: UAV, agriculture, energy consumption, altitude and speed, energy efficiency

ToCite: İNAN, M., & KARCI, A., (2025). DRONE TABANLI TARIMSAL OPERASYONLARDA HIZ VE YÜKSEKLİĞİN ENERJİ TÜKETİMİNE ETKİSİ. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 28(2), 674-689.

GİRİŞ

Günümüzde tarım sektörü, teknolojik gelişmelerin etkisiyle hızlı bir dönüşüm süreci yaşamaktadır. Bu dönüşümün en dikkat çekici örneklerinden biri, drone teknolojisinin tarımsal uygulamalardaki kullanımıdır. Tarımsal drone teknolojisi, modern tarımın verimliliğini artırmak, doğal kaynakları daha etkin kullanmak ve çevresel etkileri minimize etmek gibi önemli hedeflere ulaşmada kritik bir rol üstlenmektedir. Tarımsal alanların izlenmesi, ürün sağlığının değerlendirilmesi, sulama yönetimi ve pestisit uygulamaları gibi farklı alanlarda kullanılan drone'lar, çiftçilere hızlı ve doğru veri sağlayarak karar verme süreçlerini iyileştirmekte ve iş gücünden tasarruf etmelerine olanak tanımaktadır (Paiva vd., 2023; McCarthy vd., 2023; Zailani vd., 2020). Ancak, bu yenilikçi teknolojinin etkin kullanımı, enerji tüketimi gibi sınırlayıcı faktörler nedeniyle operasyonel zorluklarla karşı karşıya kalmaktadır.

Drone'ların enerji kapasitelerinin sınırlı olması, operasyon sürelerini doğrudan etkileyerek bu araçların tarımsal uygulamalarda sürdürülebilir bir şekilde kullanımını zorlaştırmaktadır (Huang vd., 2023; Ali vd., 2023; Mohsan vd., 2022; Czachórski vd., 2022). Drone'ların enerji tüketimi; hız, uçuş yüksekliği, taşıdığı yük miktarı ve çevresel faktörler gibi birçok değişkene bağlı olarak değişkenlik göstermektedir. Bu faktörlerden özellikle hız ve yükseklik, enerji tüketimini şekillendiren en önemli parametreler arasında yer almaktadır (Wu vd., 2024; Diller vd., 2023; Wu vd., 2018; Zorbas vd., 2016). Örneğin, yüksek hızda çalışan bir drone, daha fazla itki üretmek için motorlarını zorlar ve bu da enerji tüketiminde belirgin bir artışa neden olurken, yüksek yüksekliklerde gerçekleştirilen uçuşlar ise hava yoğunluğunun azalması ve stabilite sağlama çabası nedeniyle enerji tüketimini artırabilmektedir (Beigi vd., 2023; Thibbotuwawa vd., 2019). Dolayısıyla, bu parametrelerin etkisini anlamak ve enerji tüketimini optimize etmek, tarımsal drone uygulamalarının operasyonel maliyetlerini düşürmek ve sürdürülebilirliğini artırmak için kritik bir öneme sahiptir.

Tarımsal drone uygulamalarında enerji tüketimi sorununu ele almak amacıyla bu çalışmada "Hız ve yüksekliğin enerji tüketimine olan etkisi nedir?" sorusuna odaklanılmıştır. Burada hız, İHA'nın roll/pitch düzleminde doğrusal olarak belirli bir yön doğrultusunda ilerleme hızı olarak tanımlanmıştır. Açısal hız (örneğin yaw ekseni etrafında dönüş) bu çalışmanın kapsamı dışında tutulmuştur. Bu çalışmada kullanılan "yükseklik" kavramı ise, İHA'nın yerden olan mesafesini ifade etmektedir. "İrtifa" ifadesi havacılıkta deniz seviyesine göre yükseklik anlamında kullanılsa da bu çalışmanın kapsamı içerisinde yalnızca yer düzlemi referans alınmıştır. Yukarıda verilen araştırma sorusunun yanıtlanması, drone operasyonlarında enerji verimliliğini artıracak stratejilerin geliştirilmesi ve uygulamada karşılaşılan operasyonel sınırlamaların aşılmasını sağlayacaktır. Bu çalışma kapsamında, drone'ların enerji tüketiminde hız ve yüksekliğin oynadığı rol, sistematik bir yaklaşımla ele alınmıştır. Özellikle farklı hız ve yükseklik kombinasyonlarının enerji tüketimine olan etkilerini analiz etmek amacıyla deneysel veriler toplanmış ve bu veriler ışığında enerji yönetimine dair pratik öneriler geliştirilmiştir.

Bu çalışmanın temel hedefi, enerji tüketimini optimize eden hız ve yükseklik kombinasyonlarını belirleyerek, tarımsal drone uygulamalarında enerji verimliliğini artırmaktır. Mevcut literatür incelendiğinde, tarımsal drone teknolojisinin farklı boyutlarına odaklanan birçok çalışma bulunmasına rağmen, hız ve yükseklik değişkenlerinin enerji tüketimi üzerindeki etkilerini ayrıntılı bir şekilde inceleyen çalışmaların sınırlı olduğu görülmektedir. Literatürde hız ve yükseklik kombinasyonlarının enerji tüketimi üzerindeki etkileri genellikle teorik modeller üzerinden değerlendirilmiş, ancak gerçek zamanlı operasyonel senaryolar ise yeterince incelenmemiştir. Bu durum, mevcut çalışmanın literatürdeki eksiklikleri doldurmayı ve yeni katkılar sağlamayı hedeflediğini açıkça göstermektedir.

Araştırmanın kapsamı yalnızca hız ve yüksekliğin enerji tüketimine olan etkilerini analiz etmekle sınırlı kalmayıp, aynı zamanda drone operasyonlarının sürdürülebilirliğini artırmaya yönelik öneriler geliştirmeyi de içermektedir (Almutairi vd., 2024; Askarzadeh vd., 2024; Mourgelas vd., 2023). Örneğin, düşük hız (2 m/s) ve orta yükseklik (10 m) seviyelerinin uzun süreli operasyonlarda enerji tasarrufu sağladığı, yüksek hız (8m/s) ve yükseklik (15m) kombinasyonlarının ise yalnızca zamana duyarlı uygulamalar veya engellerden kaçınmanın kritik olduğu durumlarda tercih edilmesi gerektiği belirlenmiştir.

Sonuç olarak, tarımsal drone kullanımı, modern tarımda önemli bir yere sahiptir (Singh vd., 2024). Enerji tüketimi, bu teknolojinin etkinliğini belirleyen temel faktörlerden biridir. Hız ve yükseklik gibi operasyonel parametrelerin enerji tüketimi üzerindeki etkilerinin sistematik bir şekilde analiz edilmesi (Beigi vd., 2023; Thibbotuwawa vd., 2019), drone teknolojisinin enerji verimliliği açısından optimize edilmesine önemli katkılar sağlayacaktır (Zhang vd., 2021). Bu çalışma, yalnızca literatürdeki önemli bir boşluğu doldurmakla kalmayıp, aynı zamanda tarımsal drone

operasyonlarında sürdürülebilirlik ve maliyet etkinliği için uygulanabilir stratejiler geliştirilmesine de rehberlik edecektir.

MATERYAL VE METOT

Bu bölümde öncelikle çalışmanın temel aldığı problem ele alınmış, drone tabanlı tarımsal operasyonlarda hız ve yüksekliğin enerji tüketimine etkisi incelenmiştir. Çalışmada kullanılan drone'a ait detaylı teknik özellikler sunulmuş, bu drone ile gerçekleştirilen deneyler ve veri toplama yöntemleri açıklanmıştır. Enerji tüketiminin hesaplanması için kullanılan yöntemler ve bu süreçte dikkate alınan çevresel değişkenler tanıtılmıştır. Ayrıca, elde edilen veriler üzerinden hız ve yükseklik kombinasyonlarının enerji tüketimi üzerindeki etkileri değerlendirilmiştir.

Araştırma Alanı ve Çalışma Koşullar

Bu çalışmada, drone tabanlı tarımsal operasyonlarda hız ve uçuş yüksekliğinin enerji tüketimi üzerindeki etkisini incelemek amacıyla, belirli bir tarımsal alan seçilmiştir. Araştırma, Türkiye'nin Malatya Şehri, Hekimhan ilçesi Yayladamı Mahallesi bölgesinde yer alan 1 hektarlık(100x100 m) tarım alanında yürütülmüştür. Çalışmalar, rüzgâr hızının < 2 m/s ve hava sıcaklığının 21-24°C aralığında gerçekleştirilen kontrollü çevresel koşullarda yürütülmüştür. Çalışmada kullanılan dört pervaneli drone, Şekil 1'de sunulmuştur.



Şekil 1. Çalışmada Kullanılan Özel Tasarlanmış 4 Rotorlu Drone

Kullanılan Malzemeler

Araştırmada, 4 dört pervaneli drone ve GPS tabanlı otonom uçuş özelliğine sahip bir İnsansız Hava Aracı (İHA) kullanılmış olup, bu araç hassas tarım uygulamaları için akım ve gerilim değerlerini okuyabileceğimiz bir güç dağıtım kartı ile donatılmıştır. Ayrıca, uçuş sırasında enerji tüketimine ilişkin veriler İHA üzerinde depolanmıştır. Bu depolanan verilerin uçuş rotası, yakıt tüketimi ve çevresel etkileri analiz etmek amacıyla Python tabanlı özel bir analiz yazılımı geliştirilmiştir. 4 pervaneli drone'a ait ayrıntılı teknik özellikler Tablo 1'de sunulmuştur.

Deneysel Tasarım

Deney, tarımsal ilaçlama sırasında kullanılan standart operasyonel senaryoları simüle etmek amacıyla tasarlanmış ve 1 hektarlık düz bir arazi üzerinde gerçekleştirilmiştir. Uçuş senaryoları, hız (2, 5, 8 m/s) ve yükseklik (5, 10, 15 m) kombinasyonları kullanılarak oluşturulmuş ve bu kombinasyonlarla toplamda 9 farklı senaryo test edilmiştir (Tablo 2). Her bir senaryo için 5 tekrarla toplamda 45 uçuş yapılmıştır. Tüm uçuşlar, sabah 09:00 ile 12:00 saatleri arasında, gölgede ölçülen hava sıcaklığının 21–24°C arasında olduğu, rüzgâr hızının <2 m/s olduğu günlerde gerçekleştirilmiştir. Rüzgâr hızı, yer seviyesine yakın (1.5 m) portatif anemometre ile, sıcaklık ise dijital termometre ile ölçülmüştür. Nem ve güneş ışığı ölçümleri doğrudan yapılmamış, ancak tüm testler açık hava koşullarında, doğrudan güneş ışığı altında yürütülmüş ve Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nden alınan güncel hava durumu verileri ile desteklenmiştir. Testlerin aynı saat diliminde yapılmasına özen gösterilerek güneş konumu ve ısı değişimi gibi çevresel faktörlerin etkisi minimize edilmiştir. Her uçuşta bataryalar tamamen şarj edilmiş, taşıma yükü sabit tutulmuştur (5 litre su). Drone GPS destekli otomatik modda uçurulmuş, uçuş rotası 100 x 100 metrelik alan üzerinde grid düzeninde planlanmış ve 5 metre sıra aralığıyla gerçekleştirilmiştir. Enerji tüketimi (Wh) verileri dijital olarak kaydedilmiş, sensör kalibrasyonu ile veri doğruluğu artırılmıştır. Bu kapsamda, düşük hızda (2 m/s) ve orta

yükseklikte (10 m) enerji verimliliğinin yüksek olduğu; yüksek hızlarda (8 m/s) ise enerji tüketiminin arttığı belirlenmiştir.

Tablo 1. Mevcut Çalışmada Kullanılan İHA'nın Özellikleri

Dron Parçaları	Öğeler	Özellikler
Drone Çerçevesi	Çerçeve	Karbon Fiber
	Tip	Quadcopter
PX4 Kontrolcü	Ana Çip	STM32F765
	CPU	216 MHz ARM® Cortex® M4
	RAM	512 KB SRAM
	Bağlanılabilirlik	1× I2C, 2× CAN, 1× ADC, 4× UART
	Sensörler	İvmeölçer, 3 eksenli jiroskop, barometre, manyetometre
	Ağırlık	33.3g
Drone Motoru	Tip	Fırçasız doğru akım motoru
	Ağırlık	1040g
	Hız	5000 rpm
	Maksimum Çekme	26.5kg/mil
	Operating Pulse Width	1050-1950 us
	Maksimum Giriş Voltajı	60.9 V
	Motor KV Değeri	100 KV
	Maksimum Giriş Akımı	120 A
	Verimlilik	% 5-12
Pervane	Büyüklük	34x11 inch
	Malzeme	Karbon Fiber
	Ağırlık	98.5 gr
	Adet	2 x CW + 2 x CCW
RC Kontrolcü	Marka	FS-FTr10
	Kanal Sayısı	18
	RF	2.4 G
	Modülasyon sistemi	AFHDS3
	Mesafe	>3KM
Battery	Minimum kapasite	22000 mAh
	Yapılandırma	12S / 44.4 V
	Boşaltma oranı	25C
	Ağırlık	6300g
GPS	Osilatör	Kristal
	Teknoloji	GPS, GLONASS
	Bellek	ROM
	Navigasyon güncelleme oranı	10 Hz'e kadar
Drone ilaçlama sistemi	Tank ağırlığı	16litre
	Fırçasız su pompası açılış akışı	8litre/dakika
	Su giriş çapı	10.5mm
	Su çıkış çapı	6.5mm
	Koruma seviyesi	IP67
Güç Dağıtım Kartı	Marka	Holybro PM07

Tablo 2. Hız ve Yükseklik Kombinasyonları

Senaryo	Hız (m/s)	Yükseklik (m)
1	2	5
2	2	10
3	2	15
4	5	5
5	5	10
6	5	15
7	8	5
8	8	10
9	8	15

Veri Toplama

Uçuş sırasında, sabit 5 litre sıvı yük taşıyan drone'un enerji tüketimi, Holybro PM07 sensörü ile 1 saniye aralıklarla kaydedilen akım (A), gerilim (V), güç (W) ve toplam enerji tüketimi (Wh) değerleri üzerinden hesaplanmıştır. Veri toplama süreci, uçuş öncesi hazırlıklar, uçuş sırasında veri kaydı ve uçuş sonrası analiz olmak üzere bir dizi adımdan oluşmuştur. Hazırlık aşamasında drone bataryaları tam şarj edilerek eşit başlangıç koşulları sağlanmış, ilaç tankına sabit 5 litre sıvı yüklenmiş ve sensörlerin doğruluğu sabit yüklerle kalibre edilmiştir. Uçuş sırasında, drone önceden belirlenmiş bir grid rotasını sabit hız ve yükseklik parametreleriyle takip etmiş, akım ve gerilim verileri her saniyede bir ölçülerek toplamda 600 veri noktası toplanmıştır. Uçuş sonrası süreçte, veriler CSV formatında kaydedilip USB ile bilgisayara aktarılmış, bataryanın kalan enerji kapasitesi doğrulama amacıyla kontrol edilmiş ve ham veriler hatalı ölçümleri temizlemek için gözden geçirilmiştir. Her hız ve yükseklik kombinasyonu için beşer tekrar yapılmış, uçuşlar çevresel değişkenlerin etkisini azaltmak adına rüzgârsız günlerde gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, sistemin havada sabit durma (hover) konumundaki enerji tüketimi de gözlemlenmiştir. Yapılan ön testlerde, drone'un sabit 5 litre sıvı yük taşıdığı durumda yaklaşık %35 throttle pozisyonunda hover konumunda kalabildiği belirlenmiştir (Tablo 3). Bu esnada ortalama güç tüketimi yaklaşık 75 W olarak ölçülmüştür. Bu referans değer, hız ve yükseklik kombinasyonlarına göre yapılan uçuş senaryolarıyla karşılaştırıldığında, hareket sırasında tüketilen güç seviyelerindeki artışları değerlendirmek için temel bir kıyaslama noktası sunmuştur.

Tablo 3. Gaz Kolu Yüzdesi ve Buna Bağlı Tüketilen Enerji Miktarları

Gaz Kolu (%)	Güç (W)
20%	40 W
35%	75 W
50%	110 W
65%	140 W
80%	180 W
100%	220 W

Çalışma kapsamında elde edilen 600 veri noktasındaki çevresel koşulların tutarlılığı, uçuş öncesinde her test gününde yapılan rüzgâr ölçümleriyle kontrol edilmiştir. Rüzgâr hızı, test alanının merkez noktasında portatif bir anemometre ile ölçülmüş ve tüm test günlerinde <2 m/s olduğu doğrulanmıştır. Ancak, rüzgâr ölçümleri yalnızca yer seviyesinde gerçekleştirilmiştir. 5-15 metre arası yüksekliklerdeki olası değişimler doğrudan ölçülmemiştir. Bu durum, özellikle üst seviyelerde oluşabilecek ani rüzgâr değişimlerinin enerji tüketimi üzerindeki etkisinin göz ardı edilmesine neden olabilecektir. Bu durum potansiyel bir belirsizlik oluşturmaktadır. Gelecekte gerçekleştirilecek çalışmalarda çok noktalı ve çok seviyeli ölçüm sistemlerinin kullanılması önerilmekte olup, bu sayede farklı yüksekliklerdeki rüzgâr profillerinin detaylı şekilde analiz edilmesi ve enerji tüketimine olan etkilerinin daha doğru şekilde modellenmesi hedeflenmektedir.

Enerji Tüketimini Hesaplama

Drone'un enerji tüketimi, uçuş sırasında bataryasından geçen elektrik akımı (I) ve bataryanın uçlarındaki anlık gerilim (V) ölçülerek hesaplanmıştır. Elektrik akımı, sensörler aracılığıyla sürekli olarak ölçülen ve drone motorları ile diğer elektronik aksam tarafından çekilen enerji miktarını ifade ederken, bataryanın uçlarındaki gerilim, potansiyel farkı (V) belirlemektedir. Drone'un bir uçuş sırasında kaydettiği toplam örnek sayısı (n) olarak verilmiştir. Ayrıca, bu ölçümlerin alındığı süre (Δt =1 olarak alınmıştır.), enerji tüketimi hesaplamalarında kullanılan bir diğer önemli değişken olup saniye cinsinden ifade edilmiştir. Bu parametrelerin birlikte değerlendirilmesiyle, drone'un uçuş süresince tükettiği toplam enerji miktarı doğru ve güvenilir bir şekilde hesaplanmıştır. Temel enerji tüketim denklemi aşağıda Eşitlik 1 olarak verilmiştir.

$$Enerji\ (Wh) = \Sigma\ V_k \cdot I_k \cdot \Delta t \quad (1)$$

I_k**:** k. saniyedeki akım değeri, V_k: k. saniyedeki gerilim değeri, Δt: Örnekleme süresi (1 saniye) olarak verilmiştir. Eşitlik 1, bir cihazın belirli bir süre boyunca tükettiği toplam gücün (Watt) hesaplanmasında kullanılmıştır. Uçuş sırasında her saniyede bir ölçüm kaydedilmiştir. Bu ölçümlerden elde edilen veriler kullanılarak anlık güç (P) hesaplanmıştır. Bu hesaplanan denklem Eşitlik 2'de verilmiştir.

$$P_k = V_k \cdot I_k \quad (2)$$

P_k : Anlık güç (Watt cinsinden), I_k : Ölçülen anlık akım değeri (Amper), V_k : Ölçülen anlık gerilim değeri (Volt) olarak verilmiştir. Enerji tüketimi, uçuş süresi boyunca sürekli olarak ölçülen güç değerlerinin toplamı alınarak hesaplanmıştır. Denklem Eşitlik 3 olarak sunulmuştur.

$$Toplam\ Enerji\ (Wh) = \sum_{k=1}^{n} \frac{P_k \cdot \Delta t}{3600} \quad (3)$$

n : Uçuş boyunca kaydedilen veri noktalarının sayısı, Δt : Ölçüm aralığı (saniye cinsinden) bu deneyde 1 saniye olarak belirlenmiştir, 3600 : Watt-saat birimine dönüştürme için saniyenin saate oranı olarak verilmiştir. Bir uçuş sırasında kaydedilen örnek veri tablosu Tablo 4'de verilmiştir.

Tablo 4. Veri Örneği Tablosu

Zaman (s)	Akım (A)	Gerilim (V)	Güç (W)
1	5.29	14.88	78.73
2	7.91	14.78	116.91
3	7.87	14.95	117.66
...	...	...	...

Bu verilerden, toplam enerji tüketimi örneği Eşitlik 4'te sunulmuştur:

$$Toplam\ Enerji\ (Wh) = \frac{(78.73+116.91+117.66+\ldots)}{3600} \quad (4)$$

Analiz ve Değerlendirme

Bu çalışma, hız ve yükseklik kombinasyonlarının enerji tüketimi üzerindeki etkilerini analiz etmeye odaklanmıştır. Veri seti, belirli hız ve yükseklik senaryolarına göre filtrelenmiş ve her bir senaryo için enerji tüketimi ortalama değerlerle değerlendirilmiştir. Enerji tüketimi, anlık güç tüketimi değerlerinin toplamının veri noktası sayısına bölünmesiyle hesaplanmıştır. Analiz sürecinde, hız ve yüksekliğin enerji tüketimiyle ilişkisini anlamak için Pearson korelasyon katsayıları hesaplanmış ve dağılımlar grafiksel yöntemlerle (ör. violin plot, box plot) incelenmiştir. Gerçekleştirilen uçuşlarda, hız değişkenine bağlı olarak drone'un kat ettiği toplam mesafe değişkenlik göstermiştir. Bu nedenle enerji tüketimi analizleri, sabit mesafe yerine sabit senaryo üzerinden (sabit uçuş rotası) değerlendirilmiştir.

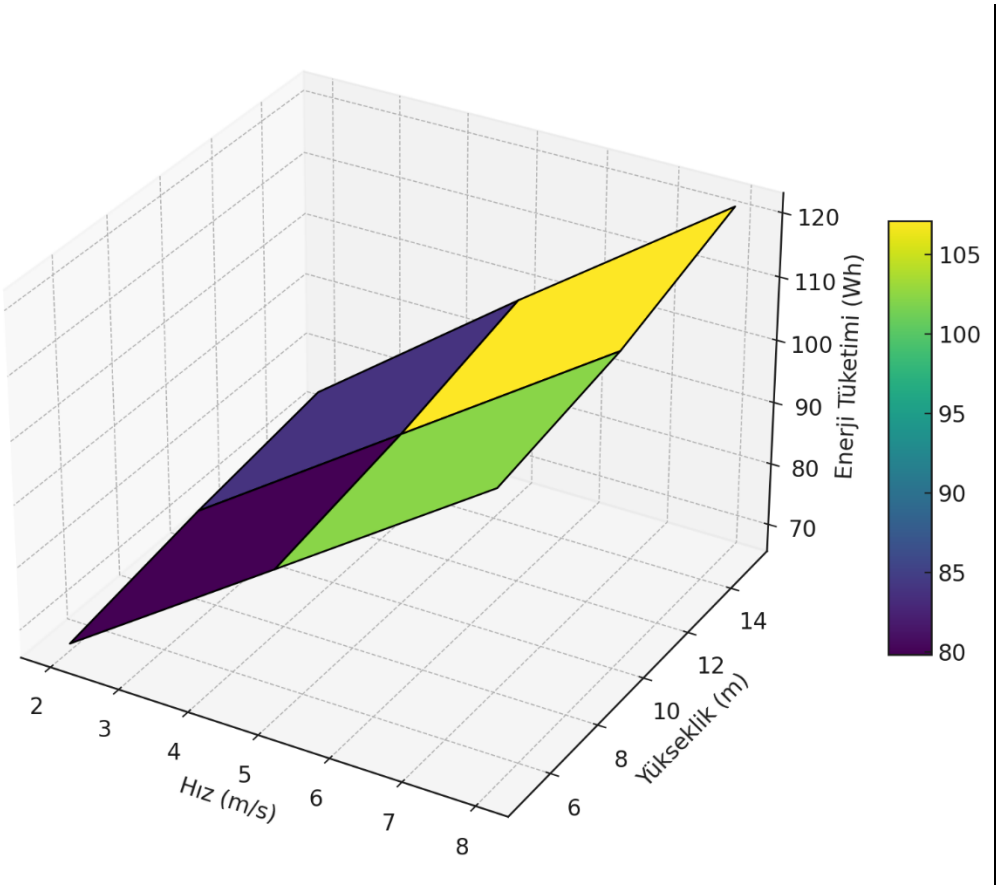
BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada, farklı hız ve yükseklik kombinasyonlarının enerji tüketimine olan etkileri, kapsamlı istatistiksel analizler ve görsel incelemelerle detaylı bir şekilde değerlendirilmiştir. Aşağıda verilen Tablo 5, bu senaryoların enerji tüketimindeki değişikliklerini özetlemektedir.

Tablo 5. Dokuz Farklı Senaryo için Hesaplanan Ortalama Güç Değerleri

Senaryo	Hız(m/s)	Yükseklik (m)	Ortalama Güç (W)
1	2	5	66,67
2	2	10	70,61
3	2	15	73,68
4	5	5	89,08
5	5	10	92,99
6	5	15	98,24
7	8	5	111,58
8	8	10	115,39
9	8	15	121,9

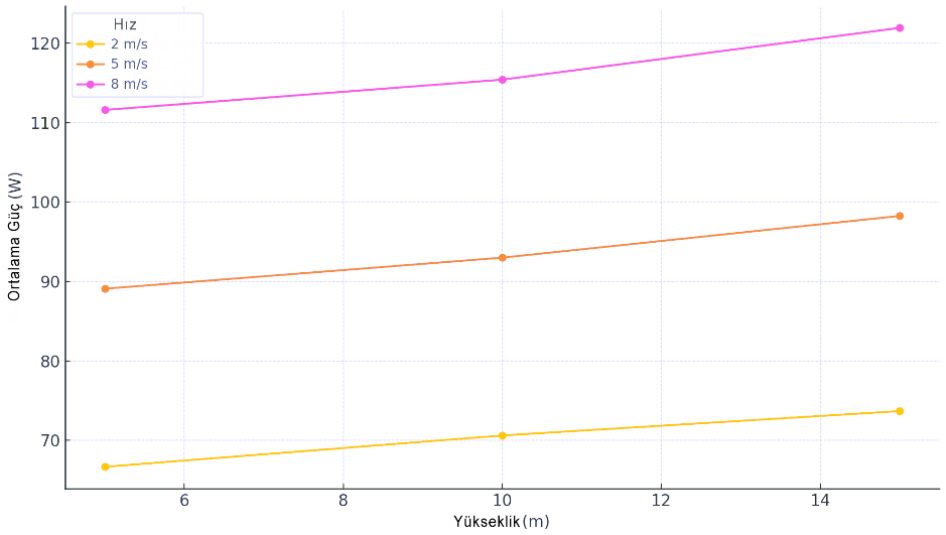
Yapılan analizler, hız ve yüksekliğin enerji tüketimi üzerinde doğrudan etkili iki temel faktör olduğunu göstermektedir. Şekil 2'de hız ve yüksekliklere göre ortalama güç tüketimi değerleri sunulmuştur. Hızın etkisi incelendiğinde, düşük hızlarda (2 m/s) enerji tüketimi ortalama 66.67 W iken, hız 8 m/s'ye yükseldiğinde bu değerin 121.90 W'a ulaştığı görülmektedir. Bu, motorların daha yüksek hızlarda (8 m/s) daha fazla enerji tükettiğini ve hız arttıkça motorların daha fazla güç üretme gereksinimi nedeniyle enerji tüketiminin belirgin şekilde arttığını doğrulamaktadır (Dükkancı ve ark.; 2021; Wu vd., 2024). Yüksekliğin etkisi ise, enerji tüketiminin yükseklikle paralel bir şekilde arttığını ortaya koymaktadır (Wu vd., 2018; Zorbas vd., 2016). Örneğin, hız 2 m/s iken yükseklik 5 m'den 15 m'ye çıkarıldığında enerji tüketiminde yaklaşık %10'luk bir artış gözlemlenmiştir. Bu artış, drone'un daha yüksek yüksekliklerde stabil kalmak ve yerçekimine karşı koymak için ek enerji harcaması gerekliliğine dayandırılmaktadır (Czachórski vd., 2022; Qu vd., 2022).



Şekil 2. Hız ve Yüksekliklere Göre Ortalama Güç Tüketimi

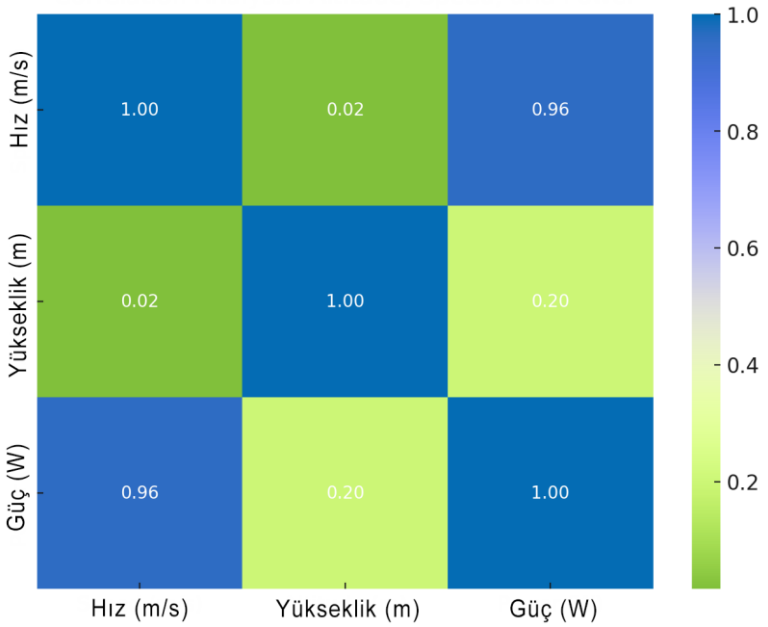
Şekil 3'te sunulan grafik, hızın enerji tüketimi üzerindeki etkisinin, yüksekliğe göre daha belirgin olduğunu açıkça göstermektedir (Gong vd., 2023; Liu vd., 2017). Hız arttıkça enerji tüketimindeki artış daha keskin bir şekilde ortaya çıkarken, yüksekliğin etkisi hızın gölgesinde kalmaktadır (Goh vd., 2023; Jacewicz ve ark.; 2022). Bu durum, hız ve yüksekliğin enerji tüketimi üzerindeki bireysel ve ortak etkilerini anlamak açısından önemli bir bulgu sunmaktadır.

Sonuç olarak, hem hız hem de yükseklik, enerji tüketimi üzerinde kayda değer bir etki yaratmakla kalmayıp, birlikte değerlendirildiklerinde bu etkiler daha da belirginleşmektedir. Enerji verimliliğini artırmak ve drone performansını optimize etmek için hız-yükseklik kombinasyonlarının dikkatle değerlendirilmesi kritik bir öneme sahiptir. ANOVA testi sonuçları da bu bulguları desteklemekte; $F(2, 18) = 5.47$, $p = 0.02$ değerleri, hız ve yüksekliğin enerji tüketimi üzerinde anlamlı bir etkisi olduğunu ortaya koymaktadır ($p < 0.05$). Şekil 3'te görüldüğü üzere, yüksek hız (8 m/s) ve düşük yükseklik (5m) kombinasyonları, enerji tüketiminde önemli bir artışa neden olmaktadır. Bu veriler, tarımsal drone uygulamalarında enerji verimliliği hedefiyle hız ve yükseklik parametrelerinin optimize edilmesinin önemini vurgulamaktadır.



Şekil 3. Yüksekliğe Göre Ortalama Güç Tüketimi

Korelasyon analizinin bulguları ise, hız ve enerji tüketimi ile yükseklik ve enerji tüketimi arasındaki ilişkileri açıkça ortaya koymaktadır (Muli vd., 2022). Şekil 4'te verilen grafikte, hız ile enerji tüketimi arasında güçlü bir pozitif korelasyon olduğunu göstermiştir (r = 0.96), bu da hız arttıkça enerji tüketiminin neredeyse doğrusal bir şekilde arttığını ifade etmektedir. Buna karşılık, yükseklik ile enerji tüketimi arasında orta düzeyde bir pozitif korelasyon (r = 0.20) bulunmuş, bu da yükseklik değişimlerinin enerji tüketimi üzerinde hıza kıyasla daha az belirgin ancak yine de anlamlı bir etkiye sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Bu sonuçlar, hızın enerji tüketimi üzerindeki baskın etkisini vurgularken, yüksekliğin de dikkate alınması gereken bir faktör olduğunu göstermektedir.

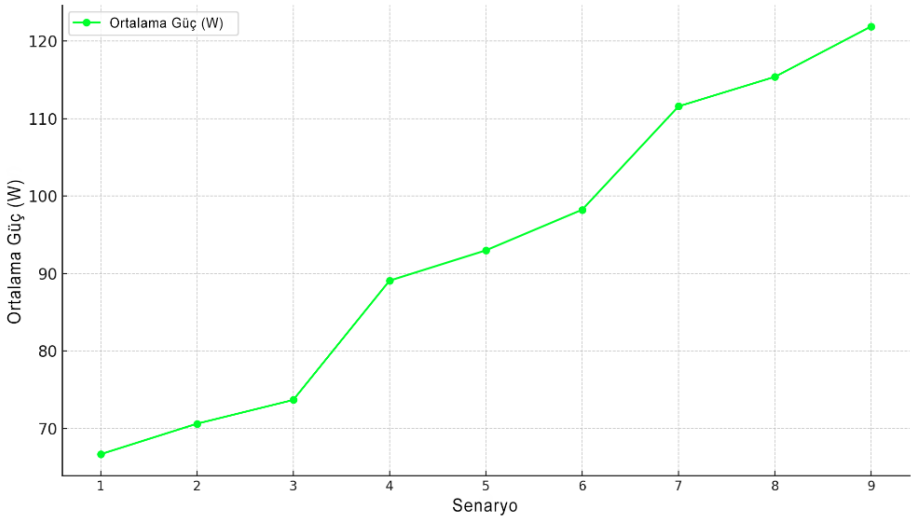


Şekil 4. Yükseklik, Hız ve Güç Parametrelerinin Korelasyon Analizi

Şekil 5'te yer alan veriler, enerji tüketiminin zamanla nasıl değiştiğini detaylı bir şekilde ortaya koymaktadır.

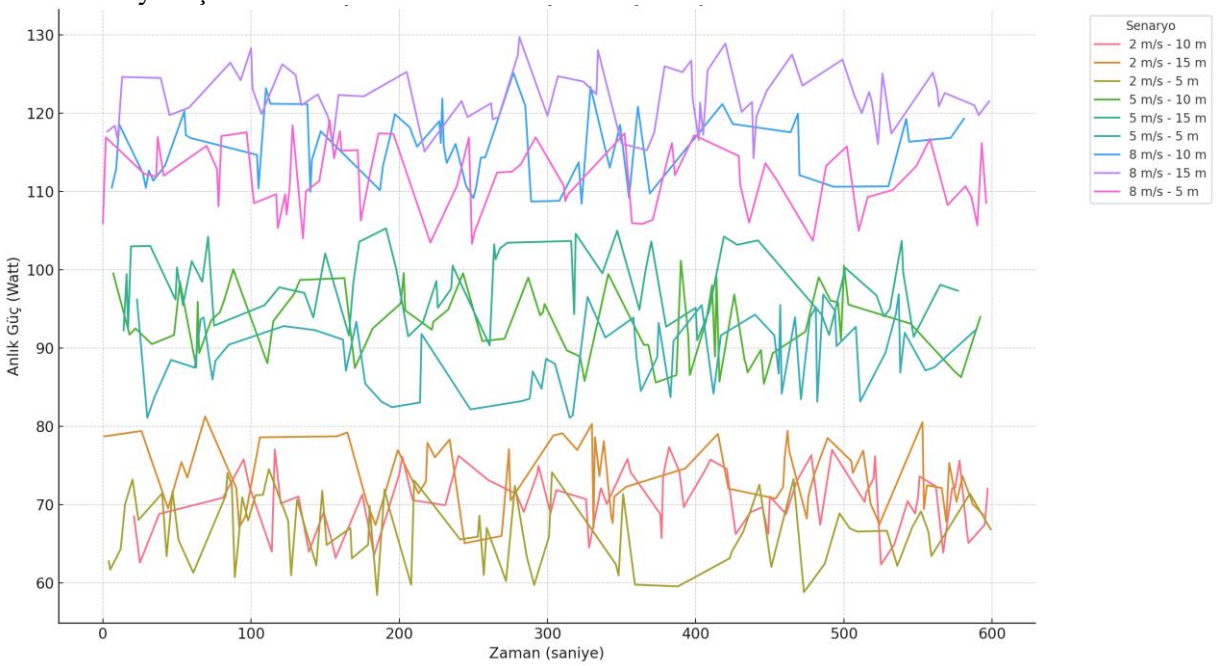
Özellikle yüksek hız (8 m/s) ve yükseklik (15 m) kombinasyonlarında enerji tüketiminde gözlemlenen dalgalanmalar, bu seviyelerde motorların dinamik yük altındaki davranışlarının daha değişken olduğunu göstermektedir (Çabuk vd., 2021). Bu dalgalanmaların motorların yüksek hızda (8 m/s) ve yüksek yükseklik (15 m) farklarında çalışırken maruz kaldığı artan stres ve hızlanma-değişim süreçlerinden kaynaklanabileceği düşünülmektedir. Buna karşın, orta hız (5 m/s) ve yükseklik seviyelerine geçildiğinde enerji tüketiminde gözle görülür bir kararlılık sağlanmış, dalgalanmaların azaldığı ve enerji tüketiminin daha düzenli bir yapıya büründüğü tespit edilmiştir. Bu bulgu, motorların orta hız (5 m/s) ve yükseklikte daha stabil bir şekilde çalıştığını ve bu seviyelerde daha verimli bir performans sergilediğini

işaret etmektedir. Zaman içerisinde gözlemlenen bu iki farklı durum, enerji tüketim dinamiklerinin hız ve yükseklik kombinasyonlarından doğrudan etkilendiğini, dolayısıyla bu parametrelerin sistemin genel enerji verimliliği üzerinde kritik bir rol oynadığını göstermektedir.



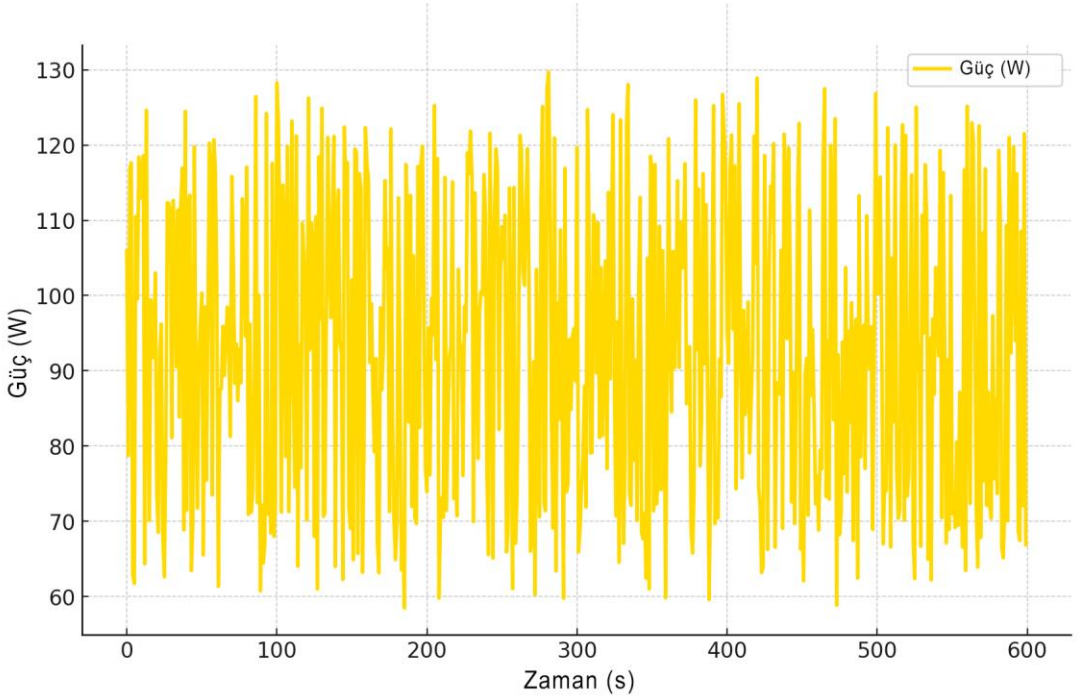
Şekil 5. Senaryolara Göre Güç Tüketimi

Enerji tüketiminin akım değerleri üzerinden dağılımı Şekil 6'da sunulmuştur. Özellikle yüksek hız ve yükseklik kombinasyonlarında, motorların ihtiyaç duyduğu anlık akım miktarının önemli ölçüde değişkenlik gösterdiği gözlemlenmiştir. Bu durum, motorların yüksek hızlarda daha fazla zorlandığını ve akım dalgalanmalarının arttığını göstermektedir. Motorların performansını artırma çabası, bu ekstra enerji ihtiyacını doğurmakta ve bu da akım dalgalanmalarına yol açmaktadır.



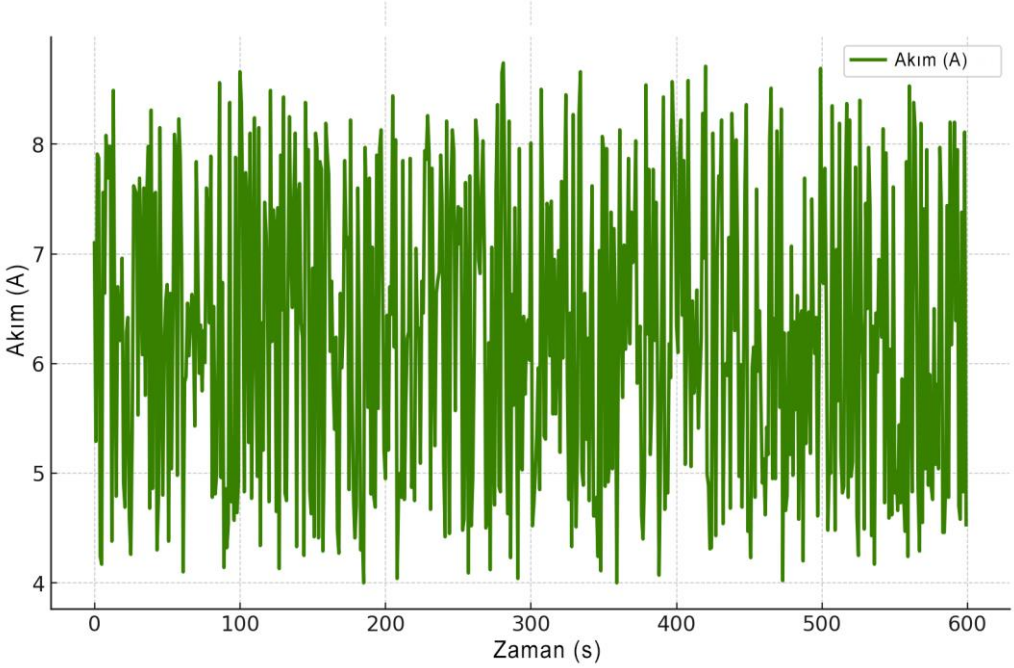
Şekil 6. Senaryolara Göre Enerji Dağıtımı

Buna karşılık, Şekil 7'deki veriler, sistemin gerilim değerlerinde göreli bir stabilite olduğunu ancak tamamen sabit bir yapıda olmadığını göstermektedir. Gerilim değerleri hafif miktarlarda değişmekte olup bu durum, bataryanın motorların değişen enerji taleplerine uyum sağlarken hafif dalgalanmalar yaşadığını ortaya koymaktadır. Bu dalgalanmalar, bataryanın enerji taleplerine genel olarak istikrarlı bir şekilde yanıt verdiğini, ancak yük ve hız kombinasyonlarına bağlı olarak anlık gerilim değişimleri olabileceğini göstermektedir. Bu bulgular, sistemin enerji tüketimi ve yönetimi üzerinde hem akım hem de gerilim değişimlerinin önemli olduğunu ve bataryanın performans ve enerji verimliliğinde kritik bir rol oynadığını ortaya koymaktadır.



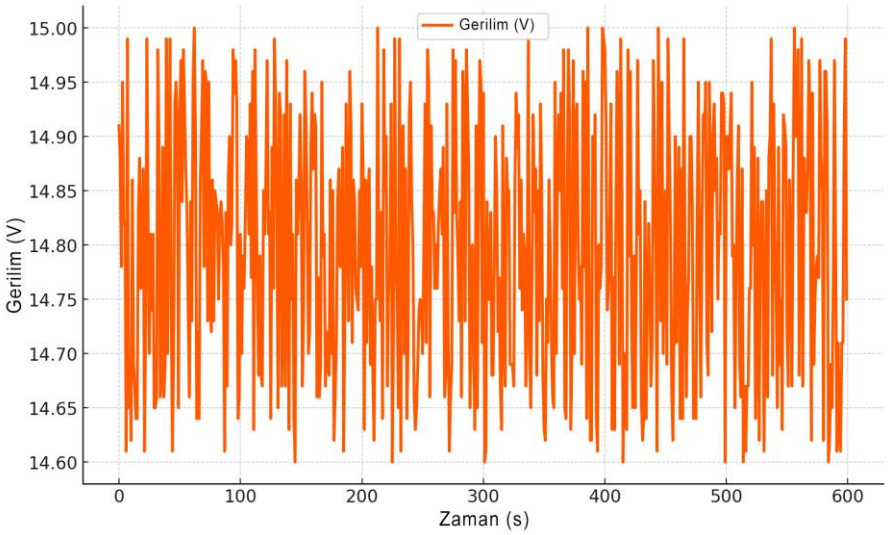
Şekil 7. Drone Güç Tüketimi Değerlerinin Zamanla Değişimi

Şekil 8 ve Şekil 9 grafiğinde ise, uçuş süresince güç ve akım değerlerinin zaman içinde nasıl değiştiğini göstermektedir. Özellikle yüksek hız ve yükseklik durumlarında, motorların hızlanma ve yavaşlama esnasında daha büyük akım tepkileri verdiği tespit edilmiştir. Bu durum enerji yönetiminde dalgalanma riskinin arttığını işaret etmektedir. Bu durum, motorların bu koşullarda hem hızlanma süreçlerini gerçekleştirmek hem de artan yükseklik farkına karşı koyabilmek için daha fazla enerji harcaması gerektiği gerçeğini doğrulamaktadır.



Şekil 8. Drone Akım Değerlerinin Zamanla Değişimi

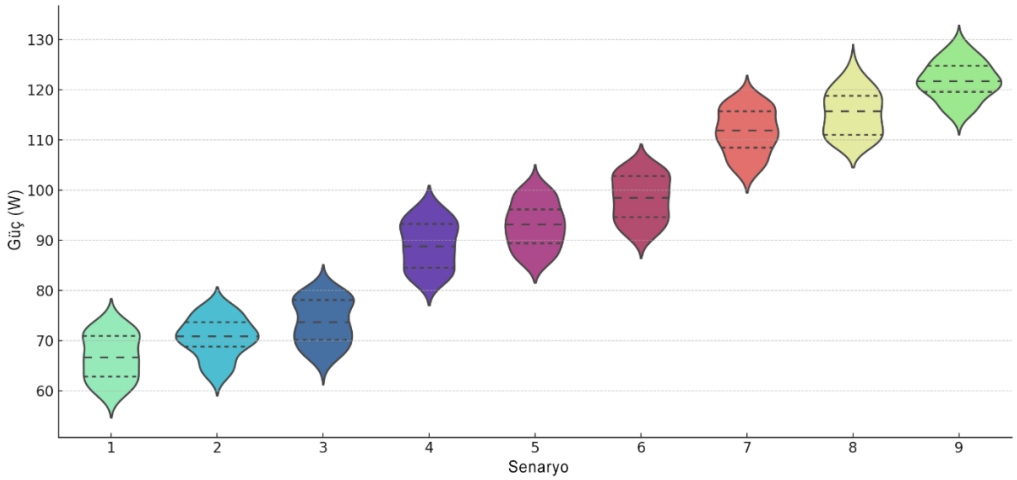
Yüksek hızlarda (8 m/s) motorlar, mekanik sürtünme, hava direnci ve ivmelenme gereksinimlerinin etkisiyle daha yüksek bir enerji talebinde bulunmaktadır. Bu talep, motorun performansını artırabilmek için daha fazla enerji çekmesini gerektirmekte ve bu da toplam enerji tüketimini önemli ölçüde artırmaktadır. Benzer şekilde, yükseklik seviyelerinde meydana gelen artış, motorların yerçekimine karşı koyarak daha fazla güç üretmesini gerektirmekte ve bu da enerji tüketiminde belirgin bir artışa yol açmaktadır.



Şekil 9. Drone Gerilim Değerlerinin Zamanla Değişimi

Şekil 8 ve Şekil 9'da gözlemlenen bu bulgular, motorların yüksek hız (8m/s) ve yükseklik (15 m) kombinasyonlarında enerji tüketim dinamiklerinin yoğun bir şekilde değiştiğini ve bu kombinasyonların sistemin genel enerji verimliliği üzerinde doğrudan etkili olduğunu göstermektedir. Bu veriler, sistem tasarımında enerji verimliliğini artırmak için hız ve yükseklik parametrelerinin dikkatle optimize edilmesi gerektiğini de vurgulamaktadır. Aynı zamanda, bu koşullar altında enerji tüketiminin maksimum seviyelere ulaşmasının batarya kapasitesi ve sistem dayanıklılığı açısından da kritik bir faktör olduğunu ifade etmektedir.

Şekil 9'da verilen grafik, enerji tüketiminin düşük ve yüksek yükseklik seviyelerine göre farklı dağılım özellikleri sergilediğini göstermektedir. Düşük yükseklik seviyelerinde enerji tüketimi daha sabit ve düzenli bir şekilde dağılmıştır. Bu durum, motorların düşük yüksekliklerde daha az zorlanması ve enerji ihtiyaçlarının minimal düzeyde kalmasıyla ilişkilendirilebilir. Motorların bu seviyelerdeki performansı, hem sistem tasarımındaki enerji verimliliğini artırmakta hem de enerji tüketiminin daha öngörülebilir bir yapıya sahip olmasını sağlamaktadır. Bu sabit enerji dağılımı, operasyonel kararlılık ve sistem dayanıklılığı açısından önemli bir avantaj sunmaktadır. Şekil 10'de verilen grafik ise, enerji tüketiminin farklı senaryolar altındaki dağılımını ve yoğunluğunu görselleştiren önemli bir araç olarak, her bir senaryodaki enerji tüketiminin dinamiklerini detaylı bir şekilde ortaya koymaktadır.

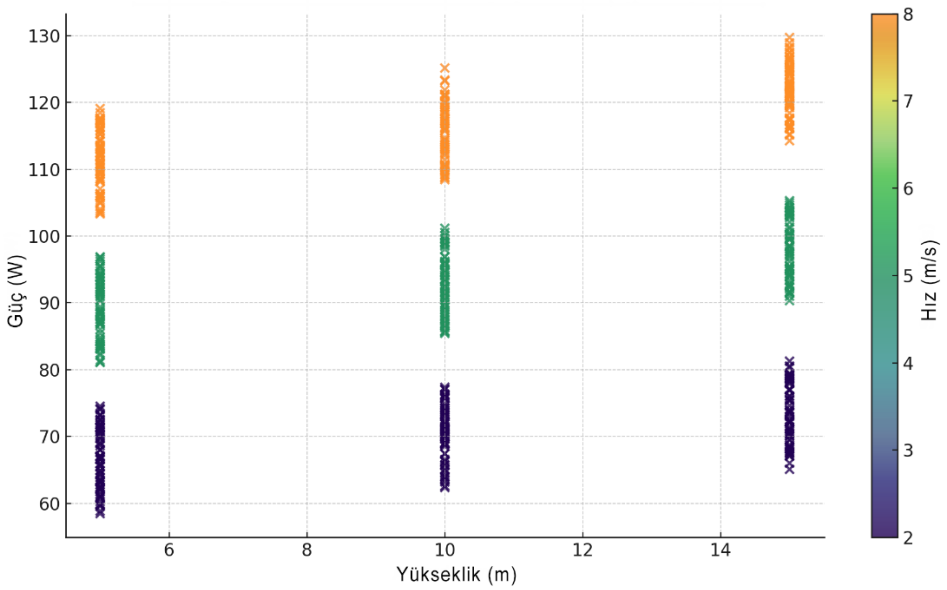


Şekil 10. Senaryolara Göre Enerji Tüketimindeki Dağılım ve Yoğunluk

Grafikte, her bir senaryoya ait enerji tüketimi verilerinin dağılımını temsil eden şekillerin genişliği, enerji tüketim değerlerinin yoğunluğunu ve çeşitliliğini göstermektedir. Siyah noktalı çizgiler, her senaryo için enerji tüketiminin ortalama değerini işaret ederek karşılaştırma için bir referans noktası sunmaktadır. Senaryo 1-3'te düşük hız (2 m/s) ve yükseklik seviyelerinde enerji tüketiminin oldukça homojen bir şekilde dağıldığı ve varyasyonların sınırlı olduğu görülmektedir. Bu durum, motorların bu seviyelerde daha kararlı çalıştığını ve enerji tüketiminin nispeten

öngörülebilir bir şekilde gerçekleştiğini göstermektedir. Bu koşullarda motorlar, düşük enerji taleplerine uyum sağlayarak verimli bir performans sergilemektedir. Senaryo 4-6'da orta hız (5 m/s) ve yükseklik (10 m) seviyelerine geçişle birlikte enerji tüketimindeki dağılımın genişlemeye başladığı fark edilmektedir. Ancak, genel ortalamaların hala dengeli olduğu ve büyük dalgalanmaların oluşmadığı gözlemlenmektedir. Bu, motorların artan enerji taleplerine karşılık verirken belirli bir kararlılık içinde çalıştığını ve sistemin orta düzey koşullarda enerji tüketimini verimli bir şekilde yönetebildiğini göstermektedir. Senaryo 7-9'da ise enerji tüketiminde belirgin bir varyasyon artışı ve dağılımın genişlemesi dikkat çekmektedir. Bu yüksek hız (8 m/s) ve yükseklik (15m) kombinasyonlarında, motorların daha fazla güç talep ettiği ve bu nedenle enerji tüketiminin daha değişken hale geldiği anlaşılmaktadır. Bu durum, motorların yoğun yük altındaki performansının daha düzensiz olduğunu ve enerji tüketiminin kontrol edilmesinin bu koşullarda daha zorlaştığını ortaya koymaktadır.

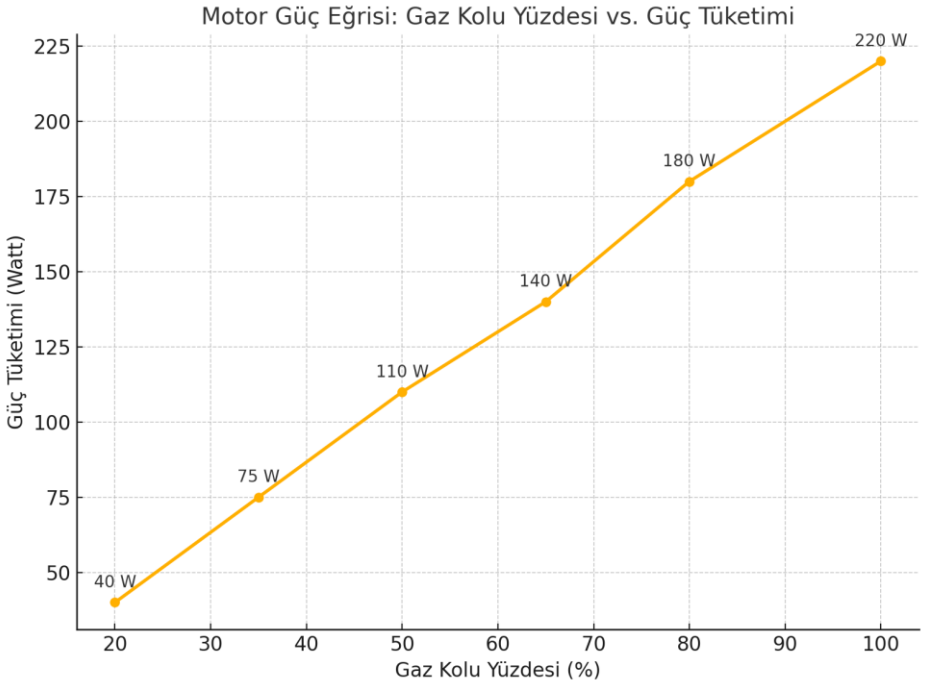
Şekil 11'deki grafik, Şekil 2'de sunulan bulguların geliştirilmiş bir versiyonudur. Şekil 11, enerji tüketiminin yükseklik ve hız ile nasıl bir ilişki içinde olduğunu detaylı bir şekilde görselleştirmektedir. Grafikte, enerji tüketimi (W), yükseklik (m) ve hız (m/s) arasındaki ilişkiyi ortaya koyarken, farklı hız seviyeleri renklerle kodlanarak bu değişkenlerin etkisi daha net bir şekilde ayrıştırılmıştır.



Şekil 11. Hız, Yükseklik ve Enerji Tüketimi Arasındaki İlişki

Düşük hızda (2 m/s) yapılan analiz, alt yüksekliklerde (5 m) enerji tüketiminin minimum seviyede olduğunu ve oldukça sabit bir dağılım sergilediğini göstermektedir. Bu, motorların düşük hız (2 m/s) ve yükseklik seviyelerinde daha az zorlanarak verimli bir şekilde çalıştığını işaret eder. Sistem, bu koşullarda enerji tüketimini kolayca kontrol edebilmektedir. Orta hızda (5 m/s), enerji tüketiminin yükseklikle birlikte artmaya başladığı gözlemlenmiştir. Ancak bu artış, dağılımın hala kontrol edilebilir bir aralıkta kalmasını sağlamış ve motorların bu hız ve yükseklik kombinasyonlarında hala dengeli bir performans gösterdiğini ortaya koymuştur. Yani, sistem bu koşullarda enerji yönetimini sürdürmekte zorlanmamaktadır. Yüksek hızda (8 m/s), enerji tüketimi özellikle yüksek yüksekliklerde (10-15 m) maksimum değerlere ulaşmıştır ve dağılımın genişlediği açıkça görülmektedir. Bu durum, motorların hızla artan enerji talebine uyum sağlamak için daha fazla güç harcaması gerektiğini ve bu nedenle enerji tüketiminin daha değişken hale geldiğini göstermektedir. Yüksek hız (8 m/s) ve yükseklik(15 m) kombinasyonlarında enerji yönetimi, sistem için en zorlu senaryoları oluşturmaktadır.

Bu durum, doğrudan fırçasız motorların gaz seviyesi (throttle) tepkisiyle ilişkilendirilebilir. Zira fırçasız motorlar genellikle düşük ve orta gaz seviyesi değerlerinde yaklaşık %35 ile %50 aralığında en verimli şekilde çalışmaktadır. Ancak gaz seviyesi %65'in üzerine çıktığında, motor daha fazla akım çekmeye başlamakta, dolayısıyla ısınmakta ve batarya daha hızlı tükenmektedir. Bu da özellikle yüksek hız ve yükseklikteki senaryolarda gözlemlenen artan enerji tüketimi ve performans dalgalanmalarının altında yatan temel nedenlerden biridir.



Şekil 12. Gaz Kolu Yüzdesine Göre Güç Tüketim Eğrisi

Şekil 12'de görülen motor güç eğrisi, düşük gaz seviyelerinde güç tüketiminin daha dengeli seyrettiğini, ancak %50'nin üzerindeki gaz konumlarında güç tüketiminin hızla arttığını göstermektedir. Bu durum, motorların düşük devirlerde daha verimli çalıştığını ve hover konumunda (%35 throttle) enerji tasarrufu sağladığını doğrulamaktadır.

Bu bulgular, hız ve yükseklik gibi operasyonel parametrelerin enerji tüketimi üzerindeki belirgin etkilerini detaylı bir şekilde ortaya koymuş, bu etkilerin dinamik bir şekilde optimize edilmesi gerektiğini göstermiştir. Özellikle tarımsal ve endüstriyel uygulamalarda, enerji tüketiminin azaltılmasına yönelik doğru hız ve yükseklik kombinasyonlarının seçimi, operasyonel maliyetlerin düşürülmesi ve sürdürülebilirlik hedeflerinin desteklenmesi açısından kritik öneme sahiptir.

SONUÇLAR

Bu çalışma, 5 litre yük taşıyan bir drone'nun hız ve uçuş yüksekliğinin enerji tüketimi üzerindeki etkilerini analiz ederek tarımsal ve endüstriyel drone uygulamalarında enerji yönetimi ve operasyonel verimliliği artırmaya yönelik önemli bulgular sunmaktadır. Yapılan değerlendirmeler, 9 farklı senaryo altında 600 veri noktası üzerinden gerçekleştirilmiş ve bu kapsamda hız ve yükseklik kombinasyonlarının enerji tüketimine olan etkileri ayrıntılı bir şekilde incelenmiştir. Çalışmanın sonuçları, drone operasyonlarında enerji tasarrufu ve verimliliği artırmak için pratik öneriler sağlamaktadır.

Elde edilen verilere göre, uçuş hızı ve yüksekliği arttıkça enerji tüketiminde düzenli bir artış gözlemlenmiştir. Örneğin, 2 m/s hız ve 5 metre yükseklik seviyesinde enerji tüketimi ortalama 66.67 W olarak kaydedilirken, bu değer 8 m/s hız ve 15 metre yükseklikte 121.90 W'a kadar yükselmiştir. Bu sonuçlar, daha yüksek hızların(8 m/s) motorlar üzerinde daha fazla yük oluşturarak enerji tüketimini artırdığına işaret etmekte ve teorik beklentilerle uyumlu bir şekilde, hız faktörünün yüksekliğe kıyasla enerji tüketimi üzerinde daha baskın bir etki yarattığını ortaya koymaktadır. Enerji tüketimini minimize etmek için, drone operasyonlarında kullanılacak hız ve yükseklik değerlerinin dikkatle optimize edilmesi gerektiği belirlenmiştir. Düşük hız (2 m/s) ve yükseklik (5 m) kombinasyonlarının, uzun süreli operasyonlarda enerji tasarrufu sağlamak için ideal olduğu; orta hız (5 m/s) ve yükseklik (10 m) seviyelerinin, geniş alanlarda hızlı ve verimli uygulamalar gerçekleştirmek için uygun bir denge sunduğu görülmüştür. Yüksek hız (8 m/s) ve yükseklik (15m) kombinasyonlarının ise sadece zamana duyarlı veya engellerden kaçınmanın kritik olduğu durumlarda tercih edilmesi gerektiği vurgulanmıştır.

Analizler, hızın enerji tüketimi üzerindeki etkisinin yüksekliğe göre daha belirgin olduğunu göstermektedir. 2 m/s hızdan 8 m/s hıza geçişte enerji tüketimindeki artış %70'i aşarken, yükseklik değişimlerinin enerji tüketimi üzerindeki etkisi daha sınırlı kalmıştır. 5 metreden 15 metreye yükseldiğinde enerji tüketiminin %10 ila %15 arasında

bir artış gösterdiği gözlemlenmiş; bu artışın, hava yoğunluğunun azalması nedeniyle belirli bir noktaya kadar sabitlenebileceği ancak çevresel faktörlerin bu durumu etkileyebileceği belirtilmiştir. Çalışmada her senaryo, 100x100 metrelik sabit bir alan üzerinde gerçekleştirilmiştir. Bu sabit mesafe sayesinde hız değişiklikleri yalnızca uçuş süresini etkilemiş; yani hız arttıkça, aynı mesafe daha kısa sürede tamamlanmıştır. Bu nedenle, uçuş sırasında motorların çektiği ortalama güç değeri (Watt cinsinden) artsa da, toplam enerji tüketimi (Wh cinsinden) her zaman doğrusal şekilde artmamış olabilir. Çünkü kısa sürede yüksek güç tüketimi ile yapılan bir uçuş, uzun sürede düşük güçle yapılan uçuşla benzer veya daha düşük toplam enerjiye sahip olabilir. Bu çalışmada analizler, ortalama güç tüketimi üzerinden yapılmıştır. Ancak gelecekte yapılacak araştırmalarda, enerji verimliliğini daha doğru ölçebilmek adına, 'birim mesafe başına tüketilen enerji' (Wh/m) gibi yeni metriklerin kullanılması, farklı hız-yükseklik kombinasyonlarının enerji açısından karşılaştırılabilirliğini daha sağlıklı bir şekilde ortaya koyacaktır.

Yüksekliğin artışı, enerji tüketiminde belirgin bir yükselişe neden olmuş ve bu etki yapılan testlerde açıkça gözlemlenmiştir. Bu durum, artan yükseklikle birlikte hava yoğunluğunun azalması sonucu pervanelerin daha yüksek devirde çalışmak zorunda kalmasından kaynaklanmaktadır. Ayrıca, motorlar bu koşullarda yerçekimine karşı daha fazla güç üretmek zorunda kalmakta, bu da enerji tüketimini artırmaktadır. Öte yandan, test alanında rüzgâr hızının yer seviyesinde <2 m/s olarak ölçülmüş olmasına rağmen, 10 m ve 15 m yüksekliklerdeki olası rüzgâr farkları ölçülememiştir. Bu durum, elde edilen verilerdeki belirsizliğe katkıda bulunmuş olabilir. Bu sonuçlar ışığında, çalışmanın önerileri daha da önem kazanmaktadır. Özellikle hız ve yükseklik parametrelerinin uygulama amacına göre optimize edilmesi, enerji tüketiminin minimize edilmesi açısından kritik bir stratejidir. Örneğin, tarımsal ilaçlama gibi geniş alan uygulamalarında düşük hız (2 m/s) ve orta yükseklik (10 m) kombinasyonları önerilirken, zamana duyarlı görevlerde daha yüksek hızlar tercih edilebilir. Ayrıca, adaptif kontrol algoritmalarıyla bu parametrelerin gerçek zamanlı optimize edilmesi ve çevresel faktörlerin dikkate alındığı rota planlama sistemlerinin geliştirilmesi, enerji verimliliğini artırmada etkili çözümler sunmaktadır.

Bu çalışmada, farklı hız ve yükseklik kombinasyonlarında drone'un gerçekleştirdiği uçuş senaryoları karşılaştırılmıştır. Ancak sabit senaryo süresi boyunca kat edilen mesafenin hızla birlikte değiştiği göz önünde bulundurulduğunda, toplam enerji tüketimi değerlerinin doğrudan karşılaştırılması sınırlı olabilir. Bu bağlamda, gelecekte yapılacak çalışmalarda sabit mesafe üzerinden enerji verimliliği kıyaslamaları yapılması önerilmektedir.

Bunun yanı sıra, farklı drone modellerinin aerodinamik yapılarının ve batarya teknolojilerinin enerji tüketimi üzerindeki etkileri de gelecekteki çalışmaların odak noktası olabilir. Bu tür analizler, drone tasarım ve üretim süreçlerine rehberlik ederek daha verimli ve enerji tasarruflu sistemlerin geliştirilmesine katkıda bulunacaktır. Sonuç olarak, bu tür çalışmalar hem endüstriyel hem de akademik alanda drone operasyonlarının enerji verimliliğini artırmak ve operasyonel maliyetleri düşürmek adına değerli bir rehber sunacaktır.

KAYNAKLAR

Ahmed, S., Mohamed, A., Harras, K., Kholief, M., & Mesbah, S. (2016). Energy efficient path planning techniques for UAV-based systems with space discretization. In 2016 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (pp. 1–6). IEEE.

Ali, M. F. M., Jamaludin, J., Ahmedy, I., & Awalin, L. J. (2023). Energy performance review of battery-powered drones for search and rescue (SAR) operations. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 1261(1), 012021. https://doi.org/10.1088/1755-1315/1261/1/012021

Almutairi, A., Baroom, A., Alsubey, R., & Elhag, S. (2024). Sensory system for swarm drone: A systematic review. International Journal of Computers and Informatics, 3(6), 72–108. https://doi.org/10.59992/ijci.2024.v3n6p3

Askarzadeh, T., Bridgelall, R., & Tolliver, D. (2024). Monitoring nodal transportation assets with uncrewed aerial vehicles: A comprehensive review. Drones, 8(6), 233. https://doi.org/10.3390/drones8060233

Beigi, P., Rajabi, M. S., & Aghakhani, S. (2023). An overview of drone energy consumption factors and models. In Proceedings of the International Conference on Advances in Computing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-97940-9_200

Borikar, G. P., Gharat, C., & Deshmukh, S. R. (2022). Application of drone systems for spraying pesticides in advanced agriculture: A review. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 1259(1), 012015. https://doi.org/10.1088/1757-899x/1259/1/012015

Çabuk, U. C., Tosun, M., Dağdeviren, O., & Öztürk, Y. (2024). Modeling energy consumption of small drones for swarm missions. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 25(8), 10176–10189. https://doi.org/10.1109/TITS.2024.3350042

Czachórski, T., Gelenbe, E., Kuaban, G. S., & Marek, D. (2022). Optimizing energy usage for an electric drone. Communications in Computer and Information Science, 61–75. https://doi.org/10.1007/978-3-031-09357-9_6

Diller, J., & Han, Q. (2023). Energy-aware drone path finding with a fixed-trajectory ground vehicle. Research Square. https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-3793699/v1

Dorling, K., Heinrichs, J., Messier, G. G., & Magierowski, S. (2016). Vehicle routing problems for drone delivery. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 47(1), 70–85. https://doi.org/10.1109/TSMC.2016.2582745

Dutta, S., Singh, A., Mondal, B. P., Paul, D., & Patra, K. (2023). Perspective chapter: Digital inclusion of the farming sector using drone technology. In Human-Robot Interaction - Perspectives and Applications. https://doi.org/10.5772/intechopen.108740

Figliozzi, M. A. (2017). Lifecycle modeling and assessment of unmanned aerial vehicles (drones) CO2e emissions. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 57, 251–261. https://doi.org/10.1016/j.trd.2017.09.011

Goh, C., Leow, C. Y., & Nordin, R. (2023). Energy efficiency of unmanned aerial vehicle with reconfigurable intelligent surfaces: A comparative study. Drones, 7(2), 98. https://doi.org/10.3390/drones7020098

Gong, H., Huang, B., Jia, B., & Dai, H. (2023). Modeling power consumptions for multirotor UAVs. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 1–14. https://doi.org/10.1109/TAES.2023.3288846

Huang, C., Hu, K., Cheng, H., & Lin, Y. S. (2023). A mission-oriented flight path and charging mechanism for internet of drones. Sensors, 23(9), 4269. https://doi.org/10.3390/s23094269

Jacewicz, M., Żugaj, M., Głębocki, R., & Bibik, P. (2022). Quadrotor model for energy consumption analysis. Energies, 15(19), 7136. https://doi.org/10.3390/en15197136

LibreTexts. (n.d.). Electric power summary. LibreTexts Physics. Retrieved December 3, 2024, from https://physics.info/electric-power/summary.shtml

Liu, Z., Sengupta, R., & Kurzhanskiy, A. (2017). A power consumption model for multi-rotor small unmanned aircraft systems. In Proceedings of ICUAS 2017 (pp. 310–315). https://doi.org/10.1109/ICUAS.2017.7991310

MATACHE, M. (2023). Development of a tricopter-hexarotor agricultural UAV destined for the realization of precision spraying works. Inmateh Agricultural Engineering, 11–20. https://doi.org/10.35633/inmateh-70-01

McCarthy, C., Nyoni, Y., Kachamba, D. J., Banda, L. B., Moyo, B., Chisambi, C., & Hoshino, B. (2023). Can drones help smallholder farmers improve agriculture efficiencies and reduce food insecurity in sub-Saharan Africa Local perceptions from Malawi. Agriculture, 13(5), 1075. https://doi.org/10.3390/agriculture13051075

Merkert, R., & Bushell, J. (2020). Managing the drone revolution: A systematic literature review into the current use of airborne drones and future strategic directions for their effective control. Journal of Air Transport Management, 89, 101929. https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2020.101929

Mohsan, S. A. H., Othman, N. Q. H., Khan, M. A., Hussain, A., & Żywiołek, J. (2022). A comprehensive review of micro UAV charging techniques. Micromachines, 13(6), 977. https://doi.org/10.3390/mi13060977

Mourgelas, C., Micha, E., Chatzistavrakis, E., & Voyiatzis, I. (2023). Meteorolojide insansız hava araçlarının sınıflandırılması: Bir araştırma. 16. Uluslararası Meteoroloji, Klimatoloji ve Atmosfer Fiziği Konferansı COMECAP 2023, 135. https://doi.org/10.3390/environsciproc2023026135

Muli, C., Park, S., & Liu, M. (2022). A comparative study on energy consumption models for drones. In A. González-Vidal, A. M. Abdelgawad, E. Sabir, S. Ziegler, & L. Ladid (Eds.), Internet of Things. GIoTS 2022 (Lecture Notes in Computer Science, Vol. 13533). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-20936-9_16

Özgüven, M. M., Altaş, Z., Güven, D., & Çam, A. (2022). Tarımda drone kullanımı ve geleceği. Ordu Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi, 12(1), 64–83. https://doi.org/10.54370/ordubtd.1097519

Paiva, D. Z., & Reis, T. (2023). The use of drones in agriculture: A literature review between 2012 and 2022. Journal of Agricultural Sciences Research, 3(7), 2–14. https://doi.org/10.22533/at.ed.973372330051

Panjaitan, S., Dewi, Y., Hendri, M., Wicaksono, R., & Priyatman, H. (2022). A drone technology implementation approach to conventional paddy fields application. IEEE Access, 10, 120650–120658. https://doi.org/10.1109/access.2022.3221188

Qu, Z., & Willig, A. (2022). Sensorless and coordination-free lane switching on a drone road segment—a simulation study. Drones, 6(12), 411. https://doi.org/10.3390/drones6120411

Singh, N., Gupta, D., Joshi, M., Yadav, K., Nayak, S., Kumar, M., & Rajpoot, A. S. (2024). Application of drone technology in agriculture: A modern approach. Journal of Scientific Research and Reports, 30(7), 142–152. https://doi.org/10.9734/jsrr/2024/v30i72131

Stolaroff, J. K., Samaras, C., O'Neill, E. R., Lubers, A., Mitchell, A. S., & Ceperley, D. (2018). Energy use and life cycle greenhouse gas emissions of drones for commercial package delivery. Nature Communications, 9(1), 409. https://doi.org/10.1038/s41467-018-07015-5

Thibbotuwawa, A., Nielsen, P., Zbigniew, B., & Bocewicz, G. (2019). Energy consumption in unmanned aerial vehicles: A review of energy consumption models and their relation to UAV routing. In J. Świątek, L. Borzemski, & Z. Wilimowska (Eds.), Information Systems Architecture and Technology: Proceedings of 39th International Conference on Information Systems Architecture and Technology (pp. 853–865). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-99996-8_16

Wu, K., Lu, S., Chen, H., Feng, M., & Lu, Z. (2024). An energy-efficient logistic drone routing method considering dynamic drone speed and payload. Sustainability, 16(12), 4995. https://doi.org/10.3390/su16124995

Wu, Q., Zeng, Y., & Zhang, R. (2018). Joint trajectory and communication design for multi-UAV enabled wireless networks. IEEE Transactions on Wireless Communications, 17(3), 2109–2121. https://doi.org/10.1109/twc.2017.2789293

Xu, L., Yang, Z., Huang, Z., Ding, W., & Buck-Sorlin, G. (2023). Effects of flight parameters for plant protection UAV on droplets deposition rate based on a 3D simulation approach. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 16(1), 66–72. https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20231601.6581

Yu, S. (2023). Comparison of the spray effects of air induction nozzles and flat fan nozzles installed on agricultural drones. Applied Sciences, 13(20), 11552. https://doi.org/10.3390/app132011552

Zailani, M. A. H., Sabudin, R. Z. A. R., Rahman, R. A., Saiboon, I. M., Ismail, A., & Mahdy, Z. A. (2020). Drone for medical products transportation in maternal healthcare. Medicine, 99(36), e21967. https://doi.org/10.1097/md.0000000000021967

Zhang, J., Campbell, J. F., Sweeney II, D. C., & Hupman, A. C. (2021). Energy consumption models for delivery drones: A comparison and assessment. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 90, 102668. https://doi.org/10.1016/j.trd.2020.102668

Zorbas, D., Pugliese, L. D. P., Razafindralambo, T., & Guerriero, F. (2016). Optimal drone placement and cost-efficient target coverage. Journal of Network and Computer Applications, 75, 16–31. https://doi.org/10.1016/j.jnca.2016.08.009

KSÜ Mühendislik Bilimleri Dergisi, 28(2), 2025
Araştırma Makalesi

KSU J Eng Sci, 28(2), 2025
Research Article

Kahramanmaras Sutcu Imam University
Journal of Engineering Sciences

Geliş Tarihi : 05.12.2024
Kabul Tarihi : 13.03.2025

Received Date : 05.12.2024
Accepted Date : 13.03.2025

YÜKSEK YOĞUNLUKLU POLİETİLEN ESASLI KOMPOZİTLERDE DOLGU MADDESİ OLARAK ODUN UNU VE TAVUK TÜYÜ KULLANIMININ ARAŞTIRILMASI

RESEARCH ON THE USE OF WOOD FLOUR AND CHICKEN FEATHER AS FILLER IN HIGH DENSITY POLYETHYLENE BASED COMPOSITES

Büşra AVCI[1] (ORCID: 0000-0003-1710-2778)
İlkay ATAR[1] (ORCID: 0000-0001-9527-1791)*
Fatih MENGELOĞLU[1] (ORCID: 0000-0002-2614-3662)

[1] *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Orman Endüstri Mühendisliği Bölümü, Kahramanmaraş, Türkiye*

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: İlkay ATAR, iatar@ksu.edu.tr

ÖZET

Bu çalışmada yüksek yoğunluklu polietilen (YYPE) esaslı kompozitlerde odun unu ilavesi ve tavuk tüyü kullanım oranının fiziksel, mekanik ve yanma özellikleri üzerine etkisi araştırılmıştır. Kompozit üretimlerinde odun unu %0-15 oranında, tavuk tüyü %0-5-10-15 oranlarında kullanılmıştır. Uyumlaştırıcı ajan olarak maleik anhidritle muamele edilmiş polietilen (MAPE) kullanılmıştır. Toplam 8 farklı kombinasyonda kompozit üretimi gerçekleştirilmiştir. Örnek gruplarının yoğunluk değeri, çekme direnci, çekmede elastikiyet modülü, kopmada uzama, eğilme direnci, eğilmede elastikiyet modülü, darbe direnci ve yatay yanma hızı değerleri tespit edilmiştir. Test sonuçlarına göre odun unu kullanımı ile yoğunluk değeri, çekmede elastikiyet modülü, eğilme direnci ve eğilmede elastikiyet modülü değerlerinde artış meydana gelmiştir. Tavuk tüyü kullanım oranının artması ile çekme direnci, elastikiyet modülü ve eğilme direnci değerlerinde artış görülmüştür. Odun unu ilavesi ve tavuk tüyü kullanım oranının artması ile örneklerin yatay yanma hızlarında düşüş olduğu tespit edilmiştir. Bu çalışmada, odun unu ve tavuk tüyü dolgu maddelerinin farklı oranlarda kullanımı, kompozit malzemelerin performansını önemli ölçüde etkilemiştir. Özellikle, %15 odun unu ve %15 tavuk tüyü içeren kompozitlerde eğilmede elastikiyet modülü, kontrol grubuna kıyasla %40'tan fazla artış göstermiştir. Bu sonuç, odun unu ve tavuk tüyünün sinerjik etkisiyle kompozit malzemelerin mekanik performansının optimize edilebileceğini göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Odun-plastik kompozit, tavuk tüyü, YYPE, enjeksiyon kalıplama

ABSTRACT

In this study, the effects of wood flour addition and chicken feather usage rate on physical, mechanical and combustion properties in high-density polyethylene (HDPE) based composites were investigated. Wood flour was used at a 0-15% rate and chicken feather at a 0-5-10-15% rate in composite production. Maleic anhydride-treated polyethylene (MAPE) was used as a compatibilizer. Composite production was carried out in a total of 8 different combinations. The density value, tensile strength, tensile modulus, elongation at break, flexural strength, flexural modulus, impact strength and horizontal burning rate values of the sample groups were determined. According to the test results, an increase occurred in the density value, tensile modulus, flexural strength and flexural modulus with the use of wood flour. An increase was observed in tensile strength, elastic modulus and flexural strength values with the increase in the chicken feather usage rate. It was determined that the horizontal burning rates of the samples decreased with the addition of wood flour and the increase in the chicken feather usage rate. In particular, the flexural modulus in composites containing 15% wood flour and 15% chicken feather increased by more than 40% compared to the control group. This result shows that the mechanical performance of composite materials can be optimized with the synergistic effect of wood flour and chicken feather.

Keywords: Wood-plastic composite, chicken feather, HDPE, injection molding

ToCite: AVCI, B., ATAR, İ., & MENGELOĞLU, F., (2025). YÜKSEK YOĞUNLUKLU POLİETİLEN ESASLI KOMPOZİTLERDE DOLGU MADDESİ OLARAK ODUN UNU VE TAVUK TÜYÜ KULLANIMININ ARAŞTIRILMASI. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 28(2), 690-701.

GİRİŞ

Plastik atıklar doğada yüzlerce yıl boyunca bozulmadan kalabilir. Plastik malzemelerin bir bölümü uzun vadeli kullanım için tasarlanırken, büyük bir kısmı kısa ömürlü kullanım amacıyla üretilmektedir. Yüksek yoğunluklu polietilen (YYPE), geniş bir kullanım alanına sahip olduğu için dünya genelinde yaygın bir şekilde tercih edilmektedir. Atık YYPE'nin geri dönüştürülmesi ve kompozit malzemelerde kullanımı, hem çevresel sürdürülebilirliği sağlamak hem de plastik atıkların ekonomik bir kaynağa dönüştürülmesi açısından önemli bir potansiyel sunmaktadır. Geri dönüştürülmüş YYPE'nin kompozitlerde kullanımı, polimer matrisin maliyetini düşürmekle birlikte, mekanik özellikleri iyileştirebilmekte ve bu malzemelerin çeşitli endüstriyel uygulamalar için uygun hale gelmesini sağlamaktadır (Kim ve Pal 2010; Geyer et al., 2017). Ayrıca, atık YYPE'nin kullanılması, plastiklerin doğal olarak zor bozunurluğu nedeniyle çevreye verdiği zararın azaltılmasına katkı sağlar (Korley et al., 2021).

Çevresel kaygılar nedeniyle sentetik malzemelerin yerine doğal malzeme kullanımı her zaman öncelik kazanmıştır. Doğal lifler, çevresel açıdan avantajları nedeniyle son zamanlarda bilim insanlarının dikkatini çekmiştir, ancak araştırmaların neredeyse tamamı bitkisel kaynaklardan elde edilen selüloza odaklanmıştır. Dünya çapında birçok bilim insanı araştırmalarını doğadan elde edilen malzemeleri kullanmaya odaklamıştır. Özellikle kompozitler ve filmler söz konusu olduğunda, biyopolimerlerin kullanımı ilginç bir alternatif olarak ortaya çıkmıştır. Bunun açık bir örneği, onlarca yıldır araştırılan bitkilerden elde edilen selülozun kullanımıdır (Brostow vd., 2010). Lifsel yapılı doğal malzelemer, binlerce yıldır ürünlerin dayanıklılığını arttırmak amacıyla kullanılmaktadır. Polimer kompozitlerde dolgu maddesi olarak çeşitli ağaç türlerinden elde edilen odun unları, kenevir lifleri, yıllık bitki atıkları gibi birçok selülozik lif kullanıldığı bilinmektedir (Mohanty et al. 2002; Kim and Pal 2010; Mantia and Morreale 2011; Mengeloğlu and Çavuş 2020; Basboga ve ark., 2022; Kilic et al. 2023).

Odun unu ve lignoselülozik dolgu maddeleri, odun-plastik kompozitlerinde (OPK) genellikle üretim maliyetlerini düşürmek ve saf polimerlere kıyasla malzemenin özelliklerini geliştirmek amacıyla kullanılır. Bu liflerin polimer matrisine dahil edilmesi, kompozitlerin çevre dostu olmasını sağlayarak fosil bazlı malzemelere sürdürülebilir ve maliyet etkin bir alternatif sunmaktadır (Kim ve Pal 2010; Summerscales et al. 2010). Lignoselülozik lifler, örneğin odun unu, düşük yoğunluk, işlenebilirlik kolaylığı ve yenilenebilirlik gibi ek faydalar sağlar ve bu özellikleri, onları çeşitli endüstriler için cazip takviye malzemeleri haline getirir (Mohanty et al. 2002; Mengeloğlu ve Karakuş 2012). Ayrıca, bu liflerin kullanımı mekanik özellikleri, örneğin sertlik ve boyutsal stabiliteyi artırırken, malzemenin ağırlığını da azaltır ve OPK'ları döşeme, mobilya ve inşaat gibi bir dizi uygulama için uygun hale getirir (Beaugrand et al. 2014; Kilic et al. 2023). Ancak, en büyük zorluklardan biri, hidrofobik polimer matris ile hidrofilik lignoselülozik lifler arasındaki zayıf yapışmadır; bu durum OPK'ların mekanik performansını olumsuz etkileyebilir. Bu sorunu çözmek amacıyla, MAPP (maleik anhidrit graftlı polipropilen) gibi bağlayıcı ajanlar, lifler ile polimer matris arasındaki uyum ve bağlanmayı iyileştirmek için sıklıkla kullanılmaktadır (Borysiak et al. 2011; Çetin et al. 2000; Maziero et al. 2019). Son dönemlerde ise selülozik dolgu maddelerinin dışında hayvansal atıkların da polimer kompozitlerde değerlendirilmesi yönünde araştırmalar başlamıştır.

Teknolojik alandaki gelişmeler ve nüfusun hızlı artması, tarımsal, kümes hayvancılığı ve evsel faaliyetlerden kaynaklı olarak yılda yaklaşık 2,4 milyar ton (UNEP 2020) katı atık meydana gelmektedir. Endüstriyel atıklar ve belediye atıklarının yanı sıra, kümes hayvancılığı sektörü; tavuk tüyleri ve diğer atıklardan kaynaklanan önemli kümes hayvanı atıklarından sorumludur. Dünya çapında yıllık kümes hayvanı tüketimi yaklaşık 127,06 metrik kilotondur. Tüyler tavuk ağırlığının yaklaşık %10'unu, yani yılda yaklaşık 12,7 metrik kiloton atığı oluşturur. Bu atıkların bertarafı, mevcut senaryoda endüstriler ve belediyeler için problem oluşturmakta ve bu durum, çevredeki atık malzeme birikiminde daha da artışa neden olmaktadır. Bu atıkların yakılması, hayvan yemi yapılması, biyoenerji üretimi ve geri dönüşüm gibi bertarafları için çeşitli yöntemler araştırılmış ve uygulanmıştır (Williams 2013). Ancak bu yöntemler çok fazla zaman ve enerji gerektirmekte ve işleme sırasında zehirli gazların açığa çıkmasına neden olarak çevreye daha fazla zarar vermektedir. Kümes hayvanı atıklarını değerlendirmek için kapsamlı araştırmalar yürütülmektedir. Tavuk tüyleri çevreyle uyumlu yapıları nedeniyle tamamen biyolojik olarak parçalanabilen, toksik olmayan, yenilenebilir, hafif, ücretsiz ve düşük yoğunluklu, doğal bir lifli yapıda malzemedir.

Kümes hayvanı atıklarının bertarafı amacıyla birçok araştırma yürütülmektedir. Şu anda kümes hayvanı atıklarının bertarafı yöntemleri yakma, kontrollü depolama, kompostlama, keratinolitik mantarlar (Ardyati vd., 2019) gibi biyolojik bozunma ajanlarının kullanılması, anaerobik sindirim, metan üretimi, iplik ve kumaşların (Evazynajad ve

ark. 2002) tüy ununun bir parçası haline getirilmesi vb.'dir (Shih 1993). Ancak bu yöntemlerin çoğu kirliliğe yol açmakta ve atık bertarafı için yeterli gelmemektedir (Soubhagya ve ark. 2019).

Tavuk tüylerinden elde edilen keratin lifleri aşındırıcı olmayan, çevre dostu, biyolojik olarak parçalanabilen, yenilenebilir, organik çözücülerde çözünmeyen ve ayrıca iyi mekanik özelliklere, düşük yoğunluğa, hidrofobik davranışa, sesi azaltma yeteneğine, ısı tutma özelliğine ve son olarak düşük maliyete sahiptir. Bu özellikler, tavuk tüylerinden elde edilen keratin liflerini polimer kompozitlerde yüksek yapısal takviye olarak kullanılmaya uygun bir malzeme haline getirir (Meyers ve ark., 2008; Martinez-Hernandez ve ark., 2005a). Tavuk tüyleri yaklaşık %91 protein (keratin), %1 lipit ve %8 sudan oluşur (Martinez-Hernandez ve ark., 2005b). Bir tavuk tüyünün amino asit dizisi diğer tüylerinkine çok benzer ve ayrıca pençelerden elde edilen sürüngen keratinleriyle de çok ortak noktası vardır (Hong ve Wool 2005). Dizi büyük ölçüde sistin, glisin, prolin ve serinden oluşur ve neredeyse hiç histidin, lizin veya metionin içermez (Winandy ve ark., 2014).

Tavuk tüylerinin kompozit malzemelerde takviye edici olarak kullanılabilirliği, son yıllarda yapılan araştırmalarla dikkat çekici şekilde incelenmiştir. Tavuk tüylerini çimento ile bağlanmış kompozitlerde takviye malzemesi olarak değerlendirerek, bu tür malzemelerin özelliklerini araştırmıştır. %5-10 oranında tavuk tüyü içeren kompozitlerin, ticari ahşap lifli çimento kompozitlerle karşılaştırılabilir mekanik ve boyutsal özellikler sunduğu ifade edilmiştir (Meandero, 2010). Salhi (2012), keratin liflerinden elde edilen biyo-kompozitlerin geliştirilmesi üzerine çalışarak, tavuk tüyü liflerinin geri dönüştürülüp polimer matrisli kompozitlerde kullanılabileceğini göstermiştir. Bununla birlikte, tavuk tüyü lifi bazlı kompozitlerin sıkıştırma dayanımının daha iyi olduğunu ve bu tür malzemelerin mühendislik uygulamalarında yapısal eleman olarak kullanılabileceğini göstermiştir (Subramani et al., 2014). Ayrıca, PLA matrisine eklenen tavuk tüyü liflerinin elastik modül ve sertlik özelliklerini iyileştirerek çevre dostu bir kompozit alternatifi sunduğu belirtilmiştir (Baba ve Özmen, 2017).

Bu çalışmada, odun unu ve tavuk tüyü gibi çevre dostu ve sürdürülebilir dolgu maddelerinin polimer kompozit malzemelerde kullanımı araştırılmıştır. Odun unu, lignoselülozik yapısı sayesinde maliyetleri düşürme, mekanik özellikleri artırma ve yenilenebilir bir kaynak olarak sürdürülebilirlik sunma potansiyeline sahiptir. Tavuk tüyünden elde edilen keratin lifleri ise düşük yoğunluk, biyolojik olarak parçalanabilirlik ve iyi mekanik özellikler gibi avantajlarıyla dikkat çekmektedir. Bu iki dolgu maddesinin sinerjik bir şekilde kullanımı hem çevresel kaygıları azaltmayı hem de kompozit malzemelerin mekanik performansını optimize etmeyi hedeflemektedir. Çalışmanın sonucunda, odun unu ve tavuk tüyü içeren kompozitlerin, çevre dostu, maliyet etkin ve çeşitli endüstriyel uygulamalara uygun nitelikte özellikler sunduğu gösterilerek, bu tür yenilikçi malzemelerin hem akademik hem de endüstriyel çalışmalar için önemli bir alternatif olduğu ortaya konulmuştur.

MATERYAL VE METOT

Kompozit üretiminde polimer matris olarak geri dönüşüm yüksek yoğunluklu polietilen (YYPE) kullanılmıştır. Geri dönüşüm YYPE özel bir firmadan satın alınmıştır. Öğütülmüş toz halinde temin edilmiştir. Dolgu maddesi olarak kızılçam odun unu, tavuk tüyleri kullanılmıştır. Kızılçam odun unları yerel kereste atölyelerinden temin edilmiş ve sarsak elekte elenerek 60mesh üzerinde kalan odun unları üretimde kullanılmıştır. Üretimlerde uyumlaştırıcı olarak maleik anhidritle muamele edilmiş polietilen (MAPE) kullanılmıştır.

Tavuk tüyleri mersinde faaliyet gösteren Pilyem işletmesinden temin edilmiştir. Tavuk tüyleri üretimde kullanılmadan önce bol miktarda saf suyla yıkanmış ve daha sonra dezenfekte yapmak amacıyla %5 klorlu suda yarım saat bekletilerek saf suyla tekrar yıkama yapılmıştır. Yıkanmış tavuk tüyleri süzüldükten sonra etüvde 80 °C'de kurutulmuştur. Kurutma işlemin ardından tavuk tüyleri uzunluğu 5mm olacak şekilde kesilmiştir. Şekil 1'de tavuk tüylerinin kesim işlemi ve kullanılan tavuk tüyü görüntüsü verilmiştir.

Kompozit üretimlerinde %0-15 odun unu ve %0-5-10-15 oranlarında tavuk tüyü kullanılarak toplam 8 farklı kombinasyonda üretim gerçekleştirilmiştir. Üretim reçetesi Tablo 1'de verilmiştir.

Üretim reçetesinde belirlenen karışım oranlarına göre malzemeler yüksek devirli karıştırıcı makinesinde önce homojen olana kadar karıştırılmıştır. Daha sonra karışım ekstrüder makinesinden (sıcaklık zonları: 180, 185, 190, 195 ve 200 °C) geçirilir ve homojen olarak karışmış eriyik malzeme küçük parçalara kesilerek suda soğutulur. Bu parçalar kırıcı makinesinde küçük granül haline gerilir ve etüvde 103 °C derecede kurutulur. Kurutulmuş granül halindeki malzemeden enjeksiyon kalıplama makinesinde (sıcaklık zonları:170, 180, 185, 190 ve 190 °C) test örnekleri üretilmiştir. Örnekler test edilmeden önce iklimlendirme kabininde 20°C'de ve %65 bağıl nemde

kondisyonlanmaya bırakılmıştır. Üretimi gerçekleştirilen örneklerin yoğunluğu, eğilme direnci, eğilmede elastikiyet modülü, çekme direnci, çekmede elastikiyet modülü, kopmada uzama değeri, darbe direnci ve yatay yanma hızı sırasıyla ASTM D792-20 (2020), ASTM D790 (2010), ASTM D638 (2010), ASTM D256 (2010) ve UL 94 (2021) standartlarına göre gerçekleştirilmiştir.



Şekil 1. Tavuk Tüylerinin Kesim İşlemi ve Kullanılan Tavuk Tüyü Görüntüsü

Tablo 1. Üretim Reçetesi

Örnek Kodu	Geri Dönüşüm YYPE	Odun unu	Tavuk tüyü	MAPE
W0Ç0	97	-	-	3
W0Ç5	92	-	5	3
W0Ç10	87	-	10	3
W0Ç15	82	-	15	3
W15Ç0	82	15	-	3
W15Ç5	77	15	5	3
W15Ç10	72	15	10	3
W15Ç15	67	15	15	3

Elde edilen dataların SPSS programı (IBM SPSS 20.0) kullanılarak istatistik analizleri yapılmıştır. Örnek kombinasyonlarının fiziksel, mekanik ve yanma özellikleri üzerine etkisinin belirlenmesi amacıyla ANOVA basit varyans analizi uygulanmıştır. Ayrıca bu grupların ortalamaları arasındaki farklar Duncan çoklu karşılaştırma testi ile belirlenmiştir.

BULGULAR VE TARTIŞMA

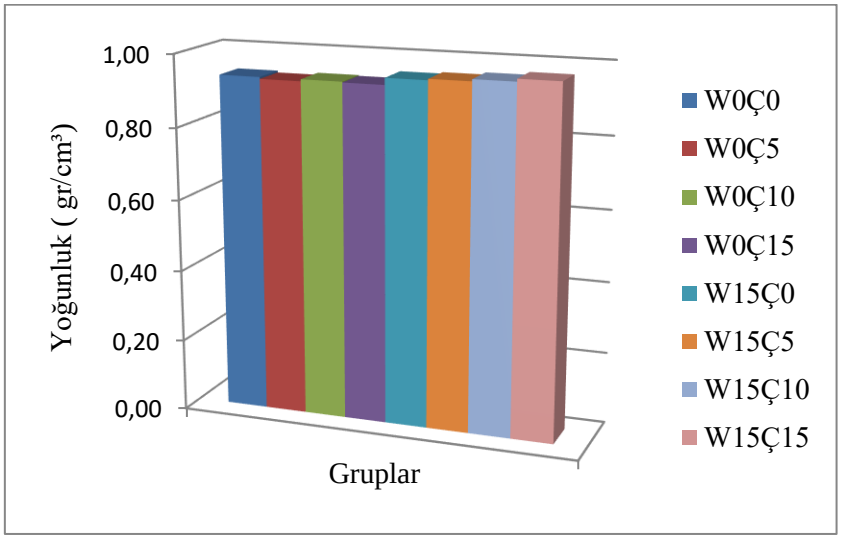
Kompozit malzemeleri yoğunluğu, eğilme direnci, eğilmede elastikiyet modülü, çekme direnci, çekmede elastikiyet modülü, kopmada uzama değeri, darbe direnci ve yatay yanma hızı değerleri belirlenmiştir. Tablo 2'de örnek gruplarının test sonuçları verilmiştir.

Şekil 2'de örnek gruplarının yoğunluk değerini gösteren bar grafiği verilmiştir. Yapılan istatistik analiz sonuçlarına göre yoğunluk değeri üzerine odun unu kullanımı önemli oranda etkili olurken tavuk tüyü kullanım oranının etkisiz olduğu tespit edilmiştir. Kompozit malzemelerde odun unu kullanımı ile birlikte yoğunluk değerlerinde bir miktar artış meydana gelmiştir. Literatürde de polimer matrise odun unu ilavesi ile yoğunlukta artış meydana geldiği rapor edilmiştir rastlanmıştır (Atar vd., 2021; Başboğa vd., 2020). Tavuk tüyü yoğunluğu 1.01±0.02 g/cm³ tür (Zhan ve

Wool 2016). Bu sebeple tavuk tüyü ve polimer matris yoğunlukları birbirine yakın olması sebebiyle tavuk tüyü yoğunluğu etkilememiştir.

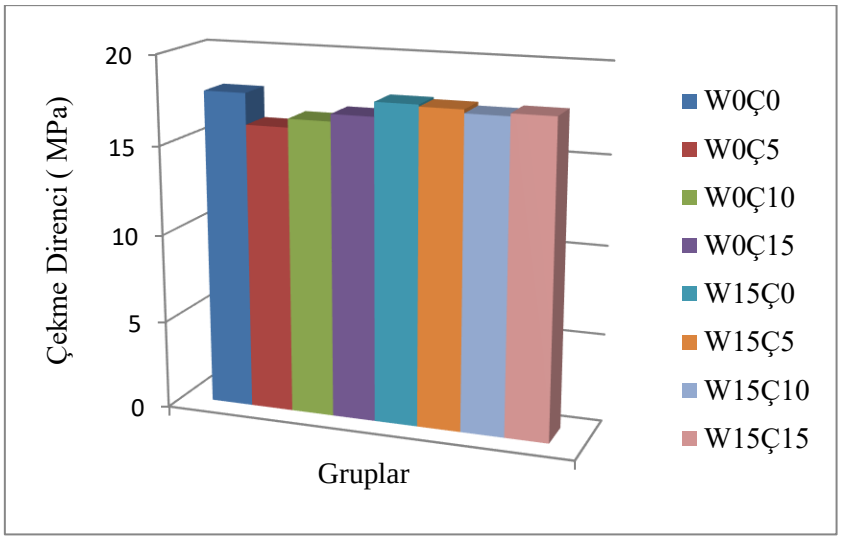
Tablo 2. Örnek Gruplarının Fiziksel, Mekanik ve Yanma Test Sonuçları

Örnek Kodu	Çekme Direnci (MPa)	Çekmede Elastikiyet Modülü (MPa)	Kopmada Uzama (%)	Eğilme Direnci (MPa)	Eğilmede Elastikiyet modülü (MPa)	Darbe Direnci (kJ/m²)	Yoğunluk (g/cm³)	Yatay yanma (mm/dk)
W0Ç0	17,86	434,74	10,92	22,53	664,72	2,88	0,94	41,31
W0Ç5	16,13	449,16	6,05	25,06	777,35	3,26	0,93	37,46
W0Ç10	16,62	502,74	5,02	27,41	884,23	3,38	0,94	35,63
W0Ç15	17,03	558,63	4,46	29,04	984,24	2,71	0,93	31,52
W15Ç0	17,83	597,54	4,89	28,90	1124,37	3,56	0,95	33,99
W15Ç5	17,72	653,90	4,30	30,79	1240,99	3,17	0,96	32,28
W15Ç10	16,04	657,99	3,54	32,27	1379,48	2,81	0,96	29,71
W15Ç15	17,67	810,91	2,91	34,40	1818,12	2,57	0,97	25,65



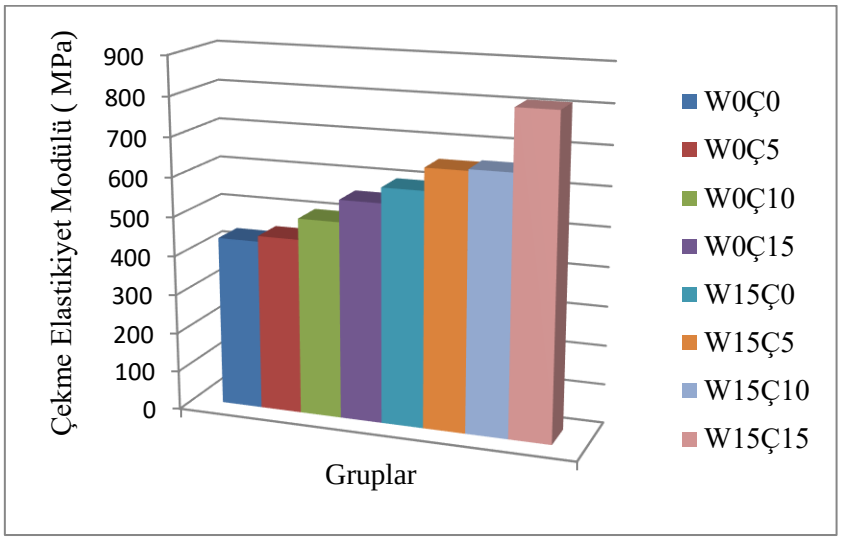
Şekil 2. Örnek Gruplarının Yoğunluk Değerini Gösteren Bar Grafiği

İstatistik analiz sonuçlarına göre çekme direnci üzerine odun unu kullanımı önemli oranda etkili olmazken tavuk tüyü kullanım oranı önemli oranda etkili olmuştur. Odun unu kullanılmayan örneklerde tavuk tüyü kullanım oranının artması ile çekme direncinde artış olduğu görülmüştür. Kontrol örneğine kıyasla dolgu maddesi kullanımı ile çekme direncinde bir miktar düşüş meydana gelmiştir. Odun unu ve tavuk tüyü dolgu maddelerinin çekme direnci üzerindeki etkilerinin farklı mekanizmalarla belirlendiğini göstermektedir. Odun unu, lignoselülozik yapısı nedeniyle kompozit malzemenin sertliğini ve stabilitesini artırırken, polimer matris ile dolgu malzemesi arasındaki zayıf bağ nedeniyle çekme direncinde belirgin bir artış sağlamamaktadır. Buna karşın, tavuk tüyü kullanımının artışı, keratin liflerinin polimer matris içinde yapısal takviye sağlaması ve liflerin yük taşıma kapasitesini artırmasıyla çekme direncini önemli ölçüde iyileştirmiştir. Bu iyileşme, tavuk tüyü liflerinin düşük yoğunluğu ve elastik yapısıyla ilişkilidir; ancak bu mekanizma, odun unu ile birlikte kullanıldığında sınırlı kalmıştır. Dolgu maddelerinin birbirinden farklı yüzey özellikleri ve matris ile etkileşim seviyeleri, özellikle lif-matris bağlanmasının zayıflığı nedeniyle mekanik performansı sınırlayabilir. Bu durum, önceki çalışmalarda da rapor edildiği gibi, bağlayıcı ajanların etkin kullanımıyla iyileştirilebilir (Yang vd., 2004; Yang vd., 2007; Bledzki ve Faruk 2003; Maziero vd., 2019; Çavuş, 2020; Çavuş ve Mengeloğlu 2020; Başboğa vd., 2022; Kılıç vd., 2023; Kılıç vd., 2024). Şekil 3'te çekme direnci bar grafiği verilmiştir.



Şekil 3. Örnek Gruplarının Çekme Direnci Değerini Gösteren Bar Grafiği

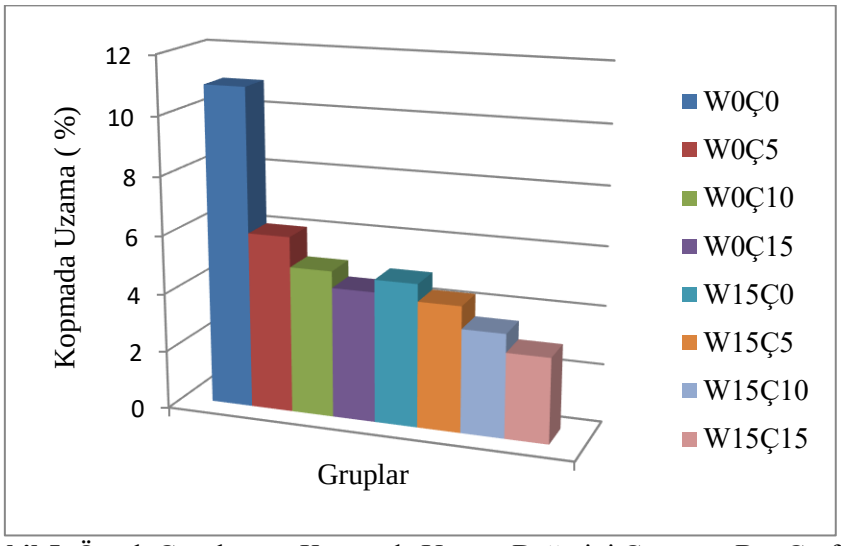
Çekmede elastikiyet modülü üzerine odun unu kullanımı ve tavuk tüyü kullanım oranının önemli oranda etkili olduğu görülmüştür. Şekil 4'te örnek gruplarının çekmede elastikiyet modülü değerini gösteren bar grafiği verilmiştir. Polimer matrise odun unu ilavesi ve tavuk tüyü kullanım oranının artması ile örneklerin çekmede elastikiyet modülü değerlerinde artış meydana gelmiştir. Odun unu, yüksek elastikiyet modülü değerine sahip lignoselülozik bir dolgu maddesi olarak polimer matrise sertlik ve rijitlik kazandırmış, bu da kompozitlerin elastikiyet modülü değerlerinde artışa neden olmuştur. Özellikle odun unu ve tavuk tüyü oranlarının artırılması, dolgu maddelerinin yüksek modül değerleri ile polimer matrisin daha rijit bir yapıya dönüşmesine neden olmuş, bu da çekmede elastikiyet modülü değerinde artışa neden olmuştur. Yapılan diğer çalışmalarda da benzer sonuçlar rapor edilmiştir (Zaini vd., 1996; Stark ve Berger 1997; Yuan vd., 2008; Çavdar vd., 2011; Çavuş ve Mengeloğlu, 2020; Başboğa vd., 2022; Kılıç vd.,2023; Kılıç vd., 2024).



Şekil 4. Örnek Gruplarının Çekmede Elastikiyet Modülü Değerini Gösteren Bar Grafiği

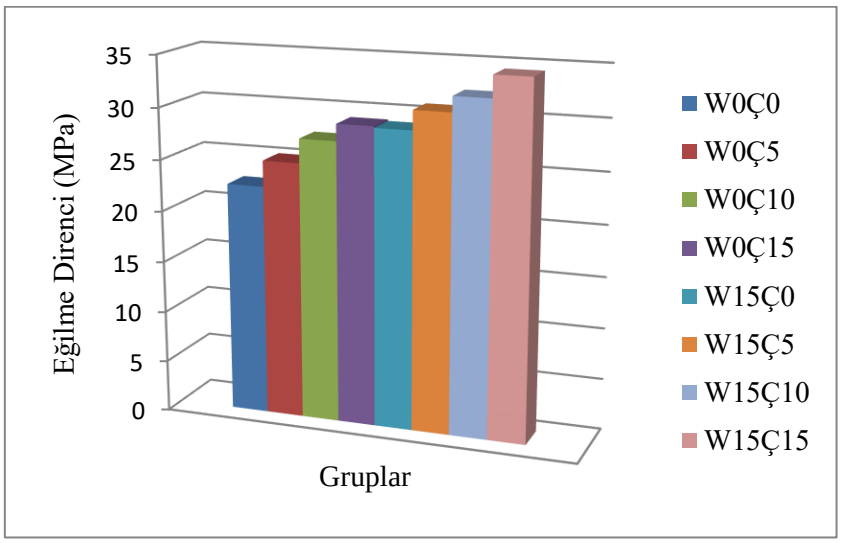
Örneklerin kopmada uzama değerlerine bakıldığında hem odun unu kullanımı hem de tavuk tüyü kullanım oranının önemli oranda etkili olduğu tespit edilmiştir. Polimer matrise odun unu ilavesi ve tavuk tüyü kullanım oranının artması ile kopmada uzama değerlerinde düşüş meydana gelmiştir. En yüksek kopmada uzama değeri W0Ç0 (%10.92) grubunda iken en düşük kopmada uzama değeri W15Ç15 (%2.91) grubunda bulunmuştur. Odun unu, lignoselülozik yapısı nedeniyle polimer matrise rijitlik kazandırarak malzemenin esnekliğini sınırlamış ve kopmada uzama değerinde azalmaya neden olmuştur. Tavuk tüyü ise elastik bir yapıya sahip olmasına rağmen, lif-matris bağlanmasındaki zayıflıklar nedeniyle malzemenin kopma noktasında deformasyon kapasitesini artırmak yerine sınırlamıştır. Bu durum, dolgu maddelerinin polimer matrisin esnekliğini azaltarak kompozitin daha rijit bir yapıya

dönüşmesine yol açtığını ve kopmada uzama değerlerinin dolgu oranı arttıkça azaldığını ortaya koymaktadır. (Zaini vd., 1996). Şekil 5'te örnek gruplarının kopmada uzama değerini gösteren bar grafiği verilmiştir.

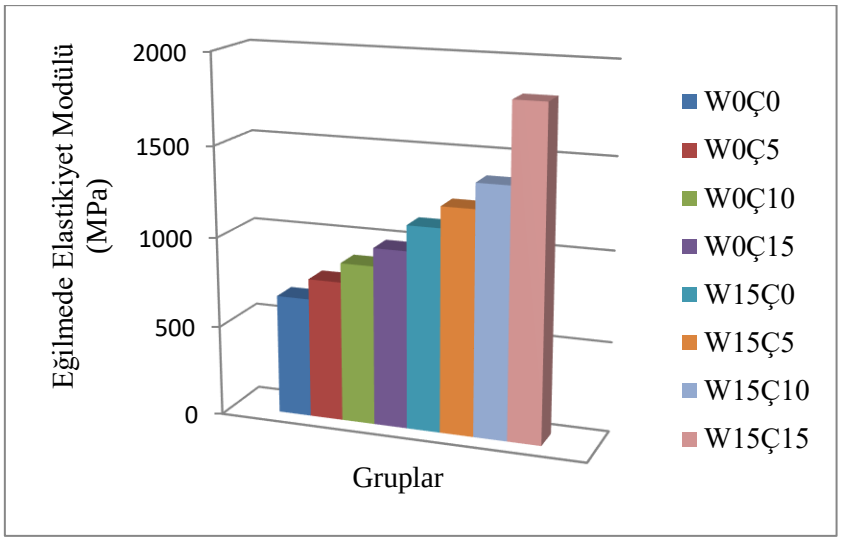


Şekil 5. Örnek Gruplarının Kopmada Uzama Değerini Gösteren Bar Grafiği

Kompozit malzemelerin eğilme direnci değerleri Şekil 6'da gösterilmektedir. Eğilme direnci ve eğilme elastikiyet modülü değeri üzerine odun unu kullanımı ve tavuk tüyü kullanım oranının önemli oranda etkili oldu belirlenmiştir. Polimer matrise odun unu katkısı ve tavuk tüyü kullanım oranının artışı ile eğilme direncinde artış olduğu tespit edilmiştir. En yüksek eğilme direnci değeri W15Ç15 grubunda iken en düşün eğilme direnci değeri W0Ç0 (kontrol grubu) grubunda bulunmuştur. Yapılan önceki çalışmada da odun unu ilavesi ile eğilme direncinde artış olduğu rapor edilmiştir (Atar vd., 2021). Tavuk tüyü ise keratin yapısı sayesinde yük taşıma kapasitesini artırarak ve deformasyon direnci sağlayarak bu değerler üzerinde olumlu bir etki yaratmıştır. Özellikle her iki dolgu maddesinin bir arada kullanılması, rijitlik ve mekanik dayanıklılığı artırarak eğilme direnci ve elastikiyet modülünde sinerjik bir etki oluşturmuştur. Polimer matrise ilave edilen dolgu maddeleri daha yüksek elastikiyet modülüne sahip olmaları nedeniyle eğilmede elastikiyet modülü değerlerinde artışa neden olmaktadır. Daha önceki çalışmalarda da benzer sonuçlar rapor edilmiştir (Espinach vd., 2013; Mengeloğlu ve Çavuş, 2020; Başboğa, 2023). Şekil 7'de örneklerin eğilmede elastikiyet modülü değerlerini gösteren bar grafiği verilmiştir.

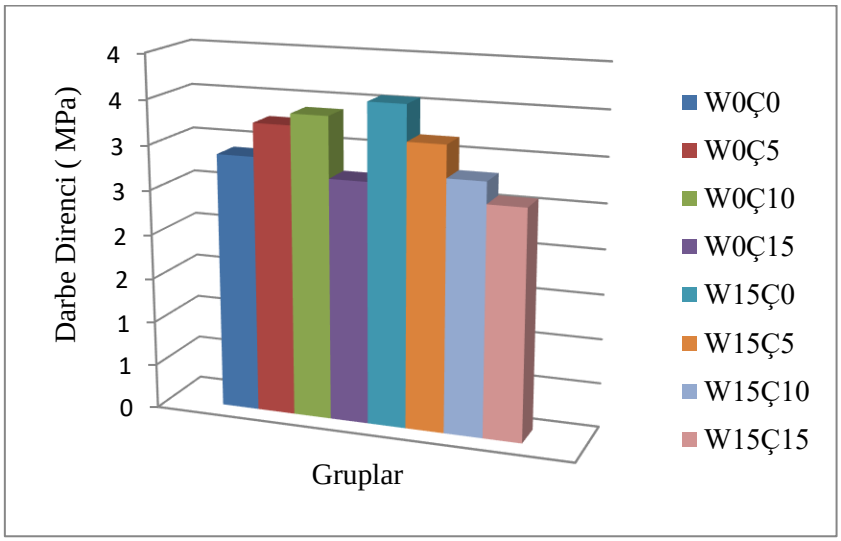


Şekil 6. Örnek Gruplarının Eğilme Direnci Değerini Gösteren Bar Grafiği



Şekil 7. Örnek Gruplarının Eğilmede Elastikiyet Modülü Değerini Gösteren Bar Grafiği

Darbe direnci üzerine odun unu ilavesinin önemli oranda etkili olmadığı, tavuk tüyü kullanımının önemli oranda etkili olduğu belirlenmiştir. Genel olarak odun unu kullanımı ile darbe direnci değerlerinde düşüş görülmüştür. Tavuk tüyü ise esnek yapısı ve lif bazlı doğası sayesinde polimer matriste enerji absorpsiyonunu artırarak darbe direnci üzerinde olumlu bir etki yaratmıştır. Özellikle tavuk tüyü oranının %5-10 seviyelerinde olduğu örneklerde darbe direncinde iyileşme gözlemlenmiştir. Ancak odun unu oranının artması, lif-matris arayüzündeki bağlanma problemleri nedeniyle darbe direnci üzerinde olumsuz bir etki yaratmıştır. Polimer matrise dolgu maddesi ilavesi ile kompozit malzemenin kırılganlığı artmakta ve darbe direncini olumsuz etkilemektedir (Mengeloğlu ve Karakuş, 2008; Li ve Matuana, 2003; Mengeloğlu vd., 2000). Şekil 8'de örneklerin darbe direnci bar grafiği verilmiştir.

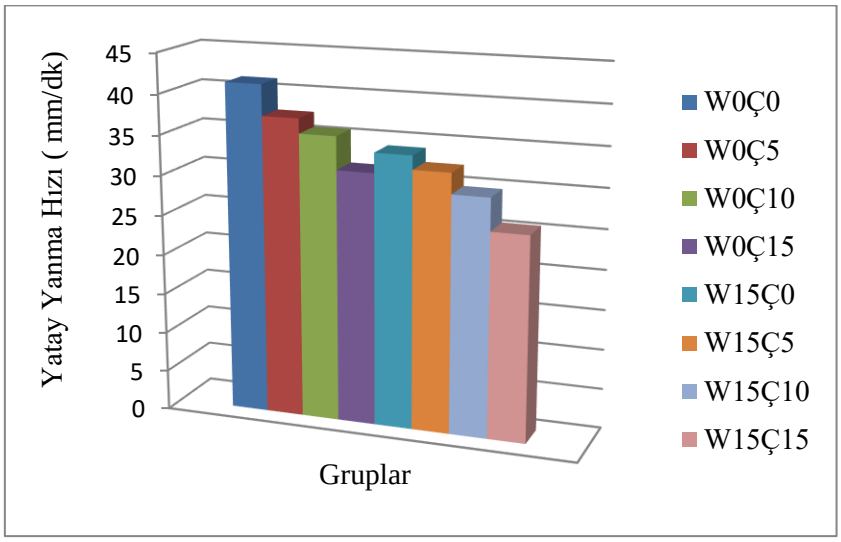


Şekil 8. Örnek Gruplarının Darbe Direnci Değerini Gösteren Bar Grafiği

Örneklerin yatay yanma hızı incelendiğinde onun unu ilavesi ve tavuk tüyü kullanım oranının artması ile yanma hızında azalma olduğu tespit edilmiştir. Odun unu, lignoselülozik yapısındaki karbon içerikli bileşenler nedeniyle yanma sırasında kömürleşme oluşturarak kompozitin yüzeyinde bir bariyer etkisi yaratmış ve yanma hızını düşürmüştür. Tavuk tüyü ise keratin bazlı yapısı sayesinde yanma sırasında karbonlu bir tabaka oluşturmuş ve kömürleşme oranını artırarak ısı transferini azaltmıştır. (Cheng vd., 2009). Özellikle odun unu ve tavuk tüyünün birlikte kullanımı, malzeme yüzeyinde oluşan koruyucu kömürleşme tabakasını güçlendirmiş ve yatay yanma hızında belirgin bir azalma sağlamıştır.

Sonuç olarak, yatay yanma hızındaki düşüş, odun unu ve tavuk tüyünün polimer matris ile etkileşimlerinden ve kömürleşme davranışlarından kaynaklanmaktadır. Bu dolgu maddelerinin oranlarının optimize edilmesi ve yanma

sırasında oluşan koruyucu tabakanın güçlendirilmesi, kompozit malzemelerin yangına karşı dayanıklılığını artırmak için önemli bir strateji sunmaktadır.



Şekil 9. Örnek Gruplarının Yatay Yanma Hızı Değerini Gösteren Bar Grafiği

SONUÇLAR

Bu çalışma kapsamında, geri dönüştürülmüş yüksek yoğunluklu polietilen (YYPE) esaslı kompozitlerde odun unu ve tavuk tüyü dolgu maddelerinin fiziksel, mekanik ve yanma özelliklerine etkileri incelenmiştir. Çalışmanın sonuçları, odun unu ve tavuk tüyünün farklı oranlarda kullanımının kompozit malzemelerin performansını önemli ölçüde etkilediğini göstermiştir.

Odun unu kullanımı, kompozitlerin yoğunluğunu artırmıştır. %15 oranında odun unu kullanılan örneklerde yoğunluk 0,97 g/cm³ olarak ölçülmüştür. Tavuk tüyü ise yoğunluk üzerinde anlamlı bir değişikliğe neden olmamıştır. Tavuk tüyü kullanımı ile çekme direncinde artış gözlemlenmiş ve %15 oranında tavuk tüyü içeren örneklerde çekme direnci 17,67 MPa'ya ulaşmıştır. Ancak, dolgu maddesi ilavesi genel olarak çekme direncinde hafif bir düşüşe neden olmuştur. Hem odun unu hem de tavuk tüyü ilavesi ile çekmede elastikiyet modülü değerlerinde artış görülmüştür. En yüksek elastikiyet modülü değeri %15 odun unu ve %15 tavuk tüyü içeren örneklerde 810,91 MPa olarak kaydedilmiştir. Dolgu maddelerinin artışı ile kopmada uzama değerlerinde azalma meydana gelmiştir. Kontrol grubundaki en yüksek değer %10,92 iken, %15 odun unu ve %15 tavuk tüyü içeren örneklerde bu değer %2,91'e düşmüştür. Odun unu ve tavuk tüyü ilavesi, eğilme direnci ve elastikiyet modülü değerlerinde artış sağlamıştır. %15 odun unu ve %15 tavuk tüyü içeren örneklerde eğilme direnci 34,40 MPa, eğilmede elastikiyet modülü ise 1818,12 MPa olarak ölçülmüştür. Tavuk tüyü oranının %5-10 seviyelerinde olduğu durumlarda darbe direnci iyileşmiştir. Ancak odun unu oranının artışıyla darbe direncinde düşüş gözlenmiştir. Odun unu ve tavuk tüyü ilavesi, yatay yanma hızında azalma sağlamıştır. En düşük yanma hızı, %15 odun unu ve %15 tavuk tüyü içeren örneklerde 25,65 mm/dk olarak ölçülmüştür. ASTM D6662 standardı (2001), poliolefinlere dayalı plastik kereste döşeme tahtalarının minimum 6,9 MPa eğilme direnci ve 340 MPa eğilmede elastikiyet modülü değerine sahip olmasını gerektirir. Çalışma kapsamında, tüm kompozit grupları standartta istenen değeri sağlamıştır.

Sonuç olarak, geri dönüştürülmüş YYPE esaslı kompozitlerde odun unu ve tavuk tüyü dolgu maddelerinin kullanımı, malzeme özelliklerini geliştirebilecek potansiyele sahiptir. Tavuk tüyünün düşük maliyeti, hafifliği ve çevre dostu özellikleri, bu malzemeyi yenilikçi ve sürdürülebilir uygulamalar için cazip bir seçenek haline getirmektedir. Ancak, her iki dolgu maddesiyle birlikte kullanımda mekanik ve fiziksel özelliklerin optimizasyonu, uygulama ihtiyaçlarına bağlı olarak dikkatlice değerlendirilmelidir.

KAYNAKLAR

Ardyati, T., Sutoyo, S., & Suharjano, (2019). Screening of keratinolytic fungi for biodegradation agent of keratin from chicken feather waste. In IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, vol. 391, 012027, 1. doi:10.1088/1755-1315/391/1/012027.

ASTM D256, (2010). Standard test for determining the Izod pendulum impact resistance of plastics, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.

ASTM D638, (2010). Standard test for tensile properties of plastics. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.

ASTM D790, (2010). Standard test methods for flexural properties of unreinforced and reinforced plastics and electrical insulating materials. ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.

ASTM D792-20 (2020). Standard Test Methods for density and specific gravity (Relativedensity) of Plastics by displacement. ASTM International, West Conshohocken, PA.

Atar, İ., Başboğa, İ.H., Karakuş, K., & Mengeloğlu F. (2021). Efect of waste tea (camellia sinensis) wood fibers and MAPE on some properties of high density polyethylene (HDPE) based polymer composites. Turkish Journal of Forest Science, 5(2), 606-619. https://doi.org/10.32328/turkjforsci.991612

Baba, B. O., & Özmen, U. (2017). Preparation and mechanical characterization of chicken feather/PLA composites. Polymer Composites, 38(5), 837-845. https://doi.org/10.1002/pc.23644

Başboğa, İ.H., Atar, İ., Karakuş, K., & Mengeloğlu, F. (2020). Determination of Some Technological Properties of Injection Molded Pulverized-HDPE Based Composites Reinforced with Micronized Waste Tire Powder and Red Pine Wood Wastes. Journal of Polymers and the Environment, 28, 1776–1794. https://doi.org/10.1007/s10924-020-01726-7

Başboğa, H. İ., Kılıç, İ., Atar, İ., & Mengeloğlu, F. (2022). The usage of wood of dahoma (Piptadeniastrum africanum), a tropic tree, in the production of wood plastic composite. Turkish Journal of Forestry Research, 9 (Special Issue), 271-280. https://doi.org/10.17568/ogmoad.1091247

Başboğa, H. I. (2023). Polypropylene-based composites reinforced with waste tropic wood flours: Determination of accelerated weathering resistance, tribological, and thermal properties. BioResources, 18(4), 7251-7294. DOI: 10.15376/biores.18.4.7251-7294

Beaugranda, J., Nottez, M., Konnerth, J., and Bourmaud, A. (2014). "Multi-scale analysis of the structure and mechanical performance of woody hemp core and the dependence on the sampling location," Industrial Crops and Products 60, 193-204. DOI: 10.1016/j.indcrop.2014.06.019

Bledzki, A., & Faruk, O. (2003). Wood fibre reinforced polypropylene composites: Effect of fibre geometry and coupling agent on physico-mechanical properties. Applied Composite Materials, 10, 365-379. DOI: 10.1023/A:1025741100628

Brostow, W., Datashvili, T., & Miller, H. (2010). Wood and Wood Derived Materials. J. Mater. Educ., Vol. 32, pp.125–138.

Borysiak, S., Paukszta, D., Batkowska, P., and Mankowski, J. (2011). "The structure, morphology, and mechanical properties of thermoplastic composites with ligncellulosic fiber," in: Cellulose Fibers: Bio- and Nano-Polymer Composites, S. Kalia, B. S. Kaith, and I. Kaur (eds.), Springer Heidelberg, Dordrecht, Netherlands, pp. 263-290. DOI: 10.1007/978-3-642-17370-7

Cheng, S., Lau, K., Liu, T., Zhao, Y., Lam, PM., & Yin, Y. (2009). Mechanical and thermal properties of chicken feather fiber/PLA green composites. Composites: Part B. 40, 650-654. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2009.04.011

Çavdar, A. D., Kalaycıoğlu, H., & Mengeloğlu, F. (2011). Tea mill waste fibers filled thermoplastic composites: The effects of plastic type and fiber loading. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 30(10), 833-844. DOI: 10.1177/0731684411408752

Çavuş, V. (2020). Selected properties of mahogany wood flour filled polypropylene composites: The effect of maleic anhydride-grafted polypropylene (MAPP). BioResources, 15(2), 2227-2236. DOI: 10.15376/biores.15.2.2227-2236

Çavuş, V., & Mengeloğlu, F. (2020). Effect of wood particle size on selected properties of neat and recycled wood polypropylene composites. BioResources, 15(2), 3427-3442. DOI: 10.15376/biores.15.2.3427-3442

Çetin, N. S., Alma, M. H., & Baştürk, M. A. (2000). Yeni kompozitler üretmek amacıyla doğal lignoselülozik lifler ile sentetik polimerler arasında uyum sağlayan birleştirici maddeler ve metotlar. Fen ve Mühendislik Dergisi, 3(2), 58-68.

Espinach, F. X., Julian, F., Verdaguer, N., Torres, L., Pelach, M. A., Vilaseca, F., & Mutje, P. (2013). Analysis of tensile and flexural modulus in hemp strands/ polypropylene composites. Composites Part B: Engineering, 47, 339-343. DOI: 10.1016/j.compositesb.2012.11.021

Evazynajad, A., Kar, A., Veluswamy, S., McBride, H., & George, B. R. (2002). Production and characterization of yarns and fabrics utilizing Turkey feather fibers. Materials Research Society Symposium Proceedings, 702, 5–16. https://doi.org/10.1557/PROC-702-U1.2.1

Geyer, R., Jambeck, J. R., & Law, K. L. (2017). Production, use, and fate of all plastics ever made. Science Advances, 3(7), e1700782. https://doi.org/10.1126/sciadv.1700782

Hong, C.K., & Wool, R.P. (2005). Development of a Bio-Based Composite Material from Soybean Oil and Keratin Fibers. Journal of Applied Polymer Science. Vol. 95: pp.1524–1538. https://doi.org/10.1002/app.21044

Kılıç, İ., Avcı, B., Atar, İ., Korkmaz, N., Yılmaz, G., & Mengeloğlu, F. (2023). Using furniture factory waste sawdust in wood plastic composite production and prototype sample production. BioResources, 18(4), 7212-7229. DOI: 10.15376/biores.18.4.7212-7229

Kılıç, İ., Avcı, B., Atar, İ., Korkmaz, N., Yılmaz, G., & Mengeloğlu, F. (2024). Utilization of flours from hemp stalks as reinforcement in polypropylene matrix. Bioresources, 19(1), 1494-1516. DOI: 10.15376/biores.19.1.1494-1516

Kim, J. K., and Pal, K. (2010). Recent Advances in the Processing of Wood–Plastic Composites, Springer-Verlag Berlin, Germany. DOI: 10.1007/978-3-642-14877-4

Korley, L. T. J., Epps, T. H., Helms, B. A., & Ryan, A. J. (2021). Toward polymer upcycling—Adding value and tackling circularity. Science, 373(6550), 66–69. https://doi.org/10.1126/science.abg4503

Li, Q. & Matuana, L.M. (2003). Effectiveness of maleated and acryclic acid-functionalized polyolefin coupling agents for HDPE-wood-flour composites. Journal of Thermoplastic Composite Materials. 16, 551-564; DOI 10.1177/089270503033340.

Martínez-Hernández, A.L., Velasco-Santos, C., De Icaza, M., & Castaño, V.M. (2005a) Microstructural Characterization of Keratin Fibres from Chicken Feathers. International Journal of Environment and Pollution. Vol. 23: pp.162–178. https://doi.org/10.1504/IJEP.2005.006858

Martínez-Hernández, A.L., Velasco-Santos, C., De Icaza, M., & Castaño, V.M. (2005b) Mechanical Properties Evaluation of New Composites with Protein Biofibers Reinforcing Poly (Methyl Methacylate). Polymer, Vol. 46: pp.8233–8238. https://doi.org/10.1016/j.polymer.2005.06.093

Maziero, R., Soares, K., Filho, A. I., Franco, A. R., & Rubio, J. C. C. (2019). Maleated polypropylene as coupling agent for polypropylene composites reinforced with eucalyptus and pinus particles. BioResources, 14(2), 4774-4791. DOI: 10.15376/biores.14.2.4774-4791

Meandro, N. A. (2010). Waste chicken feather as reinforcement in cement-bonded composites. Philippine Journal of Science, 139, 161-166.

Mengeloğlu, F., & Karakuş, K., 2008. Some properties of eucalyptus wood flour filled recycled high density polyethylene polymer-composites. Turkish Journal of Agriculture and Forestry, 32:537–546. https ://doi.org/10.3906/tar-0801-7

Mengeloglu, F., and Karakuş, K. (2012). "Mechanical properties of injection-molded foamed wheat straw filled HDPE biocomposites: The effects of filler loading and coupling agent contents," BioResources 7(3), 3293-3305. DOI: 10.15376/biores.7.3.3293-3305

Mengeloglu, F., Matuana, LM. & King, J. (2000). Effect of impact modifiers on properties of rigid PVC/ wood-fiber composites. Journal of Vinyl and Additive Technology. 6: 153–157. https://doi.org/10.1002/vnl.10244

Meyers, M. A., Chen, P. Y., Lin, A. Y. M., & Seki, Y. (2008). Biological Materials: Structure and Mechanical Properties. Progress in Materials Science, Vol. 53: pp.1–206. https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2007.05.002

Mohanty, A. K., Misra, M., and Drzal, L. T., (2002). "Sustainable bio-composites from renewable resources: Opportunities and challenges in the green materials world," Journal of Polymers and the Environment 10, 19-26

Salhi, S. S. A. B. A. (2012). Development of bio-composites based on polymer matrix and keratin fibres: Contribution to poultry biomass recycling. Materials Science Forum, 237-243.

Shih, J. C. H. (1993). Recent development in poultry waste digestion and feather utilization: A review. Poultry Science 72 (9), 1617–20. doi:10.3382/ps.0721617.

Soubhagya, M., A. Champati, H. K. Popalghat, P. Patel, & Sneha. K. R. (2019). Poultry waste management: an approach for sustainable development. International Journal of Advanced Scientific Research 4 (1):8–14.

Stark, N., & Berger, M. J., (1997). Effect of species and particle size on properties of wood-flour-filled polypropylene composites. Symposium of Functional Fillers for Thermoplastics and Thermosets, San Diego, CA, USA, pp. 1-20.

Subramani, T., Krishnan, S., Ganesan, S. K., & Nagarajan, G. (2014). Investigation of mechanical properties in polyester and phenyl-ester composites reinforced with chicken feather fiber. International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA), 4(12), 93-104.

Summerscales, J., Dissanayake, P. J., Virk, A. S., and Hall, W. (2010). "A review of bast fibres and their composites. Part 1- Fibres as reinforcements," Composites Part A: Applied Science and Manufacturing 41(10), 1329-1335. DOI: 10.1016/j.compositesa.2010.06.001

UL 94, (2021). Tests for Flammability of Plastic Materials for Parts in Devices and Appliances. American National Standard.

Williams, C. M. (2013). Poultry waste management in developing countries. The Role of Poultry in Human Nutrition 46.

Winandy, J. E., Muehl, J. H., Micaels, J. A., & Raina, A. (2014). Potential of chicken feather fibre in Wood mdf Composites. Available online: http://www.fpl.fs.fed.us/documnts/pdf2003/winan03d.pdf (accessed on 4 FEB 2016).

Yang, H.-S., Kim, H.-J., Son, J., Park, H. J., Lee, B. J., & Hwang, T. S. (2004). Rice- husk flour filled polypropylene composites; mechanical and morphological study. Composite Structures, 63, 305-312. DOI: 10.1016/S0263-8223(03)00179-X

Yang, H. S., Kim, H. J., Park, H. J., Lee, B. J., & Hwang, T. S. (2007). Effect of compatibilizing agents on rice-husk flour reinforced polypropylene composites. Composite Structures, 77, 45-55. DOI: 10.1016/j.compstruct.2005.06.005

Yuan, Q., Wu, D., Gotama, J., & Bateman, S. (2008). Wood fiber reinforced polyethylene and polypropylene composites with high modulus and impact strength. Journal of Thermoplastic Composite Materials, 21(3), 195-208. DOI: 10.1177/0892705708089472

Zaini, M. J., Fuad, M. Y. A., Ismail, Z., Mansor, M. S., & Mustafah, J. (1996). The effect of filler content and size on the mechanical properties of polypropylene/oil palm wood flour composites. Polymer International, 40, 51-55. DOI: 10.1002/(SICI)1097-0126(199605)

Zhan, M., & Wool, R.P. (2016). Mechanical properties of composites with chicken feather and glass fibers. Journal of Applied Polymer science. 133, 44013. https://doi.org/10.1002/app.44013

KSÜ Mühendislik Bilimleri Dergisi, 28(2), 2025
Araştırma Makalesi

KSU J Eng Sci, 28(2), 2025
Research Article

Kahramanmaras Sutcu Imam University
Journal of Engineering Sciences

Geliş Tarihi : 06.12.2024
Kabul Tarihi :19.03.2025

Received Date : 06.12.2024
Accepted Date : 19.03.2025

THE EFFECT OF APRICOT FIBRE ADDITION ON THE RHEOLOGICAL PROPERTIES AND MINERAL CONTENT OF PEANUT BUTTER

KAYISI LİFİ İLAVESİNİN YER FISTIĞI EZMESİNİN REOLOJİK ÖZELLİKLERİNE VE MİNERAL MADDE İÇERİĞİNE ETKİSİ

Fatma Gül EVCİL[1] (ORCID: 0000-0001-6697-7656)
Adnan BOZDOĞAN[1*] (ORCID: 0000-0002-3612-5898)

[1]Osmaniye Korkut Ata University, Department of Food Engineering, Osmaniye, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Adnan BOZDOĞAN, bozdogan@osmaniye.edu.tr

ABSTRACT

In this study, the effect of apricot fibre addition at different ratios (0%, 1%, 2%, 4%, 8%, and 16%) on the rheological properties and mineral matter composition of peanut butter was investigated. In terms of rheological properties, peanut butter showed non-Newtonian flow behaviour, and the results were expressed by Ostwald de Waele model. As the amount of apricot fibre increased, the viscosity values in peanut butter generally decreased. In terms of mineral matter, as the amount of apricot fibre increased, the amounts of Fe and Ca in peanut butter increased, while the amounts of K and Mg decreased ($p<0.05$). It can be said that the addition of apricot fiber improves the structure of peanut butter.

Keywords: Peanut butter, apricot fibre, rheology, mineral matter

ÖZET

Bu çalışmada, farklı oranlarda kayısı lifi (%0, %1, %2, %4, %8 ve %16) ilavesinin yer fıstığı ezmelerinin reolojik özelliklerine, mineral madde bileşimi üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Reolojik özellikler bakımından, yer fıstığı ezmeleri Newtonyen olmayan (Non-Newtonian) akış davranışı göstermiş ve sonuçlar Ostwald de Waele modeli ile ifade edilmiştir. Kayısı lifi miktarı arttıkça yer fıstığı ezmelerindeki viskozite değerleri genellikle azalma göstermiştir. Mineral madde açısından, kayısı lifi miktarı arttıkça, yer fıstığı ezmelerindeki Fe, Ca miktarları artış göstermiş iken, K ve Mg miktarlarında azalma olduğu saptanmıştır($p<0.05$). Yer fıstığı ezmesine kayısı lifi ilavesinin yapısını iyileştirdiği söylenebilir.

Anahtar Kelimeler: Yer fıstığı ezmesi, kayısı lifi, reoloji, mineral madde

ToCite: EVCİL, F.G., & BOZDOĞAN, A., (2024). INVESTIGATION OF THE EFFECT OF APRICOT FIBRE ADDITION ON THE RHEOLOGICAL PROPERTIES AND MINERAL CONTENT OF PEANUT BUTTER. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 28(2), 702-712.

INTRODUCTION

Peanuts (Arachis hypogaea) are a valuable source of nutrition, rich in monounsaturated fats, dietary fiber, proteins, minerals, and antioxidants (Esche et al., 2013). Incorporating peanuts into a balanced diet can help lower the chances of developing coronary heart disease, cancer, and Alzheimer's disease (Shin et al., 2009).

Peanut butter is typically made by roasting and grinding raw peanuts, resulting in its unique taste and flavor. It offers numerous health benefits (Hashemian et al., 2017; Gong et al., 2018). The composition of peanut butter consists of solid particles dispersed in a continuous oil phase, forming a thick suspension (Norazatul et al., 2016). The quality of the peanuts used in production plays a crucial role in determining the overall quality of the final peanut butter product.

Peanut butter is a healthy food, thanks to its nutrient-dense composition. However, to boost its popularity, improvements in its composition, functional properties, and overall quality are necessary.

Apricot (Prunus armeniaca L.) is a fruit belonging to the Prunus genus within the Rosaceae family of the Rosales order. It is enjoyed either fresh or processed into various products, such as dried apricots, fruit juice, nectar, jelly, jam, and extruded snacks (Özbek, 1978).

Apricot is rich in sugars, bioactive phytochemicals, fiber, minerals, and vitamins, including A, C, thiamine, riboflavin, niacin, and pantothenic acid. Among its phytochemical content, phenolic compounds, carotenoids, and antioxidants are particularly significant due to their biological value (Hacıseferoğulları et al., 2007; Ali et al., 2011).

Dietary fibers should be consumed regularly for optimal health. Initially, their significance for health was not widely recognized, but recent understanding has established them as a key component of a healthy diet. Studies conducted in recent years have highlighted the vital role of fibers in human health, leading to an increased demand for their inclusion in the production of functional foods. In response, several high-fiber formulated foods have been developed to harness the functional benefits of dietary fiber (Herbafood, 2002). For dietary fiber to be accepted in a food product, it must effectively function as a beneficial food ingredient (Jaime et al., 2002).

Fruit fibers are consumed less frequently than cereal fibers. However, fruit fiber offers superior quality, characterized by higher soluble fiber content, better water and fat retention capacities, and fewer calories compared to cereal fibers (Larrauri, 1999).

Most studies involving apricots have focused on their use in products such as bread, cakes, crackers, cookies, and yogurt (Karaca et al., 2019; Ağırbaş et al., 2021; Nisar et al., 2021; Yao et al., 2021). No research has been found in the literature regarding the production of peanut butter with added apricot fiber.

Determining the rheological properties of peanut butter is essential for understanding its structure, consistency, and overall quality. Rheology is the scientific field that focuses on the deformation and flow of materials. The mechanical properties that lead to deformation and flow under applied forces are referred to as rheological properties. In the food industry, the rheological characteristics of food products are crucial for designing equipment such as pipelines, pumps, extruders, mixers, coating machines, heat exchangers, and homogenizers, as well as for optimizing processes associated with these machines (Davulcu, 2012; Bozdogan, 2015; Bozdogan, 2017; Çavdır et al., 2020).

This study investigated the effect of incorporating apricot fiber at different levels on the mineral content and rheological properties of peanut butter.

MATERIAL AND METHOD

Material

Raw material

Apricots purchased from the fruit and vegetable market in Osmaniye, Türkiye, were used in fibre production. Apricots were grown in Mersin Mut region. The peanuts used in the production of peanut butter were obtained from Bağdatlılar Trading Dried Fruits and Nuts Industry Co. Ltd. in Osmaniye, Türkiye.

Methods

In the production of peanut butter, the peanut crushing machine of Bağdatlılar Trading Dried Fruits and Nuts Industry Co. Ltd. (XUANHUA, China) was used. In apricot fibre production, an oven (ON-O2G Oven) was used for apricot drying. The size reduction of dried apricots was carried out with a blender (Arçelik, Turkey). Rheological measurements were carried out using a Thermo Scientific Viscotester (Haake GmbH, Karlsruhe, Germany) rheometer. pH values were measured with Orion Star™ A 211 pH Benchtop Meter digital pH meter (Inolab, Weilhem, Germany). Konica Minolta colorimeter (Chroma Meter CR-400, Japan) was used for colour measurement.

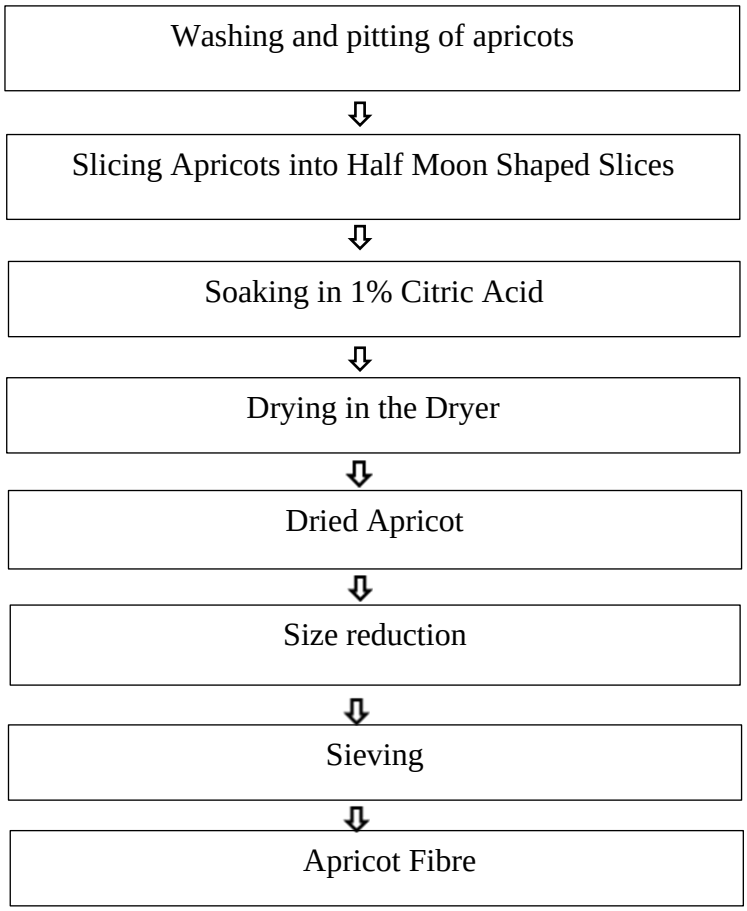


Figure 1. Apricot Fibre Production Flow Chart

Preparation of Apricot Fibre

Apricot fibre production was carried out in the laboratory of Osmaniye Korkut Ata University, Department of Food Engineering. Fresh 10 kg apricots from Mut, Mersin, Türkiye region obtained from Osmaniye, Türkiye Fruit and Vegetable market were washed with potable water and pitted. The apricots were sliced longitudinally into half moon shapes. Apricot slices were soaked in water containing citric acid (1%, w/v) to prevent browning. Apricot slices removed from the water containing citric acid were placed on aluminum trays and left at room temperature to remove moisture. For drying, they were kept in an oven at 66 °C for 90 hours. The dried apricot slices were blended and pulverized. The coarse particles were sieved to remove and retained, and apricot fibres were obtained.

Addition of Apricot Fibre to Peanut Butter

The inner peanuts were roasted in an oven at 145°C with 1% moisture content. Afterwards, membrane peeling and selection (foreign matter, unsuitable peanuts) were performed. As can be seen in Table 1, apricot fibre was added to the selected peanuts at the rates of 1%, 2%, 4%, 8%, and 16%, respectively, and these mixtures were drawn in the peanut butter production machine. In addition, peanut butter without added apricot fibre was also produced as a control product. The peanut butters were filled into 3 kg glass jars and stored in the refrigerator until analysed.

Table 1. Amounts of Apricot Fibre Added to Peanut Butter

Raw materials	Control	1%	2%	4%	8%	16%
Peanut (g)	3000	2970	2940	2880	2760	2520
Apricot Fibre (g)	-	30	60	120	240	480

Analyses of Apricot Fibre Peanut Butter

The analyses of the samples were carried out at Osmaniye Korkut Ata University Food Engineering Department and the Central Laboratory of the University.

Rheological Analyses

Rheological analysis was performed using a Thermo Scientific Viscotester rheometer (Haake GmbH, Karlsruhe, Germany). This controlled stress rheometer was equipped with a TCP/P Peltier temperature control unit and a cone-and-plate sensor (diameter = 3.5 cm, angle = 2º). Rheological measurements of peanut butter with added apricot fiber were conducted at shear rates ranging from 0 to 100 1/s. Shear stress values were plotted against shear rate, and viscosity values were also measured in relation to shear rate. Additionally, the effect of temperature on the rheological properties of peanut butter was analyzed by examining shear stress as a function of shear rate.

Mineral Matter Analysis

Mineral matter (Cu, Mn, Fe, Zn, K, Na, Ca, Mg, P) was analyzed by an atomic absorption device (Agilent 250 FS, USA) according to AOAC (Anon, 1990).

Statistical Analysis

Analysis of variance (ANOVA) was conducted on the mineral matter results, and differences between the groups were assessed using the Duncan multiple comparison test. The statistical analysis was performed using the SPSS 18.0 software (SPSS Inc., Chicago, IL, USA). Additionally, rheological data were analyzed using the non-linear regression method.

RESEARCH FINDINGS AND DISCUSSION

Mineral Composition of Peanut Butter

Peanuts serve as a valuable dietary source of macro minerals, which are essential nutrients required by the body in amounts exceeding 100 mg per day (Derise et al., 1974; Settaluri et al., 2012).
The results of the mineral composition of apricot fibre added peanut butters are given in Table 2.

AF: Apricot Fibre. The difference between the values shown with different letters from left to right in the same row is statistically significant ($p<0.05$).

The mineral composition of peanut butters varied between 0.72-0.93 mg/kg copper, 11.36-14 mg/kg manganese, 25.82-49.62 mg/kg iron, 34.38-39.88 mg/kg zinc, 4652.5-13517.5 mg/kg potassium, 205-342.5 mg/kg sodium, 593.5- 852.5 mg/kg calcium, 1253.5-1798.5 mg/kg magnesium and 2913.5-3325 mg/kg phosphorus.

Cu, Mn, Zn, Na, and P minerals were found to be statistically insignificant ($p>0.05$). In terms of Fe, K, and Ca minerals, the differences between the peanut butters were found to be significant ($p<0.05$). It was determined that Fe, K, and Ca minerals increased as the amount of apricot fibre increased. In terms of Mg, it was determined that the difference between peanut butters was statistically significant ($p<0.05$). It was determined that Mg minerals decreased as the amount of apricot fibre increased.
Iron plays a crucial role in the production of heme in blood and facilitates oxygen transport throughout the body. Potassium, abundant in peanuts, helps maintain electrolyte balance while supporting muscle and neurological functions. Calcium is essential for the development of bones and teeth, as well as for protein synthesis, which is vital for tissue growth and repair (Settaluri et al., 2012)

Table 2. Mineral Composition of Peanut Butters

	Peanut Butter					
Mineral matter (mg/kg)	**Control**	**1% AF**	**2% AF**	**4% AF**	**8% AF**	**16% AF**
Cu	0.72±0.1	0.92±0.2	0.79±0.2	0.84±0.1	0.85±0.3	0.93±0.6
Mn	12.75±0.7	14.00±2.8	12.88±0.2	12.20±1.2	12.75±1	11.36±0.3
Fe	26.12^{c}±5.8	26.75^{c}±3.8	25.82^{c}±1.5	33.00^{b}±2.1	33.00^{b}±0.0	49.62^{a}±0.2
Zn	37.38±1.9	39.88±4.7	36.75±0.4	34.63±3	36.00±1	34.38±0.5
K	4652.50^{c}±166	9400.00^{b}±1944	7510.00^{b}±459	12955.00^{a}±226	13195.00^{a}±113	13517.50^{a}±116
Na	220.00±49	218.50±11	233.50±3.5	205.00±28	245.00±21	342.50±67
Ca	593.50^{c}±32	598.50^{c}±39	653.50^{b}±11	623.50^{b}±4	780.00^{ab}±56	852.50^{a}±53
Mg	1698.50^{a}±82	1798.50^{a}±215	1712.50^{a}±4	1253.50^{b}±46	1330.00^{b}±64	1268.50^{b}±39
P	3138.50±124	3325.00±36	2925.00±35	2913.50±512	3250.00±141	3288.50±18

The limits determined by USDA (2024) are average values per 100 g and are shown as copper 0.47 mg/kg, manganese 14.66 mg/kg, iron 18.70 mg/kg, zinc 29.10 mg/kg, potassium 6490 mg/kg, sodium 170 mg/kg, calcium 430 mg/kg, magnesium 1540 mg/kg and phosphorus 3850 mg/kg. Copper, manganese, iron, zinc, potassium, sodium, and calcium values of apricot fibre added peanut butter were found to be higher than the specified limits. The phosphorus value remained below the limit.

Shibli, et al. (2019) determined that iron 16.5-19.6 mg/kg, zinc 15.1-19.7 mg/kg, potassium 6611.4-8208.6 mg/kg, sodium 6031.6-7908.7 mg/kg, calcium 580.6-644.5 mg/kg, magnesium -2033 mg/kg and phosphorus 2451.1-2644.6 mg/kg in peanut butter obtained from different peanuts. When compared with the mineral compositions of apricot fibre added peanut butters, it was observed that the values in the literature were higher than the values of this study. This may be due to the variety of peanuts and the soil and climate structure of the region where peanuts are grown.

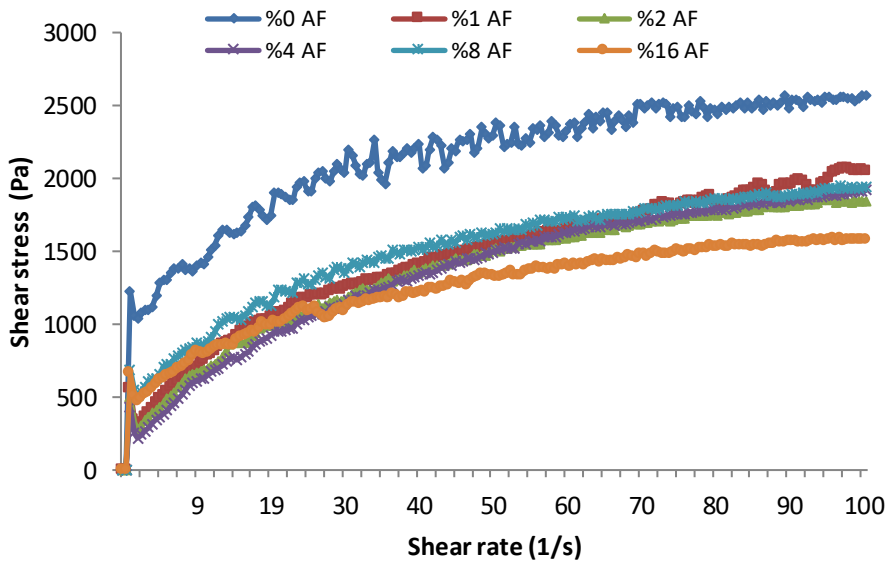


Figure 2. Shear Stress-Shear Rate Variation of Peanut Butter (20°C)

Rheological Properties of Peanut Butter

The rheological properties of peanut butter obtained by adding apricot fibre at different ratios (1%, 2%, 4%, 8%, and 16%) were investigated at shear rates of 0-100 1/s. The shear stress values of peanut butter samples versus shear rate were plotted, and the graphs are given in Figure 2, Figure 4, and Figure 6.

Shear stress indicates that a minimum stress is required to achieve flow. The presence of shear stress in apricot fibre added peanut butter products is due to the large number of peanut and apricot fibre particles in the oil dispersion in the suspension. Therefore, the viscosity decreased as the amount of apricot fibre increased.

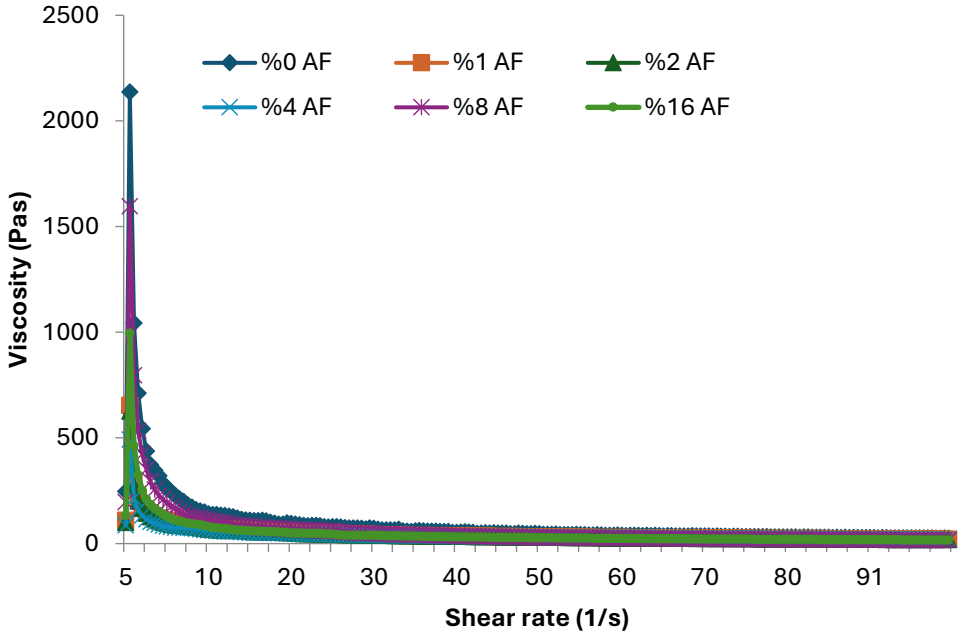


Figure 3. Viscosity-Shear Rate Variation of Peanut Butters (20°C)

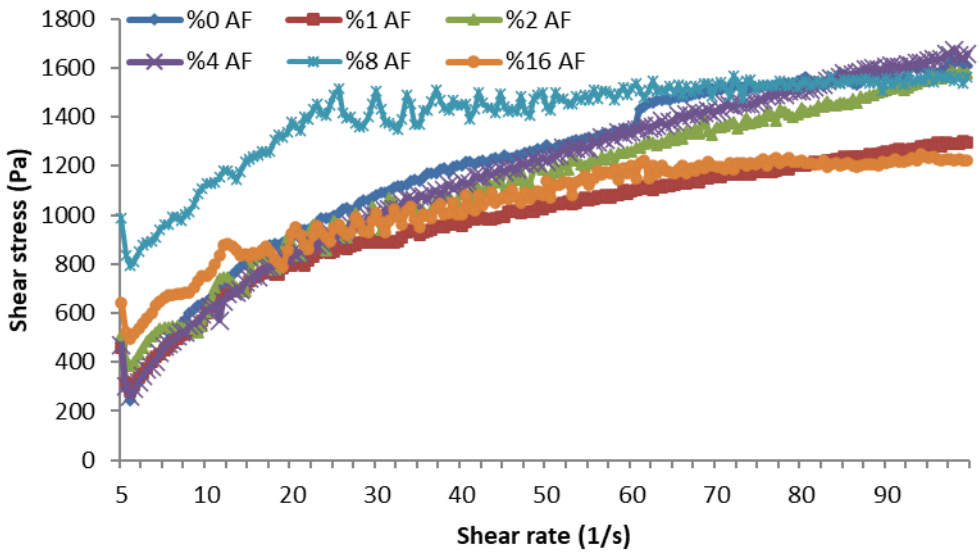


Figure 4. Shear Stress-Shear Rate Variation of Peanut Butter (30°C)

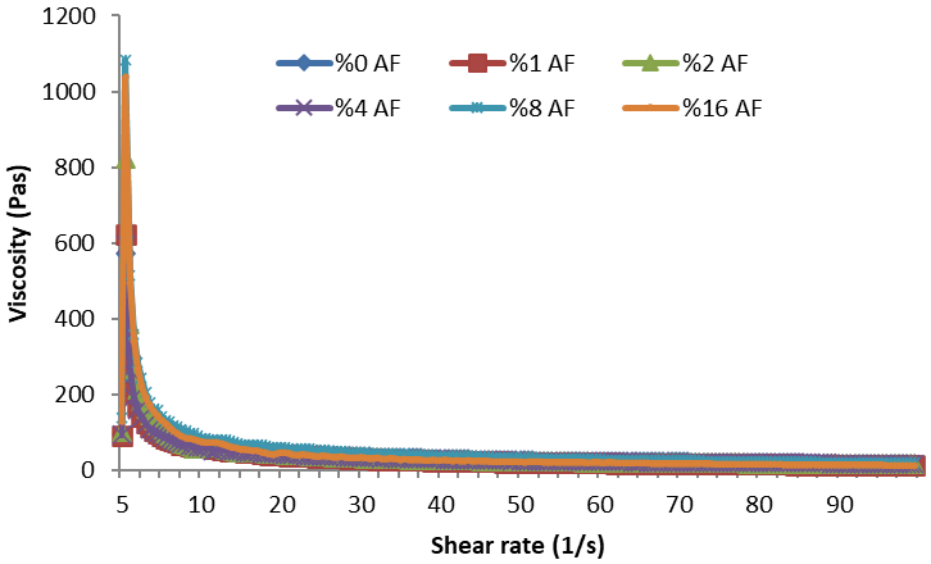


Figure 5. Viscosity-Shear Rate Variation of Peanut Butters (30°C)

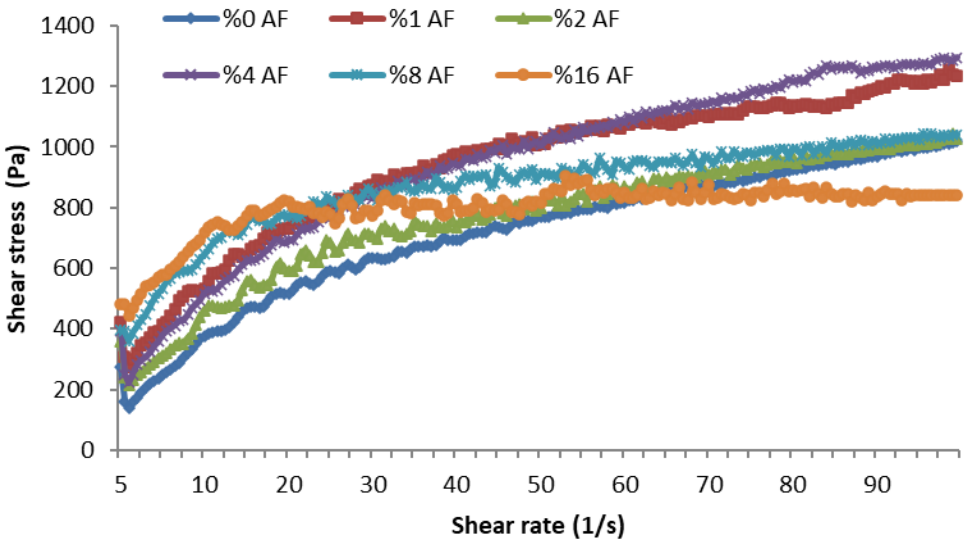


Figure 6. Shear Stress-Shear Rate Variation of Peanut Butter (40°C)

The shear rate-shear stress values of peanut butter with added apricot fiber were determined to demonstrate non-Newtonian flow behavior, as illustrated in Figure 2, Figure 4, and Figure 6.

The shear rate-viscosity values of peanut butter were plotted on graphs, as shown in Figure 3, Figure 5, and Figure 7. It was observed that as the shear rate increased, the viscosity values decreased. These graphs confirmed that the apricot fiber-added peanut butter exhibited non-Newtonian flow characteristics.

Sun and Gunasekaran (2009), Li et al. (2014), and Yu et al. (2021) observed that peanut butter exhibits non-Newtonian pseudoplastic flow behavior in their rheological studies, with calculations made using the Herschel-Bulkley model. Similarly, a study by Tanrıkulu et al. (2022) also concluded that peanut butter demonstrated non-Newtonian pseudoplastic flow behavior.

Ostwald de Waele model $\tau=k\gamma^n$ successfully explains the rheological data of apricot fibre added peanut butter samples. The Ostwald de Waele model values of the peanut butter samples are given in Table 3.

Shear stress (τ) : Pa
Shear rate (γ) : 1/s
Consistency coefficient (k): Pa sn

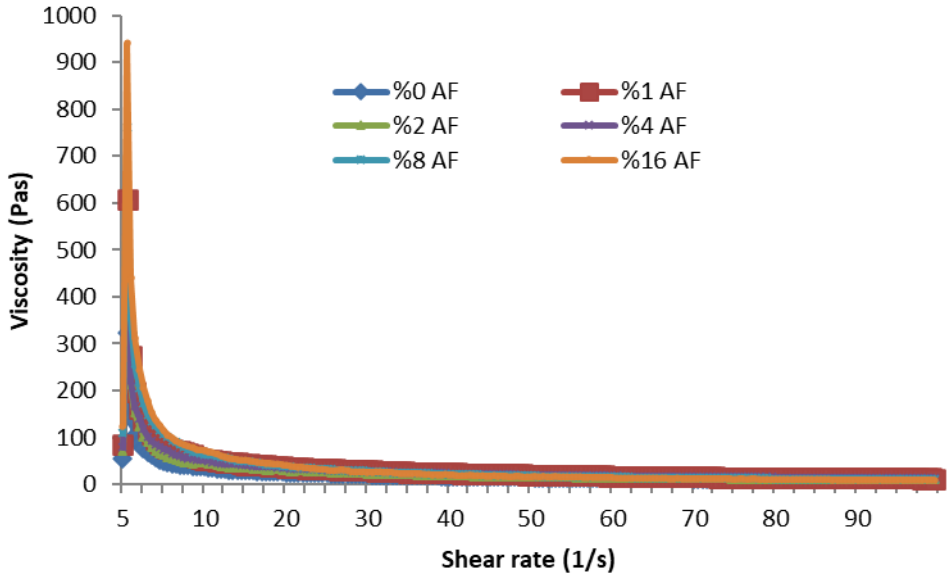


Figure 7. Viscosity-Shear Rate Variation of Peanut Butters (40°C)

As the amount of apricot fiber added to peanut butter increased, the consistency coefficient (k) values decreased up to the sample with 4% AF addition. Fluctuations were observed starting from the sample with 8% AF addition. The highest consistency coefficient value was determined in the sample without apricot fiber addition (control). Flow index (n) values varied between 0.1079-0.4628.

Davis et al. (2007) found flow index values between 0.66-0.99 in a rheological study on peanut butter. In the study conducted by Li et al. (2014), the flow index values of sorbitol added peanut butter varied between 0.55-1.17. Compared to these studies, the flow index values of apricot fibre added peanut butter were found to be high.

As shown in the shear rate-viscosity graphs in Figure 3, Figure 5, and Figure 7, which illustrate the effect of temperature on the rheological properties of peanut butter, it was observed that viscosity decreased with an increase in temperature. Furthermore, it was determined that both the viscosity coefficient and flow index values decreased as the temperature increased (Table 3).

This suggests that as the temperature increases, the optimized emulsifying agent mixture loses its functionality, leading to a significant degradation of the structure. A similar study on the effect of temperature and fat content on the apparent viscosity of coconut milk samples found that an increase in fat content reduced the impact of temperature on changes in apparent viscosity (Simuang et al., 2004).

Taghizadeh et al. (2009) explained the flow behaviour with Herschel-Bulkley model in a time independent rheological study on peanut butter. At 25°C, the flow behaviour indices ranged from 0.517 to 0.792, and at 45°C, the flow behaviour indices ranged from 0.401 to 0.806, respectively, indicating that all samples exhibited non-Newtonian pseudoplastic behaviour. When compared with the literature and the present study, the flow index of apricot fibre added peanut butters remained low.

CONCLUSIONS

The impact of varying ratios of apricot fiber (0%, 1%, 2%, 4%, 8%, and 16%) on the mineral and rheological properties of peanut butter was investigated. As the amount of apricot fibre increased, the amounts of Fe and Ca in peanut butter increased. However, it was found that the amounts of K and Mg decreased. In terms of rheological

properties, it was determined that the viscosity of the product decreased as the apricot fibre content increased. Peanut butter showed non-Newtonian pseudoplastic flow behaviour, and the results were expressed by Ostwald de Waele model. As a result, the addition of apricot fiber improved the texture and consistency of peanut butter.

Table 3. Values of the Ostwald de Waele Model or Peanut Butter

Peanut butter	*k* (Pa·s^n)	n	R^2
Control 20°C	940.9	0.2225	0.9855
Control 30°C	284.6	0.3843	0.995
Control 40°C	143.9	0.4248	0.9983
1% AF 20°C	303	0.4147	0.9977
1% AF 30°C	292.2	0.3235	0.9972
1% AF 40°C	277.3	0.3266	0.9932
2% AF 20°C	293.7	0.4088	0.995
2% AF 30°C	276.2	0.3744	0.9935
2% AF 40°C	203.6	0.3534	0.9948
4% AF 20°C	236.8	0.4628	0.995
4% AF 30°C	228.3	0.4315	0.9991
4% AF 40°C	215.3	0.3938	0.9976
8% AF 20°C	461.7	0.3174	0.9946
8% AF 30°C	432.3	0.2429	0.9564
8% AF 40°C	413.1	0.2014	0.9889
16% AF 20°C	411	0.2974	0.9966
16% AF 30°C	467.2	0.2171	0.9858
16% AF 40°C	538.8	0.1079	0.9087

AF: Apricot Fibre

REFERENCES

Ağırbaş, H. E. T., Yavuz-Düzgün, M., & Özçelik, B. (2021). The effect of fruit seed flours on Farinograph characteristics of composite dough and shelf life of cake products. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 1-12. https://doi.org/10.1007/s11694-021-00961-3

Ali, S., Masud, T., & Abbasi, K. S. (2011). Physico-chemical characteristics of apricot (Prunus armeniaca L.) grown in Northern Areas of Pakistan. *Scientia Horticulturae*, 130(2), 386-392. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2011.05.040

Anon. (1990). Official methods of analysis of the association of official analytical chemists, 15th ed. (Association of Official Analytical Chemists, Washington DC).

Bozdogan, A. (2015). Viscosity behavior of bitter orange (Citrus aurantium) juice as affected by temperature and concentration. *CyTA-Journal of Food*, *13*(4), 535-540. https://doi.org/10.1080/19476337.2015.1012120

Bozdogan, A. (2017). Viscosity and physicochemical properties of cornelian cherry (Cornus mas L.) concentrate. *Journal of Food Measurement and Characterization*, *11*(3), 1326-1332. https://doi.org/10.1007/s11694-017-9510-9

Çavdir, E., Akben, S. B., & Bozdoğan, A. (2020). Modeling and analyzing rheological behavior of sour lemon juice concentrate using image processing methods. *Journal of Texture Studies*, *51*(5), 789-799. https://doi.org/10.1111/jtxs.12537

Davis, J. P., Gharst, G., & Sanders, T. H. (2007). Some rheological properties of aqueous peanut flour dispersions. Journal of *Texture Studies*, 38(2), 253-272. https://doi.org/10.1111/j.1745-4603.2007.00097.x

Davulcu, B. (2012). Haşhaş tohumu ezmesinin reolojik özellikleri, Yüksek Lisans tezi, Denizli Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Esche, R., Müller, L., & Engel, K. H. (2013). Online LC-GC-based analysis of minor lipids in various tree nuts and peanuts. *Journal of agricultural and food chemistry*, 61(47), 11636-11644. https://doi.org/10.1021/jf403900q

Gong, A., Shi, A., Liu, H., Yu, H., Liu, L., & Lin, W. (2018). Relationship of chemical properties of different peanut varieties to peanut butter storage stability. *Journal of Integrative Agriculture*, 17(5), 1003–1010. https://doi.org/10.1016/S2095-3119(18)61919-7

Hacıseferoğulları, H., Gezer, I., Özcan, M. M., & Asma, B., (2007). Post-harvest chemical and physical–mechanical properties of some apricot varieties cultivated in Turkey. *Journal of Food Engineering*, 79(1), 364-373. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2006.02.003

Hashemian, M., Murphy, G., Etemadi, A., Dawsey, S. M., Liao, & L. M., Abnet, C. C. (2017). Nut and peanut butter consumption and the risk of esophageal and gastric cancer subtypes. *American Journal of Clinical Nutrition*, 106(3), 858–864, 201. https://doi.org/10.3945/ajcn.117.159467

Herbafood. (2002), Herbacel AQ Plus. Apple and citrus fibre. Available from www.herbafood.de/eaqplus.pdf. Date November 2021.

Jaime, E., Molla, A., Fernández, M., Martín-Cabrejas, F., & LópezAndreu, R. (2002). Soğan (*Allium cepa L.*) dokularının yapısal karbonhidrat farklılıkları ve potansiyel diyet lifi kaynağı. *Tarım ve Gıda Kimyası Dergisi*, 50, s. 122 – 128.

Karaca, O. B., Güzeler, N., Tangüler, H., Yaşar, K., & Akın, M. B. (2019). Effects of apricot fibre on the physicochemical characteristics, the sensory properties and bacterial viability of nonfat probiotic yoghurts. *Foods*, 8(1), 33. https://doi.org/10.3390/foods8010033

Larrauri, J. (1999). Meyve yan ürünlerinden yüksek diyet lifli tozların hazırlanmasında yeni yaklaşımlar, Gıda Bilimi ve Teknolojisinde Eğilimler, 10, 3-8.

Li, L., Huan, Y., & Shi, C. (2014). Effect of sorbitol on rheological, textural and microstructural characteristics of peanut butter. Food Science and Technology Research, 20(4), 739-747. https://doi.org/10.3136/fstr.20.739

Nisar, A., Jan, N., Gull, A., Masoodi, F. A., Amin, T., Bashir, O., & Wani, S. M. (2021). Effect of the incorporation of apricot pulp powder on physicochemical, functional, rheological and nutraceutical properties of wheat flour based cookies. *British Food Journal*, 123(11), 3776-3788. https://doi.org/10.1108/BFJ-11-2020-1000

Norazatul Hanım, M. R., Chin, N. L., & Yusof, Y. A. (2016). Effects of grinding time on rheological, textural and physical properties of natural peanut butter stored at different temperatures. *Journal of Texture Studies*, 47(2), 131-141. https://doi.org/10.1111/jtxs.12167

Özbek, S. (1978). Özel Bahçe Bitkileri. Ç.Ü. Ziraat Fakültesi no. 128, Adana, Türkiye.

Settaluri, V. S., Kandala, C. V. K., Puppala, N., & Sundaram, J. (2012). Peanuts and their nutritional aspects review. *Food and Nutrution Science*, 3:1644–1650. https://doi.org/10.4236/fns.2012.312215

Shibli, S., Siddique, F., Raza, S., Ahsan, Z., & Raza, I. (2019). Chemical composition and sensory analysis of peanut butter from indigenous peanut cultivars of Pakistan. *Pakistan Journal of Agricultural Research*, 32(1), 159. http://dx.doi.org/10.17582/journal.pjar/2019/32.1.159.169

Shin, E. C., Huang, Y. Z., Pegg, R. B., Phillips, R. D., & Eitenmiller, R. R., (2009). Commercial runner peanut cultivars in the United States: Tocopherol composition. *Journal of agricultural and food chemistry*, 57(21), 10289-10295. https://doi.org/10.1021/jf9029546

Simuang, J., Chiewchan, N., & Tansakul, A. (2004). Effects of fat content and temperature on the apparent viscosity of coconut milk. *Journal of Food Engineering*, 64(2), 193-197. https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2003.09.032

Sun, A., & Gunasekaran, S. (2009). Measuring rheological characteristics and spreadability of soft foods using a modified squeeze-flow apparatus. *Journal of texture studies*, 40(3), 275-287. https://doi.org/10.1111/j.1745-4603.2009.00181.x

Taghizadeh, M., & Razavi, S. M. A. (2009). Modeling time-independent rheological behavior of pistachio butter. *International Journal of food properties*, 12(2), 331-340. https://doi.org/10.1080/10942910701772048

Tanrikulu, E., Bozdogan, A., & Durmaz, G. (2022). An analysis of the rheological properties of carob molassesand carob powder-added peanut butter. *Journal of Raw Materials to Processed Foods*, 3(2), 55-62. https://doi.org/10.57252/jrpfoods.2022.8

USDA. (2024). Nutrition facts, commodity peanut butter, smooth. Retrieved 15.11.2024 from http://www.tititudorancea.com/z/nutrition_facts_usda_commodity_peanut_butter_smooth.htm

Yao, J. L., Zhang, Q. A., & Liu, M. J. (2021). Utilization of apricot kernel skins by ultrasonic treatment of the dough to produce a bread with better flavor and good shelf life. *LWT - Food Science and Technology*, 145, 111545. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.111545

Yu, H., Liu, H., Erasmus, S. W., Zhao, S., Wang, Q., & Ruth, S. M. (2021). An explorative study on the relationships between the quality traits of peanut varieties and their peanut butters. *LWT - Food Science and Technology*, 151, 112068. https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112068

KSÜ Mühendislik Bilimleri Dergisi, 28(2),2025
Araştırma Makalesi

KSU J Eng Sci, 28(2),2025
Research Article

Kahramanmaras Sutcu Imam University
Journal of Engineering Sciences

Geliş Tarihi : 23.12.2024
Kabul Tarihi :03.02.2025

Received Date : 23.12.2024
Accepted Date : 03.02.2025

HİBRİT ÜRETİM SİSTEMLERİNDE KARŞILAŞTIRMALI MALİYET ANALİZİ

COMPARATIVE COST ANALYSIS IN HYBRID GENERATION SYSTEMS

Rümeysa Aybüke KORKMAZ[1*] (ORCID: 0009-0001-3768-7892)
Ahmet Serdar YILMAZ[1] (ORCID: 0000-0002-5735-3857)

[1] Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Kahramanmaraş, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Rümeysa Aybüke KORKMAZ, korkmazrumeysaaybuke@gmail.com

ÖZET

Dünya da nüfus artışı ve sanayi sektörünün genişlemesi, merkezi şebekeye yük olan elektrik talebinin sürekli artmasının sebepleridir. Yenilenemeyen enerji kaynaklarının çevreye olumsuz etkileri ve rezervlerin sınırlı olması sebebi ile yenilenebilir enerji kaynakları sera gazı emisyonunu azalttığı için güvenilir, düşük maliyetli bir enerji kaynağı haline gelmiştir. Bu çalışmanın temel amacı, Türkiye'nin Kahramanmaraş ilinde seçilen bölgenin elektrik ihtiyacının karşılanması 2 tane senaryo da hibrit enerji sistemi tasarımı yapılmıştır. Bu sistemde Türkiye Kahramanmaraş ili için gerçek verilere dayanan Yenilenebilir Enerjide Hibrit Optimizasyon Modeli (HOMER) yazılımı kullanılmıştır. HOMER Pro yazılımı, üretim sistemi için sera gazı karbon emisyonunu azaltmak amacıyla çeşitli durumlar için net bugünkü maliyeti ve enerji birim maliyetini azaltır. Ayrıca, hassasiyet parametre sonuçları ve optimizasyon sonuçları, güneş ışınımı, rüzgar hızı ve yenilenemeyen girdiler gibi girdi parametrelerinden simülasyon sonuçları elde edilir. Simülasyon sonuçları, sistemin performansını karşılaştırır ve sistemin net bugünkü maliyet, enerji maliyeti ve enerjinin seviyelendirilmiş maliyetini azaltacak olan hibrit enerji sistemlerinin uygun kombinasyonunu doğruladı.

Anahtar Kelimeler: Hibrit enerji sistemleri, Enerji ekonomisi, HOMERpro.

ABSTRACT

Population growth and the expansion of the industrial sector in the world are the reasons for the constantly increasing demand for electricity, which puts a burden on the central grid. Due to the negative effects of non-renewable energy sources on the environment and limited reserves, renewable energy sources have become a reliable, low-cost energy source as they reduce greenhouse gas emissions. The main purpose of this study is to meet the electricity needs of the selected region in Kahramanmaraş province of Turkey. A hybrid energy system design has been made in 2 scenarios. In this system, Hybrid Optimization Model in Renewable Energy (HOMER) software, based on real data for Kahramanmaraş province of Turkey, was used. HOMER Pro software reduces the net present cost and unit cost of energy for various cases to reduce the greenhouse gas carbon emission for the production system. Additionally, sensitivity parameter results and optimization results are obtained from simulation results from input parameters such as solar irradiance, wind speed, and non-renewable inputs. Simulation results compare the performance of the system and confirm the appropriate combination of hybrid energy systems that will reduce the net present cost , cost of energy and levelized cost of energy of the system.

Keywords: Hybrid energy systems, Energy economy, HOMERpro.

ToCite: KORKMAZ, R.A., & YILMAZ, A.S., (2025). HİBRİT ÜRETİM SİSTEMLERİNDE KARŞILAŞTIRMALI MALİYET ANALİZİ. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 28(2), 713-720.

GİRİŞ

Fosil yakıtların tükenmesi, enerji güvenliği ve iklim değişikliği konusunda artan endişeler yenilenebilir enerji kaynakları arayışına yol açmıştır. Artan enerji talebini karşılamak için karbon emisyonunun azaltılması için yenilenebilir enerji kaynakları kullanılmaya başlanmıştır. Hibrit enerji santralleri, birden fazla bağlantı noktasına sahip olan ve yenilenebilir enerjiyi elektrik enerjisine dönüştüren sistemlerle donatılmış enerji santralleridir.

Literatür çalışmalarında, rüzgar enerjisi ve güneş enerjisini verimli ve ekonomik bir şekilde kullanmak için hibrit yenilenebilir enerji santrallerini optimize etmek gereklidir. Yenilenebilir enerji kaynakları ve fotovoltaik paneller, rüzgar türbinleri, piller, dönüştürücüler, elektrolizörler ve hidrojen tanklarının ilişkili maliyetleri göz önünde bulundurulmuş rüzgar-fotovoltaik şebeke dışı sistemlerinin tekno-ekonomik analizini gerçekleştirmişlerdir. Sistem, hidrojen yakıt ikmal istasyonu için hidrojen ve elektrokoagülasyon atık su arıtma reaktörü için elektrik sağlamaktadır. Elde edilen sonuçlar ile önerilen sistemin Çek Cumhuriyeti'ndeki endüstriyel veya izole topluluklarda su arıtımı ve yeşil hidrojen tedariki için uygunluğunu kanıtlamışlardır (Rizk-Allah vd., 2024).

Güneş, rüzgar ve dizel jeneratörleri içeren kaynaklar dikkate alınmış ve piller, yakıt hücreleri ve hidrojen depolama gibi depolama yöntemleri elektrik üretimi, maliyet ve emisyonlar açısından değerlendirilmiştir. Bulgular, Kayseri'deki yenilenebilir enerji sistemleri için optimum çözümün güneş, rüzgar, dizel jeneratör, pil ve hidrojen depolamayı içeren hibrit bir sistem olduğunu göstermiştir. Bu hibrit sistem en ekonomik olanıdır ve enerji maliyeti 0,376 $/kWh'dir (Akarsu vd., 2022).

Çalışmalarında kurulu güç kapasiteleri 5-50 kW arasında değişen 10 adet hibrit enerji sistemi senaryo için tasarım yapmışlardır. Senaryolar oluşturulurken güneş panelleri ve rüzgâr türbinlerinin kurulu gücü dikkate alınmış her senaryo için uygun seviyede güneş ve rüzgâr enerjisi seçmişlerdir. Sistemlerinde güneş paneli tarafından üretilen doğru akımı alternatif akıma dönüştürmek için sistem voltajı ve akımına uygun invertörler kullanmışlardır. Şebekeye bağlı durumlarda kullanılan rüzgâr türbinleri ise yapılarında invertör bulunduğundan başka bileşenler kullanılmadan doğrudan şebekeye bağlanabilir. Rüzgâr türbininden üretilen enerji hesaplanırken; Balıkesir'in İli rüzgâr hızı ölçümleri kullanmışlardır. Senaryo tasarımlarında üretilen hibrit enerji değerlerini hesaplarken özellikle sistem bileşenlerinin verimi dikkate almışlardır. Hibrit enerji sisteminin kurulu gücü arttıkça üretilen enerjinin de arttığı gözlemlemişlerdir (Atik vd., 2022).

Çalışmalarında, Şebeke Güç Fiyatı (GPP) ve Şebeke Geri Satış Fiyatı'nın (GSP) bu kaynaklara olan eğilimi nasıl etkilediğini araştırmaktadırlar. Özellikle, yüksek GPP ve GSP fiyatları, yenilenebilir enerji yatırımcıları için finansal kârlarla sonuçlanarak onları bu alana yatırım yapmaya teşvik etmektedir (Halmous vd., 2024).

Rana ve arkadaşları, daha verimli ve maliyet etkin bir simülasyon tabanlı çalışma sağlayarak enerji ticareti sektörünün boşluğunu doldurur. Sonuçlar, önerilen sistemin %22 daha düşük net bugünkü maliyete, %66 daha düşük dengelenmiş elektrik maliyetine, %25,5 daha düşük işletme ve bakım maliyetine ve %4,36 daha düşük başlangıç maliyetine sahip olduğunu göstermişlerdir (Rana vd., 2024).

Yılmaz ve arkadaşları, İzmir ilinde bulunan endüstriyel bölgenin elektrik ihtiyacının karşılanması için çalışmalarında şebeke bağlantılı hibrit enerji sistemi tasarımı yapılmıştır. Elektrik tüketiminden kaynaklanan yıllık emisyon değerleri %82 azaltılmışlardır (Yılmaz vd., 2023).

Çalışmalarında, küçük bir otelin enerji gereksinimlerini karşılayan belirli bir Casablanca sahası için geliştirilmiş bir mikro şebeke mimarisini ve bir vaka çalışması örneğini göstermişlerdir. Tasarlanmış iki model, şebekeye bağlı bir sistem ve şebekeden bağımsız bir sistem, her biri 2117,93 kWh/gün yük varsayımı kullanılarak incelenme yapılmıştır. Hibrit konfigürasyonunun 243,55 kg/yıl CO_2 emisyonu bu sistemi aynı zamanda çevre dostu hale getirmişlerdir. (Kouihi vd., 2023)

Çalışmalarında, güneş enerji santrali, rüzgar enerji santrali, dönüştürücü ve pil depolamasıyla entegre eden simülasyonu yapılmış bağımsız bir hibrit güç sistemi modeli sunmuşlardır. Sistem, hibrit enerji sistemlerinin en iyi boyutunu elde etmek için HOMER Pro'da değerlendirilmiştir. Sonuç olarak hibrit sistem, sistemin güvenilirliğini artırmaya yardımcı olurken aynı zamanda maliyetleri de düşürmektedir. Meteorolojik veriler, Cezayir'deki illerin enerji kaynaklarının çeşitliliği ve bolluğu nedeniyle yenilenebilir enerjilerin kullanımına uygun olduğunu göstermişlerdir. (Bensalmi vd., 2024)

Ulusal şebekeye ödenen elektrik miktarını azaltmak için tasarlanan sistemin güneş, rüzgar ve dönüştürücülerle ilgilendiği Rukomo köyündeki Gicumbi bölgesi için bir hibrit sistemi modellenmiştir. Bu çalışma, üretilen gücü, yayılan gazları, net mevcut maliyeti ve elektrik maliyetini değerlendirir. Önerilen hibrit modelin kırsal köye %64 oranında azaltılmış gaz emisyonuyla elektrik sağlayabileceği ve elde edilen simüle edilmiş sonuçların sistem işletme maliyetlerinde 67405 M$/Yıl önemli bir azalma gösterdiği açıkça belirlemişlerdir. (Niringiyimana vd., 2023)

Najafi ve arkadaşları, 1 MW'ı aşan güç kapasitesine sahip büyük endüstriyel fabrikalar için on ayrı hibrit sistem konfigürasyonu incelemişlerdir. İncelenen sistemin genel konfigürasyonunda kullanılan şebeke, güneş enerji santrali, rüzgar enerji santrali, dönüştürücü ve dizel jeneratör kullanmışlardır. Yenilenebilir enerjini kullanılması katılım dışı cezasını kabul edip sadece şebekeyi kullanana kadar daha uygun maliyetli olduğunu göstermişlerdir. (Najafi vd., 2024)

Jain ve arkadaşları , Hindistan'ın Madhya Pradesh eyaletinde bir enstitüsü için HOMER Pro yazılımı kullanmışlardır. Hibrit yenilenebilir enerji sistemi için yedi kombinasyon üzerinden en iyi kombinasyon olan güneş enerji santrali, rüzgar enerji santrali, dizel jeneratör, depolama sistemi ve dönüştürücü olduğu sonucuna varmışlardır. Optimum senaryo için ek enerji üretiminin 806257 kWh olduğunu bulmuşlardır.%90,8'ini yenilebilir enerji kaynağından karşılanmıştır. (Jain vd., 2023)

Bangladeş'teki kırsal bölgedeki eğitim kurumlarının enerji ihtiyacını karşılamak için yenilenebilir enerji tabanlı bir mikro şebekenin uygulanabilirliğini ve avantajlarını göstermektedir. Dört senaryo üzerinden en uygun olan şebeke bağlantılı güneş enerji santrali, rüzgar enerji santrali, depolama sistemi ve dönüştürücü olduğu sonucuna varmışlardır.%81'ini yenilenebilir enerjiden karşılanmıştır. Okul, şebekeye yıllık 4.294,103 kWh satın alabilir ve 10.337,27 kWh geri satabilir olduğunu ve şebeke bağımlılığı azaltmasını hedeflemişlerdir. Sistem tasarımı gerçekten CO2 emisyonlarını yılda 2.713,87 kg oranında azaltarak emisyonları yalnızca şebekeye bağlı bir kuruluma kıyasla %65,03 oranında düştüğü sonucuna varmışlardır.(Ali vd.,2024)

Bu çalışmada, HOMER Pro yazılımı demo versiyonu kullanılarak, iki senaryo karşılaştırması yapılıp senaryo 1 şebeke bağlantısı ve senaryo 2 güneş PV, pil depolama ve rüzgar türbinlerinden oluşan şebekeye bağlı optimum tasarım analizi yapılmıştır. Senaryo 1 ve 2 arasında hibrit enerji sistemi kullanarak karbon emisyonunu en düşük hale getirmektir.

MATERYAL VE YÖNTEM

Lokasyon Belirlenmesi

Türkiye'nin Kahramanmaraş ilinin Andırın ilçesinde kırsal bir alandan bir yerleşim yeri seçilmiştir. Seçilen alan, Türkiye'nin 37º34.0'K ve 36º 27.5'D sinde yer almaktadır. Seçilen alanda güneş ve rüzgar enerjisinden üretim potansiyeli olmasından dolayı seçilmiştir. Şekil 1 HOMER Pro yazılımından alınmıştır.



Şekil 1. Seçilen Lokasyon

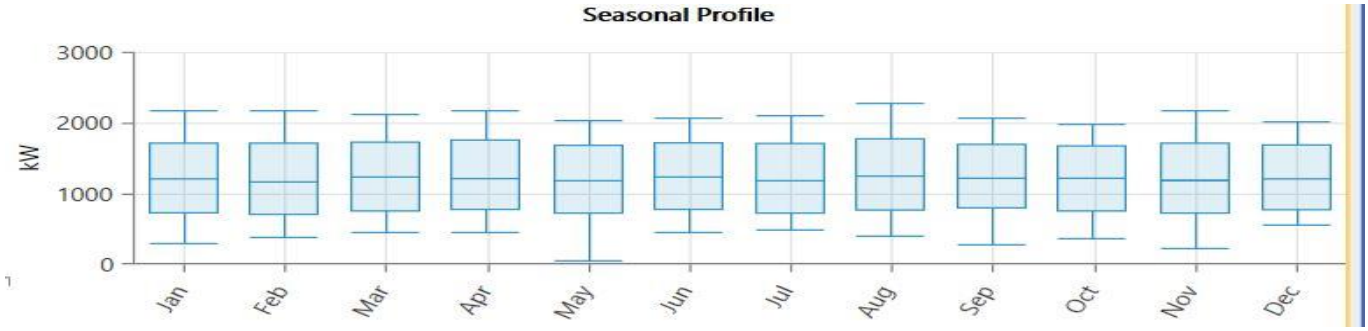
Yük Profilleri

Yapılan çalışmada Kahramanmaraş ilinde belirlenen bölgenin elektrik ihtiyacının karşılanması amaçlanmıştır. Homer Pro yazılımı, bölgenin enerji talebini 24.000 kWh/gün ve pik gücünün 1.870,38 kW olacak şekilde yük profilini modellemiştir. Yerel dağıtım şirketinin ortalama yük verilerinden alınmıştır. Günlük yük profilinde de anlaşıldığı üzere sistemimiz vardiyalı sistemdir. Vardiyalı sistemde elektrik tüketimi hemen hemen eşit miktarda olmaktadır. Vardiyalı bir işletmenin günlük yük profili Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Günlük Yük Profili

Saat	Yük(kW)
00.00	1150
01.00	1170
02.00	1190
03.00	1150
04.00	1150
05.00	1150
06.00	1200
07.00	1230
08.00	1240
09.00	1240
10.00	1245
11.00	1250
12.00	1240
13.00	1240
14.00	1300
15.00	1270
16.00	1280
17.00	1270
18.00	1280
19.00	1275
20.00	1275
21.00	1200
22.00	1180
23.00	1180

Şekil 2'de aylık yük profili maksimum, ortalama gün maksimum, ortalama, ortalama gün minimum ve minimum yük profilini vermektedir.



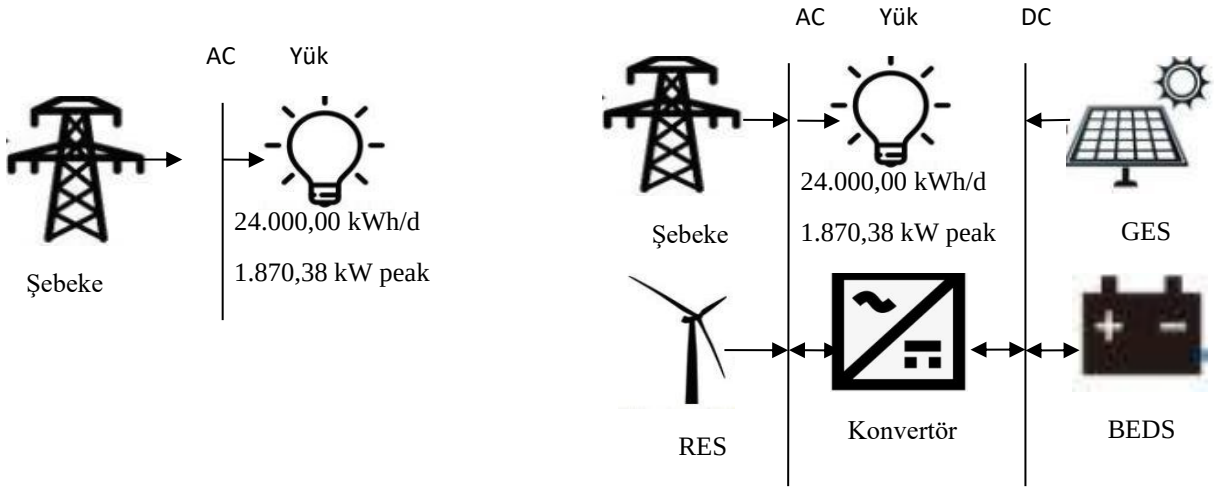
Şekil 2. Aylık Yük Profili

Üretim Modellemesi

Çalışmada şebeke bağlantılı iki farklı enerji sistemi modeli incelenmiştir. Şekil 3'te, modellemesi yapılan blok diyagramları verilmiştir. Senaryolarda kullanılan hibrit enerji üretim sistemi bileşenleri olarak güneş paneli, rüzgar türbini, dönüştürücü ve batarya depolama sistemi modelleri ve birim maliyetleri Tablo 2'de verilmiştir. Homer yazılımından dolayı veriler dolar olarak hesaplanmıştır. (Yılmaz vd., 2023; Ghorbani M., 2024).

Senaryo 1'de elektrik yük ihtiyacı sadece şebeke sisteminden karşılanmaktadır. Şekil 3b'de elektrik yük ihtiyacı AC baradan şebeke ve rüzgar enerji sisteminden, DC baradan ise güneş enerji sistemi ve batarya enerji depolama

sisteminden karşılanmaktadır. Batarya sisteminde güneş enerjisi ve rüzgar enerjisi üretiminin fazla olduğu zamanlarda şarj olmaktadır. Üretimin az olduğu dönemlerde ise batarya deşarj olmaktadır. Konvertör çift yönlü çalışmakta ac baradan ve dc baradan gelen akımı çevirmektedir.



a)Senaryo 1 **b)** Senaryo 2

Şekil 3. Sistemin Homer Modellemeleri

Tablo 2. Bileşenlerin Enerji Maliyetleri

Bileşenler	Model	Kurulum Maliyeti ($)	Yenileme Maliyeti($)	İşletme ve Bakım Maliyeti($/yıl)
Güneş Paneli	Generic flat plate	640	640	0
Rüzgar Türbini	Generic 1.5 MW	3 000 000	3 000 000	30 000
Dönüştürücü	System Converter	300	300	0
Batarya	Generic 1MWh Li-Ion	500 000	500 000	5 000

SİMÜLASYON SONUÇLARI

Kahramanmaraş ilinde bulunan günlük 24.000 kWh elektrik tüketimine sahip sanayi bölgesinin enerji ihtiyacını karşılamak hibrit enerji üretim sisteminin analizi ve tasarımı HOMER Pro yazılımı kullanılarak yapılmıştır. 2024 yılı verilerine göre şebekeden elektrik alış fiyatı ve şebekeye elektrik satış fiyatı kWh başına 0,090 $ olarak belirlenmiştir. Şekil 3a ve Şekil 3b için HOMER programına bilgileri girilen şebeke elektrik fiyatı sonucunda simülasyon yapılmış olup şebekeden alınan elektrik miktarı, şebekeye satılan elektrik miktarı ve yıllık elektrik üretimi miktarı Tablo 3'te verilmiştir. Şekil 3a ve Şekil 3b için senaryo maliyet analizleri incelenmiştir. Senaryo 1'de şebekeden elektrik satın alınmıştır. Senaryo 2 'de hibrit enerji üretim sistemi için 18001 kW'lık güneş enerji santrali, 1500 kW'lık 1 adet rüzgar enerji santrali, 8418 kW'lık dönüştürücü kullanılmış ve 1MWh'lik lityum iyon batarya depolama sistemi kurulmuştur.Yapılan incelemelerde senaryolar net şimdiki maliyeti, birim elektrik maliyeti, işletme maliyeti, başlangıç maliyeti ve amortisman süresi karşılaştırma sonuçları Tablo 4 'te verilmiştir.

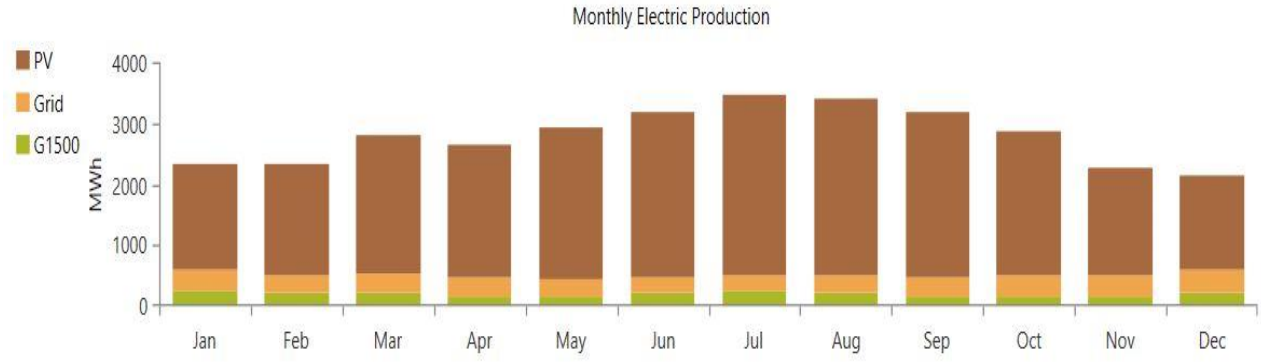
Tablo 3. Üretim Senaryoları

Senaryo	Güneş Enerji Santralleri (kW)	Rüzgar Enerji Santralleri (kW)	Batarya Depolama Sistemi (Adet)	Dönüştürücü(kW)	Şebeke Kullanımı (%)	Şebekeden Satın Alınan Elektrik Miktarı (kWh/yıl)	Şebekeye Satılan Elektrik Miktarı (kWh/yıl)
Senaryo 1	-	-	-	-	100	8 760 000	-
Senaryo 2	18 001	1 500	1	8 418	11,2	3 761 125	19 187 832

Tablo 4. Senaryo Maliyet Analizi

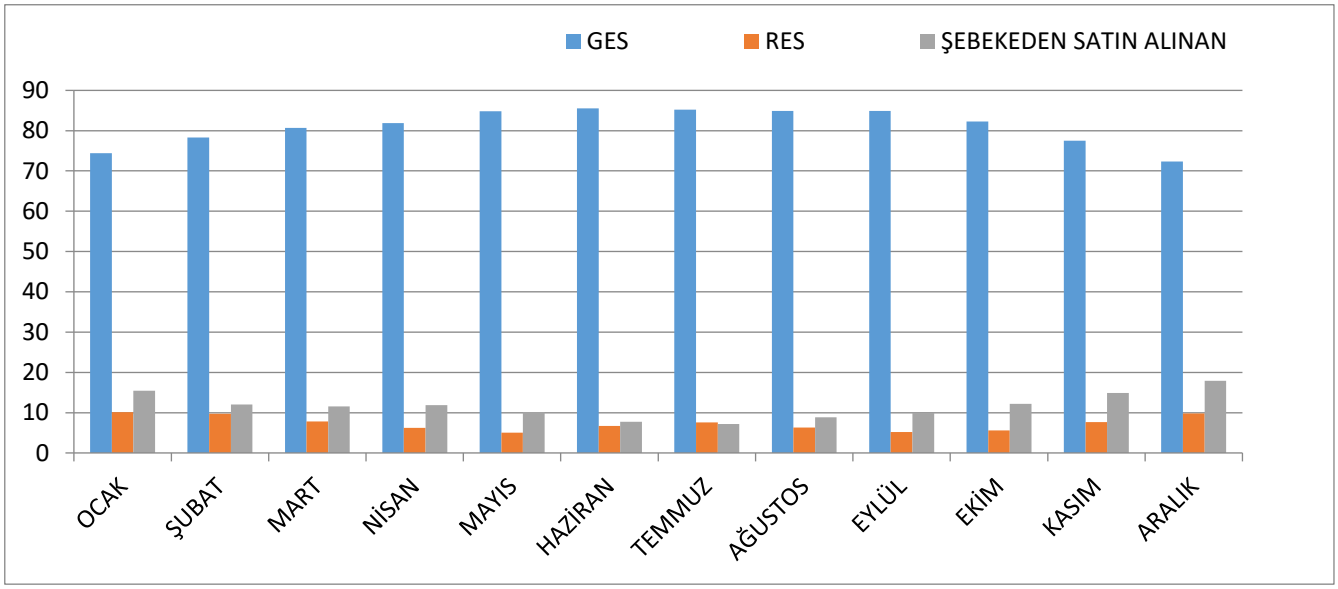
Senaryo	Net Şimdiki Maliyeti ($)	Birim Elektrik Maliyeti ($/kWh)	İşletme Maliyeti ($/yıl)	Başlangıç Maliyeti ($)	Amortisman Süresi (Yıl)
Senaryo 1	-	$0,090	$788.400	-	-
Senaryo 2	$1,51 M	$0,00418	-$1,24 M	$17,5 M	7,2

Tasarlanan 2 farklı senaryonun maliyet analizi yapılmıştır. Yapılan karşılaştırma sonucunda birim elektrik maliyeti en düşük olan sistem depolamalı hibrit enerji sistemi Senaryo 2 olduğu görülmüştür. Senaryo 2'deki hibrit enerji sisteminde birim elektrik maliyeti 0,0041 $, net şimdiki maliyeti 1,51 M$ olarak hesaplanmıştır. Senaryo 2'de bulunan yenilenebilir enerji kaynaklarının ve şebekenin aylık elektrik üretimindeki payları Şekil 4'te verilmiştir.



Şekil 4. Sistem Bileşenlerine Göre Elektrik Üretimi

Şekil 4'te görüldüğü üzere güneş enerji santralinin yıllık elektrik üretimi 27.442.222 kWh, rüzgar enerji santralinin yıllık elektrik üretimi 2.393.953 kWh ve şebekeden satın alınan yıllık elektrik miktarı ise 3.761.125 kWh olarak analiz edilmiştir.



Şekil 5. Sistem Bileşenlerine Göre Elektrik Üretim Yüzdesi

Şekil 5'te sistem bileşenlerine göre güneş enerji santralleri, rüzgar enerji santralleri ve şebekeden satın alınan elektrik miktarları yüzdesi verilmiştir. Güneş enerji santralinde en verimli Temmuz ayında 2.962.522 kWh ve Ağustos ayında 2.893.268 kWh üretim olmuştur. Rüzgar enerji santralinde en verimli üretim ise Temmuz ayında 263.345 kWh ve Ocak ayında 236.923 kWh olmuştur. Şebekeden satın alınan elektrik miktarı en çok Aralık ayında 383.092 kWh ve Ocak ayında 361.156 kWh olmuştur.

DEĞERLENDİRME VE SONUÇLAR

Sonuç olarak, önerilen hibrit enerji sistemi için yenilenemez enerji kaynağı yerine daha fazla yenilenebilir enerji kaynağı kullanılıyor. Bu nedenle, elektrik üretimi için sürdürülebilir, uygun maliyetli ve temiz enerji sistemidir. Çevreye duyarlı yenilenebilir enerji kaynaklarının birlikte kullanıldığı hibrit enerji sistemlerinin kurulmasının çevresel ve ekonomik açıdan avantajlı olduğu anlaşılmaktadır. Yıllık CO_2 salınımına göre senaryo 1 ve senaryo 2 karşılaştırıldığında %57'lik bir düşüş görülmektedir. Bu sayede yılda 3.159.289 kg CO_2 'nin doğaya salınımı engellenmiştir. Çalışmada CO_2 emisyonunu yılda 2.377.031 kg azaltmıştır. Gelecekteki çalışmalarda, farklı yöntemler kullanarak bir şebekenin maliyet analizi optimizasyonunun yapılması ve optimizasyonun geliştirilmiş yönteminin seçilmesi için HOMERpro yazılımında karşılaştırılması hedeflenmektedir.

KAYNAKLAR

Akarsu B. & Genç M.S. (2022). Optimization of electricity and hydrogen production with hybrid renewable energy systems. Fuel, Volume 324, Part A . https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.124465

Ali Md.F., Sheikh Md.R.I., Akter R., Islam K.M.N. & Ferdous A.H.M.I. (2024). Grid-connected hybrid microgrids with PV/wind/battery: Sustainable energy solutions for rural education in Bangladesh. Results in Engineering, Volume 25, March 2025, 103774. https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.103774

Atik I. & Sekin A. (2022). Hibrit yenilenebilir enerji sistem tasarımı: Balıkesir örneği. DUJE (Dicle University Journal of Engineering) 13:3 ,Sayfa 517-529. Doi: 10.24012/dumf.1148223

Bensalmi W., Belhani A. & Bouzid-Daho A. (2024). Evaluation of Algeria's energy potential: hybrid energy system analysis and sizing with HOMER pro. 2024 2nd International Conference on Electrical Engineering and Automatic Control (ICEEAC). https://doi.org/10.1109/ICEEAC61226.2024.10576241

Ghorbani M., Nazififard M. & Khorasanizadeh H. (2024). Evaluating the Environmental Benefits of a Photovoltaic-Based Microgrid for Industrial Hydrogen Production in Hot and Dry Region of Iran . International Conference on Technology and Energy Management (ICTEM) . https://doi.org/10.1109/ICTEM60690.2024.10632007

Halmous A., Oubbati Y. & Lahdeb M. (2024). Techno-Economic Study of Grid-Connected Hybrid Renewable Energy Systems Optimized by Homer Pro. 2024 2nd International Conference on Electrical Engineering and Automatic Control (ICEEAC). https://doi.org/10.1109/ICEEAC61226.2024.10576327

Jain S., Singh P., Chaudhary V.& Pandit M. (2023). Optimal design of an off-grid hybrid system using HOMER Pro. 2023 International Conference on Computer, Electronics & Electrical Engineering & their Applications (IC2E3). https://doi.org/10.1109/IC2E357697.2023.10262800

Kouihi M., Moutchou M., & ElMahjoub A.A. (2023). Optimized Design of Hybrid PV-Wind System Using HOMER – Case Study: Small Hotel in Casablanca. 2023 International Conference on Digital Age & Technological Advances for Sustainable Development (ICDATA). https://doi.org/10.1109/ICDATA58816.2023.00027

Najafi M., Kiani H., Nazari M.H., Gharepetian G.B., Hosseinian S.H. & Sarbazi J. (2024). Evaluating the Non-participation Penalty in Renewable Energy Utilization to Supply a Portion of Electricity for large Industries in Iran.

2024 9th International Conference on Technology and Energy Management (ICTEM). https://doi.org/10.1109/ICTEM60690.2024.10631920

Niringiyimana E., Wanquan S., Dushimimana G. & Niyigena J.B. (2023). Hybrid Renewable Energy System Design and Optimization for Developing Countries Using HOMER Pro: Case of Rwanda. 2023 7th International Conference on Green Energy and Applications (ICGEA) . https://doi.org/10.1109/ICGEA57077.2023.10125739

Rana A. & Grof G. (2024). Prosumer potential assessment and techno-economic feasibility analysis of rural electrification. Energy Conversion and Management: X , Volume 22, April 2024, 100542 https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2024.100542

Rizk-Allah R.M., Hassan I. A., Snasel V. & Hassanien A.E. (2024) . An optimal standalone wind-photovoltaic power plant system for green hydrogen generation: Case study for hydrogen refueling station . Results in Engineering, Volume 22 . https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102234

Yılmaz G., Şahin M., Akyazı Ö. & Öztürk B. (2023). Şebeke Bağlantılı Hibrit Yenilenebilir Enerji Sisteminin Homer ile Ekonomik ve Çevresel Analizi: İzmir Endüstriyel Bölgesi Örneği . Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi, 13(3), 1090-1106 . https://doi.org/10.31466/kfbd.1292005

KSÜ Mühendislik Bilimleri Dergisi, 28(2), 2025
Araştırma Makalesi

KSU J Eng Sci, 28(2), 2025
Research Article

Kahramanmaras Sutcu Imam University
Journal of Engineering Sciences

Geliş Tarihi : 25.12.2024
Kabul Tarihi : 21.01.2025

Received Date : 25.12.2024
Accepted Date : 21.01.2025

POLİPROPİLEN LİFLİ MİKRO BETONLARDA NANO SİLİKA KULLANIMININ ETKİSİ

EFFECT OF USING NANO SILICA IN POLYPROPYLENE FIBRE MICRO CONCRETES

Melek AKGÜL[1] (ORCID: 0000-0001-8815-3762)

[1] Munzur Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Tunceli, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Melek AKGÜL, melekakgul@munzur.edu.tr

ÖZET

Son yıllarda nano malzemelerin kullanımı diğer tüm uygulama alanlarında olduğu gibi çimento esaslı sistemlerde de önem arz etmektedir. Bu çalışma, harç ve beton uygulamalarında değerlendirilmiş olan nano malzemeler ve polipropilen liflerin mikro betonlarda eş zamanlı kullanımını amaçlamaktadır. Çalışma kapsamında üretilen 9 seri mikro betonun mekanik, fiziksel ve mikro yapı üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Karışım tasarımlarında 3 farklı miktarda (0, 5, 10 kg/m^3) nano silika ve 3 farklı miktarda (0, 1.2, 2.4 kg/m^3) 12 mm uzunluğunda kırpılmış polipropilen lif kullanılmıştır. Referans karışımında kullanılan çimento miktarı 625 kg/m^3 ve tüm karışımlarda kullanılan silis dumanı miktarı 125 kg/m^3'tür. Üretilen ve kirece doygun su kürü ile olgunlaştırılan 9 seri mikro beton ile bir dizi fiziksel ve mekanik deney uygulanmıştır. Ayrıca 9 seri mikro betonu temsil edecek şekilde 6 seriden sağlanan numune örnekleriyle Taramalı Elektron Mikroskobu ve Enerji Dağılımlı X-Işını Spektroskopisi analizi yapılmıştır. Buna göre artan nano silika miktarı basınç ve eğilme dayanımı üzerinde doğrusal bir artış sunmaz, ancak 5 kg/m^3 nano silika kullanımı eğilme ve basınç dayanımı üzerinde pozitif etkiye sahiptir. Ayrıca polipropilen lif kullanımı eğilme dayanımını artırmaktadır. Enerji Dağılımlı X-Işını Spektroskopisi verilerine göre artan nano silika miktarı C-S-H oluşumunu desteklemektedir. Taramalı Elektron Mikroskobu analizi görüntülerinde ise polipropilen lif miktarının karışımdaki dağılımı belirgindir.

Anahtar Kelimeler: Mikro beton, nano silika, polipropilen lif, mekanik özellikler, mikroyapı.

ABSTRACT

In recent years, the use of nano materials is important in cement-based systems as in all other application areas. This study aims at the simultaneous use of nanomaterials and polypropylene fibers, which have been evaluated in mortar and concrete applications, in micro concretes. The mechanical, physical and microstructural effects of 9 series of micro concrete produced within the scope of the study were investigated. In the mixture designs, 3 different amounts (0, 5, 10 kg /m^3) of nano silica and 3 different amounts (0, 1.2, 2.4 kg/m^3) of 12 mm long chopped polypropylene fiber were used. The amount of cement used in the reference mix is 625 kg/m^3 and the amount of silica fume used in all mixes is 125 kg/m^3. A series of physical and mechanical experiments were carried out with 9 series of micro concretes produced and matured with lime saturated water curing. In addition, Scanning Electron Microscopy and Energy Dispersive Spectrum analysis were performed on samples from 6 series to represent 9 series of micro concrete. Accordingly, increasing amount of nano silica does not provide a linear increase in compressive and flexural strength, but the use of 5 kg/m^3 nano silica has a positive effect on flexural and compressive strength. In addition, the use of polypropylene fiber increases flexural strength. According to Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy data, increasing amount of nano silica supports more C-S-H formation. In the Scanning Electron Microscopy analysis images, the distribution of the amount of polypropylene fiber in the mixture is evident.

Keywords: Micro concrete, nano silica, polypropylene fibre, mechanical properties, microstructure.

ToCite: Akgül, M., (2025). POLİPROPİLEN LİFLİ MİKRO BETONLARDA NANO SİLİKA KULLANIMININ ETKİSİ. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 28(2), 721-731.

GİRİŞ

Artan dünya nüfusu ve yapı ihtiyacı, inşaat sektörünün dünya ekonomisindeki yerini üst sıralara taşımaktadır (Bayrak ve Telatar, 2021). Bunun yanı sıra işçilik masrafları sektörün önemli bir gider kalemidir (Akgül, 2024). İşçilik giderlerini azaltmak; sürdürülebilir ve ekonomik uygulamalara bağlıdır. Çimento esaslı kompozitler, özellikle yapıların inşasında en fazla kullanılan malzemelerin temelini oluşturur (Sevim et al., 2022). Çimento sisteminin performansını arttırmak, uygun malzeme kullanımının yanı sıra bakım ve yaşam döngüsü maliyetini azaltacak daha sürdürülebilir sistemlerin geliştirilmesine bağlıdır (Felekoğlu, 2014; Sevim et al., 2021; Singh et al., 2013). Bu amaçla sıklıkla tercih edilen kendiliğinden yerleşen sistemlerinin üretim esası; artan işçilik giderlerini azaltmak için daha fazla ince malzeme ve vizkozite artırıcı katkı maddesi kullanımına dayanır (Akgül, 2024; Akgül ve Hansu, 2024). Kendiliğinden yerleşen mikro beton (KYMB), 100 μ m'den küçük maksimum agrega boyutuna sahip, akışkan ve ayrışmayan kohezyonel kıvama sahip bağlayıcılar ve inert malzemelerin bir karışımı olarak tanımlanmaktadır (Felekoğlu, 2009). Bunun yanı sıra mikro beton (MB) uygulamalarında daha küçük agrega boyutlarının kullanılması yönünde artan bir eğilim vardır (Etli, 2022). MB'larda uygun reolojiyi sağlamak için yüksek aralıklı su azaltıcı katkı maddelerinin kullanımı ve su içeriğinin dengeli aralıkta tutulması önemlidir (Felekoğlu, 2014). Uygulamalarda en fazla tercih edilen katkı maddelerinden biri plastikleştirici katkı maddeleridir. Ancak bu katkı maddelerinin miktarı numune içindeki hava muhtevası üzerinde etkilidir ve birim hacim ağırlığı dolaylı olarak düşürmektedir. Yüksek doldurma yeteneği sayesinde enjeksiyon amaçlı harç malzemesi olarak kullanılan bu sistemler, her ne kadar kırılgan bir yapı sergilese de, son uygulamalarda özellikle elyaf takviyesi ile birçok yeni kullanım alanına erişebilmektedir (Topçu & Ateşin, 2016).

Yapılan birçok çalışmanın sonucu olarak nano malzemelerin kullanımı farklı alanlarda artan bir trende sahiptir. Nano parçacıklar geleneksel malzemelerden farklı olarak çok ince boyutludur ve hem fiziksel hem de kimyasal özellikleri bazı uygulama yöntemleri ile desteklendiğinde kabul edilebilir üstünlükler sunmaktadır (H. Li et al., 2004). Bu hali ile nano malzeme, harç ve betonun dayanıklılık özelliklerine büyük katkı sağlayan en etkili malzemelerden biri olarak kabul edilmektedir (Naji Givi et al., 2010). Beton ve harç elamanların maruz kaldığı birçok kimyasal saldırı elemanın erkili servis ömrünü azaltmaktadır. Bu kimyasal saldırılara maruz kalan elemanın genleşmesi ve çatlaması ile devam eden hasar sürecinde dayanım ve durabilite kaybı kaçınılmazdır (Akgül et al., 2022). Boşluk yapısı ile de ilişkili olan bu performans kaybını önlemek için en sık başvurulan malzemeler mikro silika (MS) ve nano silika (NS)'lardır. Özellikle betonda kullanılan mikro ve nano malzemelerin, arayüz bölgesinde filler etkisi sağlayarak performansı arttırması beklenir. Bunun yanı sıra silika içeriğine bağlı olarak betonda puzolanik etki sunduğu kabul edilir. Tüm bu özellikleri ile elemanda daha yoğun bir arayüz ve daha güçlü bir yapı sağlanmaktadır (Başaran, 2022). Ayrıca NS'nin, MS, uçucu kül (UK) veya yüksek fırın cürufu (YFC) ile birlikte kullanımı sinerjik bir etkiye sahiptir. Tek başına kullanımına kıyasla ikili veya üçlü değişimi mekanik ve durabilite özellikleri açısından çok daha iyi sonuçlar vermektedir (Başaran, 2022; L. G. Li et al., 2018; Liu et al., 2016; P. P. et al., 2021; Türkmenoğlu vd., 2022). NS kullanılarak üretilen beton elemanlarda, 0,53 su/bağlayıcı oranı ile sadece NS veya sadece YFC kullanımı ile referans karışımlara göre basınç dayanımında elde edilen artış oranları sırasıyla %8,8 ve %7,8'dır. (Türkmenoğlu vd., 2022). NS eklenen karışımlarda belirlenen yüksek reaksiyon hızı, hidratasyon ısısı ve puzolanik reaktivite; genel olarak parçacıklarının özgül yüzey alanına ve SiO_2 içeriğine bağlıdır (Björnström et al., 2004; Liu et al., 2016). NS, sertleştirilmiş çimento hamuru ve agregalar arasındaki arayüz geçiş bölgesinde dizilmiş kalsiyum hidroksit (C-H) kristalleriyle reaksiyona girebilir ve kalsiyum silikat hidrat (C-S-H) jeli üretebilir. Böylece, C-H kristallerinin boyutu ve miktarı önemli ölçüde azalır ve sertleşmiş çimento hamurunun erken yaş mukavemeti artar (Ji, 2005).

Çimento esaslı kompozitlerde sıklıkla tercih edilen lifler genel bir kabul ile, doğal ve yapay olarak sınıflandırılır ve bu çeşitliliğin bir sonucu olarak farklı birçok kullanım alanına entegre edilmektedir (Dheyaaldin et al., 2022; Xin et al., 2019). Özellikle çelik liflere göre daha fazla tercih edilen ve bir ticari lif türü olan Polipropilen lif (PL)'lerin maliyeti düşük, korozyon direnci yüksektir (Dheyaaldin et al., 2022; Xin et al., 2019). PL takviyeli beton ve harç elemanların fiziksel, mekanik, mikro yapı ve durabilitesinin tespitine dair çalışmalar önemli sonuçlar sunmaktadır (Açıkgenç vd., 2012; Khaliq & Kodur, 2011; Kim et al., 2020; Jeon et al., 2023; Wei et al., 2024). PL miktarı karışımın kalıplanma sonrası birim hacim ağırlığında etkilidir (Topçu vd., 2017) ve bunun yanı sıra PL kullanımı basınç dayanımını bir miktar düşürmekte, eğilme dayanımını ve elektriksel iletkenliği bir miktar arttırmaktadır (Uygunoğlu vd., 2017).

Mikro betonların bilinen kırılgan yapısını (Topçu & Ateşin, 2016) azaltmak için lif takviyesi iyi bir çözüm gibi kabul edilir. Lif kullanımı eğilme dayanımını artırır ancak basınç dayanımı üzerinde belirgin bir pozitif etki sunmaz. Bu amaçla eğilme dayanımı ve mikro betonun kırılgan yapısı üzerinde olumlu etki sunan PL kullanımı; NS'nin arayüz

bölgesinde sağlayacağı filler etkisi ve buna bağlı performans değişimi ile aynı anda değerlendirilmelidir. Bu çalışmada MB tasarımları oluşturulurken değişken parametre olarak PL takviyesinin yanı sıra NS'nin çimentoya ikame durumları esas alınmıştır. Bu amaçla bir tanesi referans olmak üzere 3 farklı miktarda PL ve 3 farklı miktarda NS değişimi uygulanmıştır. Üretilen 9 farklı MB, 7 ve 28 gün kirece doygun su kürü ile olgunlaştırılmış ve akabinde fiziksel, mekanik ve mikro yapıya yönelik tespitler yapılmıştır. Elde edilen veriler grafikler yardımı ile sunulmuş ve mevcut çalışmalar ile karşılaştırılarak yorumlanmıştır. Bu hali ile çalışma sonuçları literatürde özellikle beton ve harç tasarımlarında kullanılan PL ve NS'nin mikro betonun fiziksel, mekanik ve mikro yapı üzerindeki etkisini sunmaktadır.

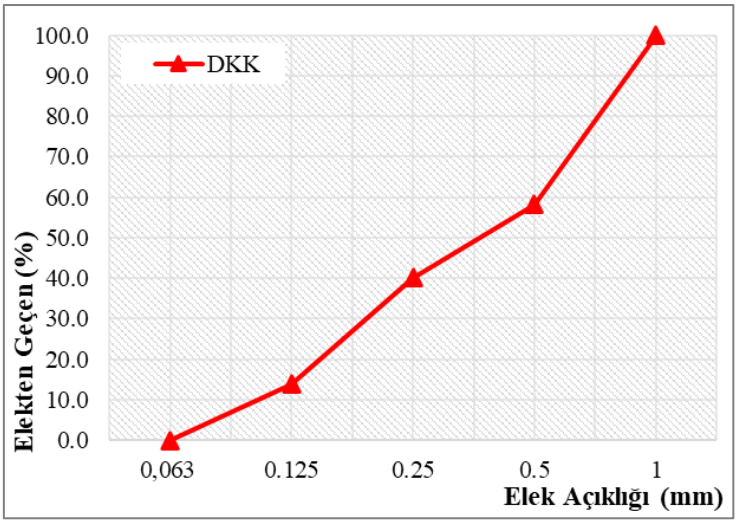
MATERYAL VE METOD

Deneysel çalışmada kullanılan materyal ve uygulanan deneysel yöntemler bu bölümde sunulmuştur. Üretilen MB'larda Çimentaş-Elazığ firmasından temin edilen CEM-I 42.5R çimento (PÇ) (TS EN 197-1, 2011) ve çimentoya 3 farklı oranda ikame edilen NS'nin yanı sıra tüm karışımlarda sabit miktarda silis dumanı (SD) kullanılmıştır. Tablo 1'de özellikleri verilen, PÇ, NS ve SD'nin özgül ağırlığı sırasıyla 3.15, 2.23, 2.32'dir.

Tablo 1. PÇ, NS ve SD'nin Özellikleri

		PÇ	NS	SD
Kimyasal bileşim (%)	CaO	63.57	-	
	SiO_2	19.34	>99	93
	Al_2O_3	3.75	-	
	Fe_2O_3	4.15	-	
	MgO	2.90	-	
	SO_3	3.15	-	
	K_2O	0.81	-	
	Na_2O	0.41	-	
Kızdırma kaybı		1.92	-	3.5

Tüm tasarımlarda 1 mm'lik kare gözlü elekten elenen doğal kırma kum (DKK) kullanılmıştır. Tunceli iline bağlı kırma taş ocaklarından temin edilen DKK'nin elek analizi Şekil 1'de verilmiştir (TS EN 933-1, 2012). Çalışmada karışım suyu olarak TS EN 1008'e (TS EN 1008, 2003) uygun dinlendirilmiş şehir şebeke suyu kullanılmıştır. Kullanılan TS EN 934-2+A1'e (TS EN 934-2+A1, 2014) uygun polikarboksilat bazlı yüksek oranda su azaltıcının firma ürün kodu Sika Visco Crete Hi-Tech-28'dir ve özgür ağırlığı 1.06'dır.



Şekil 1. DKK Granülometri Eğrisi

Referans karışımında kullanılan çimento miktarı 625 kg/m^3 ve tüm karışımlardaki kullanılan SD miktarı 125 kg/m^3'tür. MB'lerin tasarımında kullanılan NS miktarı 0, 5, 10 kg/m^3'tür. Ayrıca tüm NS ikame durumları için 0, 1.2 ve 2.4 kg/m^3 oranında PL kullanılarak toplamda 9 seri MB tasarlanmıştır. Tüm karışımlarda kullanılan su miktar, katkı maddesi ve karışım tasarımı ön çalışma sonuçları ve benzer çalışma verilerine bağlı olarak belirlenmiştir. Buna göre karışımlarda su miktarı 322.5 kg/m^3 olarak alınmıştır (Akgül ve Etli, 2023; Etli, 2022; Felekoğlu, 2009; Felekoğlu, 2014). Su miktarının sabit olmasına bağlı olarak vizkozite ve taze hal kriterlerinin tahsisi, akışkanlaştırıcı

katkı maddesinin farklı miktarda kullanımı ile sağlanmıştır. Karışımların hazırlanması laboratuvar ortamında gerçekleştirilmiş ve 3 dm^3 kapasiteli laboratuvar tipi mikser kullanılmıştır. Tüm MB karışımları için oluşturulan 1 m^3 harç tasarımı Tablo 2'te verildiği gibidir. MB'lerin kodlamasında ilk bölüm NS miktarını temsil ederken ikinci bölüm PL miktarını temsil etmektedir. Örnekle; 0NS-0PL karışımı referans karışımıdır ve NS ya da PL içermez; 5NS-2.4PL karışımı ise 1 m^3 MB'da 5 kg NS ve 2.4 kg PL içermektedir.

Tablo 2. 1 m^3 MB İçin Karışım Tasarımı (kg/m^3)

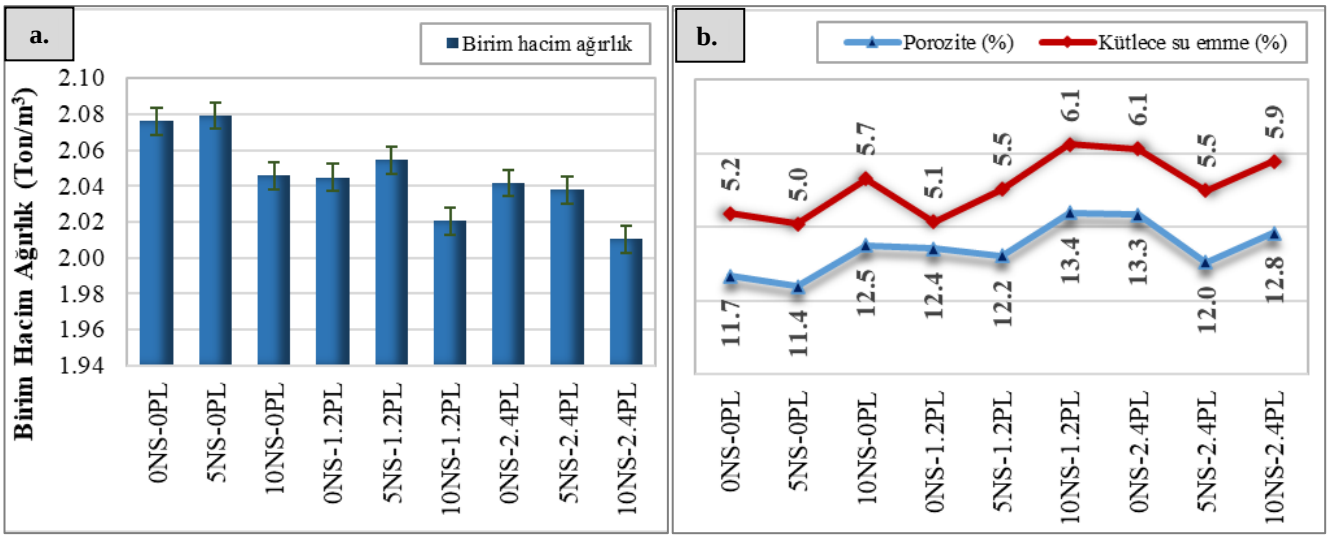
	PÇ	SD	NS	DKK	Su	PL
0NS-0PL	625	125	0	1081-1084	322.5	0
5NS-0PL	620	125	5		322.5	0
10NS-0PL	615	125	10		322.5	0
0NS-1.2PL	625	125	0		322.5	1.2
5NS-1.2PL	620	125	5		322.5	1.2
10NS-1.2PL	615	125	10		322.5	1.2
0NS-2.4PL	625	125	0		322.5	2.4
5NS-2.4PL	620	125	5		322.5	2.4
10NS-2.4PL	615	125	10		322.5	2.4

MB'ler vibrasyon ve sıkıştırma yapılmaksızın prizma kalıplara (40x40x160 mm) yerleştirilmiştir. 24 saat kalıp alma süresini tamamlayan numuneler 7 ve 28 gün 20 ± 2 °C sıcaklıkta kirece doygun su kürü ile olgunlaştırılmıştır. 9 seri MB için birim hacim ağırlık, porozite, kütlece su emme (ASTM C1585-13, 2013), eğilmede çekme (ASTM C348-21, 2021) ve eksenel basınç (ASTM C349-08, 2008) deneyleri yapılmıştır. Eğilmede çekme ve basınç dayanımı deneyi için sırasıyla 0.5 ve 2.4 kN/sn yükleme hızı kullanılmıştır. Ayrıca mikro yapının tespitine yönelik olarak Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) ve Enerji Dispersiv Spektrum (EDS) analizi yapılmıştır. SEM ve EDS analizleri için örnekler, 28 gün su kürü sonrası eğilmede çekme ve ardından eksenel basınç deneyinde kullanılan 0NS-0PL, 10NS-0PL, 0NS-1.2PL, 10NS-1.2PL, 0NS-2.4PL, 10NS-2.4PL serilerine ait uygun boyut ve forma getirilen numuneler ile Munzur Üniversitesi MUNTEAM bünyesinde gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmaya dair tüm veriler grafikler ile sunulmuş, mevcut literatür çalışmaları ile değerlendirilerek yorumlanmıştır.

BULGULAR VE TARTIŞMA

Birim Hacim Ağırlık, Porozite ve Kütlece Su Emme Sonuçları

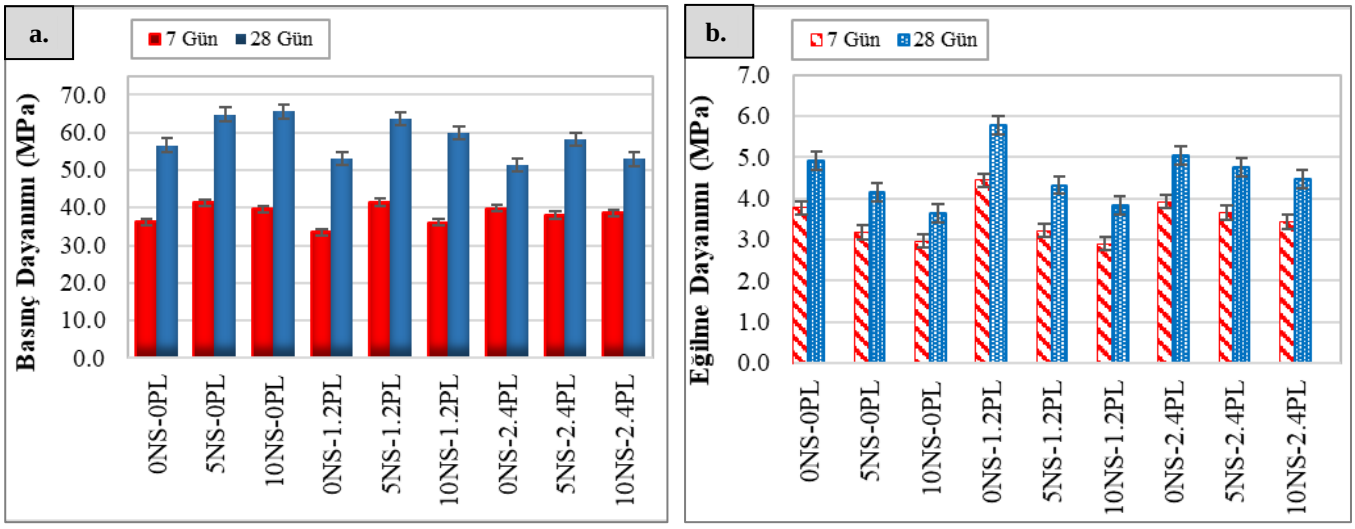
28 gün kirece doygun standart su kürü uygulanan 9 seri sertleşmiş MB ile gerçekleştirilen birim hacim ağırlık, porozite ve kütlece su emme sonuçları Şekil 2'de verilmiştir. Tüm MB serileri için birim hacim ağırlık 2.08 ile 2.01 ton/m^3 aralığında değer almaktadır. Birim hacim ağırlık; 0NS-0PL serisinde 2.076 ton/m^3; 0NS-1.2PL ve 0NS-2.4PL serisinde ise sırasıyla 2.045, 2.042 ton/m^3'tür. Ayrıca artan NS miktarı birim hacim ağırlık üzerinde doğrusal bir etki sunmamaktadır. PL içermeyen serilerde en yüksek birim hacim ağırlık 5NS-0PL serisine aittir. 1.2 ve 2.4 PL içeren serilerde en yüksek birim hacim ağırlık sırasıyla 5NS-1.2PL ve 0NS-2.4PL serilerinde sağlamaktadır. Bu hali ile 1.2 PL muhtevasına kadar 5 kg/m^3 oranında NS içeren seriler daha yüksek birim hacim ağırlığa sahiptir ancak bu artış sadece 0.003-0.010 ton/m^3 bandındadır. Tüm MB'lere ait porozite ve kütlece su emme oranı Şekil 2.b'de verilmiştir. Grafiğe göre porozite ve kütlece su emme oranı sırasıyla %11.4-13.4 ve % 5.0-6.1 aralığında değer almaktadır. En fazla porozite oranı 10NS-1.2PL serisinde tespit edilmiştir. Ayrıca 5NS-0PL serisinin porozite ve kütlece su emme oranı referans serisinden daha düşüktür. PL kullanılmadan üretilen ilk üç seri ile 1.2 kg/m^3 PL kullanılarak üretilen ikinci üç serideki eşit NS miktarlarını içeren karışımlar kıyaslandığında, porozite ve kütlece su emme oranında artış tespit edilmiştir. Ancak 2.4 kg/m^3 PL içeren serilere geçişte benzer eğilim yoktur. PL miktarındaki artış porozite ve kütlece su emme oranını arttırmaktadır. NS miktarının 5 ve 10 kg/m^3 olduğu 5NS-2.4PL ve10NS-2.4PL serilerinde PL'nin porozite ve kütlece su emme oranındaki etkisi NS miktarına bağlıdır. Tüm serilerde PL miktarındaki artış ile birim hacim ağırlık çok az miktarda düşmektedir. Birim hacim ağırlıktaki bu kayıp benzer çalışma verileri ile paralellik sergilemektedir. Artan PL miktarı harçtaki homojen dağılımı üzerinde belirleyicidir. Bazı miktar ve uzunluklarda PL, topaklanmaya sebep olarak birim hacim ağırlığı etkilemektedir (Topçu vd., 2017). Şekil 2'de sunulan veriler ışığında birim hacim ağırlık, porozite ve kütlece su emme oranlarında PL miktarına bağlı olarak çok belirgin farklar olmadığı görülmektedir. Çünkü PL miktarı belirlenirken; PL'nin taze harçta sebep olması muhtemel olan topaklanma dikkate alınmış ve kullanım miktarı literatürdeki çalışmalar ve ön çalışmalar ile sınırlı aralıkta tutulmuştur.



Şekil 2. a. Birim Hacim Ağırlık (Ton/m^3) Sonuçları **b.** Porozite (%) ve Kütlece Su Emme (%) Sonuçları

Eksenel Basınç ve Eğilmede Çekme Dayanımı Sonuçları

7 ve 28 günlük prizma numuneler ile gerçekleştirilen eğilmede çekme ve eksenel basınç deneyi sonuçları Şekil 3'te verilmiştir. 28 günün sonunda en fazla basınç dayanımı 65.56 MPa ile 10NS-0PL serisine, en düşük basınç dayanımı ise 51.30 MPa ile 0NS-2.4PL serisine aittir. Şekil 3.a'da verilen ilk üç seri (0NS-0PL, 5NS-0PL, 10NS-0PL) PL içermeyen karışımlara aittir ve bu serilerde artan NS miktarı ile basınç dayanımı artmaktadır. PL içermeyen serilerde NS miktarı arttıkça basınç dayanımı artan eğilim sergiler. Ancak 1.2 ve 2.4 kg/m^3 PL içeren serilerde sadece 5 kg/m^3 NS içeren seriye kadar basınç dayanımında artış söz konusudur. NS miktarındaki artışın basınç dayanımına olan katkısı PL miktarından etkilenmektedir. 2.4 kg/m^3 PL içeren serilerin 7 günlük basınç dayanımı, referans serisinin basınç dayanımından fazla olmasına rağmen, 28 günlük basınç dayanımı sonuçları aynı miktarda NS içeren serilere kıyasla daha düşüktür.



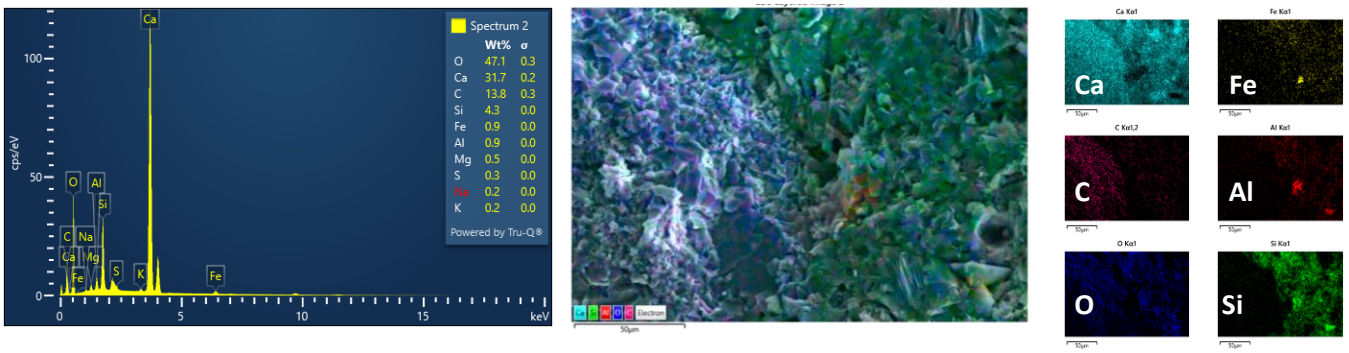
Şekil 3. a. Basınç Dayanımı (MPa) Sonuçları **b.** Eğilmede Çekme Dayanımı (MPa) Sonuçları

7 ve 28 günlük MB'ler ile gerçekleştirilen eğilmede çekme dayanımı sonuçları (Şekil 3.b)'na göre 28 günün sonunda en yüksek ve en düşük eğilmede çekme dayanımı sırasıyla 0NS-1.2PL ve 10NS-0PL serilerine aittir. Aynı NS miktarına sahip MB serileri incelendiğinde; 0NS-2.4PL serisi hariç tüm serilerin eğilmede çekme dayanımında artış kaydedilmiştir. Aynı PL miktarına sahip MB serilerinde artan NS miktarının eğilmede çekme dayanımı azalttığı görülmektedir. PL miktarı taze harç elemanların dayanımı üzerinde etkilidir (Topçu vd., 2017). PL miktarı basınç dayanımını bir miktar düşürmekte, eğilme dayanımını ve elektriksel iletkenliği bir miktar arttırmaktadır (Uygunoğlu vd, 2017). NS kullanımı basınç dayanımı, elastisite modülü, eğilme dayanımı ve yarma dayanımı gibi mekanik ve elastik özelliklerle birlikte durabilite özelliklerini de etkilemektedir (Başaran, 2022; H. Li et al., 2004; Türkmenoğlu

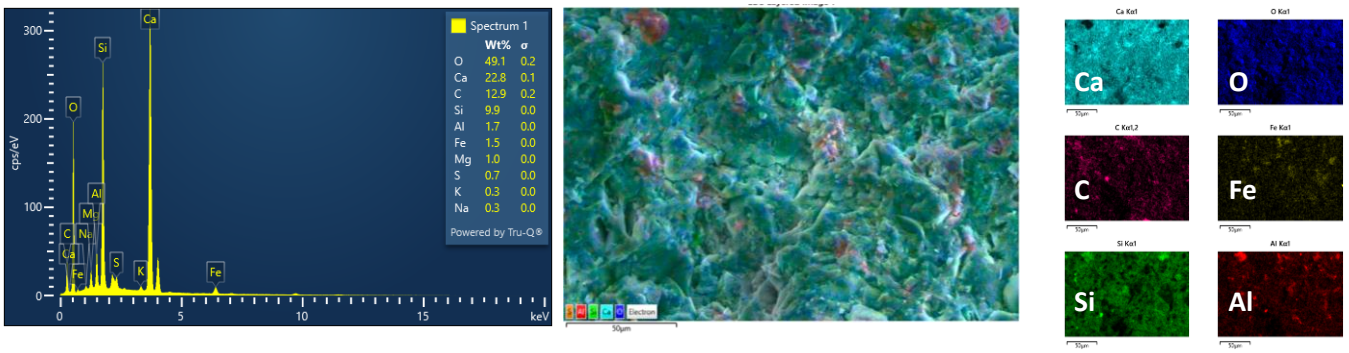
vd., 2022). Nano parçacıklı harçların 7. ve 28. günlük basınç ve eğilme dayanımları referans harcına göre daha yüksektir (H. Li et al., 2004). NS miktarındaki artış gevrekliği arttırmaktadır ve bu durum eğilme dayanımında bir miktar kayba neden olabilmektedir (Başaran, 2022). Şekil 3'te verilen eğilme ve basınç dayanımı verileri NS ve/veya PL kullanımına bağlı olarak eğilme ve basınç dayanımı sonuçları içeren çalışmalar ile paralellik sergilemektedir (Başaran, 2022; H. Li et al., 2004; Kara, 2020; Türkmenoğlu vd., 2022).

Enerji Dağılımlı X-Işını Spektroskopisi (EDS) Analizi Sonuçları

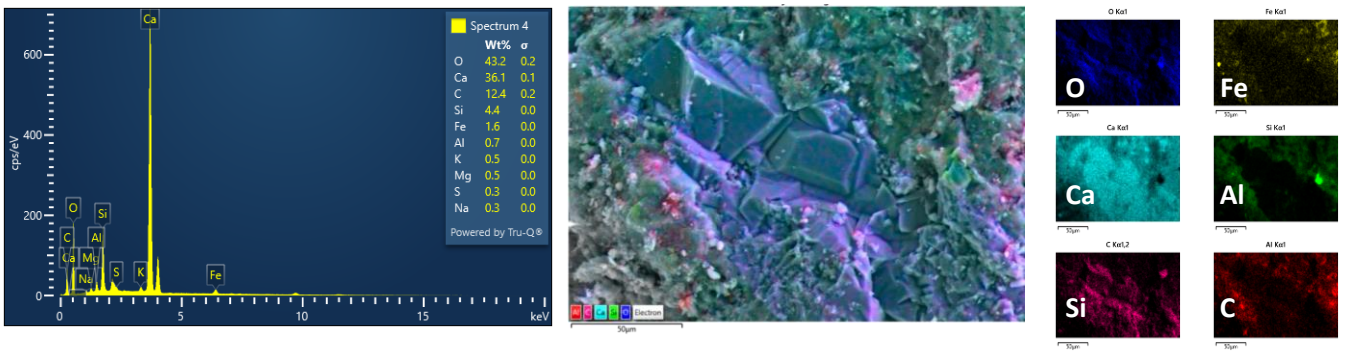
EDS, bir numunenin kimyasal bileşimini analiz etmek için kullanılan bir tekniktir. Genellikle SEM analizi ile beraber kullanılan EDS analizi, uygun boyut ve şartları sağlanan numuneden yayılan karakteristik X-ışınlarının enerjisine bağlı olarak numunedeki mevcut elementleri belirler ve miktarlarını ağırlıkça oranlar. Çalışma kapsamında üretilen 9 farklı MB serisini temsil edecek şekilde 6 MB serisine (0NS-0PL, 10NS-0PL, 0NS-1.2PL, 10NS-1.2PL, 0NS-2.4PL, 10NS-2.4PL) ait EDS analizinde elde edilen tespitler element bazında Şekil 4-9'da verilmiştir. 6 seri MB için verilen Şekil 4-9'da ağrılıkça (%) oranı en fazla olan 6 element verilmiştir. Bu elementler O, C, Ca, Fe, Al ve Si'dir. İçeriğinde ağırlıkça baskın oranda Oksijen (O), Karbon (C), Kalsiyum (Ca) ve Silisyum (Si) içeren çimento esaslı numunelerden beklenen genel bileşenler kalsiyum silikatlar ve kalsiyum alüminatlardır. NS ikame edilen 10NS-0PL, 10NS-1.2PL, 10NS-2.4PL serilerinde (Şekil 5, 7, 9) NS ikame edilmeyen 0NS-0PL, 0NS-1.2PL, 0NS-2.4PL serilerine (Şekil 4, 6, 8) kıyasla Si oranı daha fazladır.



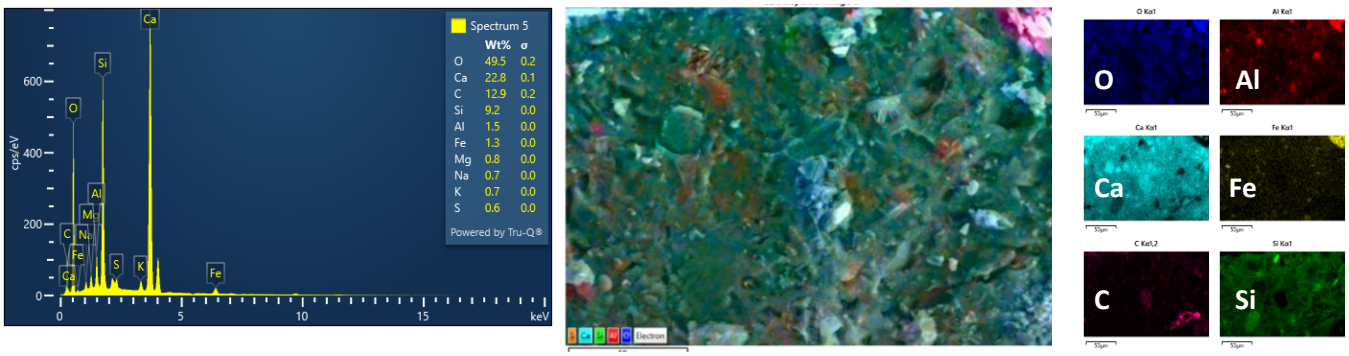
Şekil 4. 0NS-0PL Serisine Ait EDS Analizi Sonuçları



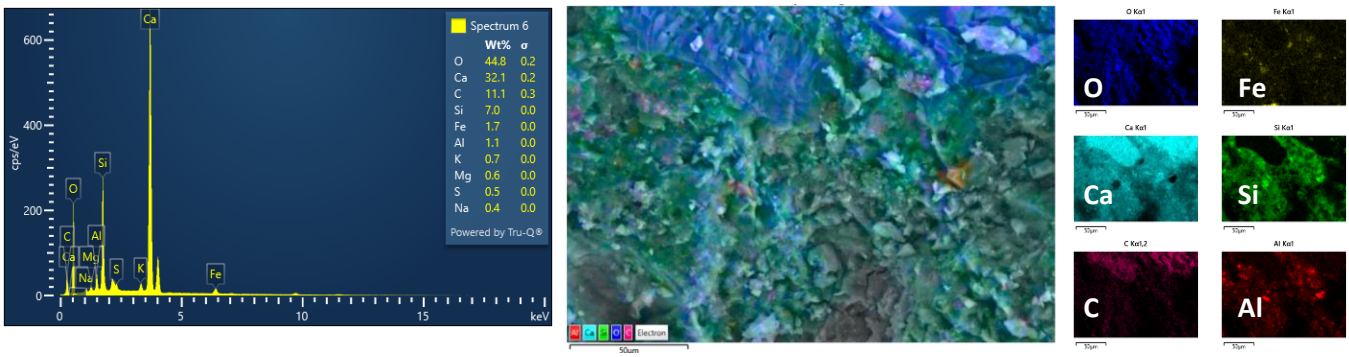
Şekil 5. 10NS-0PL Serisine Ait EDS Analizi Sonuçları



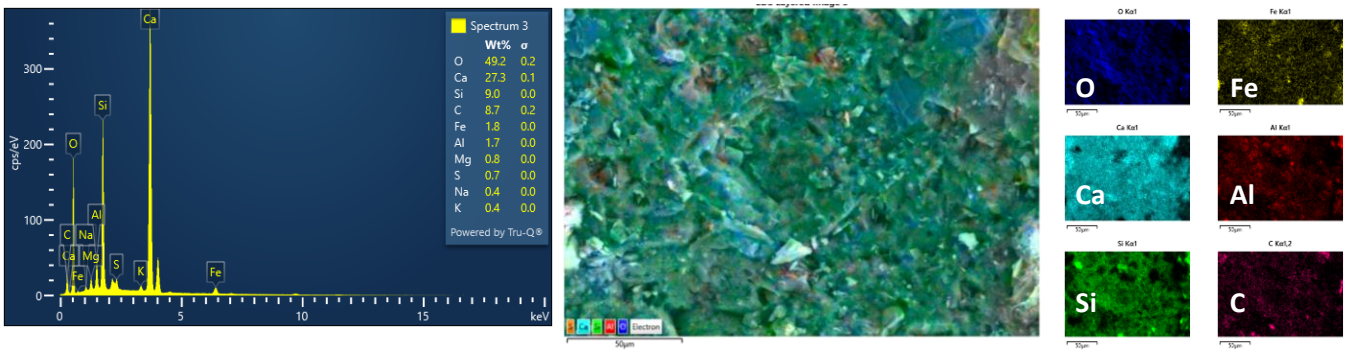
Şekil 6. 0NS-1.2PL Serisine Ait EDS Analizi Sonuçları



Şekil 7. 10NS-1.2PL Serisine Ait EDS Analizi Sonuçları



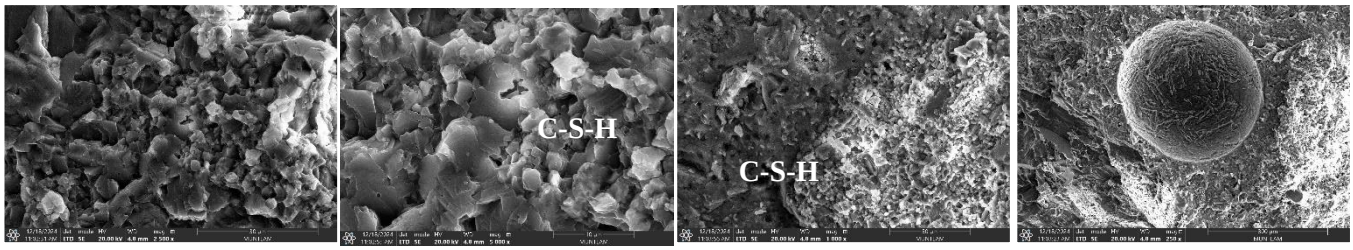
Şekil 8. 0NS-2.4PL Serisine Ait EDS Analizi Sonuçları



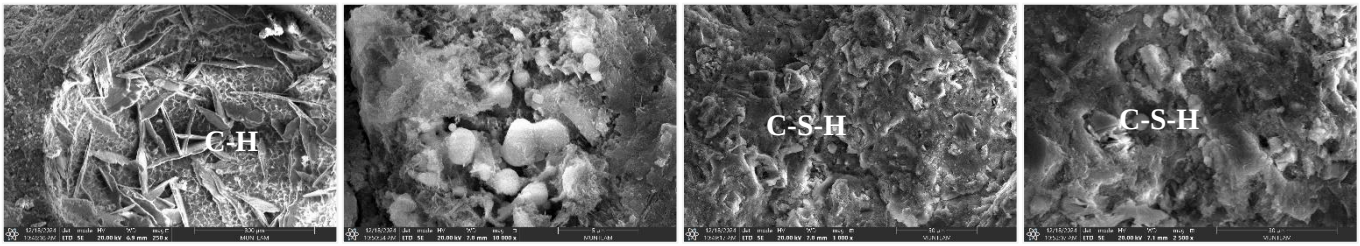
Şekil 9. 10NS-2.4PL Serisine Ait EDS Analizi Sonuçları

Taramalı Elektron Mikroskobu Analizi (SEM) Sonuçları

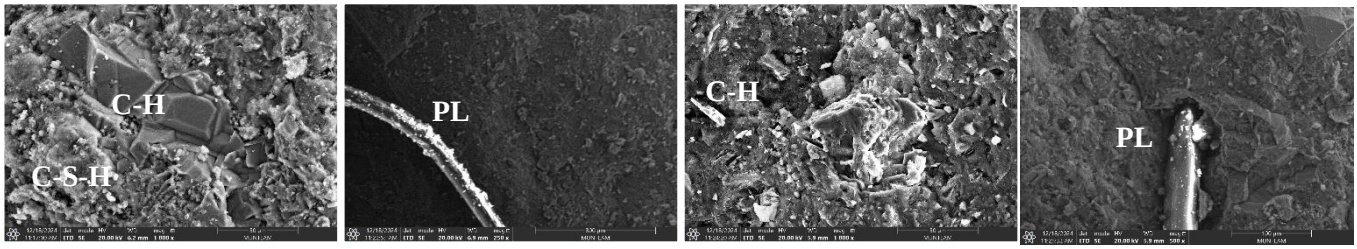
NS ve PL'nin karışımdaki farklı miktarını temsil edecek şekilde seçilen 6 MB (0NS-0PL, 10NS-0PL, 0NS-1.2PL, 10NS-1.2PL, 0NS-2.4PL, 10NS-2.4PL)'un SEM görüntüleri Şekil 10-15'te verilmiştir. Sem analizi aracılığı ile NS ve PL'nin etkisi incelenmiştir. Görüntülere göre; NS içeren serilerde (10NS-0PL, 10NS-1.2PL, 10NS-2.4PL) C-S-H jel oluşumunun NS içermeyen serilere (0NS-0PL, 0NS-1.2PL, 0NS-2.4PL) kıyasla daha fazladır. C-H kristalleri masif, yassı, hekzagonal prizma şekilli veya büyük zayıf uzun kristaller şeklinde çok farklı biçim ve boyutta görülmektedir. Çimento harcı ve beton içinde C-H kristalleri çimento ile agrega ara yüzeyinin bağlayıcılığını geliştirme eğilimindedir (Doğruyol ve Karaşin, 2016). Çimento ve betonda C-S-H jeli bağlayıcı son ürün olduğu için önemli bir bileşendir ve bunun sonucu olarak dayanıma en büyük katkıyı sağlamaktadır.(Doğruyol ve Karaşin, 2016). C-S-H Portland çimentosundaki başlıca hidratasyon ürünü ve birincil bağlayıcı fazdır (Björnström et al., 2004). NS, genel olarak çimento ile su arasındaki hidratasyon reaksiyonu sırasında oluşan C-H ile reaksiyona girerek daha fazla C-S-H jeli oluşturur. NS içeren betonun mikro yapısı normal betondan daha düzgün ve kompakttır (Ji, 2005). Hem hamur fazı içerisinde hem de agrega ile harç arasındaki ara yüzey bölgesinde, NS kullanımı ile birlikte C-H miktarı belirgin bir şekilde azalmakta ve içyapı daha yoğun ve boşluksuz bir hal almaktadır (Jalal et al., 2012; Türkmenoğlu vd., 2022). Şekil 10-15'te verilen analiz sonuçları NS'nin gözenek doluluğu ve C-H üzerindeki etkisini göstermektedir ve benzer çalışma verileri ile benzerlik sunmaktadır (Balapour et al., 2018; H. Li et al., 2004; Zyganitidis et al., 2011).



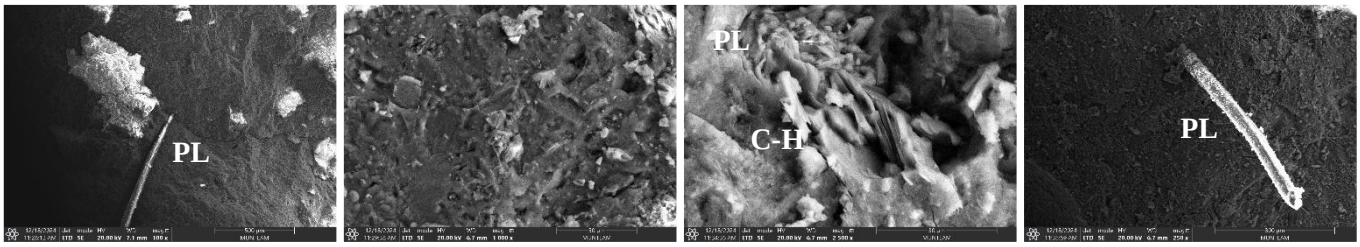
Şekil 10. 0NS-0PL Serisine Ait SEM Analizi Sonuçları



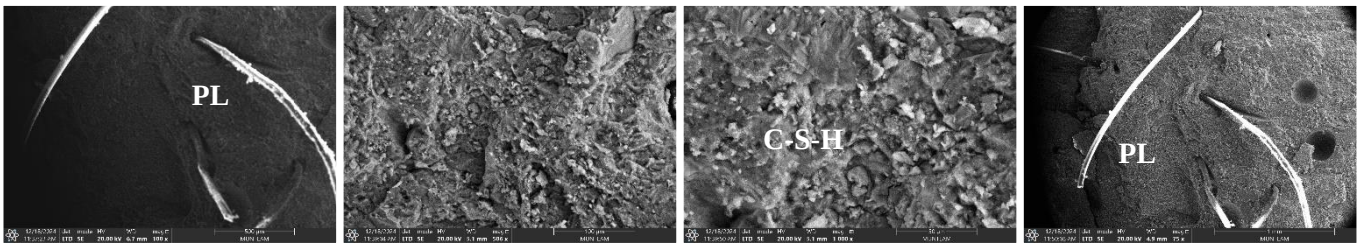
Şekil 11. 10NS-0PL Serisine Ait SEM Analizi Sonuçları



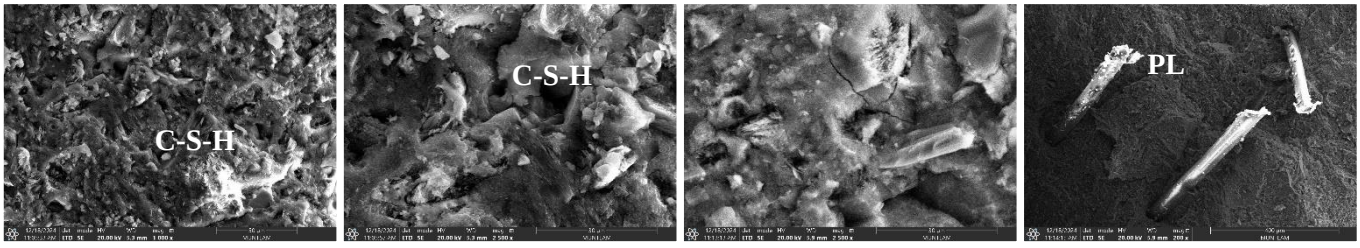
Şekil 12. 0NS-1.2PL Serisine Ait SEM Analizi Sonuçları



Şekil 14. 10NS-1.2PL Serisine Ait SEM Analizi Sonuçları



Şekil 14. 0NS-2.4PL Serisine Ait SEM Analizi Sonuçları



Şekil 15. 10NS-2.4PL Serisine Ait SEM Analizi Sonuçları

SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Çalışma kapsamında; üretilen 9 MB'de 3 farklı oranda NS ve 3 farklı oranda PL kullanılmıştır. Tüm MB serileri 7 ve 28 gün kirece doygun su kürü ile olgunlaştırılmıştır. Fiziksel, mekanik ve mikro yapı analizine bağlı olarak elde edilen sonuçlar genel hatları ile aşağıda verildiği gibidir;

- Üretilen MB serilerinin birim hacim ağırlığı 2.08 ile 2.01 ton/m^3 aralığında değer almaktadır. Artan NS miktarı birim hacim ağırlık üzerinde doğrusal bir etki sunmamaktadır. 1.2 PL muhtevasına kadar 5 kg/m^3 oranında NS içeren seriler daha yüksek birim hacim ağırlığa sahiptir ve bu artış sadece 0.003-0.010 ton/m^3 bandındadır. Tüm serilerde PL miktarındaki artış ile birim hacim ağırlık çok az miktarda düşmektedir.
- Tüm MB'lerin porozite ve kütlece su emme oranı sırasıyla %11.4-13.4 ve % 5.0-6.1 aralığında değer almaktadır. En fazla porozite oranı 10NS-1.2PL serisine aittir. PL miktarındaki artış porozite ve kütlece su emme oranını arttırmaktadır.
- En fazla basınç dayanımı 65.56 MPa ile 10NS-0PL serisine, en düşük basınç dayanımı ise 51.30 MPa ile 0NS-2.4PL serisine aittir. PL içermeyen serilerde NS miktarı arttıkça basınç dayanımı artan eğilim sergiler. Ancak 1.2 ve 2.4 kg/m^3 PL içeren serilerde sadece 5 kg/m^3 NS içeren seriye kadar basınç dayanımında artış söz konusudur. NS miktarındaki artışın basınç dayanımına olan katkısı PL miktarından etkilenmektedir.
- Aynı PL miktarına sahip MB serilerinde artan NS miktarının eğilmede çekme dayanımı azalttığı görülmektedir.
- SEM analizi görsellerine göre NS kullanılan serilerde C-S-H oluşumunu daha belirgindir. Tüm serilerin EDS analizinde ağırlıkça baskın oranda Oksijen (O), Karbon (C), Kalsiyum (Ca) ve Silisyum (Si) tespit edilmiştir. Ayrıca NS içeren serilerde Si oranı daha yüksektir.

Bu çalışmada tasarlanan karışımlarda çimentoya sadece NS ikame edilmiş ve 3 farklı oranda değişim uygulanmıştır. Bunun yanı sıra deneysel periyotlar 7 ve 28 gündür. Çalışma verileri ve mevcut literatür çalışmalarına göre; ilerleyen numune yaşı ve çimentoya ikili ve üçlü ikame durumlarının; fiziksel, mekanik ve mikro yapı üzerinde etkisi öngörülmektedir. Takip eden MB çalışmaları için; NS, MS, UK, YFC'nin ikili ve üçlü ikame yöntemi ile uygulandığı ve ileri numune yaşının farklı kür koşullarına bağlı olarak değerlendirildiği deneysel verilerin sürdürülebilirlik bağlamında faydalı olacağı düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

Açıkgenç, M., Arazsu, U., ve Alyamaç, K. E. (2012). Farklı Karışım Oranlarına Sahip Polipropilen Lifli Betonların Dayanım ve Durabilite Özellikleri. *Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi*, *4*, 41–54.

Akgül, M., ve Etli, S. (2023). Lif Takviyeli Mikro Betonların Erken Yaş Mekanik ve Durabilite Özellikleri. *8. Internatıonal Scıences & Innovatıon Congress,* 14-15 October, Ankara.

Akgül, M. (2024). Wood Ash Effect on Cement Based Self-Compacting Mortars. *Civil Engineering Beyond Limits*, *5*(2), 1–8. https://doi.org/10.36937/cebel.2024.1945

Akgül, M., Doğan, O., & Odacıoğlu, O.G. (2022). A Review on Adherence in Reinforced Concrete. *Civil Engineering Beyond Limits,* 4, 1765. https://doi.org/10.36937/cebel.2022.1765

Akgül, M., ve Hansu, O. (2024). Harç Atığı İkameli Mikro Betonlarda Sertleşmiş Hal ve Mikroyapı Değerlendirilmesi. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, *27*(3), 1089–1101. https://doi.org/10.17780/ksujes.1482487

ASTM C348-21. (2021). *Test Method for Flexural Strength of Hydraulic-Cement Mortars*. ASTM International. https://doi.org/10.1520/C0348-21

ASTM C349-08. (2008). *Standard test method for compressive strength of hydraulic-cement mortars (using portions of prisms broken in flexure). ASTM lnternational, 1-4.*

ASTM C1585-13. (2013). *Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic Cement Concretes, ASTM International 41. 1-6.*

Balapour, M., Joshaghani, A., & Althoey, F. (2018). Nano-SiO2 contribution to mechanical, durability, fresh and microstructural characteristics of concrete: A review. *Construction and Building Materials*, *181*, 27–41. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.266

Başaran, M. (2022). *Nano silika ve mikro silika katkılı harçlarda durabilite ve mekanik özellikler*. Yüksek Lisans Tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi.

Bayrak, İ. C., ve Telatar, O. M. (2021). İnşaat Sektörü ve Ekonomik Büyüme İlişkisi: Türkiye Ekonomisi Üzerine Ampirik Bir Analiz. *Gümüşhane Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, *12*(3), 1283–1297.

Björnström, J., Martinelli, A., Matic, A., Börjesson, L., & Panas, I. (2004). Accelerating effects of colloidal nano-silica for beneficial calcium–silicate–hydrate formation in cement. *Chemical Physics Letters*, *392*(1–3), 242–248. https://doi.org/10.1016/j.cplett.2004.05.071

Dheyaaldin, M. H., Mosaberpanah, M. A., & Alzeebaree, R. (2022). Shrinkage behavior and mechanical properties of alkali activated mortar incorporating nanomaterials and polypropylene fiber. *Ceramics International*, *48*(16), 23159–23171. https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2022.04.297

Doğruyol, M., ve Karaşin, A. H. (2016). Diyarbakır bazaltı kullanılan betonun sem ile araştırılması. *1st International Mediterranean Science and Engineering Congress (IMSEC 2016)*.

Etli, S. (2022). Evaluatıon Of Curıng Tıme For Mıcro Concrete Mıxes Contaınıng Sılıca Fume, Nano-Sılıca And Fly Ash. *İstanbul Ticaret Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, *21*(42), 304–316. https://doi.org/10.55071/ticaretfbd.1093891

Felekoğlu, B. (2009). *Yüksek performanslı mikro beton tasarımı*. Doktora Tezi. Dokuz Eylül Üniversitesi.

Felekoğlu, B. (2014). Rheological behaviour of self-compacting micro-concrete. *Sadhana*, *39*(6), 1471–1495. https://doi.org/10.1007/s12046-014-0281-2

Jalal, M., Mansouri, E., Sharifipour, M., & Pouladkhan, A. R. (2012). Mechanical, rheological, durability and microstructural properties of high performance self-compacting concrete containing SiO2 micro and nanoparticles. *Materials & Design*, *34*, 389–400. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.08.037

Jeon, K., Jeon, C., & Choi, W. (2023). Effect of mixing ratio on fire resistance of cement mortar with polypropylene fiber and polymer. *Case Studies in Construction Materials*, *19*, e02503. https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02503

Ji, T. (2005). Preliminary study on the water permeability and microstructure of concrete incorporating nano-SiO2. *Cement and Concrete Research*, *35*(10), 1943–1947. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2005.07.004

Kara, C. (2020). Nano SiO_2 Katkılı Çimento Harçlarının Mekanik Özelliklerine Yüksek Sıcaklığın Etkisi. *European Journal of Science and Technology*, 247–253. https://doi.org/10.31590/ejosat.722814

Khaliq, W., & Kodur, V. (2011). Thermal and mechanical properties of fiber reinforced high performance self-consolidating concrete at elevated temperatures. *Cement and Concrete Research*, *41*(11), 1112–1122. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.06.012

Kim, M.S., Sim, S.R., & Ryu, D.W. (2020). A Study on the Spalling Properties of Polymer Modified Cement Mortar Using Polypropylene Fiber. *Journal of the Korea Institute of Building Construction*, *20*(4), 305–311. https://doi.org/10.5345/JKIBC.2020.20.4.305

Li, H., Xiao, H., Yuan, J., & Ou, J. (2004). Microstructure of cement mortar with nano-particles. *Composites Part B: Engineering*, *35*(2), 185–189. https://doi.org/10.1016/S1359-8368(03)00052-0

Li, L. G., Zheng, J. Y., Zhu, J., & Kwan, A. K. H. (2018). Combined usage of micro-silica and nano-silica in concrete: SP demand, cementing efficiencies and synergistic effect. *Construction and Building Materials*, *168*, 622–632. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.02.181

Liu, M., Zhou, Z., Zhang, X., Yang, X., & Cheng, X. (2016). The synergistic effect of nano-silica with blast furnace slag in cement based materials. *Construction and Building Materials*, *126*, 624–631. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.09.078

Naji Givi, A., Abdul Rashid, S., Aziz, F. N. A., & Salleh, M. A. M. (2010). Experimental investigation of the size effects of SiO2 nano-particles on the mechanical properties of binary blended concrete. *Composites Part B: Engineering*, *41*(8), 673–677. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2010.08.003

P. P., A., Nayak, D. K., Sangoju, B., Kumar, R., & Kumar, V. (2021). Effect of nano-silica in concrete; a review. *Construction and Building Materials*, *278*, 122347. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122347

Sevim, O., Jiang, Z., & Ozbulut, O. E. (2022). Effects of graphene nanoplatelets type on self-sensing properties of cement mortar composites. *Construction and Building Materials*, *359*, 129488. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129488

Sevim, O., Kalkan, İ., Demir, İ., & Akgüngör, A. P. (2021). Effects of the sole or combined use of chemical admixtures on properties of self-compacting concrete. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, *21*(4), 150. https://doi.org/10.1007/s43452-021-00302-7

Singh, L. P., Karade, S. R., Bhattacharyya, S. K., Yousuf, M. M., & Ahalawat, S. (2013). Beneficial role of nanosilica in cement based materials – A review. *Construction and Building Materials*, *47*, 1069–1077. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.05.052

Topçu, İ. B., & Ateşin, Ö. (2016). Effect of high dosage lignosulphonate and naphthalene sulphonate based plasticizer usage on micro concrete properties. *Construction and Building Materials*, *120*, 189–197. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.05.112

Topçu, İ. B., Demirel, O. E., ve Uygunoğlu, T. (2017). Polipropilen Lif Katkılı Harçların uluslararası ve Mekanik Özelikleri. *Politeknik Dergisi*, *20*(1), 91–96.

TS EN 197-1. (2011). Çimento- Bölüm 1: Genel çimentolar- Bileşim, özellikler ve uygunluk kriterleri. *Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.*

TS EN 933-1. (2012). Agregaların geometrik özellikleri için deneyler - Bölüm 1: Tane büyüklüğü dağılımının tayini - Eleme yöntemi. *Türk Standartları Enstitüsü*, *Ankara.*

TS EN 934-2+A1. (2014). *Kimyasal katkılar - Beton, harç ve şerbet için - Bölüm 2: Beton kimyasal katkıları - Tarifler, gerekler, uygunluk, işaretleme ve etiketleme*. *Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.*

TS EN 1008. (2003). Beton-Karma suyu-Numune alma, deneyler ve beton endüstrisindeki işlemlerden geri kazanılan su dahil, suyun, beton karma suyu olarak uygunluğunun tayini kuralları. *Türk Standartları Enstitüsü*, *Ankara*.

Türkmenoğlu, H. N., Önder, E., ve Atahan, H. N. (2022). Farklı Su/Bağlayıcı Oranına Sahip Betonlarda Nano Silika ve Granüle Yüksek Fırın Cürufu Kullanımın Mekanik ve Elastik Özellikler Üzerine Etkisi. *DÜMF Mühendislik Dergisi*. https://doi.org/10.24012/dumf.1147581

Uygunoğlu, T., Topçu, İ. B., Meşe, M., ve Çınar, E. (2017). Polipropilen Lif Katkılı Harçların Elektriksel ve Mekanik Özelikleri. *V. Uluslararası Polimerik Kompozitler Sempozyumu ve Çalıştayları*, 439-446.

Wei, W., Xukun, M., Chulei, F., Na, L., Wei, T., Fuyong, C., Ping, J., & Guoxiong, M. (2024). Mechanical characteristics and microscopic mechanism of polypropylene fiber modified recycled road solid waste fine aggregate mortar. *Journal of Building Engineering*, *97*, 110798. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.110798

Xin, C. L., Wang, Z. Z., Zhou, J. M., & Gao, B. (2019). Shaking table tests on seismic behavior of polypropylene fiber reinforced concrete tunnel lining. *Tunnelling and Underground Space Technology*, *88*, 1-15. https://doi.org/10.1016/j.tust.2019.02.019

Zyganitidis, I., Stefanidou, M., Kalfagiannis, N., & Logothetidis, S. (2011). Nanomechanical characterization of cement-based pastes enriched with SiO2 nanoparticles. *Materials Science and Engineering: B*, *176*(19), 1580–1584. https://doi.org/10.1016/j.mseb.2011.05.005

KSÜ Mühendislik Bilimleri Dergisi, 28(2), 2025
Araştırma Makalesi

KSU J Eng Sci, 28(2), 2025
Research Article

Kahramanmaras Sutcu Imam University
Journal of Engineering Sciences

Geliş Tarihi : 03.01.2025
Kabul Tarihi :22.04.2025

Received Date : 03.01.2025
Accepted Date :22.04.2025

PERFORMANCE AND EFFICIENCY OF PHOTOVOLTAIC PANELS IN ERZURUM WINTER CONDITIONS

ERZURUM KIŞ KOŞULLARINDA FOTOVOLTAİK PANELLERİN PERFORMANSI VE VERİMLİLİĞİ

Şendoğan KARAGÖZ[1] (ORCID: 0000-0003-2618-8788)
Meryem ARAS[1] (ORCID: 0000-0003-4971-2917)
Orhan YILDIRIM[1*] (ORCID: 0000-0001-8780-1297)
Fadime ŞİMŞEK[1] (ORCID: 0000-0002-1440-7480)
Ömer ÇOMAKLI[1] (ORCID: 0000-0003-4631-7989)

[1] Atatürk University, Department of Mechanical Engineering, Erzurum, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Orhan YILDIRIM, orhan.yildirim@atauni.edu.tr

ABSTRACT

In this study, the efficiency and performance ratios of monocrystalline and polycrystalline type Photovoltaic (PV) solar panels were investigated comparatively under winter conditions in Erzurum province. Within the scope of the research, an experimental system was established using 250W monocrystalline and polycrystalline panels, and measurements were taken in December, January, and February. Current, voltage, and power outputs of the panels were measured, and efficiency and performance ratios were calculated. The results of the study show that the theoretical efficiency of polycrystalline panels is in the range of 13.9-18%, while the efficiency of monocrystalline panels is in the range of 13-17%. The performance ratios of polycrystalline panels were 116%, 94%, and 90% for December 2019, January, and February 2020, respectively. The performance rates of monocrystalline panels were 110%, 91%, and 90% for the same months. These results show that both panel types perform similarly in terms of efficiency, but polycrystalline panels have a slightly higher performance ratio. The results show that both polycrystalline and monocrystalline panels show similar performance in terms of efficiency in winter months, but the polycrystalline panel exhibited higher values in terms of performance ratios. In light of these findings, it is concluded that polycrystalline panels are more suitable for Erzurum winter conditions.

Keywords: Photovoltaic panels, efficiency, performance ratio, winter conditions, Erzurum/Turkey

ÖZET

Bu çalışmada, Erzurum ili kış ayları şartlarında monokristal ve polikristal tip fotovoltaik güneş panellerinin verimlilikleri ve performans oranları karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Araştırma kapsamında, 250W gücünde monokristal ve polikristal paneller kullanılarak bir deney sistemi kurulmuş ve Aralık, Ocak, Şubat aylarında ölçümler alınmıştır. Panellerin akım, gerilim ve güç çıkışları ölçülerek verim ve performans oranları hesaplanmıştır. Çalışmanın sonuçları, polikristal panellerin teorik veriminin %13,9-18 aralığında, monokristal panellerin veriminin ise %13-17 aralığında elde edilmiştir. Polikristal panellerin performans oranları Aralık 2019, Ocak ve Şubat 2020 için sırasıyla %116, %94 ve %90 olmuştur. Monokristal panellerin performans oranı ise aynı aylar için %110, %91 ve %90 olarak gerçekleşmiştir. Bu sonuçlar, her iki panel türünün de verimlilik açısından benzer performans gösterdiğini, ancak polikristal panellerin biraz daha yüksek bir performans oranına sahip olduğunu göstermektedir. Sonuçlar hem polikristal hem de monokristal panellerin kış aylarında verimlilik açısından benzer performans gösterdiğini, ancak performans oranları açısından da polikristal panel daha yüksek değerler sergilemiştir. Bu bulgular ışığında, Erzurum kış şartları için polikristal panellerin daha uygun olduğu sonucuna varılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Fotovoltaik paneller, verimlilik, performans oranı, kış koşulları, Erzurum/Türkiye

ToCite: KARAGÖZ, Ş., ARAS, M., YILDIRIM, O., ŞİMŞEK, F. & ÇOMAKLI, Ö., (2025). PERFORMANCE AND EFFICIENCY OF PHOTOVOLTAIC PANELS IN ERZURUM WINTER CONDITIONS. *Kahramanmaras Sutcu Imam University Journal of Engineering Sciences*, 28(2), 732-746.

INTRODUCTION

The use of renewable energy sources, such as solar energy, has been increasing in recent years as a response to the growing concern about the environmental impact of fossil fuels and the need to reduce greenhouse gas emissions. PV panels are an important technology for converting solar energy into electricity, and the efficiency and performance of these panels are critical factors for their economic viability and long-term sustainability (Jeter, 1981; Chandel and Agarwal, 2017; Shukla et al., 2017; Cuce et al., 2013; Öztürk et al., 2012a).

Erzurum, Turkey, is an area with high solar radiation and a suitable location for PV power plants. However, the performance of PV panels is affected by the weather conditions, particularly in winter. Therefore, it is essential to investigate the efficiency and performance of PV panels under winter conditions (December 2019, January, and February 2020) in Erzurum, Turkey. Farahmand et al. (2021), in their study of the effect of Seasonal Weather and Solar Conditions on PV Panels, showed that the panel efficiency is higher in winter than in summer due to the decrease in air temperature (Farahmand et al., 2021). It has been shown in many studies that the efficiency of PV panels decreases as the temperature increases. For example, theoretical studies show that each 1°C increase in temperature decreases the energy conversion efficiency by approximately 0.3% (Hossain et al., 2020). In this context, it can be considered that lower temperatures in winter conditions can positively affect panel efficiency. However, environmental factors also affect panel performance. For example, dust accumulation can reduce the power output of panels. In one study, uncleaned panels were observed to produce 8-12% less power per month compared to clean panels (Salimi et al., 2019). In winter conditions, snow and ice accumulation can cause similar effects.

The purpose of this study is to investigate the performance and efficiency of monocrystalline and polycrystalline PV panels under winter conditions in Erzurum, Turkey. The study aims to determine the most suitable type of panel for the region in terms of efficiency, performance ratio, and cost, and to provide scientific data to investors for making informed decisions about PV panel investments. Efficiency and performance ratios were compared over the parameters of current, voltage, and power produced by the panel, and the most suitable panel type for Erzurum was determined in terms of efficiency, performance ratio and cost (The average global radiation value of Erzurum is calculated as 4.63 kWh/m^2 -day, the average sunshine duration is 7 hours and the altitude is 1869 m).

The efficiency and performance of PV panels are critical factors for their economic viability and long-term sustainability. The efficiency of a PV panel is a measure of the panel's ability to convert solar radiation into electricity, while the performance ratio is a measure of the panel's actual energy output compared to its theoretical maximum output. Previous studies have investigated the performance and efficiency of PV panels under different weather conditions and have shown that the performance of PV panels is affected by temperature and solar radiation. For example, a study by Parthiban and Ponnambalam (2022) found that the performance of PV panels decreases as the temperature increases, a study by Karafil et al. (2016) found that the performance of PV panels is affected by the solar radiation and According to Brahim et al. (2017) They stated that only less than 20% of solar energy is converted to electricity and more than 50% of incoming solar radiation is converted to heat.

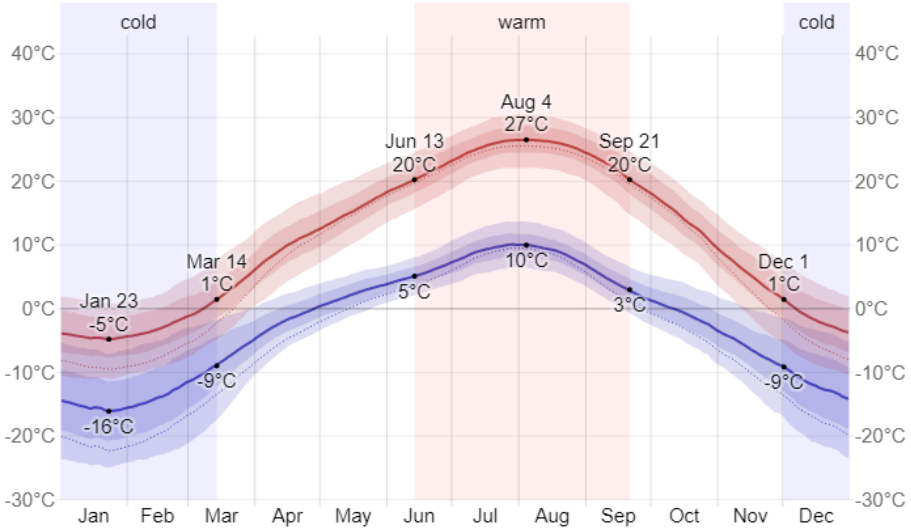


Figure 1. Average High and Low Temperatures in Erzurum Region (Weather Spark, 2023)

Despite the previous studies, the performance and efficiency of PV panels under winter conditions in Erzurum, Turkey, have not been fully investigated yet. Therefore, this study aims to fill this gap in the literature by investigating the performance and efficiency of monocrystalline and polycrystalline PV panels under winter conditions in Erzurum, Turkey. The average low and high temperatures of the Erzurum region and the hourly temperature distribution of the region are shown in Figure 1, Figure 2, and Figure 3.

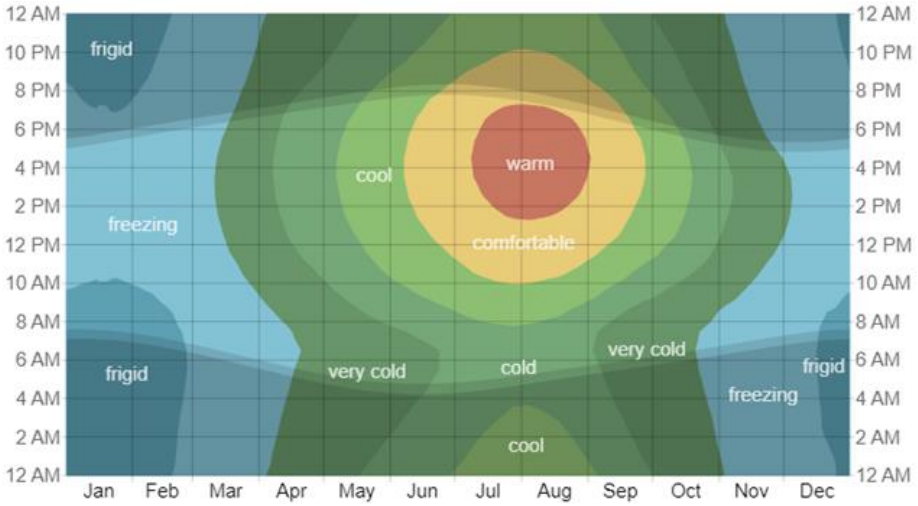


Figure 2. Hourly Temperature in Erzurum Region (Weather Spark, 2023)

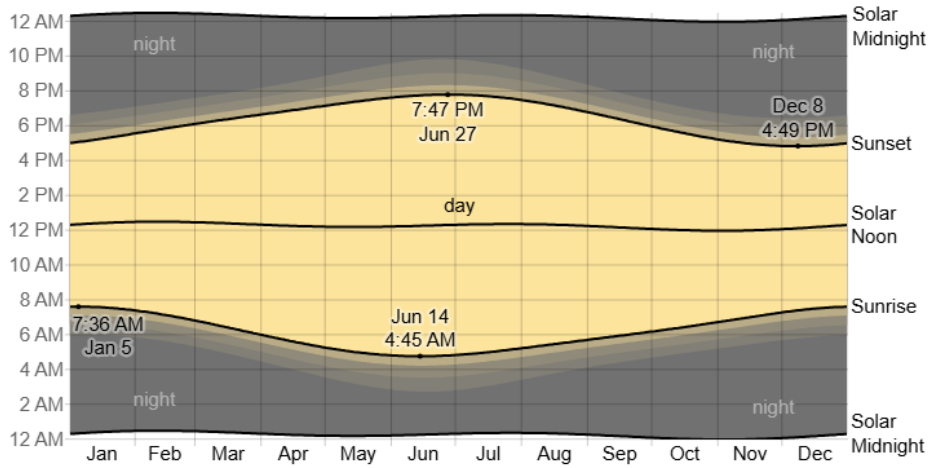


Figure 3. Sunrise and Sunset with Twilight in Erzurum (Weather Spark, 2025)

Solar energy can be used in thermal and electric systems. PV systems are utilized to generate electricity. The working principle of these systems is based on the principle of converting the radiation falling on semiconductor materials into electrical energy. Different panel types are formed due to the type and production method of the semiconductor cells used, and as a result, the efficiencies of the resulting panels are also different (Chauhan et al, 2018; Nadda et al, 2018; Baloch et al, 2015; Öztürk et al, 2012b; Yesildal et al, 2022)

In their study, Fouad et al. (2017) emphasized that it is very important to take into account the installation factors such as cable properties, inclination angle, mismatch effects, fixed/tracking PV mechanisms, and maximum power point when installing the PV systems. Canete et al., (2014) have conducted a comparative study of four different PV module technologies to obtain energy performance under the meteorological conditions of southern Spain over a period of one year.

Sulukan (2020) studied the techno-economic and environmental analysis of a PV system in Istanbul. In this study, research was conducted on a system consisting of PV modules to meet the electricity demand of a campus. The focus of the study was determined as the rooftop usable area, efficiency, inverter efficiency, and temperature effect of the photovoltaic array. At the end of the study, it was evaluated that the greenhouse gas emission was reduced by 93%, and 721.1 tons of crude oil would be saved. Taşçıoğlu et al., (2016) measured the power output of two different

technologies, polycrystalline and monocrystalline panels, according to the irradiance in Bursa and stated that as the irradiance increases, the power output also increases, and there is a linear relationship between irradiance and power. As a result of the experimental studies, 87.14 W and 80.17 W power were obtained from the monocrystalline solar panel and polycrystalline solar panel, respectively, under 1001.13 W/m^2 total solar irradiance. It can be observed that all studies have evaluated the performance of different PV technologies under different meteorological conditions and found some variations in performance, efficiency, and output power. But it's important to notice that these studies were carried out under specific conditions, and it's not possible to generalize the results for different regions and climates.

Guenounou et al. (2016) conducted a study comparing the performance of four PV panels with different technologies under natural conditions on the southern coast of the Mediterranean over a period of one year (Figure 4). 4 studies were conducted on panel technology. They compared the data provided by the manufacturer's data sheets and the experimental outdoor data, and found that the data on the data sheets were clearly not taken from real measurements. According to their results, the performance ratio, thin film PV panels (a-Si and l-Si) had the best performance ratio in summer months, while crystalline silicon PV panels (M-Si and Poli-Si) had the best performance in winter months.



Figure 4. Experimental System (Guenounou et al., 2016)

Tossa et al. (2016) measured the current and voltage values of three silicon technologies: a monocrystalline module, two polycrystalline modules, a tandem structure module (amorphous/microcrystalline), and a microcrystalline module under outdoor conditions throughout the year. The results show that the micromorph module performs best at the selected site with an average performance ratio of 92%. The monocrystalline and polycrystalline modules from the same manufacturer both have an average performance ratio of 84%. The second polycrystalline module from another manufacturer strangely shows the lowest average performance ratio (80%) due to both its large series resistance and high maximum power temperature coefficient under operating conditions. Ozden et al. (2017) investigate the performance of three distinct solar systems operating in Central Anatolia under the same meteorological circumstances after four years of operation. Different approaches for calculating input solar irradiance on tilted surfaces are used to calculate performance. These three systems' 44-month average efficiencies are calculated to be 11.86%, 6.40%, and 5.30%, respectively. The performance of a photovoltaic thermal pump (PV/T) combined system, as well as the effects of a newly designed evaporator, have been numerically studied. The highest electrical efficiency of a PV system is 2.5% more than that of a system without a cooling system, and the maximum COP of a heat pump system is 4.75. The combined system's maximum COP value is determined to be 4.3 (Ozakin et al, 2020).

MATERIALS AND METHODS

Experimental System

The study was conducted at Ataturk University Teknokent. The system was designed as an off-grid system containing two different panel Technologies (Figure 5-6). A 4 kWp solar energy system was used, consisting of 8 polycrystalline and 8 monocrystalline panels, 2 inverters (4 kW), and 8 gel batteries (100 Ampers) (Table 1). The system was also equipped with software for real-time monitoring and control. The aim was to measure the performance of two different production technologies in winter months according to Erzurum province conditions (Aras, 2019).



Figure 5. PV Experimental System



Figure 6. Combiner Box

Table 1. Introduction and Technical Characteristics of System Components

System Technical Specifications	
Installed Power	4 kWp
Panel Type	8 pieces 250 W Polycrystalline, 8 pieces 250 W Monocrystalline
Inverter	Smart Inverter 4 kW (2 pieces)
Voltage Measurement	Enda EPV 241A Modbus Voltmetre (4 pieces)
Current Measurement	Enda EPV 241A Modbus Ampermetre (4 pieces)
Automation	PLC Datalogger Ethernet
Meter	Elster A15000 Meter
Battery	100 A Gel Battery (8 pieces)
Supporting Construction	45 m^2

PV Panels

In the study, polycrystalline and monocrystalline solar panels were used. The technical specifications of these panels are given in Table 2.

Table 2. Characteristic Information Provided by The Manufacturer for The Polycrystalline and Monocrystalline Panels

Cell Type:	Polycrystalline	Monocrystalline
Maximum Power (Pm):	250 W	250 W
Maximum Power Voltage (Vmp):	30.3 V	31.64 V
Panel Efficiency:	15.37%	17.8%
Tolerance:	± 3%	± 3%
Panel Dimensions:	1640 x 992 x 40 mm.	1640 x 992 x 40 mm.

Inverter

In this study, the Axpert KS Inverter was used. Two 4 kW Smart Inverters were used, one for monocrystalline panels and one for polycrystalline panels. The inverters used can power any type of equipment, including motor-driven

items such as fluorescent lights, fans, refrigerators, and air conditioners in residential or office environments (Figure 7).

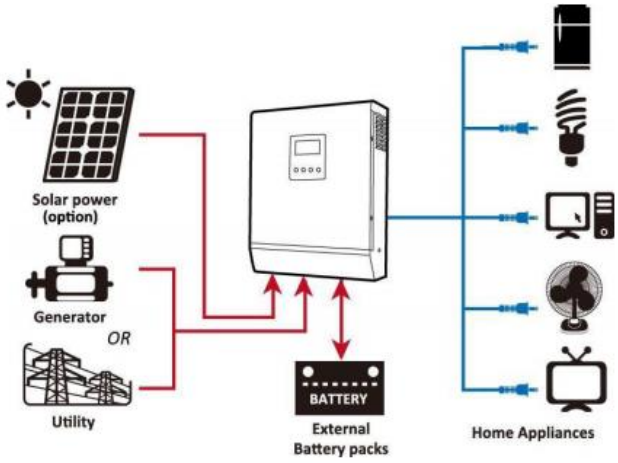


Figure 7. Inverter

The working and display panel shown in the figure below is the front panel of the inverter. This panel includes three indicators that show the working status and input/output power, four function buttons, and an LCD screen.

Current Voltage Meter

4 Enda EPV 241A Modbus Voltmeters, 2 for the output of polycrystalline and monocrystalline panels, and 2 for the output of polycrystalline and monocrystalline battery groups, and 4 Enda EPV 241A Modbus Ampermeters, 2 for the output of polycrystalline and monocrystalline panels and 2 for the output of polycrystalline and monocrystalline battery groups, were used to measure the current and voltage of the circuit. These ammeters and voltmeters have the ability to communicate with ModBus RTU protocol (Figure 8).



Figure 8. Enda EPV 241A Modbus Voltmeter and Ampermeter

Automation

Data from the system was recorded through a PLC Datalogger data recorder, remote access was provided to the system, and data was saved in a SQL database. Through the provided connection, the system's status was remotely monitored, alarms were set, and the list of data to be collected was controlled (Figure 9).



Figure 9. PLC Datalogger



Figure 10. Station Data Map

On the page that we entered with our username and password, the first thing that appears is the station data map showing the location and status of our test system (Figure 10).

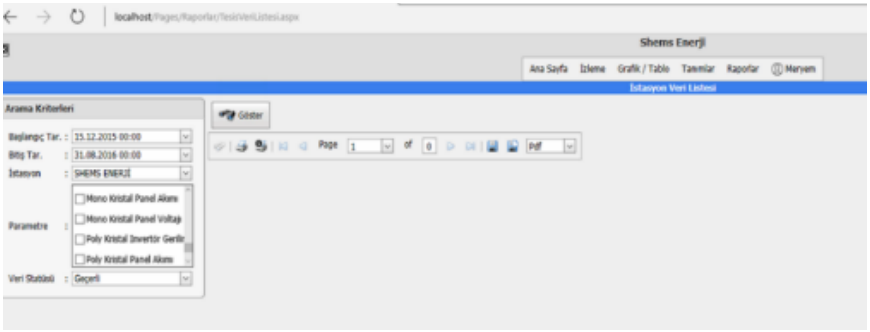


Figure 11. Station Data List

By selecting the parameter we want to see through the station data list, the read values of that parameter are examined (Figure 11).

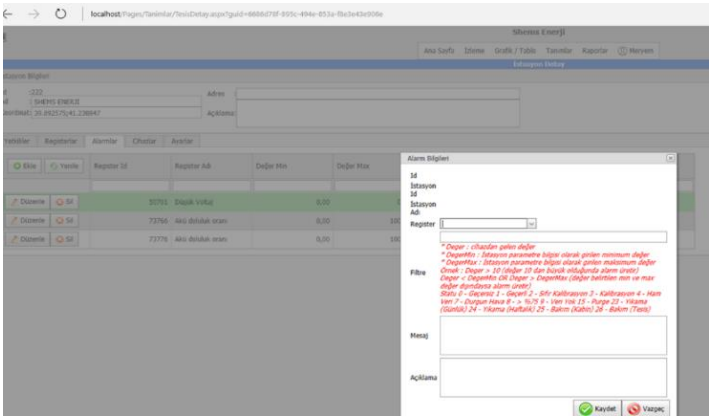


Figure 12. Station Alarm Definition

We set an alarm by specifying the range of values we want on the Station Alarm Definition page, and otherwise, we could be notified via the alarm (Figure 12).

Counter

The equipment that can measure the consumed or produced electrical energy is called an electricity meter or simply a meter. To put it briefly, the electricity meter measures the power and the time this power is applied. For this reason, the unit of measurement is Wh (Watt hour). The total energy produced in the system was measured by the Elster A15000 Counter.

Battery

8 gel batteries of 12V 100A were used in the experimental system. Gel batteries have a longer life than other batteries. Gel batteries are batteries with deeper discharge characteristics compared to other batteries. Gel batteries can discharge up to 20% without any problems.

Experiment Procedure:

The measurements were taken in December 2019, January, and February 2020, during winter months, in Erzurum province, at an appropriate slope angle, between 9:00 AM and 5:00 PM, every minute. The purpose is to assess the performance of two distinct manufacturing technologies in relation to the winter circumstances in Erzurum region. As a result of these measurements, daily average data was collected to create current-voltage graphs, and monthly average data was used to calculate the system's efficiency and performance ratio by month, and charts were drawn (Aras, 2019).

In the application, a PV experimental system was used, with an inverter system with AC output, and two different types of solar panels with 250 W power each, and an off-grid system containing two separate panel technologies. Measurements were taken in the winter months in Erzurum. The energy generated was used to illuminate the corridor of Ata Teknokent Building.

To determine the amount of electricity generated by the solar panels, an electrical measurement equipment comprised of Voltmeters and Ammeters was used in the scope of the study. The electrical measurement equipment was used to determine the current and voltage values produced by the solar panels. The data in the system was recorded with a PLC Datalogger and written to a SQL database through a remote connection. Instant data acquisition can be achieved through remote connection. The power, efficiency, and performance ratios were calculated with the current and voltage values obtained.

Determination of Panel Efficiency:
Panel efficiency can be calculated using equation 1 below.

$$\eta sys = \frac{P}{AxG} \text{ x } 100 \quad (1)$$

η : Panel efficiency (dimensionless)
P: Instant power output (W)
A : Surface area of the panel (m^2)
G: Solar irradiance (Standard Test Conditions (STC) solar irradiance is 1000 W/m^2)

Calculation of Performance Ratio:

$$P.R. = \eta sys/\eta stc \quad (2)$$

$$\eta stc = (P_{stc}/AxG_{stc}) \text{ x } 100 \quad (3)$$

These equations are used to calculate the efficiency and performance ratios.
Where;
η_{sys}: System panel efficiency (dimensionless)
η_{stc}: Panel efficiency under standard test conditions (dimensionless)
P: Instant power output from the system (W)
A : Surface area of the panel (m^2)
G: Solar irradiance intensity (Solar irradiation intensity under standard test conditions (STC) 1000 W/m^2)
*P*stc: Power output (W) under standard test conditions

RESEARCH FINDINGS AND DISCUSSION

Evaluation of Solar Radiation by Power Output

The results of this study, as illustrated in Figure 13, demonstrate that the solar radiation values recorded on sunny and partly cloudy days during the three winter months exhibit peak values in the afternoon. Additionally, it is observed that as the months progress, the peak values of solar radiation increase. This can be attributed to the increase in solar incidence angle. The results also show that the peak values of solar radiation fluctuate based on the cloudiness throughout the day. The solar radiation values approach zero at sunrise and sunset, and these findings are in line with previous studies in the literature (Başoğlu et al, 2015b; Başoğlu ve Çakır, 2015a). In conclusion, this study provides

a detailed analysis of the solar radiation values in Erzurum province during the winter months and highlights the potential of solar energy in the region. The results indicate that solar radiation values are at their highest during the afternoon hours and increase as the solar incidence angle increases. Furthermore, the study shows that cloudiness affects the solar radiation values during the day. These findings can be used as a reference for future solar energy projects in the region and for choosing the appropriate solar panel type for the region. It is important to note that the results of this study are based on measurements taken during the winter months, and future studies could be conducted to include other seasons to have a more comprehensive understanding.

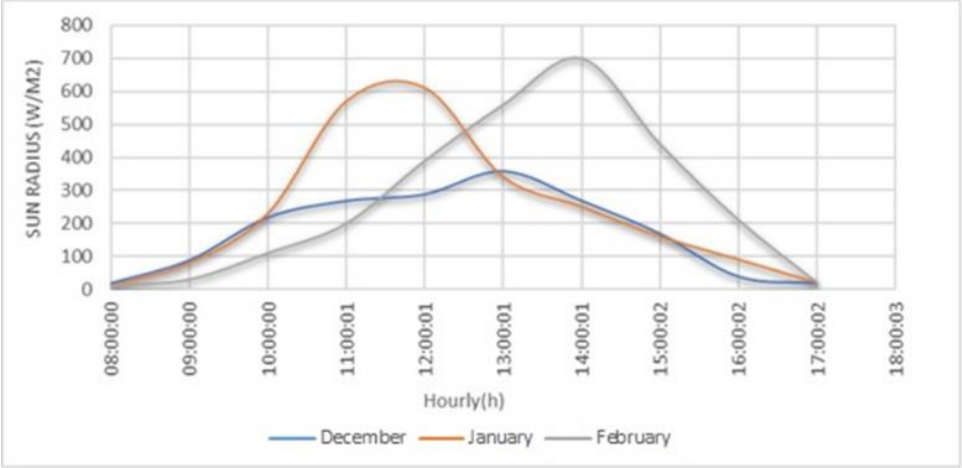


Figure 13. Hourly Solar Radiation Graph

Evaluation of Panel Power According to Solar Radiation

Figure 14. illustrates the evaluation of the panel output power at various times based on the solar radiation value recorded at that time. The analysis shows that there is an approximate linear relationship between solar radiation and panel output power. The equation of this line is found to be y = 0.0731x + 182.97. As the panel power increases, it is observed that solar radiation also increases. The results obtained are in agreement with the literature (Mirzaei and Mohiabadi, 2017; Al-Ghezi vd., 2022).

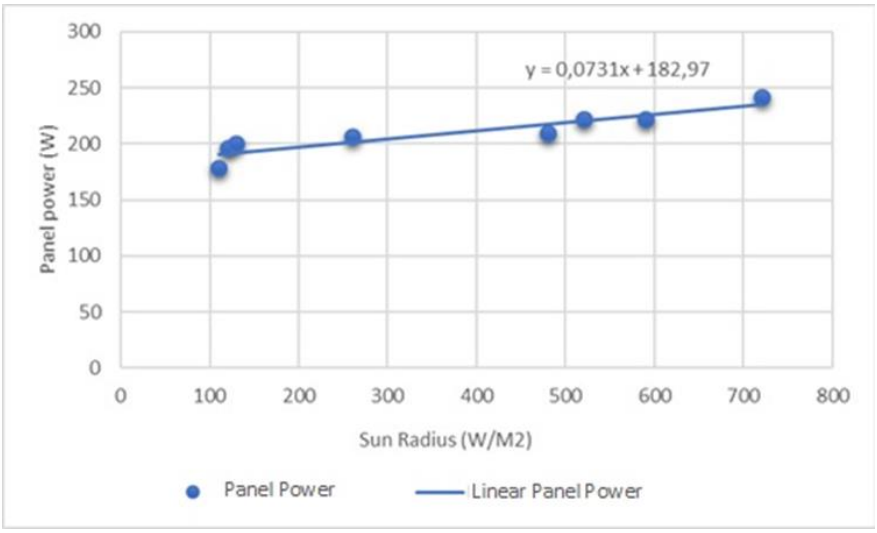


Figure 14. Panel Power-Solar Radiation Graph

The results of this study show that there is a linear relationship between solar radiation and panel output power (Al-Ghezi vd., 2022). This finding is significant because it demonstrates that the panel's output power increases as the solar radiation values increase. This information can be used to optimize the performance of PV systems by adjusting the orientation and tilt angle of the panels to maximize solar radiation.

Additionally, this study also provides an equation that can be used to estimate the panel output power based on the solar radiation values. This can be useful for predicting the performance of PV systems in Erzurum province. It is

worth noting that the results of this study are based on the measurements taken during the winter months, and further studies could be conducted to include other seasons to have a more comprehensive understanding of the relationship between solar radiation and panel output power in Erzurum province.

Evaluation of Panel Power Output by Month

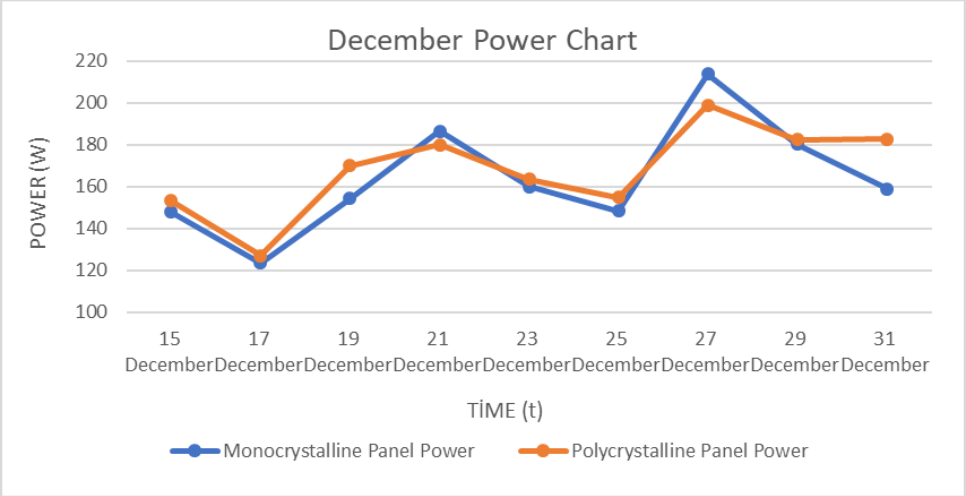


Figure 15. Panel Power Output in December

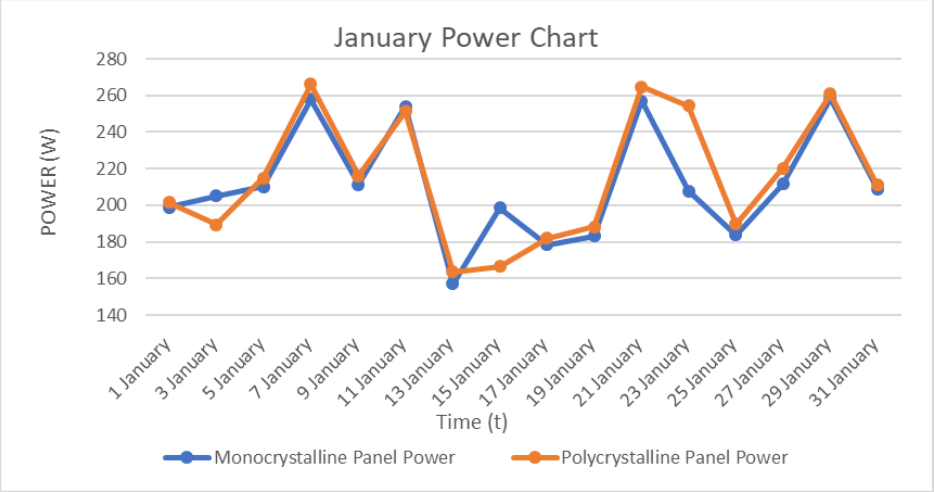


Figure 16. Panel Power Output in January

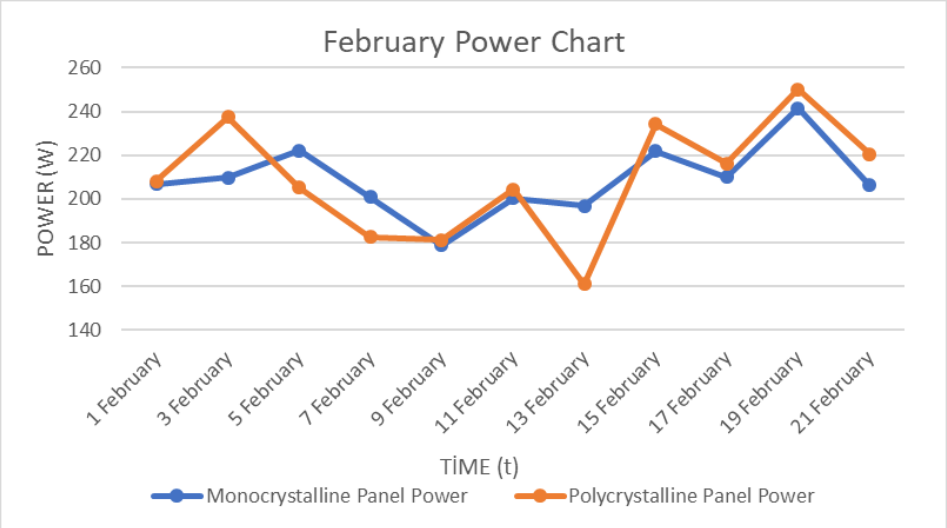


Figure 17. Panel Power Output in February

Figures 15, 16, and 17 present the power output graphs obtained from the experimental studies for the months. As shown in the graphs, the highest power values were obtained in the month of January. The average power output for monocrystalline and polycrystalline panels was 163.7 W and 168.1 W, respectively, in December; 211.4 W and 215 W in January; and 208.6 W and 209.2 W in February. Factors such as the number of sunny days, cloudiness rate, operating temperature, radiation intensity, as well as the reflection property of snow, were also observed to be effective in the results. The data is very close to each other, but there are some days when they change. However, it was determined that the power of polycrystalline panels is higher than that of monocrystalline panels on average for all three months. (Başoğlu et al, 2015b). The results obtained are in agreement with scientific studies.

The study results show that the power output of polycrystalline panels is higher than monocrystalline panels in the winter months of Erzurum. This information can be useful for investors who are considering PV panel investments in Erzurum, Turkey, and can help them to make more informed decisions about which type of panel to invest in.

Furthermore, the results also indicate that the power output is influenced by the number of sunny days, cloudiness rate, operating temperature, radiation intensity, and the reflection property of snow.

Evaluation of Panel Efficiency by Month

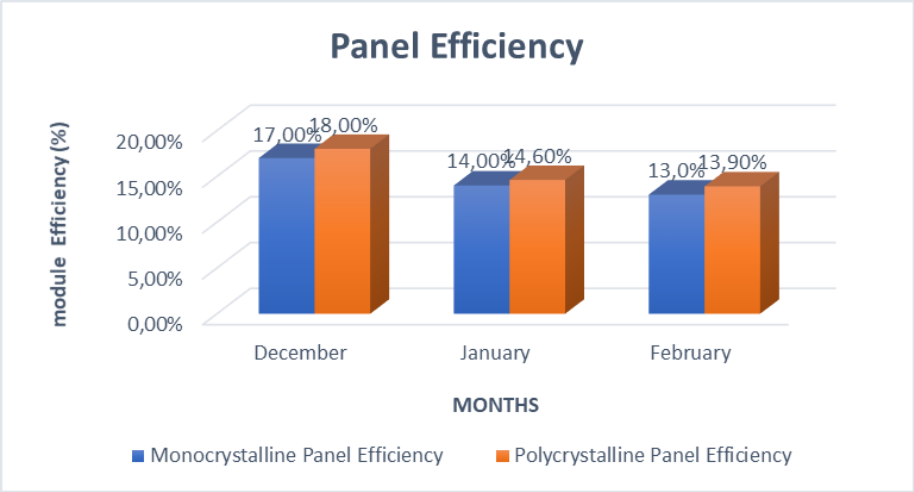


Figure 18. Average Panel Yield Per Month

Figure 18 compares the calculated efficiency values of polycrystalline and monocrystalline panels in the months of December, January, and February. The efficiency calculations were made using the hourly horizontal solar radiation values obtained from the Meteorological Institute, and the vertical solar radiation values were calculated taking into account the tilt angle of the panels. Based on the experimental data, it was determined that the average panel efficiencies for Erzurum province in the winter months were highest in December with values of 17% and 18% for monocrystalline and polycrystalline, respectively, and lowest in February with values of 13% and 13.9% for monocrystalline and polycrystalline, respectively. The efficiency values of solar panels are very similar, and it was determined that the polycrystalline panel type has an approximately 1% higher efficiency value than the monocrystalline panel type for three months (Guenounou et al., 2016; Başoğlu et al, 2015b; Başoğlu ve Çakır, 2015a). The study results show that the efficiency of polycrystalline and monocrystalline solar panels is very close to each other in the winter months of Erzurum. However, the efficiency of polycrystalline panels is slightly higher than monocrystalline panels. This information can be useful for investors who are considering PV panel investments in Erzurum and can help them to make more informed decisions about which type of panel to invest in.

Additionally, these results indicate that the efficiency of the panels is influenced by the solar radiation values, tilt angle of the panels, and weather conditions of the region. Further studies can be conducted to include other seasons and to investigate the effect of other factors such as temperature and shading on the efficiency of the panels.

Evaluation of Performance Rate by Month

Figure 19 shows the calculated performance ratios of the panels for the months. The performance ratio, which is a percentage, was calculated using the panel efficiencies and the standard conditions specified in the manufacturer's catalogs, using Equation 2. The standard test conditions used a solar radiation constant of 1000 W/m^2. The results of

the calculations indicate that the highest performance ratio was achieved in December with values of 110% and 116% for monocrystalline and polycrystalline panels, respectively, and the lowest performance ratio was in February with values of 84% and 90% for monocrystalline and polycrystalline panels, respectively. Başoğlu et al. (2015b) analyzed the energy performance of three different PV module technologies (ci-si, mc-si, cd-te) in Kocaeli, located in northwestern Turkey, between October 2013 and December 2014. The study determined the performance ratios of the panels as 82.05%, 83.8%, and 89.76%, respectively. The research indicates that the energy performance of different PV module technologies varies depending on environmental and climatic conditions, as well as disruptive factors such as shading and pollution, and location. The experiments show that the performance ratio of the polycrystalline panel is higher than the other panel, and it is in agreement with the literature (Canete et al., 2014; Başoğlu et al, 2015b). In some cases, the efficiency of polycrystalline panels can be improved. For example, coating with hydrophobic SiO_2 nanomaterial can increase the efficiency of polycrystalline panels by up to 15% (Alamri et al., 2020). Additionally, keeping the panel surface clean is crucial. Regularly cleaned panels can achieve up to 15% higher efficiency compared to dusty panels (Alamri et al., 2020). Moreover, a study conducted in arid regions observed that under high solar radiation conditions, polycrystalline panels were less affected by temperature increases and experienced less power loss compared to monocrystalline panels (Benghanem et al., 2023). According to the study conducted by Mirzaei and Mohiabadi (2017), Temperature measurements have enabled the evaluation of the impact of ambient temperature on the performance of PV modules under real operating conditions. Performance ratio (PR) analyses indicate that, due to the different light absorption and thermal characteristics of each PV module, polycrystalline modules exhibit higher PR under high temperatures during the summer months. However, despite similar irradiation conditions, monocrystalline modules demonstrate higher PR during non-summer months. Consequently, it has been determined that under the semi-arid climate conditions of Iran, polycrystalline solar modules are more suitable for use in summer, while monocrystalline modules are more efficient during non-summer periods. Panel efficiency may vary depending on environmental conditions, temperature, and solar radiation levels. Although monocrystalline panels are generally more efficient, polycrystalline panels can perform better in regions with high temperatures and intense solar radiation. Therefore, regional conditions should be considered when selecting panels (Benghanem et al., 2023; Selvaraj et al., 2023).

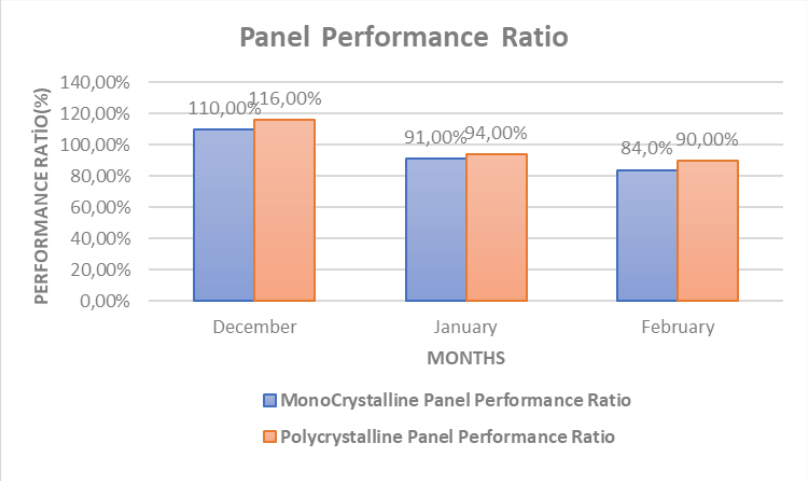


Figure 19. Average Performance Rate Per Month

The study results show that the performance ratio of polycrystalline solar panels is higher than monocrystalline solar panels. The results also suggest that the performance ratio of the panels is affected by the solar radiation, solar panel efficiency, and weather conditions of the region. These differences can be explained by the different performance of the modules depending on the operating temperature (Sharma et al., 2013; Makrides et al., 2012). Further studies can be conducted to include other seasons and to investigate the effect of other factors such as temperature and shading on the performance ratio of the panels.

CONCLUSIONS AND RECOMMENDATIONS

In Erzurum Province, the efficiency of 250 W solar panels was tested. Within the framework of efficiency and cost analysis, the research sought to identify the most efficient panel type for Erzurum province. The measurements were made in a real environment and took into account parameters such as the climatic conditions of the region (cloudiness rate, number of sunny days, outdoor temperature, etc.), solar radiation intensity, and operating temperature.

The results of the research indicate that the highest power outputs were obtained from the polycrystalline panel in January. Solar radiation and panel output power have been found to have an almost linear relationship. The theoretical efficiency of the monocrystalline panel, which is typically 15% to 18%, was found to be in the range of 13-17% as a result of the experimental study. The theoretical efficiency of the polycrystalline panel, which is typically 14% to 16%, was found to be in the range of 13.9%-18%. The performance rates of the monocrystalline panel were calculated as 110%, 91%, and 84% for December, January, and February, respectively. The performance rates of the polycrystalline panel were calculated as 116%, 94%, and 90% for December, January, and February, respectively.

Based on these results, it was determined that the average panel yields for the winter months of Erzurum province are quite high. It was also determined that the polycrystalline panel would be more suitable for Erzurum winter conditions due to its higher efficiency and performance rates. It is worth mentioning that the results of this study are based on the measurements that were taken during the winter months of December 2019, January, and February 2021, future studies could be conducted to extend the measurements and include other seasons in order to have a more complete understanding of the PV panels performance in Erzurum.

In conclusion, this study provides valuable data for investors considering PV panel investments in Erzurum, Turkey. The results indicate that both polycrystalline and monocrystalline panels performed similarly in terms of efficiency during the winter months, but polycrystalline panels had a slightly higher performance ratio and lower cost. This data can help investors to make more informed decisions about which type of panel to invest in, and can also provide insight into the potential return on investment for different types of panels in the region.

REFERENCES

Alamri, H. R., Abd-Elbary, H., Elnozahy, A., Ziedan, H. A., & Rezk, H. (2020). Experimental Investigation to Improve the Energy Efficiency of Solar PV Panels Using Hydrophobic SiO2 Nanomaterial. *Coatings*, 10(5), 503. https://doi.org/10.3390/coatings10050503

Al-Ghezi, M. K., Ahmed, R. T., & Chaichan, M. T. (2022). The Influence of Temperature and Irradiance on Performance of the photovoltaic panel in the Middle of Iraq. *International Journal of Renewable Energy Development*, 11(2), 501–513. https://doi.org/10.14710/ijred.2022.43713

Aras, M. (2019). Comparison of yield of polycrystalline and monocrystalline type photovoltaic solar panels in Erzurum winter months. Master Thesis. *Ataturk University*, Erzurum, Türkiye.

Baloch, A. A., Bahaidarah, H. M., Gandhidasan, P., & Al-Sulaiman, F. A. (2015). Experimental and numerical performance analysis of a converging channel heat exchanger for PV cooling. *Energy conversion and management*, *103*, 14-27.

Başoğlu ME, Çakır B. (2015a). An improved incremental conductance based MPPT approach for PV modules. *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, 23, 6, 13.

Başoğlu ME, Kazdaloğlu A, Erfidan T, Bilgin MZ, Çakır B. (2015b) Performance analyzes of different photovoltaic module technologies under İzmit, Kocaeli climatic conditions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 52, 357-365.

Benghanem, M., Alzahrani, A., Khushaim, M., Mellit, A., Haddad, S., Almohamadi, H., & Aida, M. S. (2023). Evaluation of the Performance of Polycrystalline and Monocrystalline PV Technologies in a Hot and Arid Region: An Experimental Analysis. *Sustainability*, 15(20), 14831. https://doi.org/10.3390/su152014831

Brahim, T., & Jemni, A. (2017). Economical assessment and applications of photovoltaic/thermal hybrid solar technology: A review. *Solar Energy*, 153, 540-561.

Canete, C., Carretero, J., & Sidrach-de-Cardona, M. (2014). Energy performance of different photovoltaic module technologies under outdoor conditions. *Energy*, *65*, 295-302.

Chandel, S. S., & Agarwal, T. (2017). Review of cooling techniques using phase change materials for enhancing efficiency of photovoltaic power systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 73, 1342-1351.

Chauhan, A., Tyagi, V. V., & Anand, S. (2018). Futuristic approach for thermal management in solar PV/thermal systems with possible applications. *Energy conversion and management*, *163*, 314-354.

Cuce, E., Cuce, P. M., & Bali, T. (2013). An experimental analysis of illumination intensity and temperature dependency of photovoltaic cell parameters. *Applied Energy*, 111, 374-382.

Farahmand, M. Z., Nazari, M. E., Shamlou, S., & Shafie-khah, M. (2021). The simultaneous impacts of seasonal weather and solar conditions on PV panels electrical characteristics. *Energies*, 14(4), 845.

Fouad, M. M., Shihata, L. A., & Morgan, E. I. (2017). An integrated review of factors influencing the perfomance of photovoltaic panels. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *80*, 1499-1511.

Guenounou, A., Malek, A., & Aillerie, M. (2016). Comparative performance of PV panels of different technologies over one year of exposure: Application to a coastal Mediterranean region of Algeria. *Energy Conversion and Management*, *114*, 356-363.

Hossain, R., Kouzani, A. Z., Ahmed, A. J., Saha, N., Mahmud, M. A. P., Debnath, P., & Islam, S. M. K. N. (2020). New Design of Solar Photovoltaic and Thermal Hybrid System for Performance Improvement of Solar Photovoltaic. *International Journal of Photoenergy*, 1–6.

Jeter, S. M. (1981). Maximum conversion efficiency for the utilization of direct solar radiation. *Solar energy*, 26(3), 231-236.

Karafil, A., Ozbay, H., & Kesler, M. (2016). Temperature and solar radiation effects on photovoltaic panel power. *Journal of New Results in Science*, 5, 48-58.

Makrides, G., Zinsser, B., Phinikarides, A., Schubert, M., & Georghiou, G. E. (2012). Temperature and thermal annealing effects on different photovoltaic technologies. *Renewable Energy*, *43*, 407-417.

Mirzaei M, & Mohiabadi MZ. (2017). A comparative analysis of long-term field test of monocrystalline and polycrystalline PV power generation in semi-arid climate conditions. *Energy for Sustainable Development*, 38, 93-101.

Nadda, R., Kumar, A., & Maithani, R. (2018). Efficiency improvement of solar photovoltaic/solar air collectors by using impingement jets: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *93*, 331-353.

Ozakin, A. N., Yakut, K., & Khalaji, M. N. (2020). Performance analysis of photovoltaic-heat pump (PV/T) combined systems: A comparative numerical study. *Journal of Solar Energy Engineering*, *142*(2), 021010.

Ozden, T., Akinoglu, B. G., & Turan, R. (2017). Long term outdoor performances of three different on-grid PV arrays in central Anatolia–An extended analysis. *Renewable energy*, *101*, 182-195.

Öztürk, M., Bozkurt Çırak, B., & Özek, N. (2012a). Life cycle cost analysis of domestic photovoltaic system. *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences, 18(1): 1-11.*

Öztürk, M., Özek, N., & Berkama, B. (2012b). Comparison of some existing models for estimating monthly average daily global solar radiation for Isparta. *Pamukkale Universitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 18(1): 13-27.

Parthiban, R., & Ponnambalam, P. (2022). An enhancement of the solar panel efficiency: a comprehensive review. *Frontiers in Energy Research*, 10, 937155.

Salimi, H., Mirabdolah Lavasani, A., Ahmadi-Danesh-Ashtiani, H., & Fazaeli, R. (2019). Effect of dust concentration, wind speed, and relative humidity on the performance of photovoltaic panels in Tehran. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 45(3), 7867–7877

Selvaraj, J., Tharmarajah, N., Faeshol Umam, M., Kumar, L., Hasanuzzaman, M., Abd Rahim, N., & Abdulmuhsen Saleh Basuhaib, A. (2023). Comparative Experimental Investigation on Front Cooling for Tempered Glass Photovoltaic Thermal System. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 45(3), 7245–7261. https://doi.org/10.1080/15567036.2023.2220663

Sharma, V., Kumar, A., Sastry, O. S., & Chandel, S. S. (2013). Performance assessment of different solar photovoltaic technologies under similar outdoor conditions. *Energy*, *58*, 511-518.

Shukla, A., Kant, K., Sharma, A., & Biwole, P. H. (2017). Cooling methodologies of photovoltaic module for enhancing electrical efficiency: A review. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 160, 275-286.

Sulukan, E. (2020). Techno-economic and environmental analysis of a photovoltaic system in Istanbul. *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, *26*(1), 127-132.

Taşçıoğlu, A., Taşkın, O., & Vardar, A. (2016). A power case study for monocrystalline and polycrystalline solar panels in Bursa City, Turkey. *International Journal of Photoenergy*, 2016(1), 7324138.

Tossa, A. K., Soro, Y. M., Thiaw, L., Azoumah, Y., Sicot, L., Yamegueu, D., Lishou, C., Coulibaly, Y., Razongles, G. (2016). Energy performance of different silicon photovoltaic technologies under hot and harsh climate. *Energy, 103*, 261-270.

Weather Spark. Climate and Average Weather Year-Round in Erzurum. https://weatherspark.com/y/102045/Average-Weather-in-Erzurum-Turkey-Year-Round (10.08.2023)

Weather Spark. Climate and Average Weather Year-Round in Erzurum. https://weatherspark.com/y/102045/Average-Weather-in-Erzurum-Turkey-Year-Round#Figures-SolarDay (28.02.2025)

Yesildal, F., Ozakin, A. N., & Yakut, K. (2022). Optimization of operational parameters for a photovoltaic panel cooled by spray cooling. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, *25*, 100983.

KSÜ Mühendislik Bilimleri Dergisi, 28(2), 2025
Araştırma Makalesi

KSU J Eng Sci, 28(2), 2025
Research Article

Kahramanmaras Sutcu Imam University
Journal of Engineering Sciences

Geliş Tarihi : 02.01.2025
Kabul Tarihi :10.01.2025

Received Date : 02.01.2025
Accepted Date : 10.01.2025

KAHRAMANMARAŞ GREENHOUSE GASES EMISSION INVENTORY AND CLIMATE CHANGE ACTION PLANS

KAHRAMANMARAŞ SERA GAZI EMİSYON ENVANTERİ VE İKLİM DEĞİŞİKLİĞİ EYLEM PLANLARI

Emre Oguz KOROGLU[1*] (ORCID: 0000-0002-6027-6792)

[1]Kahramanmaraş Sütçü İmam University, Environmental Engineering Department, Kahramanmaraş, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Emre Oguz Koroglu, emreoguzkoroglu@gmail.com

ABSTRACT

To combat the effects of climate change, especially the urban heat island effect, and provide a healthier, more sustainable environment, local governments play a crucial role in implementing national policies at the local level. Local governments must develop action plans tailored to their specific conditions, aligned with national strategies. In this context, a greenhouse gas inventory was prepared for Kahramanmaraş, and climate change action plans were identified to reduce emissions and mitigate the impacts of climate change. The proposed actions focus on energy efficiency, renewable energy, waste management, and afforestation. Key measures include improving energy efficiency in buildings (insulation, energy-efficient lighting) and reducing coal consumption, resulting in a total reduction of 152,550 tons of CO_2 emissions. Energy-efficient urban planning in new developments is projected to reduce emissions by 5,462 tons, while energy efficiency measures in the commercial sector could lead to a reduction of 40,048 tons. Expanding public transportation and promoting alternative fuels are expected to save 41,377 tons of emissions. Renewable energy adoption, particularly through rooftop photovoltaic systems, could reduce emissions by 69,045 tons. Improvements in waste management, particularly recycling, would lower emissions by 4,113 tons, and afforestation efforts are estimated to reduce emissions by 2,891 tons. In total, these measures are projected to achieve a reduction of 315,486 tons of CO_2 emissions, significantly contributing to Kahramanmaraş's efforts to combat climate change and promote sustainability.

Keywords: Climate change, emission reduction, local governments, energy efficiency, renewable energy

ÖZET

İklim değişikliğinin etkilerine karşı mücadele etmek, özellikle kentsel ısı adası etkisini azaltmak ve daha sağlıklı, sürdürülebilir bir çevre sağlamak için yerel yönetimlerin, ulusal ölçekte belirlenen politikaları yerel düzeyde uygulama ve yayma konusunda çok önemli görevleri vardır. Yerel yönetimler, kendi özel koşullarını göz önünde bulundurarak ulusal politikalarla uyumlu stratejiler geliştirip, bu sorunu çözmek için yerel ölçekte eylem planları hazırlamalıdır. Bu bağlamda bu çalışmada, Kahramanmaraş ilinin sera gazı envanteri hazırlanmış ve şehre özel olarak uygulanabilecek iklim değişikliği eylem planları ile bu planların emisyon azaltımına katkıları belirlenmiştir. Belirtilen eylemlerde, enerji verimliliği, yenilenebilir enerji, atık yönetimi ve ağaçlandırma alanlarına odaklanmaktadır. Öne çıkan önlemler arasında binalarda enerji verimliliğini artırma (yalıtım, enerji verimli aydınlatma) ve kömür tüketiminin azaltılması yer almakta ve bu önlemler ile toplamda 152.550 ton, yeni kentsel gelişimlerde enerji verimli planlama ile 5.462 ton, ticaret sektöründe enerji verimliliği önlemleriyle 40.048 ton, toplu taşımanın genişletilmesi ve alternatif yakıtların teşvik edilmesi ile 41.377 ton, çatı üstü fotovoltaik sistemler aracılığıyla yenilenebilir enerji kullanımı ile 69.045 ton, atık yönetiminde iyileştirmeler yani özellikle geri dönüşüm ile, 4.113 ton ve ağaçlandırma çalışmaları 2.891 ton CO_2 emisyon azaltımı sağlanabileceği belirlenmiştir. Bu eylemler ile toplamda 315.486 ton CO_2 emisyonu azaltımı gerçekleştirilerek, Kahramanmaraş'ın iklim değişikliğiyle mücadele ve sürdürülebilirlik çabalarına önemli katkılar sağlanabileceği düşünülmektedir.

To Cite: KOROGLU, E.O., (2025). KAHRAMANMARAŞ GREENHOUSE GASES EMISSION INVENTORY AND CLIMATE ACTION PLANS. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 28(2), 747-762.

Anahtar Kelimeler: İklim değişikliği, emisyon azaltımı, yerel yönetimler, enerji verimliliği, yenilenebilir enerji

INTRODUCTION

Cities with dense populations, production, and consumption tend to have higher pollutant levels, which not only amplify their contributions to climate change but also make them more vulnerable to its impacts. Moreover, cities influence a vast area beyond their boundaries through activities such as trade and transportation. In recent years, extreme weather events such as floods, erosion, heat waves, and droughts have affected many regions of the world, including our country, bringing the issue of climate change to the forefront of global concerns (Bolan et al., 2024). Climate change is one of the most critical problems of the world, negatively affecting all aspects of life, including the natural environment, urban living, development and economy, technology, human rights, agriculture and food, clean water, and health. The Industrial Revolution, marked by increased fossil fuel use, deforestation, land-use changes, industrial processes, rapid population growth, and human activities, has accelerated the accumulation of greenhouse gases in the atmosphere, exacerbating global warming and turning climate change into one of humanity's most significant threats (Venegas et al., 2023).

Scientific studies have proven that climate change is more than an environmental issue; it is a global crisis that will continue to affect the planet in the long term. In the coming decades, Earth will face rising temperatures and changes in precipitation patterns. As part of the preparation for the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), which involved thousands of scientists worldwide, it was emphasized that the warming of the climate system is unequivocal, with many changes observed since 1950 being unprecedented (IPCC, 2014). It was further highlighted that human activity is the primary cause of global warming, with the northern hemisphere experiencing the warmest 30-year period in history and surface temperatures continuing to rise since 1850 (Jones et al., 2010). Studies also reveal that recent climate changes have impacted people and natural systems across all continents and oceans, altering precipitation patterns and melting snow and ice masses, thereby disrupting the hydrological cycle and affecting the quality and quantity of water resources.

The impacts of climate change, including increased land and sea temperatures and changes in precipitation patterns, are causing global sea levels to rise, increasing coastal erosion risks, and intensifying natural disasters linked to weather conditions (Dong et al., 2024). Changes in water levels, temperatures, and flows affect sectors such as food supply, agriculture, health, industry, tourism, and transportation, as well as ecosystem integrity. In some regions, including those where our country is located, societies are encountering the adverse effects of climate change more frequently and severely.

Rural-to-urban migration triggers unplanned urbanization, exacerbating the urban heat island effect and intensifying warming in cities (Das et al., 2024). Rapid population growth in urban areas causes significant changes in land cover, necessitating more industrial, commercial, and transportation services to accommodate expanding cities. Unplanned urbanization and industrialization alter the heat and water cycles in the atmospheric boundary layer, distinguishing urban climates from rural ones (Tzavali et al., 2015). The urban heat island effect exacerbates global climate change on a local scale, adversely impacting the health of humans and other living beings, quality of life, and energy consumption.

To combat the heightened impacts of climate change, such as the urban heat island effect, and to provide citizens with a livable, healthy, and sustainable environment while reducing climate change-related risks, local governments play a vital role in implementing and expanding nationally determined policies at the local level (Hoppe et al., 2014). In this context, local governments must develop localized strategies and action plans tailored to their unique circumstances, aligning with national policies to address this global issue effectively. In this context, this study investigated the greenhouse gas inventory of Kahramanmaraş city and identified climate change action plans that can be implemented specifically for the city, as well as their contribution to emission reduction.

MATERIAL AND METHODS

The boundaries of the inventory encompass all emission sources within the administrative borders of Kahramanmaraş Province. Within the scope of this reporting, emissions from stationary units, mobile units, and waste have been identified. Based on the available data and emission factors, the inventory includes three greenhouse gases: carbon dioxide (CO_2), methane (CH_4), and nitrous oxide (N_2O). The calculated CH_4 and N_2O emissions were converted into

carbon dioxide equivalents (CO_2e) and included in the total emissions. The CO_2e conversions were obtained by multiplying the mass of the respective greenhouse gas by the global warming potentials provided in the IPCC Fifth Assessment Report (AR5). Hydrofluorocarbons (HFCs), perfluorocarbons (PFCs), sulfur hexafluoride (SF6), and similar greenhouse gases were excluded from the inventory due to the lack of information regarding the activities causing these emissions (IPCC, 2014).

Direct and indirect emissions from stationary sources, such as residences, commercial/institutional facilities, energy production, and industrial energy use, were considered in the inventory report. Apart from leaks in the natural gas distribution system, no other fugitive emissions within the boundaries were identified and thus not included in the inventory. Although the possibility of leakage from the natural gas distribution system is not ignored, this leakage is not currently included in the inventory due to insufficient data. To determine the emissions from stationary sources, the method outlined in Chapter 2: Stationary Combustion of the IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories was used (IPCC, 2006). Emission quantities were calculated by multiplying activity data by the emission factor associated with the fuel type. The Tier 1 approach is used to calculate CO_2 emissions by multiplying the estimated fuel sold with a default CO_2 emission factor. The approach is represented in Equation 1 (IPCC, 2006).

$$\text{Emission} = \sum_a [\text{Fuel}_a \times \text{EF}_a] \quad (1)$$

Where emission is the total emissions of CO_2 (kg), fuel_a is the fuel sold (TJ), EF_a is the emission factor (kg/TJ) and a is the type of fuel (e.g. petrol, diesel, natural gas, LPG, etc.)

Road transport, rail transport, and aviation were considered as mobile sources, and their direct and indirect emissions were included in the inventory report. For quantifying direct emissions from road vehicles, the methodology outlined in Chapter 3: Mobile Combustion of the IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories (IPCC, 2006) was used. For calculating emissions from aviation sources, the methodology in Chapter 3, of the same guidance was applied. Emissions from the total municipal solid waste (MSW), biological waste, and wastewater generated and treated within the defined boundaries were included in the inventory. These emissions were calculated in accordance with the IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories-Volume 5 (IPCC, 2006). Both CH_4 and N_2O emissions were calculated as carbon dioxide equivalents (CO_2e).

RESULTS AND DISCUSSION

Data Inventory for Stationary Sources

Sources such as residential buildings, commercial/institutional facilities, energy production, and industrial energy use are considered stationary sources, and the direct and indirect emissions from these sources are included in the inventory report. Fossil fuel consumption for heating and cooking in residential buildings, fossil fuel consumption in commercial/institutional buildings, fossil fuel consumption in manufacturing industries and construction, and the amounts of fuel consumed in energy production facilities within the boundaries that supply the national electricity grid and auto generators producing their energy within the boundaries are provided in Table 1.

Due to the lack of complete and accurate data regarding leakage from the natural gas distribution network, it has been assumed that 100% of the supplied natural gas is consumed. For the calculation of emissions from coal use in residential buildings, the number of independent housing units in the city and the number of natural gas subscribers provided by the Energy Market Regulatory Authority (EMRA) were utilized. Based on a simple assumption, the difference between these two figures was considered to represent the approximate number of coal users in the city. The calculated difference was multiplied by the average coal consumption per household, assumed to be 1.5 tons, to estimate the amount of coal used for heating purposes in Kahramanmaraş.

For fuel types, emission factors and net calorific values were taken from the IPCC guidelines (IPCC, 2006). Fuels used in industrial facilities were classified under "Scope 1 – direct emissions," while emissions from grid electricity consumption were classified under "Scope 2 – indirect emissions" and calculated using the Tier 2 approach. The total amount of electric transmission and distribution losses in Kahramanmaraş was determined to be 159,279.595 MWh through the Turkish Electricity Transmission Company (TEİAŞ). Since the sectoral distribution of the transmission and distribution losses could not be determined, it was not evaluated on a sectoral basis but included in the Scope 2 total. The fuel types and annual consumption amounts of energy production facilities within the boundaries connected

to the grid were obtained from EMRA's 2020 Natural Gas Market Sector Report and the 2020 Environmental Status Report (ESR) of the Kahramanmaraş Provincial Directorate of Environment, Urbanization, and Climate Change.

Table 1. Energy Consumption in Residential, Commercial/Institutional, Industrial, and Energy Production Facilities

Category	Consumption Item	Unit	Amount	Reference
Residential Buildings	Natural Gas Consumption	Sm^3	156,707,410.9	EMRA, 2020b
	Coal Consumption	Ton	204,192	-
	Fuel Oil Consumption	Ton	208.64	EMRA, 2020c
	Total Electricity Consumption	MWh	569,611	EMRA, 2020a
	LPG Consumption	Ton	11,154	EMRA, 2020d
Commercial/Institutional Buildings	Natural Gas Consumption	Sm^3	32,582,571.99	EMRA, 2020b
	Total Electricity Consumption	MWh	666,779	EMRA, 2020a
Industrial Facilities	Natural Gas Consumption	Sm^3	86,345,922.41	EMRA, 2020b
	Fuel Oil Consumption	Ton	14,354.06	EMRA, 2020c
	Total Electricity Consumption	MWh	2,546,242	EMRA, 2020a
	LPG Consumption	Ton	633	EMRA, 2020d
Energy Production Facilities	Natural Gas Consumption	Sm^3	106,570,952.2	EMRA, 2020b
	Coal Consumption	Ton	5,281,034	SER, 2020

Data Inventory for Mobile Sources

Road transportation, railway transportation, and aviation are considered mobile sources, and the direct and indirect emissions from these sources are included in the inventory report. Within this scope, Table 2 presents the amounts of fuel sold for road and railway transportation in Kahramanmaraş, categorized by type.

Table 2. Fuel and Electricity Consumption in Road and Railway Transportation in Kahramanmaraş

Category	Consumption Item	Unit	Amount	Reference
Road Transportation	Gasoline	Ton	20,595.238	EMRA, 2020c
	Diesel	Ton	197,061.359	EMRA, 2020c
	LPG	Ton	67,452	EMRA, 2020d
Railway Transportation	Total Electricity Consumption	MWh	3,183.84	TCDD, 2020

	Diesel	Ton	404	TCDD, 2020

In railway transportation, if rail systems operate solely on grid electricity, their electricity consumption is identified; if they operate using other fuel sources, the fuel types and their consumption are determined. Data on fuel and electricity consumption for calculating emissions from railway transportation were obtained from the statistical yearbook published by the Turkish State Railways (TCDD) for 2019-2020. The amounts of diesel and electricity consumed in railway transportation were approximately calculated based on the passenger and freight transport data provided for Turkey and specifically for Kahramanmaraş.

For emissions from aviation, emissions caused during landing and takeoff (LTO) cycles were included in the inventory. Greenhouse gas emissions were calculated separately for each LTO cycle using the Tier 2 approach. In line with this approach, LTO data for each domestic and international aircraft type were obtained from both the General Directorate of State Airports Authority (DHMİ) and Kahramanmaraş Airport (Table 3). The emissions calculated according to the LTO approach only include the emissions caused during takeoff, which have been included in the Kahramanmaraş inventory (Fong et al., 2015).

Table 3. The LTO Data for Kahramanmaraş Airport

Landing	Take-off	Domestic Flights	International Flights	Reference
939	939	1870	8	DHMI, 2020

In the calculation of aviation-related emissions, the B738 aircraft type was selected as the aircraft that landed and took off the most in Kahramanmaraş, in line with the Kahramanmaraş province data of the State Airports Authority (DHMİ). The 2780 kgCO_2/LTO value belonging to this aircraft type was used.

Data Inventory for Wastes

The emissions caused by the total municipal solid waste (MSW), biological waste, and wastewater generated and treated within the defined boundaries have been included in the inventory. In this context, the annual amount of waste sent to landfill sites and the annual volume of treated wastewater are provided in Table 4.

Table 4. The Annual Amount of Waste Sent To Landfill Sites and the Annual Volume of Treated Wastewater

	Unit	Amount	Reference
Waste disposal	Ton/year	237,476.7	SER, 2020
Wastewater Treatment (Advanced treatment)	m^3/day	110,000	SER, 2020
Wastewater Treatment (Biological treatment)	m^3/day	27,162	SER, 2020

Data Inventory for Other Sources: Industrial Processes and Product Use (IPPU)

Direct emissions from non-energy industrial processes have been included in the inventory and incorporated into the Scope-1 total. In this context, the Industrial Processes and Product Use (IPPU) fata for Kahramanmaraş Province are provided in Table 5.

Table 5. Industrial Processes and Product Use Data for Kahramanmaraş Province

	Unit	Amount	Reference
Clinker production	ton	3,036,000	Koleli et al., 2015; SER, 2020
Cement production	ton	5,179,680	Koleli et al., 2015; SER, 2020

Greenhouse Gases Emission Inventory

The total carbon footprint of Kahramanmaraş was calculated as ***15,007,740 tCO_2e*** (Table 6). This value reflects the cumulative greenhouse gas emissions associated with various economic activities and energy consumption patterns in the city. As depicted in Figure 1, a significant majority of these emissions, 87.89%, originated from "Scope 1—Direct Emissions." These include emissions released directly from sources owned or controlled by entities within the city, such as fuel combustion in residential, industrial, and transportation sectors. Meanwhile, the remaining 12.11% of emissions fall under "Scope 2—Indirect Emissions," which are associated with the generation of electricity, heat, or steam consumed by the city. These two categories highlight distinct yet interconnected sources of greenhouse gas emissions that require targeted mitigation strategies.

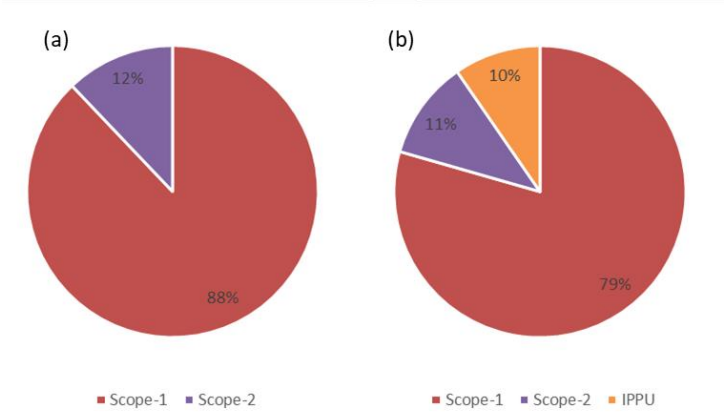


Figure 1. (a) Distribution of Emissions Based on Scope-1 and Scope-2 Emissions **(b)** Distribution of Emissions Including Industrial Production and Processes (IPPU)

Direct emissions account for the largest share of Kahramanmaraş's carbon footprint. The dominance of Scope 1 emissions reflects the heavy reliance on fossil fuels for heating, industrial processes, and transportation (Emborg et al., 2024). The residential sector, for instance, predominantly uses natural gas and coal for heating, contributing significantly to direct emissions. Similarly, the industrial sector characterized by energy-intensive activities such as cement production, textile manufacturing, and metal processing—generates substantial greenhouse gases. Transportation is another major contributor, with emissions resulting from the combustion of gasoline and diesel in private and commercial vehicles.

Addressing Scope 1 emissions requires sector-specific action plans. In the residential sector, initiatives to promote energy-efficient buildings and the use of renewable energy sources, such as solar panels, can significantly reduce fossil fuel dependence (Garg et al., 2019). For the industrial sector, technological upgrades to improve energy efficiency, coupled with the adoption of low-carbon production methods, are critical (Wang et al., 2018). In transportation, transitioning to electric or hybrid vehicles and enhancing public transportation infrastructure can help minimize direct emissions (Gordon, 2013).

Although Scope 2 emissions constitute a smaller portion of the total carbon footprint, they represent an area with substantial mitigation potential. These emissions are primarily linked to electricity consumption in residential, commercial, and industrial sectors. The dependency on electricity generated from fossil fuels exacerbates the carbon footprint, underscoring the need for a transition to renewable energy sources.

Increasing the share of renewable energy in the electricity mix is a key strategy to reduce Scope 2 emissions (Robinson et al., 2022). Investments in solar and wind energy projects can harness Kahramanmaraş's natural potential for renewable energy production. Additionally, energy efficiency measures—such as the use of LED lighting, energy-

efficient appliances, and smart grids—can lower electricity consumption and, consequently, reduce indirect emissions. Policymakers should also consider incentivizing energy audits and retrofitting programs for industrial and commercial facilities to enhance energy efficiency (Tanaka, 2011).

To address both Scope 1 and Scope 2 emissions effectively, a comprehensive and integrated climate action plan is essential. For example, expanding the use of renewable energy sources across all sectors is critical. Initiatives could include subsidizing solar panel installations, incentivizing wind energy projects, and facilitating grid integration for renewable energy producers (Qadir et al., 2021). Energy efficiency programs should target residential, industrial, and transportation sectors. Building codes must be updated to mandate energy-efficient designs, while financial incentives can encourage businesses to adopt energy-efficient technologies. Developing a robust public transportation network can reduce reliance on private vehicles. Investments in electric buses, metro systems, and bike-sharing programs can also contribute to emission reductions (Bullock et al., 2017). Introducing carbon pricing mechanisms, such as carbon taxes or cap-and-trade systems, can provide economic incentives for reducing emissions. Revenues generated from these mechanisms can be reinvested in green infrastructure and renewable energy projects. Public education campaigns are vital to foster behavioral changes. Raising awareness about energy conservation, waste reduction, and sustainable consumption can empower individuals to contribute to emission reduction efforts. Robust monitoring and evaluation frameworks are necessary to track progress in emission reduction efforts. Developing a city-wide greenhouse gas inventory can help identify emission hotspots and prioritize intervention areas.

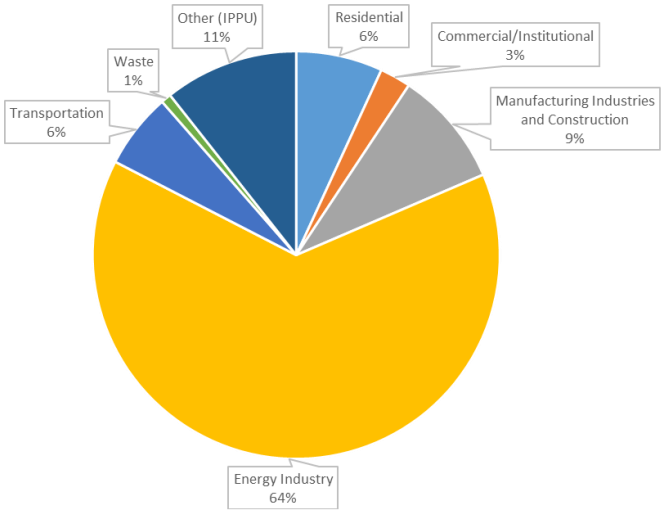


Figure 2. Distribution of Emissions by Source Category within Total Emissions

In this section, an in-depth analysis is conducted based on source categories to elaborate on the broader picture summarized in the previous section. By examining Figure 2, it becomes evident that the energy industry, which includes natural gas cycle power plants and thermal power plants, ranks first, contributing 64% to the total carbon footprint. Following the energy industry, direct emissions originating from non-energy industrial processes and product use (IPPU), such as clinker and cement production, are the next largest contributors.

Table 6. Greenhouse Gas Inventory of Kahramanmaraş (Distributions at Scope-1, 2, and 3)

Sources	Scope-1	Scope-2	Scope-3
Stationary Sources	10,576,837.44	1,814,462	-
Transportation	892,443.0456	2,753	2,610.42
Waste	121,698.01	-	-
Industrial Processes	1,596,936	-	-
Total	13,187,914.5	1,817,215	2,610.42

Within the scope of stationary sources, emissions were primarily calculated for residential areas, commercial/institutional buildings, the manufacturing industry, construction activities, and the energy industry.

Stationary source-based emissions constitute 82.5% of the total emissions, with 64.3% of these stemming from the energy industry. This significant contribution is attributed to the fact that Kahramanmaraş is one of the major energy production hubs in Turkey, hosting several thermal power plants. Furthermore, 86% of emissions from stationary sources fall under Scope 1 (Direct Emissions), while the remaining 14% are categorized under Scope 2 (Indirect Emissions). One striking finding from the analysis is the per capita greenhouse gas (GHG) emissions, which amount to 12.84 tCO_2e. This value highlights the substantial environmental burden per individual and underscores the need for effective mitigation strategies tailored to the region's specific emission profile.

Expanding on the contributions of the energy industry, it is important to note that natural gas cycle power plants and thermal power plants are central to the energy production landscape in Kahramanmaraş. These facilities primarily utilize fossil fuels, which are significant sources of CO_2 emissions due to the combustion of coal, natural gas, or oil. The reliance on such energy sources not only contributes to high carbon emissions but also exacerbates air quality issues, potentially impacting public health (Finkelman et al., 2021). According to the International Energy Agency (IEA), thermal power plants account for nearly 40% of global CO_2 emissions, making regions heavily reliant on such facilities particularly critical in achieving climate targets (IEA, 2020). The non-energy industrial processes and product use (IPPU) sector also plays a pivotal role in Kahramanmaraş's carbon footprint. The production of clinker and cement is especially emission-intensive due to the calcination process, where limestone ($CaCO_3$) is heated to produce lime (CaO), releasing substantial amounts of CO_2 (Teran et al., 2024). Studies indicate that cement production alone contributes approximately 8% of global CO_2 emissions (Andrew, 2019). This aligns with the findings in Kahramanmaraş, where the IPPU sector is the second-largest contributor to the region's emissions profile.

Residential and commercial buildings also contribute significantly to stationary emissions, primarily through heating, cooling, and electricity consumption. The energy demand in these sectors is typically met by fossil fuels or grid electricity, which, in the context of Kahramanmaraş, is largely sourced from carbon-intensive thermal power plants. Improving energy efficiency in buildings and transitioning to renewable energy sources could substantially reduce emissions in these categories. According to the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), implementing energy-efficient technologies in buildings can reduce emissions by 50-90% compared to traditional practices (IPCC, 2014).

Manufacturing and construction activities further add to the stationary emissions profile. These sectors consume significant amounts of energy and materials, such as steel and cement, which are inherently carbon-intensive. The transition to low-carbon technologies, including the use of alternative fuels, waste heat recovery, and renewable energy integration, is essential for mitigating emissions from these sectors. Research shows that adopting best practices in energy-intensive industries can lead to a 20-30% reduction in emissions (Worrell et al., 2018). The breakdown of stationary emissions into Scope 1 and Scope 2 provides valuable insights into the nature of emission sources. Scope 1 emissions, which constitute 86% of stationary emissions, are direct emissions from fuel combustion in facilities or equipment owned or controlled by the entity. These include emissions from boilers, furnaces, and vehicles. On the other hand, Scope 2 emissions, which account for 14% of stationary emissions, are indirect emissions resulting from the generation of purchased electricity, heat, or steam. The high proportion of Scope 1 emissions in Kahramanmaraş underscores the dominance of direct combustion processes in the region's emission profile. Strategies targeting fuel switching, efficiency improvements, and carbon capture and storage (CCS) could be particularly effective in addressing these emissions.

The per capita GHG emissions of 12.84 tCO_2e in Kahramanmaraş are notably higher than the global average, which stood at approximately ~4.79 tCO_2e in 2021 (Global Carbon Atlas, 2021). This disparity highlights the need for region-specific interventions that address the unique characteristics of Kahramanmaraş's emission sources. Public awareness campaigns, policy incentives for renewable energy adoption, and investments in low-carbon infrastructure are critical for reducing per capita emissions while fostering sustainable development. In conclusion, the carbon footprint analysis of Kahramanmaraş reveals a predominantly stationary source-driven emissions profile, with the energy industry and IPPU sectors being the primary contributors. The findings underscore the importance of targeted mitigation strategies, including transitioning to renewable energy sources, enhancing energy efficiency, and adopting low-carbon technologies. Addressing these challenges requires a collaborative effort involving policymakers, industry stakeholders, and the public to achieve a sustainable and low-carbon future for the region.

Climate Action Plans for Kahramanmaraş

Although the results of mitigation actions are not immediately apparent, they are practices that provide global benefits (IPCC, 2014). On the other hand, the results of adaptation activities can be observed in both the short and long term and can directly benefit the local level. This situation presents itself as a local policy choice that should be considered in the integration of climate action strategies. Indeed, today's local climate change strategies include not only action plans for emission reduction in specific sectors such as energy, transportation, and waste but also adaptation action plans with equal importance (Musco, 2010). In the framework of mitigation policies, energy, transportation, buildings (construction), and waste sectors are prominent (Seto et al., 2014). Many local climate action plans focus on actions to reduce greenhouse gas emissions from these sectors, proposing technical, administrative, and financial solutions for these actions. One of the key solutions to reduce emissions in the energy sector in cities is to ensure energy efficiency in almost all urban services. Energy efficiency is essential for combating climate change, as well as for reducing energy costs in cities. In urban transportation, promoting notable practices such as improving public transportation systems, renewing public transport vehicles based on energy efficiency, using bicycles as a means of urban transportation, and encouraging urban mobility plans for pedestrian-friendly living is important for the climate fight (Banister, 2008). Efficiency measures to be taken within the framework of urban waste management also contribute to combating climate change (Yang et al., 2023). Likewise, in the housing sector, new neighborhoods and buildings should be constructed using energy-efficient standards to reduce greenhouse gas emissions. The tables below provide examples of activities that local governments can undertake to reduce greenhouse gas emissions in cities and the co-benefits of these activities.

Due to the geographical and climatic conditions of Kahramanmaraş, heating loads do not dominate building energy consumption. Although natural gas is widely distributed, heating is mostly achieved using air conditioners, which often fail to meet the desired comfort levels in winter. On the other hand, cooling loads are significantly high during the summer, making insulation crucial for comfort in both seasons. Residential energy consumption accounts for 6.7% of Kahramanmaraş's greenhouse gas emissions. If thermal insulation is applied to 30% of existing buildings, including facades, roofs, and windows, it is estimated that electricity consumption could decrease by 5%, and heating energy demand could be reduced by 30%. This would result in savings of 10,933 MWh of electricity, 14,103,666 m^3 of natural gas, and a reduction of 31,846.61 tCO_2e in greenhouse gas emissions. Lighting systems also play a significant role in residential energy use, with studies in Turkey indicating that lighting accounts for 10-20% of total electricity consumption in homes. If 75% of households in Kahramanmaraş adopt energy-efficient LED lighting systems, lighting-related electricity consumption could be reduced by 50-80%, leading to a 10% overall reduction in electricity consumption. This transition could save 65,600 MWh of electricity and prevent 30,195.68 tCO_2e emissions. Behavioral changes in households are another critical factor in reducing energy consumption. Simple adjustments in lighting and device usage habits could lower total residential energy use by approximately 5%. To encourage such changes, local authorities plan to establish advisory centers in Kahramanmaraş, providing information on energy-saving opportunities, new technologies, and service providers. These centers will offer brochures on renewable energy technologies, efficient lighting, energy-efficient appliances, insulation, and public transportation use. Collaboration with district municipalities is recommended to maximize the reach and impact of these initiatives. Through these efforts, potential savings include 36,444 MWh of electricity and a reduction of 17,775.17 tCO_2e in emissions. Lastly, imported coal used in residences contributes 2.4% to Kahramanmaraş's total greenhouse gas inventory. Plans to reduce residential coal consumption by 20% are projected to save 40,838 tons of coal and reduce greenhouse gas emissions by 72,734 tCO_2e. Together, these strategies highlight the significant potential for reducing energy consumption and greenhouse gas emissions in Kahramanmaraş through a combination of technological upgrades, behavioral shifts, and targeted policy measures.

Table 8 highlights a sub-action focusing on urban transformation and energy-efficient new building construction in Kahramanmaraş, a key area of the city's development efforts. Large-scale urban transformation projects are being implemented, with specific zones designated for redevelopment. Approximately 5,395 buildings have been identified as risky and are targeted for replacement with new, energy-efficient residential units. The estimated outcome of this initiative is the construction of 5,395 new independent residential units. By incorporating energy-efficient design principles, proper insulation, and energy-efficient systems, it is projected that these buildings could achieve energy savings of 30-40%. The estimated savings from this initiative include 3,274 MWh of electricity, 2,080,312 cubic meters of natural gas, and a reduction of 5,462 tons of CO_2 emissions. This action represents a significant step in improving the city's sustainability, as it not only addresses the need for safer housing but also contributes to long-term energy savings and a reduction in carbon emissions. By focusing on energy-efficient construction, this urban transformation project supports both environmental and economic goals, demonstrating a commitment to reducing the city's overall carbon footprint (Moloney et al., 2015).

Table 7. Action 1: Reducing Energy Consumption in Existing Buildings through Energy Efficiency Practices

Sub-Action	Current Status	Activities	Emission Savings
1.1: Thermal Insulation	In Kahramanmaraş, due to geographical and climatic conditions, heating loads do not dominate the energy consumption of the building stock. Despite the distribution of natural gas, heating is mostly achieved using air conditioners, and the desired comfort level in winter is often not met. However, cooling loads in summer are high, and insulation is essential for comfort in both cases. Energy consumption from residences accounts for 6.7% of Kahramanmaraş's greenhouse gas emissions.	If thermal insulation is applied to 30% of the existing buildings (facades, roofs, and windows), it is estimated that electricity consumption will be reduced by 5% and energy for heating by 30%, resulting in significant savings.	10,933 MWh electricity, 14,103,666 m^3 natural gas savings, 31,846.61 tCO_2e emissions reduction
1.2: Use of Energy-Efficient Lighting Systems (LED)	Various studies in Turkey indicate that lighting accounts for about 10-20% of total electricity consumption in homes. Assuming 75% of existing residences in Kahramanmaraş switch to energy-efficient lighting systems, lighting-related electricity consumption could decrease by 50-80%, leading to an overall 10% reduction in electricity consumption.	Replacement of the most frequently used lighting systems and eventually all systems in residences with LED lighting.	65,600 MWh electricity savings, 30,195.68 tCO_2e emissions reduction
1.3: Awareness Training/Campaigns on Energy Efficiency	Household behavior is a significant factor in residential energy consumption. Changing habits for lighting and device usage can reduce total residential energy consumption by approximately 5%.	Local authorities will establish advisory centers in Kahramanmaraş where residents and workers can access information about energy consumption, savings, new technologies, and service providers. These centers will provide brochures and information on renewable energy technologies, efficient lighting, energy-efficient electronic devices, insulation, and public transport usage. Collaboration with district municipalities is recommended.	36,444 MWh electricity savings, 17,775.17 tCO_2e emissions reduction
1.4: Reduction of Coal Consumption	Imported coal consumed in residences constitutes 2.4% of the total greenhouse gas inventory.	It is planned to reduce coal consumption in residences by 20%.	40,838 tons of coal savings, 72,734 tCO_2e emissions reduction

Table 9 outlines several sub-actions focused on improving energy efficiency in commercial buildings in Kahramanmaraş, which account for a significant portion of the city's energy consumption. The energy use of non-residential buildings, including public buildings, constitutes around 17% of the city's total energy consumption, and measures like thermal insulation, awareness campaigns, and energy-efficient lighting can help reduce this figure. Sub-Action 3.1 targets thermal insulation in existing commercial buildings. Insulation is considered a cost-effective energy efficiency measure due to the higher energy consumption and prices in commercial buildings compared to

residential buildings. The goal is to apply insulation to 30% of these buildings, potentially reducing electricity consumption by 5%. This action is expected to result in 12,000 MWh in electricity savings and a reduction of 5,523 tons of CO_2 emissions. Sub-Action 3.2 focuses on awareness campaigns for energy efficiency in commercial buildings. With electricity consumption in non-residential buildings representing about 16% of the city's total, lighting accounts for a significant portion. By conducting information and awareness campaigns targeting commercial building owners, it is estimated that 5% of energy savings can be achieved in 75% of these buildings. The projected savings from this initiative are 25,000 MWh in electricity and 11,507 tons of CO_2 emissions reduction. Sub-Action 3.3 addresses the implementation of energy-efficient lighting systems in commercial buildings. With high energy consumption and costs in these buildings, replacing lighting with more efficient systems has proven to be cost-effective, often with a payback period of less than a year. It is estimated that applying energy-efficient lighting to 75% of commercial buildings could lead to a 10% reduction in electricity consumption. This action is expected to save 50,008 MWh of electricity and reduce CO_2 emissions by 23,018 tons. These initiatives collectively contribute to a significant reduction in both energy consumption and carbon emissions, aligning with the city's goals for sustainability and energy efficiency.

Table 8. Action 2: Energy-efficient Planning of Newly Designated Residential Areas in Kahramanmaraş

Sub-Action	Current Status	Activities	Emission Savings
2.1: Urban Transformation and Energy-Efficient New Building Construction	Urban transformation is one of the key focus areas in Kahramanmaraş. Large-scale urban transformation and development project areas have been designated across the city. Approximately 5,395 risky buildings have been identified in the province.	It is estimated that 5,395 new independent residential units will be constructed. Through proper energy-efficient design, insulation, and efficient energy systems, 30-40% energy savings can be achieved in these units.	3,274 MWh electricity, 2,080,312 m^3 natural gas savings, 5,462 tCO_2e emissions reduction

Table 9. Action 3: Reducing Energy Consumption in Existing Commercial Buildings through Energy Efficiency Practices

Sub-Action	Current Status	Activities	Emission Savings
3.1: Thermal Insulation in Existing Commercial Buildings	The energy consumption of non-residential buildings, including public buildings, constitutes approximately 17% of Kahramanmaraş's energy usage. Given the higher energy consumption and prices in commercial buildings compared to residences, energy efficiency measures such as insulation are cost-effective. It is estimated that applying insulation to 30% of these buildings could reduce electricity consumption by 5%.	Raising awareness among commercial building owners about the importance of thermal insulation.	12,000 MWh electricity savings, 5,523 tCO_2e emissions reduction
3.2: Awareness Campaigns for Energy Efficiency in Commercial Buildings	Electricity consumption in non-residential buildings accounts for about 16% of the city's total consumption. A significant portion of this consumption is due to lighting. Awareness campaigns can be very effective in achieving 5% energy savings in 75% of these buildings.	Conducting information and awareness campaigns targeted at commercial buildings.	25,000 MWh electricity savings, 11,507 tCO_2e emissions reduction
3.3: Energy-Efficient Lighting in Existing Commercial Buildings	The high energy costs and consumption in commercial buildings make energy-efficient lighting systems cost-effective, with a payback period of less than a year in similar projects. It is estimated that implementing such measures in 75% of commercial buildings could result in 10% electricity savings.	Conducting targeted information and awareness campaigns for commercial buildings.	50,008 MWh electricity savings, 23,018 tCO_2e emissions reduction

Table 10 outlines two sub-actions focused on enhancing public transportation and adopting alternative technologies in Kahramanmaraş to reduce fuel consumption and greenhouse gas emissions. Sub-Action 4.1 promotes the use of public transportation as an alternative to private vehicles, which has been steadily increasing in the city. Public

transportation is expected to save approximately 5% of total fuel consumption, leading to a significant reduction in greenhouse gas emissions. Activities include encouraging public institutions to adopt shuttle services, expanding bike lanes, promoting cycling, implementing light rail systems, and converting roads to encourage walking and public transport. These measures are expected to save 1,029 tons of gasoline, 9,853 tons of diesel, and reduce CO_2 emissions by 34,553 tons. Sub-Action 4.2 involves the transition of public transportation to alternative fuels, with plans to convert 25% of the public transport fleet to electric or hybrid vehicles. The operation of 50 electric buses is anticipated, leading to energy savings of 14,826 MWh and a reduction of 6,824 tons of CO_2 emissions. These actions aim to improve the sustainability of the city's transport sector while reducing both energy consumption and carbon footprint.

Table 10. Action 4: Promoting Public Transportation to Reduce Motor Vehicle Traffic

Sub-Action	Current Status	Activities	Emission Savings
4.1: Promotion of Public Transportation	Bus-based public transportation continues to play a significant role, while private vehicle use is steadily increasing. Promoting public transportation could save approximately 5% of total fuel consumption and significantly reduce greenhouse gas emissions.	Encouraging public institutions without shuttle services to adopt them, increasing bike lanes and promoting cycling, implementing light rail public transportation, establishing rail systems in natural green areas, and narrowing vehicle roads to encourage walking and public transportation.	1,029 tons of gasoline, 9,853 tons of diesel savings, 34,553 tCO_2e emissions reduction
4.2: Use of Alternative Technologies and Fuels	Planning is required for converting the public transportation fleet to alternative fuel vehicles.	Converting 25% of the public transport fleet to electric/hybrid vehicles.	Operation of 50 electric buses, 14,826 MWh energy savings, 6,824 tCO_2e emissions reduction

Sub-Action 5.1 focuses on increasing awareness of photovoltaic (PV) applications on urban roofs in Kahramanmaraş. As one of the leading renewable energy technologies, the PV market in the city is growing rapidly, with declining prices. The activity involves awareness campaigns addressing regulations and technical aspects of installing PV systems in urban areas. It is estimated that a 100 MW PV investment capacity can be achieved, resulting in electricity savings of 150,000 MWh and a reduction of 69,045 tons of CO_2 emissions. This initiative promotes the use of renewable energy to enhance sustainability in urban environments.

Table 11. Action 5: Expansion of Renewable Energy Applications in Kahramanmaraş

Sub-Action	Current Status	Activities	Emission Savings
5.1: Awareness of Photovoltaic (PV) Applications on Urban Roofs	Photovoltaic (PV) is one of the leading renewable energy technologies for Kahramanmaraş. The PV market is growing rapidly, and prices are declining.	Awareness campaigns about regulations and technical issues for installing PV systems in urban built-up areas. It is estimated that a PV investment capacity of 100 MW can be achieved in urban areas.	150,000 MWh electricity savings, 69,045 tCO_2e emissions reduction

Sub-Action 6.1 aims to increase awareness of waste recycling practices in Kahramanmaraş, where waste characterization data from the city's solid waste landfill reveals significant amounts of recyclable materials. The total waste generated in the city amounts to 670 tons per day or 244,550 tons annually. Among this waste, 4.4% consists of paper and cardboard, 19.7% plastic, 2.6% glass, and 0.6% metal, representing substantial recycling opportunities. The proposed activities focus on recycling significant quantities of these materials, including 10,760 tons of paper/cardboard, 48,176 tons of plastic, 6,358 tons of glass, and 1,467 tons of metal. These recycling efforts are expected to contribute to a reduction of 4,113 tons of CO_2 emissions. The breakdown of emissions reductions includes

1,904 tons from paper/cardboard, 1,975 tons from plastic, 190 tons from glass, and 44 tons from metal. This initiative highlights the potential environmental benefits of recycling and emphasizes the need for increased awareness and action in waste management. By diverting recyclable materials from landfills, the city can significantly reduce its carbon footprint, promote sustainability, and contribute to a circular economy (Haris et al., 2024).

Table 12. Action 6: Waste Management

Sub-Action	Current Status	Activities	Emission Savings
6.1: Awareness of Waste Recycling Practices	According to waste characterization data at the city's solid waste landfill, 4.4% is paper and cardboard, 19.7% is plastic, 2.6% is glass, and 0.6% is metal. Daily waste amounts to 670 tons, equivalent to 244,550 tons annually.	Recycling 10,760 tons of paper/cardboard, 48,176 tons of plastic, 6,358 tons of glass, and 1,467 tons of metal.	4,113 tCO_2e emissions reduction (1,904 from paper/cardboard, 1,975 from plastic, 190 from glass, 44 from metal)

Sub-Action 7.1 focuses on forest afforestation in Kahramanmaraş, which has a total of 205,620 hectares of forested area. The proposed activity involves creating ecological corridors within urban areas, including parks, groves, afforestation zones, and gardens, to support the urban ecosystem. These green spaces are intended to enhance the city's environmental health and promote biodiversity. The initiative assumes that each tree reduces CO_2 emissions by ~22 kg annually (Gül et al., 2018). By increasing the number of trees in the city by 25%, it is estimated that a reduction of 2,891.5 tons of CO_2 emissions could be achieved. This afforestation project plays a key role in reducing the city's carbon footprint and improving air quality, while also contributing to overall climate change mitigation efforts. The creation of green spaces and urban forests provides both environmental and social benefits, enhancing the quality of life for city residents.

Table 13. Action 7: Forest Rehabilitation and Afforestation

Sub-Action	Current Status	Activities	Emission Savings
7.1: Forest Afforestation	There are 205,620 ha of forest area in the province.	Ecological corridors that will support the urban ecosystem, such as parks, groves, afforestation areas, and gardens, should be created in cities.	Assuming that 1 tree reduces CO_2 by ~22 kg per year, if the number of trees is increased by 25%, 2891.5 tCO_2e emission reduction will be achieved.

The above tables outline various actions aimed at reducing CO_2 emissions in Kahramanmaraş, focusing on energy efficiency, renewable energy, waste management, and afforestation. These initiatives contribute to the city's broader climate change mitigation efforts. Energy efficiency measures in existing buildings play a central role in emission reduction. Insulation improvements, energy-efficient lighting systems, and awareness campaigns are expected to significantly reduce CO_2 emissions, totaling 79,816 tons. Additionally, efforts to reduce coal consumption are projected to cut 72,734 tons of CO_2. These measures address residential and commercial buildings, aiming to optimize energy use and minimize waste. In new urban developments, energy-efficient planning and construction are prioritized. This includes the integration of thermal insulation and energy-saving designs in newly built residential areas, leading to a reduction of 5,462 tons of CO_2. The commercial sector also plays a key role in emissions reduction. Energy efficiency measures such as insulation, awareness campaigns, and energy-efficient lighting in existing commercial buildings are expected to reduce emissions by 40,048 tons. These actions are critical for addressing the sector's high energy consumption. Public transportation expansion and the promotion of alternative fuel technologies are crucial for reducing traffic-related emissions. Expanding public transport is expected to save 34,553 tons of CO_2 while switching to alternative technologies and fuels in public transportation will contribute an additional 6,824 tons. Renewable energy adoption is encouraged through awareness campaigns about photovoltaic applications on urban rooftops. This initiative alone is projected to reduce emissions by 69,045 tons, promoting clean energy use and decreasing dependency on fossil fuels. Waste management improvements, particularly through recycling awareness, are expected to reduce CO_2 emissions by 4,113 tons. Meanwhile, forest rehabilitation and afforestation efforts, including the planting of additional trees, will lead to a reduction of 2,891 tons of CO_2. Collectively, these actions will result in a total CO_2 reduction of 315,486 tons, marking significant progress in the city's efforts to reduce emissions, improve sustainability, and address climate change challenges.

CONCLUSION

Local governments are pivotal in addressing climate change at the local level, translating national policies into actionable strategies tailored to their unique conditions. Kahramanmaraş has taken significant steps in this regard, developing a climate change action plan to reduce greenhouse gas emissions and enhance sustainability. This comprehensive plan prioritizes energy efficiency, renewable energy, waste management, and afforestation, reflecting a multi-faceted approach to environmental stewardship. Key initiatives include enhancing energy efficiency in residential and commercial buildings, promoting sustainable urban planning, encouraging public transportation, and adopting renewable energy technologies like rooftop photovoltaic. Waste management improvements and afforestation efforts further support the city's commitment to reducing its environmental footprint. Looking ahead, continued efforts to integrate sustainable practices into urban development and public infrastructure will be essential. Future recommendations include scaling up renewable energy projects, fostering community awareness programs, and leveraging advanced technologies for waste and resource management. Additionally, enhancing regional collaboration and accessing international climate funds can amplify these efforts. Kahramanmaraş's proactive measures not only contribute to local climate resilience but also set an example for other cities seeking to combat climate change and create healthier, more sustainable communities.

REFERENCES

Andrew, R. M. (2018). Global CO_2 emissions from cement production. *Earth System Science Data*, 10(1), 195-217. https://doi.org/10.5194/essd-10-2213-2018

Banister, D. (2008). The sustainable mobility paradigm. *Transport policy*, 15(2), 73-80. https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2007.10.005

Bolan, S., Padhye, L. P., Jasemizad, T., Govarthanan, M., Karmegam, N., Wijesekara, H., ... & Bolan, N. (2024). Impacts of climate change on the fate of contaminants through extreme weather events. *Science of the Total Environment*, *909*, 168388. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168388

Bullock, C., Brereton, F., & Bailey, S. (2017). The economic contribution of public bike-share to the sustainability and efficient functioning of cities. *Sustainable cities and society*, 28, 76-87. https://doi.org/10.1016/j.scs.2016.08.024

Das, S., Choudhury, M. R., Chatterjee, B., Das, P., Bagri, S., Paul, D., ... & Dutta, S. (2024). Unraveling the urban climate crisis: Exploring the nexus of urbanization, climate change, and their impacts on the environment and human well-being–A global perspective. *AIMS Public Health*, *11*(3), 963. https://doi.org/10.3934/publichealth.2024050

DHMI (2020). General Directorate Of State Airports Authority, Aircraft, Passenger and Cargo Traffic Statistics, https://www.dhmi.gov.tr/Sayfalar/Istatistikler.aspx/ Accessed: 05.09.2024.

Dong, W. S., Ismailluddin, A., Yun, L. S., Ariffin, E. H., Saengsupavanich, C., Maulud, K. N. A., ... & Yunus, K. (2024). The Impact of Climate Change on Coastal Erosion in Southeast Asia and the Compelling Need to Establish Robust Adaptation Strategies. *Heliyon, 10 (4)*. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e25609

Emborg, M., & Olsen, S. I. (2024). Meeting increasing demands for upstream scope 3 reporting: a framework for the drilling industry. *SPE Journal*, 29(10), 5207-5220. https://doi.org/10.2118/217701-PA

EMRA, (2020a). Electricity Market Sector Report. Energy Market Regulatory Authority, Ankara. https://www.epdk.gov.tr/Detay/Icerik/3-0-24/elektrikyillik-sektor-raporu/ Accessed: 05.09.2024.

EMRA, (2020b). Turkish Natural Gas Market Report. Energy Market Regulatory Authority, Ankara. https://www.epdk.gov.tr/Detay/Icerik/3-0-94-1007/dogal-gazyillik-sektor-raporu/ Accessed: 05.09.2024.

EMRA, (2020c). Turkish Petroleum Market Report. Energy Market Regulatory Authority, Ankara. https://www.epdk.gov.tr/Detay/Icerik/3-0-107/yillik-sektor-raporu/ Accessed: 05.09.2024.

EMRA, (2020d). Liquefied Petroleum Gas (Lpg) Market Sector Report. Energy Market Regulatory Authority, Ankara. https://www.epdk.gov.tr/Detay/Icerik/3-0-108-1002/lpgyillik-sektor-raporlari/ Accessed: 05.09.2024.

Finkelman, R. B., Wolfe, A., & Hendryx, M. S. (2021). The future environmental and health impacts of coal. *Energy Geoscience*, 2(2), 99-112. https://doi.org/10.1016/j.engeos.2020.11.001

Fong, W. K., Sotos, M., Michael Doust, M., Schultz, S., Marques, A., & Deng-Beck, C. (2015). Global protocol for community-scale greenhouse gas emission inventories (GPC). World Resources Institute: New York, NY, USA.

Garg, N., Kumar, A., Pipralia, S., & Garg, P. (2019). Initiatives to achieve energy efficiency for residential buildings in India: A review. *Indoor and Built Environment*, 28(6), 731-743. https://doi.org/10.1177/1420326X18797381

Global Carbon Atlas (2021), Per Capita CO_2 Emissions, https://globalcarbonatlas.org/emissions/carbon-emissions/ Accessed: 09.10.2024.

Gordon, A. (2023). The Role of Public Transportation Systems in Promoting Sustainable Mobility in Green Cities. *Advances in Urban Resilience and Sustainable City Design*, 15(6), 1-18. https://doi.org/10.17613/e62m-x851

Haris, N. I. N., Al Edrus, S. S. O., Abdul Raof, N., Wondi, M. H., Khan, W. R., Sien, L. S., ... & Sawatdeenarunat, C. (2024). Toward low-carbon cities: A review of circular economy integration in urban waste management and its impact on carbon emissions. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Energy and Environment*, 13(5), 1-17. https://doi.org/10.1002/wene.535

Hoppe, T., van den Berg, M. M., & Coenen, F. H. (2014). Reflections on the uptake of climate change policies by local governments: facing the challenges of mitigation and adaptation. *Energy, sustainability and society*, *4*, 1-16. https://doi.org/10.1186/2192-0567-4-8

IEA (2020), The role of CCUS in low-carbon power systems, https://www.iea.org/reports/the-role-of-ccus-in-low-carbon-power-systems/the-co2-emissions-challenge/ Accessed: 10.12.2024.

IPCC, (2006). 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme, eds. H.S. Eggleston, L. Buendia, K. Miwa, T. Ngara, K. Tanabe. Japan: IGES.

IPCC, (2014). Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.

Jones, P. D., Lister, D. H., Osborn, T. J., Harpham, C., Salmon, M., & Morice, C. P. (2012). Hemispheric and large-scale land-surface air temperature variations: An extensive revision and an update to 2010. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, *117*(D5). https://doi.org/10.1029/2011JD017139

Köleli, Y. (2015). TR63 Bölgesi Çimento Sektör Raporu. Doğu Akdeniz Kalkınma Ajansı. https://www.kalkinmakutuphanesi.gov.tr/dokumanflipbook/tr63-bolgesi-cimento-sektor-raporu/194/ Accessed: 05.10.2024.

Moloney, S., & Horne, R. (2015). Low carbon urban transitioning: From local experimentation to urban transformation?. *Sustainability*, 7(3), 2437-2453. https://doi.org/10.3390/su7032437

Musco, F. (2010). Local governments and climate change. F. M. M. van Staden (Ed.). Springer Netherlands.

Qadir, S. A., Al-Motairi, H., Tahir, F., & Al-Fagih, L. (2021). Incentives and strategies for financing the renewable energy transition: A review. *Energy Reports*, 7, 3590-3606. https://doi.org/10.1016/j.egyr.2021.06.041

Robinson, S., & Sullivan, G. (2022). Proposed guidelines for US Scope 2 GHG reduction claims with renewable energy certificates. *The Electricity Journal*, 35(7), 107160. https://doi.org/10.1016/j.tej.2022.107160

SER (2020). State of the Environment Report for Kahramanmaraş. https://ced.csb.gov.tr/il-cevre-durum-raporlari-i-82671/ Accessed 20.12.2024.

Seto, K. C., Dhakal, S., Bigio, A., Blanco, H., Carlo Delgado, G., Dewar, D., ... & Zwickel, T. (2014). Human settlements, infrastructure, and spatial planning. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom.

Tanaka, K. (2011). Review of policies and measures for energy efficiency in industry sector. *Energy policy*, 39(10), 6532-6550. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.07.058

TCDD (2020). Turkish State Railways, Railway Sector Report. https://static.tcdd.gov.tr/ Accessed 19.11.2024.

Teran-Cuadrado, G., Tahir, F., Nurdiawati, A., Almarshoud, M. A., & Al-Ghamdi, S. G. (2024). Current and potential materials for the low-carbon cement production: Life cycle assessment perspective. *Journal of Building Engineering*, 96(1), 110528. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.110528

Tzavali, A., Paravantis, J. P., Mihalakakou, G., Fotiadi, A., & Stigka, E. (2015). Urban heat island intensity: A literature review. *Fresenius Environmental Bulletin*, *24*(12b), 4537-4554.

Venegas, R. M., Acevedo, J., & Treml, E. A. (2023). Three decades of ocean warming impacts on marine ecosystems: A review and perspective. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, *212*, 105318. https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2023.105318

Wang, C., Engels, A., & Wang, Z. (2018). Overview of research on China's transition to low-carbon development: The role of cities, technologies, industries and the energy system. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81, 1350-1364. https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.099

Worrell, E., Bernstein, L., Roy, J., Price, L., & Harnisch, J. (2018). Industrial energy efficiency and climate change mitigation. *Energy Efficiency*, 2, 109–123. https://doi.org/10.1007/s12053-008-9032-8

Yang, M., Chen, L., Wang, J., Msigwa, G., Osman, A. I., Fawzy, S., ... & Yap, P. S. (2023). Circular economy strategies for combating climate change and other environmental issues. *Environmental Chemistry Letters*, 21(1), 55-80. https://doi.org/10.1007/s10311-022-01499-6

KSÜ Mühendislik Bilimleri Dergisi, 28(2), 2025
Araştırma Makalesi

KSU J Eng Sci, 28(2), 2025
Research Article

Kahramanmaras Sutcu Imam University
Journal of Engineering Sciences

Geliş Tarihi : 03.01.2025
Kabul Tarihi :04.02.2025

Received Date : 03.01.2025
Accepted Date : 04.02.2025

DEPREM KARAKTERİSTİK ÖZELLİKLERİNİN ZEMİN ÇİVİLİ DUVARLARIN DİNAMİK DAVRANIŞINA ETKİSİ: 3 BOYUTLU SAYISAL ANALİZ

THE INFLUENCE OF EARTHQUAKE CHARACTERISTICS ON THE BEHAVIOUR OF NAILED WALLS: 3D NUMERICAL ANALYSES

Burcu DIŞKAYA[1*] (ORCID: 0000-0002-6170-3856)
Akın GÖKGÖZ[1] (ORCID: 0000-0001-6777-5351)
Mustafa Kubilay KELEŞOĞLU[2] (ORCID: 0000-0003-1721-7946)

[1] İstanbul Beykent Üniversitesi, İnşaat Teknolojisi, İstanbul, Türkiye
İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, İnşaat Mühendisliği, İstanbul, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Burcu DIŞKAYA, burcuozbasaran@gmail.com

ÖZET

Zemin çivili duvarlar deprem yükleri altında önemli deformasyonları karşılayabilmektedir. Bu sistemlerin tasarımında, limit denge yöntemlerine dayanan Mononobe-Okabe yöntemi gibi pseudo-statik yaklaşımlar tercih edilmektedir. Ancak, bu yöntemlerin sınırlamaları bulunmakta; zemin-çivi etkileşimi ve yapı elemanlarının etkileri tam olarak incelenememektedir. Dinamik koşullar altında zemin çivili sistemlerin davranışının derinlemesine anlaşılması için sayısal analizlerin önemi büyüktür. Bu bağlamda, mevcut çalışmaların çoğu pseudo-statik limit denge analizlerine dayanmakta olup, gerçek zaman tanımlı sismik etkiler altında yapılan sayısal çalışmaların sınırlı olduğu tespit edilmiştir. Bu çalışmada, zemin çivileriyle güçlendirilmiş şev modellerinin dinamik analizi FLAC3D yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. On ayrı deprem hareketi altında incelenen şev sisteminin dinamik davranışı, çeşitli deprem karakteristiklerinin etkilerini ortaya koymuştur. Özellikle, pik yer ivmesinin, düşük deformasyon seviyelerinde belirleyici olduğu, ancak yüksek deformasyon koşullarında Arias Şiddetinin önemli bir etken haline geldiği gözlemlenmiştir. Ayrıca, çivilerde meydana gelen maksimum kuvvetlerin alt sıra çivilerde meydana geldiği, üst sıralardaki çivilerin sisteme katkısının sınırlı kaldığı belirlenmiştir. Çalışma sonuçları, sismik tasarım ve analiz disiplinlerine katkı sağlayacak nitelikte olup, zemin çivili sistemlerin dinamik davranışlarının daha iyi anlaşılmasına yönelik önemli veriler sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Zemin çivili duvarlar, şev stabilitesi, dinamik analiz, sonlu farklar yöntemi

ABSTRACT

Soil-nail walls can endure significant deformations during earthquakes. Their design often relies on pseudo-static methods like the Mononobe-Okabe approach, based on limit equilibrium principles. However, these methods have limitations, as they cannot fully capture soil-nail interactions or the influence of structural elements. Numerical analyses are essential for a deeper understanding of soil-nail behavior under dynamic conditions. Most studies focus on pseudo-static analyses, with limited research on real-time seismic effects. This study used FLAC3D software to analyze the dynamic behavior of soil-nail reinforced slopes under ten different earthquake motions. The results showed that peak ground acceleration influenced low deformation levels, while Arias Intensity became significant at high deformation levels. Under dynamic loads, maximum nail forces were concentrated in the lower nail rows, with minimal contribution from upper nail rows. These findings enhance understanding of soil-nail system dynamics and support advancements in seismic design and analysis.

Keywords: Soil nailed walls, slope stability, dynamic analysis, finite difference method

ToCite: DIŞKAYA, B., GÖKGÖZ, A., & KELEŞOĞLU, M. K., (2025). DEPREM KARAKTERİSTİK ÖZELLİKLERİNİN ZEMİN ÇİVİLİ DUVARLARIN DİNAMİK DAVRANIŞINA ETKİSİ: 3 BOYUTLU SAYISAL ANALİZ. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 28(2), 763-784.

GİRİŞ

Zemin çivisi uygulaması ile şevlerde ve kazılarda duraylılığın arttırılması, zemin ve kaya ortamlarda sıklıkla uygulanan bir destekleme yöntemidir. Bu tür dayanma yapılarının çalışma prensibi, duvarda bir deplasman mobilize olduğunda, zemin içine yerleştirilen çivi elemanın çekme yükleri altında çalışması ve zemin yüzeyine uygulanan kaplamanın da sınırlayıcı etkisiyle deplasmanların azaltılması olarak açıklanabilir. Çivi elemanlar sistemde deformasyon meydana gelene kadar aktif olmadığı için, zemin çivileri pasif destek elamanları olarak da bilinmektedir. Sistem deforme olmaya başladığında meydana gelen gerilmeler, zemin çivileri ile enjeksiyon harcı tarafından karşılanmaktadır (FHWA, 2015). Zemin çivili duvarların, esneklikleri sayesinde, özellikle deprem yükleri altında büyük deformasyonları karşıladıkları bilinmektedir. Barar vd. (1990), Loma Prieta (1989), Kobe (1995) ve Nisqually (2001) depremleri sonrasında gerçekleştirilen çalışmalar neticesinde bu tür duvarların deprem sırasında ve sonrasında olumlu bir davranış gösterdiğini belirtmiştir.

Zemin çivili şevlerin, dinamik koşullar altındaki davranışının incelenmesinde, en yaygın kullanılan yöntem, bir pseudo-statik analiz tekniği olan Mononobe-Okabe metodudur (FHWA, 2015). Bu yöntemde deprem nedeniyle oluşacak sarsıntı etkisi, depremin pik yer ivmesine bağlı olarak hesaplanan sismik katsayının (k_h), kayma düzlemi içinde kalan zeminin ağırlığı ile çarpımından elde edilen pseudo-statik kuvvetler ile temsil edilir. Bu yöntem limit denge prensibine dayandığı için sistemin genel stabilitesi ve iç stabilitesi hakkında fikir sahibi olmak mümkün olsa da zemin-çivi etkileşimi, çivi imalat yöntemleri, çivi kaplama bağlantısı, başlık plakalarının etkisi gibi durumların incelenmesi mümkün değildir (Panah ve Majidian, 2013). Ayrıca, bu yöntemde, depremin karakteristik davranışını temsil etmede faydalanılan tek parametre kuvvetli yer hareketinin pik ivmesidir. Depremin hasar potansiyelini öngörmede pik ivme oldukça etkin bir parametre olsa da depreme ait diğer karakteristik özelliklerin bu tip yapıların davranışına etkisinin araştırılması gerekmektedir.

Depremler yer hareketinin genliği, frekans içeriği ve süresi gibi parametrelerle tanımlanmaktadır (Kramer, 1996). Kuvvetli yer hareketlerinin karakteristik özelliklerinin tamamını doğru bir şekilde tanımlayan tek bir parametrenin geliştirilmesinin mümkün olmadığı literatürde belirtilmiştir (Jennings, 1985; Joyner ve Boore, 1988; Kramer, 1996). Bu bağlamda, depremlerin yapılar üzerindeki etkilerinin kapsamlı bir şekilde analiz edilmesi için birden fazla parametrenin dikkate alınması gerekmektedir. Bu yaklaşım, deprem mühendisliği ve yapıların sismik tasarımı açısından daha güvenilir ve etkili çözümlerin geliştirilmesine olanak sağlayacaktır. Deprem hareketleri çoğunlukla, hareket esnasında zamana bağlı ölçülen ivme, hız ve yer değiştirme değerleri ile ifade edilir. Bir yer hareketinin genliğini ifade etmede en yaygın olarak kullanılan kriter depremin (mutlak) en büyük yatay yer ivmesidir (PHA). Kramer, (1996) pik ivmelerin yüksek frekanslarda meydana gelmesi, depremin süresinin kısa olması nedeniyle pik ivme değeri 0.5g'den büyük olan birçok depremin yapısal hasara sebebiyet vermeyecek nitelikte olduğunu belirtmiştir. Benzer şekilde nispeten daha küçük pik ivmeli fakat uzun süreli bir deprem hareketi daha yıkıcı bir hasar potansiyeli davranışı gösterebilir. Dolayısıyla, pik ivme yer hareketlerinin değerlendirilmesinde en çok kullanılan parametre olmasına rağmen, hareketin frekans içeriği ve süresi hakkında bilgi sunmaması nedeniyle, depremi karakterize etmek için ek bilgilere ihtiyaç duyulmaktadır (Kramer, 1996). Bu nedenle, deprem davranışının doğru bir şekilde ifade edilmesi için birden çok özelliği yansıtan kuvvetli yer hareketi parametrelerinin de göz önüne alınması büyük önem taşımaktadır. Depremin Arias Şiddeti (I_a) ve Kümülatif Mutlak Hız (CAV) değerleri bu kapsamda değerlendirilen ve bu çalışmada zemin çivili duvarların sismik davranışına etkisi incelenen deprem parametreleridir. Arias Şiddeti, depremin hareketi boyunca enerji boşalımını temsil eder. Bu ifade, deprem hareketinin frekans içeriği ile sarsıntı süresini birlikte değerlendirmektedir (Arias, 1979). Bir diğer ifadeyle, Arias Şiddeti depremin ivme zaman geçmişinin tamamını, dolayısıyla pik ivme değerini ve frekans içeriğini, aynı zamanda deprem hareketi boyunca depremin yatay ve düşey bileşenlerini kapsamaktadır (Kayen ve Mitchell, 1997). Bu değerin, toprak kaymalarını tetiklemek için gerekli olan deprem sarsıntısını tanımlamada güvenilir bir parametre olduğu kabul edilmektedir.

Literatürde, deprem karakteristiklerinin, takviye elemanlarla güçlendirilen dayanım duvarları üzerindeki etkilerini inceleyen birçok çalışma bulunmaktadır. Liu vd. (2018) geosentetiklerle güçlendirilmiş bir duvar modeli üzerinde dinamik koşullar altında gerçekleştirdikleri sonlu elemanlar analizleri neticesinde, girdi hareketi parametrelerinin takviye yükleri ve kaplamada oluşan kalıcı deplasman üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Yazarlar, dayanım yapısında meydana gelen maksimum takviye yükünün, yapının titreşim özellikleri ile girdi hareketinin yoğunluğundan etkilendiğini belirtmişlerdir. Maksimum takviye yükü ile Arias Şiddetinin iyi bir korelasyon gösterdiği, duvar yüzünde meydana gelen kalıcı deplasmanların, yapının ve girdi hareketinin frekans içeriğinden etkilendiğini belirtmişlerdir. Fan vd. (2020), düşey yer ivmesinin, geosentetikler ile güçlendirilmiş duvarların sismik davranışındaki etkisini araştırmak amacıyla bir grup sonlu elemanlar analizi gerçekleştirmiştir. Yazarlar düşey yer

ivmesinin, kayma dalgası yayılımını etkilediğini, Arias Şiddeti değerinin bu tür yapılarda maksimum takviye yükü ile doğrudan ilişkili olduğunu belirtmişlerdir. Başbuğ vd. (2021) geosentetiklerle güçlendirilen duvarlarda takviye elemanlarda meydana gelen deformasyonlarda, I_a ile doğrusal bir ilişki olduğunu belirtmişlerdir. Zemin çivileri ile desteklenen duvarlarda ise deprem karakteristiklerinin etkilerini inceleyen sınırlı sayıda araştırma bulunmaktadır. Yazdandoust (2018), zemin çivileriyle desteklenen duvarların sismik performansını değerlendirmek için farklı çivi uzunluklarına sahip duvar modelleri üzerinde bir grup 1g sarsma tablası deneyi gerçekleştirmiştir. Çalışmada yazar, girdi hareket parametrelerinin (süre ve pik ivme) etkilerini araştırmak için, değişken genlikli harmonik bir uyarım kullanmıştır. Duvarların sismik deformasyon davranışının, çivi uzunluğu ve giriş hareketi parametrelerine yüksek derecede bağlı olduğu bulunmuştur. Mokhtari vd. (2020) yakın alan ve uzak alan fay hareketinin zemin çivileriyle desteklenen duvarlar üzerindeki davranışlarını gözlemlemek amacıyla aynı pik ivme değerine sahip 10 ayrı deprem hareketi altında gerçekleştirdikleri sayısal analizlerde, duvarda meydana gelen deformasyon davranışında pik yatay hızın önemli olduğunu belirtmişlerdir. Mesrabadi vd. (2023) yakın fay durumunda darbe içeren hareketlerde, zemin çivilerin eksenel kuvvetleri ve yer değiştirmeleri ile pik hız arasında iyi bir korelasyon olduğunu, darbe içermeyen hareketlerde ise çivilerde oluşan eksenel kuvvetlerin Arias Şiddeti ile ilişkili olduğunu belirtmişlerdir.

Zemin çivili sistemlerin, hem statik hem de dinamik koşullar altındaki davranışının sayısal olarak modellenerek gözlemlenmesi gereklidir. Sayısal analizlerle, dinamik hareketler neticesinde, bir zemin çivili sistemi oluşturan her yapısal elemanın deformasyon davranışı, çivilerde meydana gelen çekme kuvvetleri, sistemde oluşan kalıcı deplasmanlar da tahmin edilebilir. Fakat zemin çivili duvarların, dinamik koşullar altındaki davranışının değerlendirilmesinde yapılan çalışmaların büyük bir kısmı pseudo-statik limit denge analiz yöntemlerine dayanmaktadır ve gerçek zaman tanımlı sismik etkiler altında yapılmış sayısal çalışmalar oldukça kısıtlıdır (Sheikhbahaei vd., 2010). Zemin çivili duvarların sismik davranışının sayısal davranışının değerlendirilmesinde Giri ve Sengupta (2009, 2010b, 2010a) 0.1g ivmeye sahip sinüs dalgası etkisi altında gerçekleştirdikleri küçük ölçekli sarsma tablası deneylerini bir sonlu farklar yöntemi kullanarak FLAC yazılımda iki boyutlu olarak modellemişlerdir. Şevin taç bölgesinde meydana gelen deplasman ile duvar arkasında oluşan oturmanın deneysel çalışma ve sayısal analizlerle uyumlu olduğunu belirtmişlerdir. Panah ve Majidian (2013) akademik bir sonlu farklar yazılımı olan CA2 kullanarak zemin çivili duvarların dinamik davranışını değerlendirmişlerdir. Gerçekleştirdikleri çalışmada, zemin çivili sistemlerin sismik koşullar altında yenilme mekanizmasını gözlemleyebilmek adına pseudo-statik analizler ile zamana bağlı dinamik analizler gerçekleştirmişlerdir. Yazarlar, gözlemledikleri kayma düzlemlerinde; alt çivilerin sistemde ankraj olarak görevi yaptığını, en alt çivilerin boyundaki artışın, zemin çivili yapıların sismik stabilitesini artırmada en etkili yöntem olduğunu belirtmişlerdir. Sheikhbahaei vd. (2010) zemin çivileri ile desteklenen bir duvarın, dinamik koşullar altında davranışını araştırmayı amaçlamıştır. Bu amaçla yazarlar, sonlu farklar yazılımı olan FLAC3D kullanarak üç boyutlu bir model geliştirmişler ve sisteme yarı sismik harmonik bir hareket uygulayarak girdi hareketinin frekansı, çivi eğimi ve uzunluğunun değişimi, zemin dayanım kriterleri gibi parametrik özelliklerin etkilerini incelemişlerdir. Halabian vd. (2010) oluşturdukları üç boyutlu şev modelini üç farklı depreme ait ivme-zaman kaydı altında, yüklemenin frekans içeriği, zeminin dayanım özellikleri gibi kriterleri göz önüne alarak incelemişlerdir. Zamiran vd. (2012) gerçek deprem ivme-zaman girdisi ile zemin çivili bir duvar modeli için FLAC3D programında sayısal simülasyon gerçekleştirilmiş ve sonuçlarını statik analiz bulguları ile kıyaslamışlardır. Sahoo vd. (2015) zemin çivili dik şevlerin sismik koşullar altındaki davranışını gözlemlemek için bir sonlu elemanlar yazılımı olan MIDAS GTS kullanarak, üç boyutlu modeller geliştirmişlerdir. Yaptıkları çalışmada, zaman tanımlı dinamik analizler gerçekleştirmişlerdir. Çivi eğimi, çivi uzunluğu, frekans, amplifikasyon faktörü ve şev açıları gibi çeşitli parametrelerin, zemin çivili duvarların sismik dayanıklılığı ve yenilme mekanizması üzerindeki etkisini incelemişlerdir. Maleki vd. (2023) bir sonlu elemanlar yazılımı olan PLAXIS'te gerçekleştirdikleri sayısal analizlerinde, çivilerin mekanik ve geometrik özelliklerinin, iki boyutlu zemin çivili bir duvarın hem gevşek hem de sıkı zemin koşullarında dinamik davranışı ve amplifikasyon özellikleri üzerindeki etkilerini araştırmışlardır.

Bu makalede, deprem girdi hareketlerine ait farklı özelliklerin zemin çivili şevlerin sismik davranışına etkisi araştırılmaktadır. Gerçekçi bir zemin çivili şev modeli oluşturabilmek için üç boyutlu bir sonlu farklar modeli hazırlanarak zemin özelliklerinin ve yapısal elemanların (plaka, çivi ve kaplama) birbirleri ile etkileşimleri modellenmiştir. Bu amaçla, sarsma tablası ve santrifüj deneyleri ile incelenen küçük ölçekli iki farklı deney verisinden faydalanılmıştır. Sonlu farklar yaklaşımından faydalanılarak doğrulama analizleri yapılan modellerden gerçeğe yakın sonuçlar elde edilmiştir. Ardından ivme, hız, frekans içeriği, Arias Şiddeti, CAV ve süre gibi farklı karakteristik özelliklere sahip 10 deprem hareketi altında tipik bir çivili duvar davranışının incelenmesi aşamasında geçilmiştir. 12 metre yüksekliğinde ve 60^o şev eğimine sahip referans bir model hazırlanarak analizler yürütülmüştür. Analizler sonucunda özellikle pik ivme, Arias Şiddeti ve CAV değerlerinin dayanma yapısı deplasmanları üzerinde belirleyici bir etkisi olduğu ortaya konulmuştur. Deprem hareketleri içinde pik ivme değeri 0.43g'den, CAV değeri

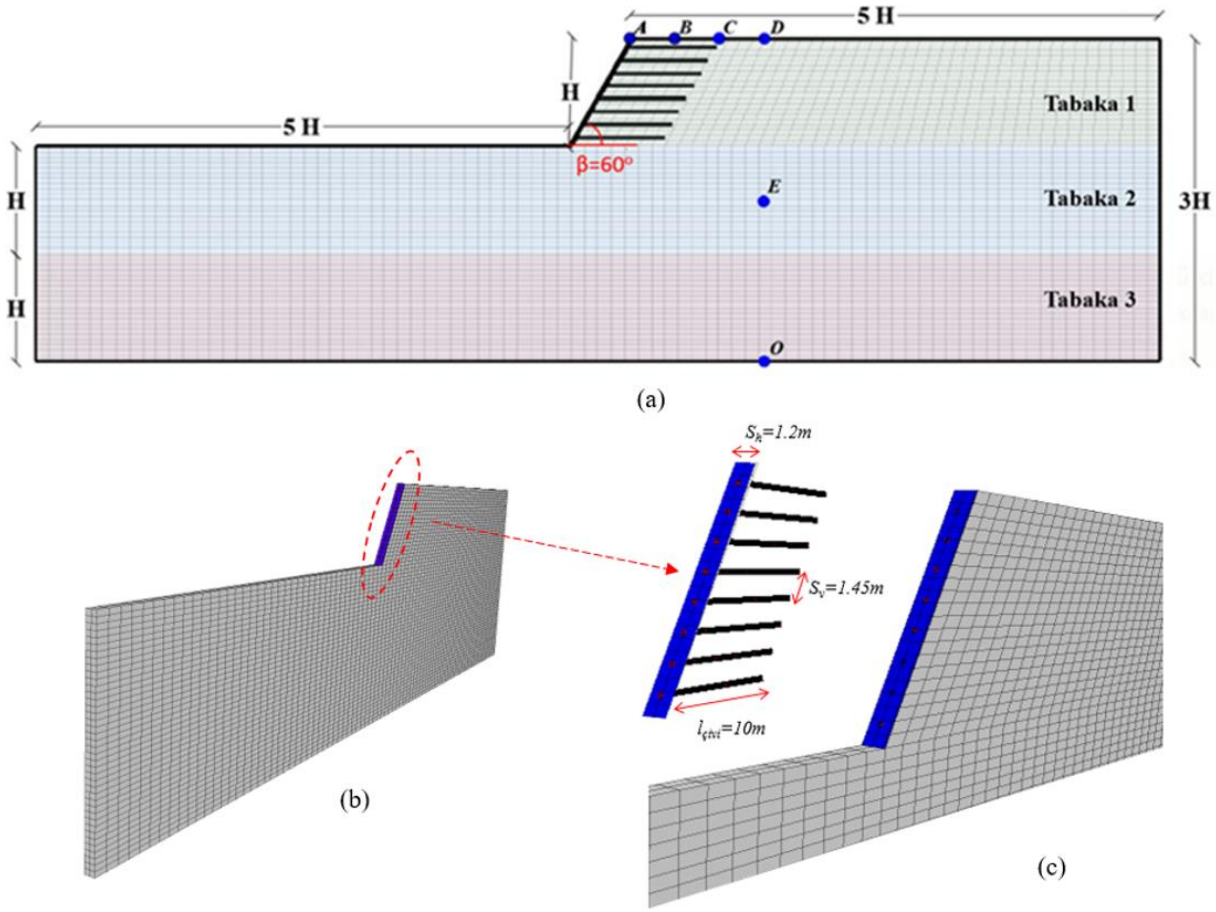
yaklaşık 1300 cm/s'den ve I_a değeri 2.70 m/s'den küçük depremlerde kaplama yüzünde duvar yüksekliğinin %5-9'u arasında deplasman meydana geldiği ve kaplamada oluşan maksimum deplasmanın pik ivmeyle birlikte arttığı görülmüştür. Pik ivme değerinin 0.43g'den büyük olduğu depremlerde ise deplasmanların yaklaşık 2 kat artığı gözlemlenmiştir. Bununla birlikte, 0.43g'den daha düşük pik ivme değerine sahip ancak yüksek CAV ve I_a değerleri olan deprem hareketinde ise oldukça yüksek, duvarı yüksekliğinin %20'si mertebesinde deplasman tespit edilmiştir. Buradan, pik ivme değerinin deformasyon davranışını değerlendirmede yeterli bir gösterge olmadığı anlaşılmaktadır. Günümüz literatüründe sıklıkla kullanılan yönetmeliklerde, deprem karakteristiğinin etkisini dikkate alan bir yöntem bulunmadığı ve tüm dinamik tasarımın maksimum ivme değerinin bir oranı olarak alındığı düşünüldüğünde elde edilen sonuçların literatüre ve tasarıma önemli katkıları olacağı sonucu çıkarılmaktadır.

SAYISAL MODEL VE DOĞRULAMA ANALİZLERİ

3 Boyutlu Zemin Çivili Şev Modeli

Bu çalışmada, deprem hareketlerinin karakteristik özelliklerinin, zemin çivili duvarların sismik davranışına etkisinin araştırılması hedeflenmiştir. Bu amaçla bir sonlu farklar yazılımı olan FLAC3D.v6 (Itasca, 2019) programında, zemin çivili duvarın dinamik koşullar altındaki davranışını analiz etmek üzere üç boyutlu sayısal bir model oluşturulmuştur.

Dinamik analizler için oluşturulan referans sayısal model, 60° eğime sahip 12 m yüksekliğinde bir zemin çivili şevdir. Model, her biri 10 m uzunluğunda olan sekiz adet zemin çivisiyle güçlendirilmiştir. Sonlu fark ağ yapısı, zemin ortamını temsil eden sürekli elemanlardan oluşmaktadır. Modeldeki her bölge (*zone*) tetrahedral elemanlara ayrılmıştır. Verimli CPU kullanımı ve tekrarlanabilir bir sayısal model sağlamak amacıyla, bu çalışmada, zemin çivili duvar sisteminin ortasında bulunan iki düşey düzlem arasındaki zemin kütlesinin bir diliminin analizleri gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma için geliştirilen üç boyutlu sonlu farklar modeli Şekil 1'de gösterilmiştir. Daha gerçekçi dalga yayılımı elde edilebilmesi amacıyla, model sınırları, sismik dalgaların modelin içinde yayıldıktan sonra geri dönmesini önleyecek şekilde yeterince büyük tanımlanmıştır. Şev yüzeyinin tabanından başlayarak, sayısal modelin yatay sınırları her yönde şev yüksekliğinin (H) 5.0 katı olacak şekilde uzatılmıştır.



Şekil 1. (a) Model Geometrisi (b-c) Üç Boyutlu Sonlu Farklar Ağı, Çivi ve Başlık Plakası Detayı

Sayısal model, her biri 12 m derinliğinde bağıl yoğunluğu ve kayma dalgası hızı model tabanından yüzeye doğru azalan üç ayrı kum tabakasından oluşmaktadır. Böylelikle, modelde, zemin bağıl yoğunluğunun artışına bağlı olarak zemin parametrelerinin değişimi göz önüne alınmıştır. Statik yükleme koşulları altında zemin davranışını tanımlayabilmek için bu tür yapıların sayısal analizlerinde literatürde sıklıkla tercih edilen elastik-tam plastik Mohr-Coulomb bünye modeli kullanılmıştır (Giri ve Sengupta, 2009; Halabian vd., 2012; Sahoo vd., 2016; Zamiran vd., 2012). Tablo1'de zemin tabakalarının mekanik ve fiziksel özellikleri listelenmiştir.

Tablo 1. Şev Modeline Ait Zemin Özellikleri

	Tabaka 1	**Tabaka 2**	**Tabaka 3**
Birim Hacim Ağırlık, γ (kN/m^3)	16	17	18
Young Modülü, E (MPa)	95	150	230
Kohezyon, c (Pa)	5000	5000	5000
Kayma Mukavemeti Açısı, ϕ (°)	36	38	40
Bağıl Yoğunluk, D_r (%)	0.60	0.75	0.80
Kayma Dalgası Hızı, V_s (m/s)	280	345	390

Sismik koşullar altında gerçekleştirilen sayısal analizlerde, modelleme koşullarının bir sonucu olarak yayılan dalga hareketinde sayısal bozulmalar meydana gelebilir. Giriş hareketinin frekans içeriği ve sistemin dalga hızı özellikleri, dalganın model içinde yayılımını etkileyebilir. Sayısal modelde, dalga yayılımının doğru bir şekilde temsil edilebilmesi için sonlu farklar ağının sıklığı büyük önem taşımaktadır. Dalganın zemin ortamında düzgün bir şekilde iletilmesini sağlamak amacıyla, bu ağın yeterince sıkı olması gerekmektedir. Bu durum aynı zamanda, modelin doğruluğunu arttırarak daha güvenilir sonuçlar elde edilmesini sağlar. Kuhlemeyer ve Lysmer (1973), bu koşulun yalnızca, dalga yayılım yönündeki minimum birim eleman boyutunun dalga boyunun 1/10 ile 1/8'i arasında veya daha az olduğu durumlarda sağlandığını belirtmişlerdir. Bu nedenle birim eleman boyutu, Denklem 2.1'e dayanarak, en uzun dalga boyunun onda birinden daha az olacak şekilde 1.20 m x 0.60 m x 0.60 m olacak şekilde belirlenmiştir.

$$\Delta l = \frac{\lambda}{10} \tag{2.1}$$

Burada, λ, dalga boyu olmak üzere, kayma dalgası hızı (v_s) ve deprem kaydının en yüksek frekans içeriğine ($f_{\max}$) bağlı olarak Denklem 2.2'ye göre hesaplanabilir.

$$\lambda = \frac{v_s}{f_{\max}} \tag{2.2}$$

FLAC3D'de gerçekleştirilen dinamik analizlerde, zemin modeli olarak Mohr-Coulomb bünye modeli tercih edilmiş olup bu model Histeretik sönüm yaklaşımı ile birleştirilmiştir. Dinamik yükler altındaki zeminlerin doğrusal olmayan gerilme-şekil değiştirme davranışı genellikle kayma modülü bozulma eğrileri (G/G_{max}) ile karakterize edilir. Bu yaklaşım, kayma gerilmesi modülünün azaltma eğrilerine dayanarak, akma gerilmesine kadar, doğrusal olmayan gerilme-şekil değiştirme ilişkisini modellemeyi mümkün kılar. Bu nedenle, zemin tabakalarının maksimum kayma modülü değerleri ($G_{\max}$), Seed ve Idriss (1970), tarafından sağlanan Denklem 2.3'te verilmiş denklem kullanılarak hesaplanmıştır.

$$G_{\max} = 21.7(K_2)_{max} p_a \left(\frac{\sigma'_m}{p_a}\right)^{0.5} \tag{2.3}$$

Eşitlikteki $(K_2)_{max}$ değeri, kumun bağıl yoğunluğuna göre belirlenen bir modül değeridir (Seed ve Idriss, 1970); burada p_a atmosferik basıncı ve σ'_m ise ortama efektif gerilmeyi temsil etmektedir. Bulk modülü (K) ve Young Modülü (E), elastik teoriye dayanarak, Kayma Modülü (G) ve Poisson oranı (υ) kullanarak hesaplanmıştır. Poisson oranının tüm zemin tabakaları için 0.30 olduğu kabul edilmiştir.

FLAC3D, modül ve sönüm azalım eğrilerini asimptotik fonksiyonlarla birleştirerek tüm deformasyon seviyelerinde rijitlik ve sönüm değerlerini hesaplar ve böylece sonlu fark ağındaki elemanların gerilme-şekil değiştirme ilişkisini tanımlar. Bu çalışmada, FLAC3D'de mevcut olan Sigmoidal-3 modeli seçilmiştir. Sigmoidal-3 modele ait fonksiyon, Denklem 2.4'te verilmiştir.

$$M_s = \frac{a}{1 + \exp\left(-\frac{L - x_0}{b}\right)} \tag{2.4}$$

Burada, M_s, normalize edilmiş sekant kayma modülüdür ve L, logaritmik gerinim değeridir. Sigmoidal-3 fonksiyonun parametreleri, Darendeli (2001) modül azaltma ve sönüm oranı eğrilerine göre değerlendirilmiştir. Darendeli (2001) için kumlu zeminlerin eğrileri için Sigmoidal-3 fonksiyonunun katsayıları Tablo 2'de verilmiştir; burada α, b ve x_0 fonksiyonun parametreleridir (Alver, 2023). Deprem yüklemesi sırasında yüksek frekanslı gürültüleri azaltmak için modele çok düşük bir Rayleigh sönümü (%0.20) uygulanmıştır.

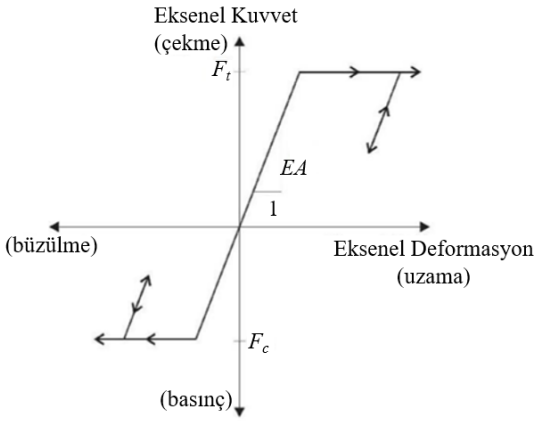
Tablo 2. Darendeli (2001) Eğrileri Için Kumlar Üzerindeki Sigmoidal-3 Fonksiyonun Katsayıları (Alver, 2023)

L	α	b	x_0
Log(γ)	1	-0.4726	$-1.45 + 0.15 \ln\left(\frac{\sigma'_m}{p_a}\right)$

Hazırlanan zemin çivili duvar modeli, limit denge yaklaşımıyla (LEM) hem statik hem de dinamik olarak detaylı bir şekilde incelenmiştir. Çivi aralıklarının S_v=S_h= 2.0 m olarak belirlendiği durumda, en yüksek sismik katsayı ile tarif edilen deprem koşulu için statik ve dinamik güvenlik sayısı değerleri sırasıyla 1.7 ve 1.2 olarak hesaplanmıştır. Deprem koşullarında güvenli kabul edilen çivi aralıkları için gerçekleştirilen FLAC3D analizlerinde, dinamik durumlardaki göçmeler sebebiyle LEM ile sağlanan çivi aralıkları için sayısal analiz yapılamamıştır. Bu nedenle, çivi aralıkları kademeli olarak azaltılmıştır. Sonuç olarak, mevcut model, FLAC3D sonlu farklar yöntemiyle gerçekleştirilen zaman tanım alanı analizleri doğrultusunda, en uygun deplasman sonuçlarının elde edildiği geometri üzerinden devam ettirilmiştir. Şev modeli, düşeyde S_v =1.45 m ve yatayda S_h=1.20 m aralıklarla yerleştirilmiş sekiz adet, on metre uzunluğunda zemin çivisi içermektedir. İlk çivi, model yüzeyinden 1.0 m aşağıda olacak şekilde konumlandırılmıştır. Son çivi ise şev topuğundan 1.0 m yukarıdadır. Zemin çivileri oldukça narin elemanlar olduğu için eğilmeye karşı çok az direnç sağlar (FHWA, 2015; Jones, 1999; Zamiran vd., 2012b). Bu sebeple, zemin çivilerinin bir boyutlu eksenel çekme kuvveti altında çalıştığı varsayılır ve zemin çivileri modellenirken bir boyutlu kablo elemanlarından faydalanılır. Kablolar hem çekme hem de basınç altında elastik-mükemmel plastik davranış sergileyen yapısal elemanlardır. FLAC3D'de zemin çivilerini tanımlarken kablonun eksenel davranışını, enjeksiyon halkasının kayma özelliklerini ve harcın arayüz performansını dikkate almak önemlidir.

Bir kablo elemanın eksenel rijitliği, çivi elemanlarının çivi çubuğu kesit alanı A, Young Modülü E ve çivi uzunluğu $L_{çivi}$'ye dayanan bir boyutlu yapısal eleman modeline dayandığını varsayarak, Denklem 2.5 ile ifade edilebilir. Ayrıca, kablo elemanlarının elastik-mükemmel plastik bir malzeme olarak tanımlanabilmesi için, bu limitlerin üzerinde gelişemeyecek şekilde bir çekme ve basınç dayanımı atanabilir; bu durum Şekil 2'de gösterilmiştir (Itasca, 2019).

$$K = \frac{AE}{L_{çivi}} \tag{2.5}$$



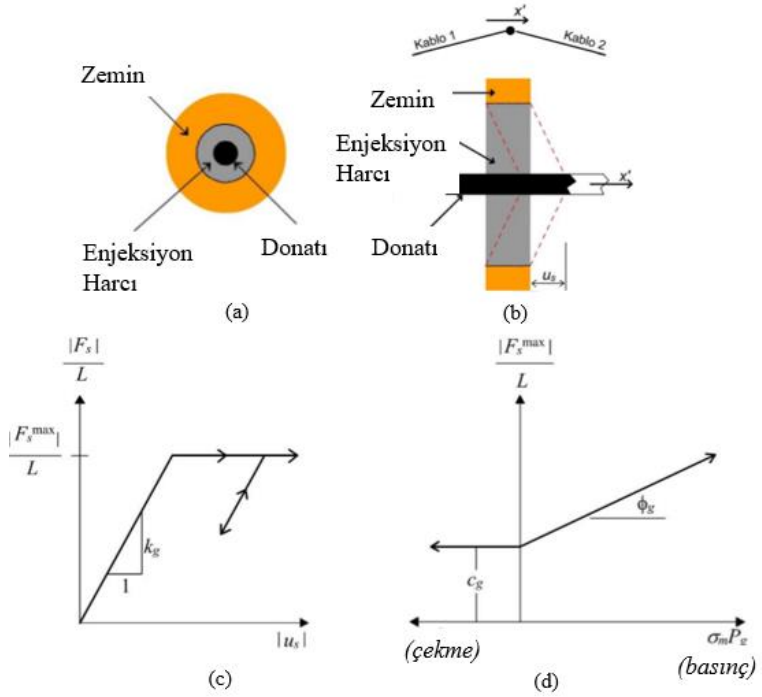
Şekil 2. Kablo Yapısal Elemanın Çekme Basınç Yükleri Altında Malzeme Davranışı (Itasca, 2019)

Zemin çivileri ve zemin arasındaki halka biçimde bulunan boşluk genellikle çimento harcı ile doldurulur; böylelikle zemin kütlesinde oluşan gerilmeler bu arayüz ile zemin çivilerine aktarılır. Zemin-çivi arayüzünün kayma davranışı sürtünmeli ve kohezif olarak kabul edilmektedir. Şekil 3 (a), (b)'de bir çiviye ait tipik enjeksiyon harcı ve kablo etkileşimi verilmiştir (Itasca, 2019). Sonlu farklar simülasyonunda enjeksiyon davranışını modellemek için kablo elemanına atanan düğüm noktalarında kayıcı bir yay sistemi olduğu varsayılmaktadır. Bu nedenle, yay elemanları, enjeksiyonun kayma davranışını temsil ederken; kayıcı elemanlar zemin ile çivi arasındaki kohezif davranıştan sorumludur. Enjeksiyon bölgesinin kayma davranışını FLAC3D'de modellemek için gerekli parametreler (Şekil 3 (c), (d)) kayma rijitliği k_g, enjeksiyon kohezif dayanımı c_g, enjeksiyon sürtünme açısı ϕ_g, enjeksiyon çevresi p_g ve efektif çevre gerilmesi σ_m'dir (Gokgoz ve Kelesoglu, 2024; Itasca, 2019).

Kesme bölgesinin, yani enjeksiyon harcının, rijitliği, k_g, Denklem 2.6 ile hesaplanabilir. Denklemde G, enjeksiyon harcının kayma modülü olup zemin kayma modülüne eşit olduğu varsayılmaktadır (Zamiran vd., 2012); D, takviye eleman çapı ve t kesme bölgesi halkası kalınlığıdır. Kesme bölgesi kohezyon dayanımını birim uzunluk başına tahmin edebilmek için Denklem 2.7 kullanılabilir. Burada c, zeminin kohezyon değeridir ve kesme bölgesi kayma mukavemeti açısının, zeminin kaymam mukavemeti açısına benzer olduğu kabul edilmektedir (Zamiran vd., 2012). Çivilerin çapı 32 mm olarak belirlenmiş olup, zemin çivilerini sayısal modelde tanımlamak için gerekli olan tüm parametreler Şekil 4'te verilmiştir.

$$k_g = \frac{2\pi G}{10\ln(1 + 2t / D)} \tag{2.6}$$

$$c_g = \pi c(D + 2t) \tag{2.7}$$

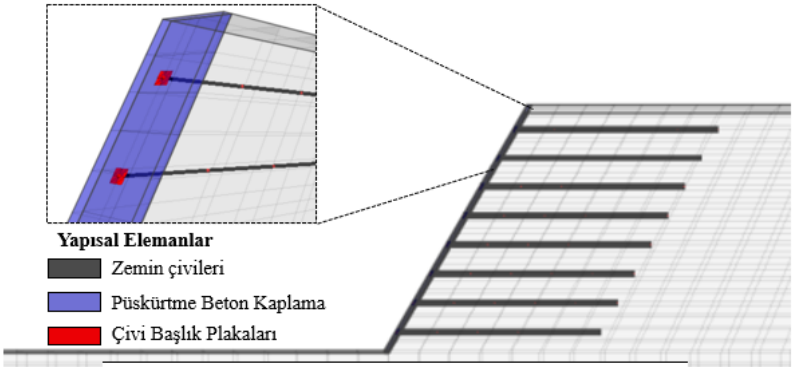


Şekil 3. (a-b) İdealize Edilmiş Kablo-Enjeksiyon Etkileşimi, (c-d) Harcın Mekanik Davranışı (Itasca, 2019)

Püskürtme beton kaplama, zemin çivili duvar modeli için gerekli yapısal bir unsurdur. Zemin çivili sistemlerde, tendonlar eğimli şev yüzeyine ya da kazı yüzündeki bir kaplama elemanına bağlanır. Kaplama, kazı ve montaj esnasında çiviler arasındaki zemini desteklemek ve kazı yüzeyinde erozyonu önlemek için hizmet eder (FHWA, 2015). Kaplama elemanlar genellikle, eğilme ve eksenel rijitlik ile karakterize edilen püskürtme beton veya yerinde güçlendirilmiş beton ile imal edilir. Bu nedenle sayısal analizlerde kaplama elemanlar çoğunlukla kabuk (*shell*) veya plaka (*plate*) elemanı olarak modellenir. Ancak, Ardiaca (2009), plaka elemanlarının kullanımının mümkün olmadığı karmaşık yapılarda, Mohr-Coulomb malzeme modelinin ve hacimsel elemanların ince duvarlar, plakalar veya kabuk elemanlar için gerçekçi sonuç verdiğini belirtmiştir. Gokgoz ve Kelesoglu (2024) ve Gökgöz (2021)'de FLAC3D'de zemin çivileri ile desteklenen duvarlar için gerçekleştirmiş oldukları analizlerde püskürtme beton kaplamasını hacimsel bir eleman olarak ve Mohr-Coulomb parametreleri ile tanımlamışlar ve bu tür bir modellemenin gerçek ile

uyumlu sonuçlar verdiğini belirtmişlerdir. Bu çalışmada da püskürtme beton kaplaması hacimsel bir eleman olarak tanımlanmıştır. Kaplama elemana ait parametreler Şekil 4'te verilmiştir. Ayrıca, püskürtme beton kaplama ile zemin arasındaki etkileşimi modelleyebilmek için zeminin kayma mukavemeti açısına dayalı bir arayüz elemanı tanımlanmıştır. Arayüzdeki sürtünme açısı $2/3\phi$ olarak belirlenmiştir (Lin vd., 2017; Marzionna vd., 1998); burada ϕ, zeminin kayma mukavemeti açısıdır. Zemin ile kaplama arasındaki arayüz özellikleri, Kesme Rijitliği Modülü (K_s) ve Normal Rijitlik Modülü (K_n) hesaplanarak uygulanmış ve rijitlik değerleri Itasca, (2019)'da bulunan Denklem 2.8'e göre hesaplanmıştır. Burada K ve G zeminin Bulk ve Kayma modülüdür ve Δz_{min}, arayüz elemanının normal yönündeki bitişik bir elemanın en küçük birim genişliğidir.

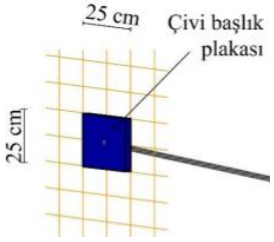
$$K_n = K_s = 10max\left[\frac{K + \frac{4}{3}G}{\Delta z_{min}}\right] \tag{2.8}$$



Çivi Parametreleri	Değerler
Young Modülü, E (GPa)	210
Zemin Çivisi Çekme Dayanımı, F_c (kN/m)	281
Enjeksiyon Kohezyon Mukavemeti, c_g (kN/m)	3.89
Enjeksiyon Kayma Mukavemeti Açısı, ϕ_g (°)	36
Enjeksşyon Rijitliği, k_g (MPa)	54
Enjeksiyon Halkası Çevresi, p_g (m)	0.380
Kaplama Parametreleri	**Değerler**
Birim Hacim Ağırlık, γ (kN/m^3)	24
Young Modülü, E_f (MPa)	25000
Poisson Oranı, ν	0.2
Kohezyon, c_f (kPa)	365
Kayma Mukavemeti Açısı, ϕ_f (°)	35
Çekme Mukavemeti, σ_{stress} (kPa)	1216

Şekil 4. Şevin, Kaplamanın ve Çivilerin Üç Boyutlu Görünümü ve Malzeme Özellikleri

Çivi çubukları, çivi ucuna gelen kuvveti kaplama yüzeyine ve ardından arkasındaki zemine ileten başlık plakaları ile kaplama yüzeyine bağlanır. Bu çalışmada çivi başlık plakaları, FLAC3D ağ yüzeyine bağlı ızgara ile plaka arasındaki sürtünme etkileşimini dikkate alan plaka (*plate*) elemanlar olarak modellenmiştir. Modelde, başlık plakaları, 25 cm genişliğinde ve 2.0 cm kalınlığında kare plakalar olarak modellenmiştir (Şekil 5). Başlık plakalarının malzeme özellikleri şu şekildedir: Young Modülü, E_p = 15 GPa; Poisson Oranı, υ = 0.2 ve birim hacim ağırlık, γ = 23.0 kN/m^3.



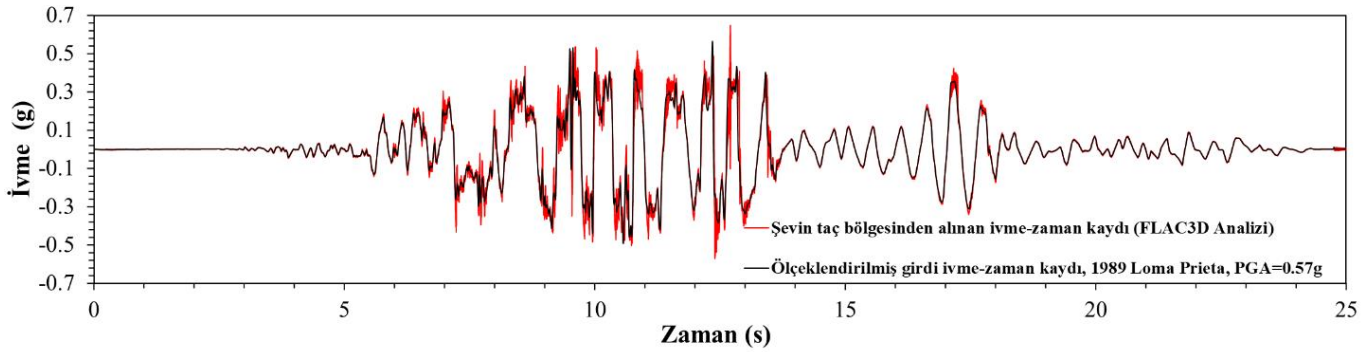
Şekil 5. 25x25 cm Kare Plaka ile Çivi-Şev Bağlantısı Görseli (Gokgoz ve Kelesoglu, 2024)

DOĞRULAMA ANALİZLERİ

Bu çalışmada, farklı karakteristik özelliklere sahip deprem hareketlerinin zemin çivileri ile güçlendirilmiş bir şev üzerindeki etkisini araştırmak için FLAC3D sonlu farklar yazılımı kullanılarak üç boyutlu sayısal bir model oluşturulmuştur. Dinamik analizler için geliştirilen sayısal modelin doğrulunu ve uygulanabilirliğini kanıtlamak amacıyla, farklı deneysel çalışmalara dayanan iki ayrı sayısal doğrulama analizi gerçekleştirilmiştir. İlk olarak Sahoo vd. (2021, 2016) tarafından zemin çivili dolgu modelleri üzerinde gerçekleştirilen sarsma tablası deneyleri modellenmiştir. Ardından, Ghadamgahi vd. (2019) ve Baziar vd. (2021) tarafından gerçekleştirilen santrifüj deneyleri modellenmiştir. Her iki doğrulama analizi neticesinde, bu çalışma kapsamında geliştirilen sayısal modelin dinamik analizler için uygun olduğu kararlaştırılmıştır.

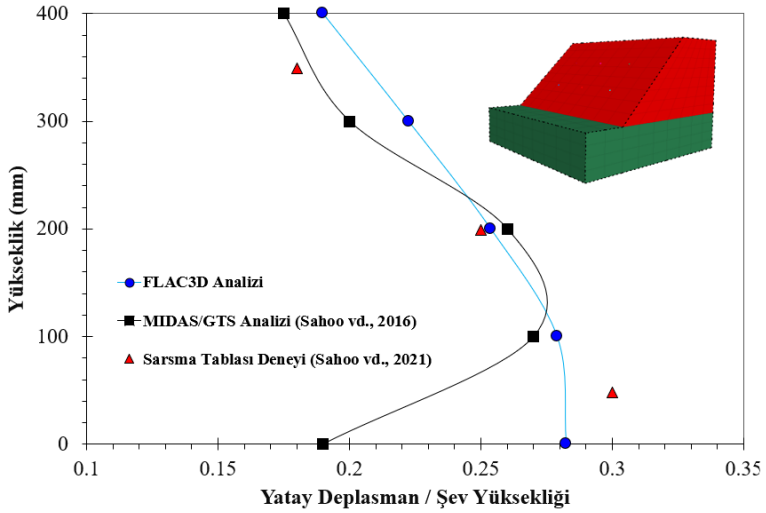
Bir Boyutlu Sarsma Tablası Deneyinin Sonlu Farklar Yöntemiyle Modellenmesi

Çalışmanın bu aşamasında, Sahoo vd. (2021, 2016) tarafından zemin çivili bir duvar modeli için gerçekleştirilen sarsma tablası deneyleri FLAC3D'de modellenmiştir. Sonlu farklar analizinden elde edilen sonuçlar, hem sarsma tablası deney sonuçları ile hem de aynı zemin çivili duvar modeli üzerinde Sahoo vd. (2016)'nin bir sonlu elemanlar yazılımı olan MIDAS/GTS yazılımı kullanılarak gerçekleştirilen sayısal analiz sonuçları ile kıyaslanmıştır. Model, 45° eğim açısına sahip 0.40 m yüksekliğinde bir şevdir ve yatayla 0° açı yapan 0.30 m uzunluğunda zemin çivileriyle güçlendirilmiştir. Her bir çivi arasındaki yatay mesafe 225 mm ve düşey mesafe 130 mm'dir. Sonlu farklar modelinde, zemin Yamuna kumu olarak modellenmiş zemine ait özellikler Sahoo vd. (2021, 2016)'de verildiği şekilde tanımlanmıştır. Zeminin yapısal modeli tanımlanırken, Sahoo vd. (2016) tarafından aynı şev modeli üzerinde gerçekleştirilen sonlu elemanlar modelinde olduğu gibi Mohr-Coulomb bünye modeli tercih edilmiştir. Çiviler, bir boyutlu kablo (*cable*) yapısal elemanlar olarak modellenmiş ve kaplama yüzeyi kabuk (*shell*) yapısal elemanı olarak tanımlanmıştır. Çivilerin ve alüminyum kaplama plakasının boyutları ve mekanik özellikleri Sahoo vd. (2021, 2016)'de belirtildiği gibi uygulanmıştır. Bu noktada, FLAC3D'de sadece şevin ve yapısal elemanların modellendiğini belirtmek gerekmektedir; sarsma tablası sistemi ve konteyner modellenmemiştir. Şev modelinin öncelikle statik koşullar altındaki denge durumu sağlandıktan sonra, dinamik koşullar altında analizi gerçekleştirilmiştir. Dinamik analizlerde uygulanan deprem hareketi Los Gatos istasyonundan alınan N00E bileşenli pik yer ivmesi PGA=0.57g olan 1989 Loma Prieta depremidir (Sahoo vd., 2016, 2021). Depremin ivme-zaman kaydı, sarsma tablası deneyi için yazarlar tarafından belirtildiği gibi filtrelenmiş ve ölçeklendirilmiştir. Girdi hareketinin ivme-zaman kaydı Şekil 6'da verilmiştir. Dinamik koşullar altındaki doğrusal olmayan zemin davranışı, FLAC3D'de mevcut olan Sigmoidal-3 histeretik sönüm modeli ile tanımlanıştır (Itasca, 2019). Ayrıca, deprem yüklemesi sırasında yüksek frekans gürültülerini azaltmak için modele çok düşük bir miktar Rayleigh sönümü (%0.20) uygulanmıştır. Sismik analizde, modelin sınır koşulları anti-simetrik sınır koşulları olarak seçilmiştir (Halabian vd., 2010; Sheikhbahaei vd., 2010). Model tabanı yatay yönde serbest bırakılırken, dalgaların uzak alana yayılmasını sağlamak için modelin sağ ve sol taraflarına serbest alan sınır koşulları uygulanmıştır.



Şekil 6. Deprem Girdi İvme Zaman Kaydı ve Şevin Taç Bölgesi Yakından Alınan İvme Zaman Kaydı

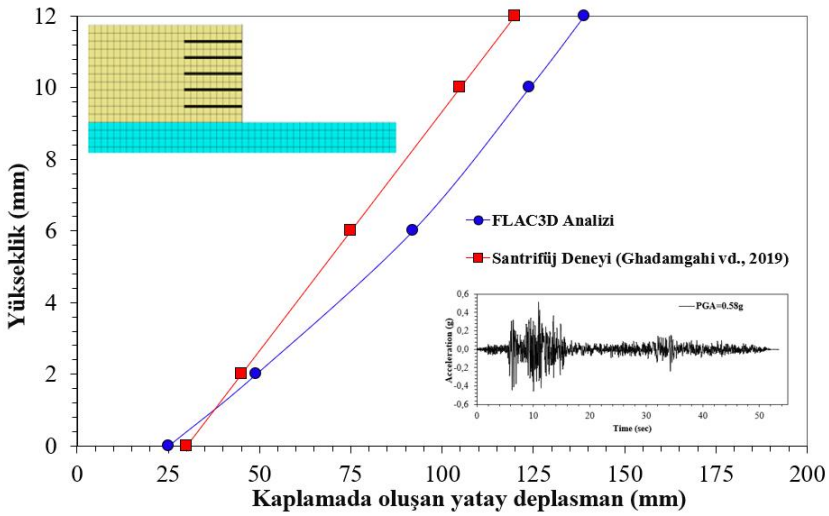
Şekil 7'de sarsma tablası deneylerinden (Sahoo vd., 2021) ve sonlu elemanlar analizlerinden (Sahoo vd., 2016) elde edilen yatay deplasman değerleri, bu çalışmada gerçekleştirilen sonlu farklar analizi sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Şekilde yatay deplasman değerlerinin üç çalışma için de tutarlı olduğu görülmektedir. Ayrıca, yazarlar sarsma tablası deneyleri sonucunda şev tepesinde amplifikasyon faktörünü 1.110 olarak hesapladıklarını belirtmiş ve bu sonucun sonlu elemanlar analizleri ile tutarlı olduğunu vurgulamışlardır. Bu çalışmada sonlu farklar yöntemi kullanılarak yapılan analizde, şevin tepe noktasındaki amplifikasyon faktörü 1.10 olarak hesaplanmıştır (Şekil 6). Bu tutarlılık, doğrulama analizinde kullanılan sayısal modelin deneysel verilerle uyumlu olduğunu göstermektedir.



Şekil 7. Dinamik Analiz Sonucunda Kaplamada Oluşan Yatay Deplasman

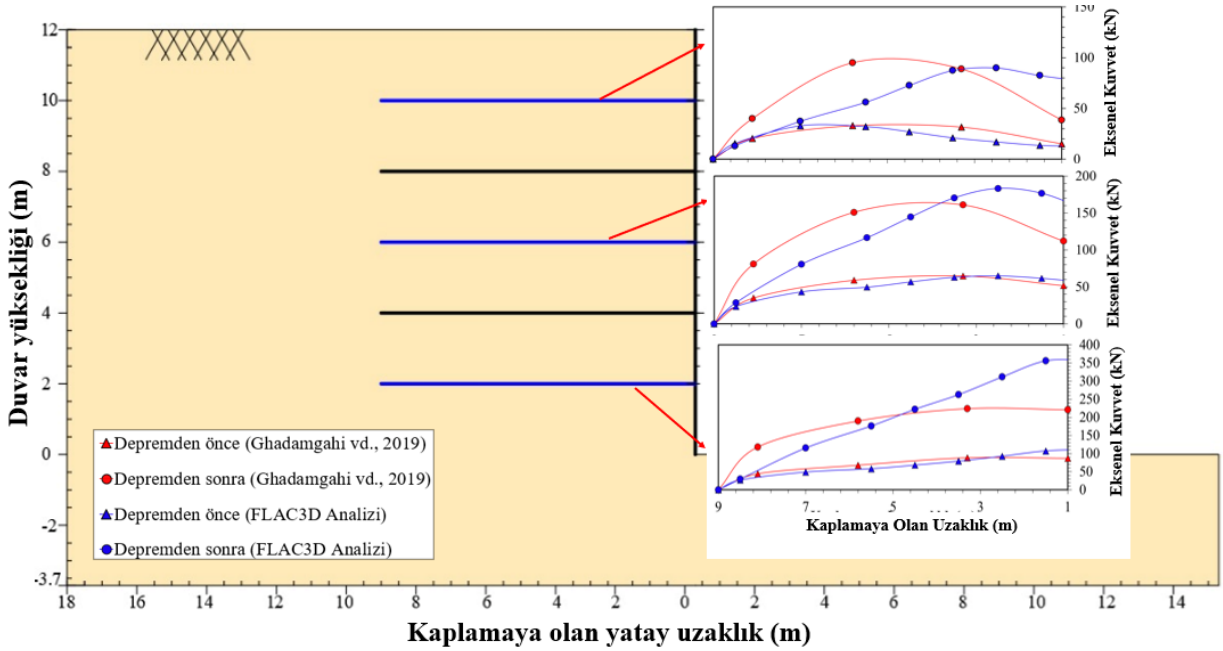
Santrifüj Deneyinin Sonlu Farklar Yöntemi ile Modellenmesi

Santrifüj deneyi yöntemleri, gerçekçi gerilme seviyeleri altında daha küçük ölçekli modelleri detaylı bir şekilde inceleme fırsatı sunar. Bu nedenle, bu çalışmada geliştirilen sayısal modelin dinamik analizdeki kullanılabilirliğini doğrulamak için Ghadamgahi vd. (2019) tarafından gerçekleştirilen santrifüj deneyleri modellenmiş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır. Yazarlar, 12 m yüksekliğindeki bir prototip duvarı temsil eden bir model duvar üzerinde 2.0 m yatay ve düşey aralıklı, 9 m uzunluğunda 5 sıra çivi ile santrifüj deneyleri gerçekleştirmiştir (Baziar vd., 2021; Ghadamgahi vd., 2019). Model zemini kum olup zemin ve yapısal elemanların tüm mühendislik ve malzeme özellikleri, prototip model için yazarlar tarafından belirtildiği gibi tanımlanmıştır. Zemin bünye modeli sarsma tablası deneyleri için gerçekleştirilen doğrulama analizinde olduğu gibi Mohr-Coulomb olarak tanımlanmıştır. Çivi yapısal elemanları, bir boyutlu kablo yapısal elemanları olarak seçilmiştir. Püskürtme beton kaplama, kabuk yapısal elemanı olarak oluşturulmuştur. 3D modellemede, yalnızca şev ve yapısal elemanların tanımlandığı, santrifüj test sistemi ve test ekipmanlarının modellenmediği önemle belirtilmelidir. Deprem hareketi (Şekil 8) olarak 1990 Rudbar-Manjil yer hareketi seçilmiştir; bu hareket Ab-bar istasyonunda 0.58g'lik bir pik yer ivmesi kaydetmiştir. Depremin ivme-zaman geçmişi 0.8-8 Hz aralığında bant geçişli filtrelenmiştir; bu, prototip ölçeği için verilen frekans aralığıdır. Statik denge sağlandıktan sonra, dinamik analiz gerçekleştirilmiştir. Bu doğrulama analizinde de sarsma tablası deneyi için gerçekleştirilen dinamik analizlerde modele uygulanan sınır koşulları uygulanmıştır. Dinamik koşullar altında doğrusal olmayan histeretik zemin modeli, Itasca'da (2019) mevcut olan Sigmoidal-3 sönüm modeli kullanılarak oluşturulmuştur. Bu analizde de yüksek frekanslı gürültüleri azaltmak için çok düşük bir miktarda Rayleigh sönümü (%0.2) uygulanmıştır. Santrifüj deneyinin ve sayısal analizin sonuçları olarak kaplamada ölçülen yatay deplasman değerleri Şekil 8'de sunulmuştur. Doğrulama analizinden elde edilen yatay hareket değerlerinin deneysel sonuçlarla oldukça tutarlı olduğu gözlemlenmiştir.



Şekil 8. Girdi Hareketi İvme Zaman Kaydı ve Kaplamada Oluşan Yatay Deplasman

Şekil 9'da, ise çivilerde depremden önce ve sonra ölçülen eksenel kuvvet değerleri sunulmaktadır. Her iki durumda da çivilerde gelişen eksenel kuvvetlerin santrifüj testinin sonuçlarıyla tutarlı olduğu açıktır.



Şekil 9. Statik ve Sismik Yükleme Sonunda Eksenel Kuvvet Dağılımın Kıyaslanması

ZEMİN ÇİVİLİ DUVARLARIN ÜÇ BOYUTLU SİSMİK ANALİZİ

Zemin çivili duvarların sismik tasarımında, deprem hareketinin davranışını temsil etmede göz önünde bulundurulan tek deprem karakteristiği depremin pik yer ivmesidir. Oysaki deprem hareketinin diğer karakteristik özelliklerinin zemin çivili duvarların dinamik davranışı üzerindeki etkilerini incelemek, bu tür yapıların sismik tasarımı için oldukça gereklidir. Bu nedenle, aynı şev modeli için farklı özelliklere sahip on deprem kaydı altında bir dizi sismik analiz gerçekleştirilmiştir. Bu özellikler arasında kuvvetli yer hareketinin pik yer ivmesi (PGA), Kümülatif Mutlak Hız değeri (CAV), Arias Şiddeti (I_a), depremin 5-95 saniye arasındaki önemli süresi (D_{5-95}) ve istasyon kayma dalgası hızı bulunmaktadır.

Tablo 3. Analizlerde Uygulanan Deprem Hareketlerinin Karakteristik Özellikleri

No	RSN	İsim	D5-95 (s)	Ia (m/s)	Vs (m/s)	M_W	PGA (g)	PGV (cm/s)	CAV (cm/s)	Süre (s)
1	4097	Parkfield	6.40	1.48	648.09	6.00	0.35	53.17	704.12	21.19
2	71	San Fernando	12.00	0.90	602.10	6.60	0.38	16.37	697.80	36.67
3	4843	Chuetsu-oki	19.90	0.71	640.14	6.80	0.19	11.46	845.60	59.99
4	1787	Hector-Mine	11.70	0.83	726.00	7.10	0.27	26.01	796.21	45.30
5	1012	Northridge	8.00	1.07	706.22	6.70	0.38	37.94	779.55	60.01
6	231	Mammoth Lake	10.90	1.33	537.16	6.10	0.43	23.74	907.87	29.99
7	164	Imperial Valley	36.40	1.33	471.53	6.50	0.15	19.28	1589.70	63.81
8	810	Loma Prieta	9.70	2.70	713.59	6.90	0.46	22.75	1314.91	39.99
9	1111	Kobe	11.20	3.35	609.00	6.90	0.48	46.82	1432.84	40.95
10	1512	Chi-Chi	26.10	3.66	443.04	7.60	0.31	39.09	2369.12	90.00

FLAC yazılımında dinamik analizler gerçekleştirilirken dinamik yüklerin belirlenmesi, sınır koşulları, mekanik sönümleme ve model üzerinde deprem dalgası iletiminin tanımlanması gerekir (Zhang vd., 2012). Model sınır koşullarının gerçeğe en uygun saha koşullarını yansıtması, hem statik koşullar hem de dinamik koşullar için gereklidir. Özelikle dinamik koşullarda, sınır koşulları doğru tanımlanmadığı takdirde, deprem dalgaları model içine geri yansıyarak model tepkisinde hatalara sebebiyet vermektedir. Bu çalışmada, modelin öncelikle kendi ağırlığı etkisi altında statik denge koşulunu sağlaması amaçlanmıştır. Statik yükleme altında gerçekleştirilen analizlerde, model yan sınırlarının normali doğrultusunda hareket sınırlanırken, düşey doğrultuda hareketine izin verilmiştir. Modelin taban sınırı yatay ve düşeyde sabittir. Dinamik yükleme durumunda bu tür sınır koşulları dışa doğru yayılan

dalgaların modele geri yansımasına neden olur. Daha büyük boyutlarda model tercih edilmesi, bu sorunu azaltabilir; zira daha uzak sınırlarından yansıyan dalgaların enerjisi, malzeme sönümü sayesinde emilir. Ancak, bu çözüm yüksek hesaplama süresine yol açmaktadır (Itasca, 2019). Bu nedenle, viskoz sınırların (*quiet boundry*) kullanımı çok etkili bir alternatif olarak görülmektedir. Modelin taban sınırında, Lysmer ve Kuhlemeyer tarafından geliştirilen viskoz taban sınır koşulu uygulanmıştır (1969). Viskoz sınırlar model tabanından aşağıya doğru giden dalgaların model içine geri dönmesini engeller. Itasca'ya (2019) göre, viskoz sınır koşulları kullanıldığında, bu sınır koşulunun etkisini geçersiz kılmamak için sismik kayıt, gerilme-zaman kaydına dönüştürülmektedir. Model tabanına uygulanan giriş gerilme-zaman kaydı, Denklem 3.1'de verilen formül kullanılarak bir hız- zaman geçmişinden gerilme-zaman geçmişine dönüştürülmüştür (Mejia ve Dawson, 2006).

$$\sigma_s = 2(\rho C_S)v_S \tag{3.1}$$

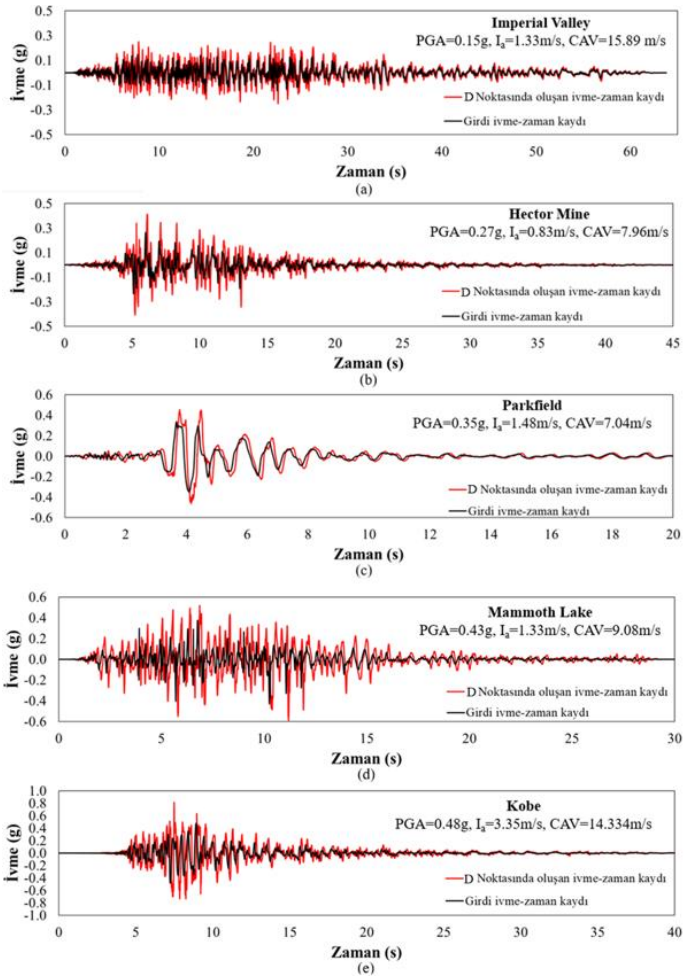
Denklemde, σ_s uygulanan kayma gerilimini, ρ zemin yoğunluğunu, C_s ortamda s-dalga yayılma hızını, v_s ise depremin giriş hızı-zaman kaydını temsil etmektedir. Formasyondaki 2.0 katsayısı kesin bir değer değildir ve dinamik analizler gerçekleşmeden önce serbest alan analizleri ile kontrol edilmelidir. Bu nedenle, FLAC3D kullanıcı kılavuzunu (Itasca, 2019) ve Kiran (2021)'ı dikkate alarak, Denklem 3.1 ile dönüştürülen kayma gerilimi kaydı önce viskoz sınıra uygulanmış ve analiz tamamlandıktan sonra model tabanından elde edilen ivme kaydı gerçek ivme kaydı ile karşılaştırılmıştır. Bu kontroller, bu çalışmada incelenen on farklı deprem kaydı için gerçekleştirilmiş ve her biri için bir katsayı belirlemesi yapılmıştır. Ayrıca, sismik dalganın sınır yansıma etkisini önlemek ve model etrafında sonsuzluğu tanımlayabilmek için modelin tüm yan yüzeylerinde serbest alan (*free field*) sınırı kullanılmıştır.

BULGULAR

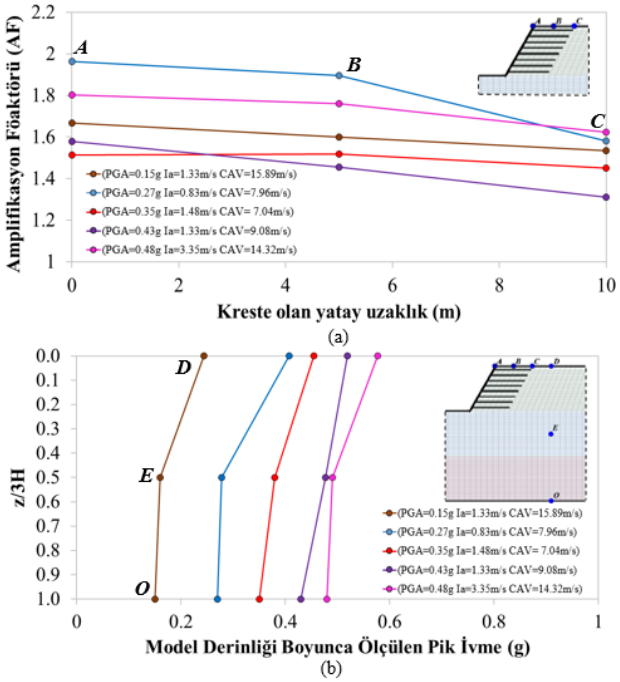
Pik İvmede Meydana Gelen Amplifikasyonun Değerlendirilmesi

Depremler, yer kabuğundaki fay hatları boyunca meydana gelen ani hareketlerin bir sonucu olarak ortaya çıkan sismik dalgalardır. Sismik dalgaların yüzeye yayılması sırasında, zemin özellikleri, yapısal özellikler ve yer hareketinin frekans içeriği gibi faktörler, depremin etkisini önemli ölçüde artırabilir. Bu artış, model yüzeyindeki ölçüm noktalarında belirlenen pik ivme değerlerinin ($PGA_{yüzey}$), model tabanından etkitilen girdi hareketine ait pik ivme değerlerine (PGA_{girdi}) bölünmesiyle elde edilen amplifikasyon faktörü (AF) ile ifade edilir. Bu çalışmada, zemin yüzeyinde beş metre aralıklarla alınan üç noktada (*A, B, C*) ve model derinliği boyunca eşit aralıklarla belirlenen üç farklı noktada (*D, E, O*) amplifikasyon faktörü değerleri incelenmiştir (Şekil 1 (a)). Şekil 10'da beş farklı deprem hareketi için model yüzeyinden (Nokta *D*) elde edilen ivme-zaman geçmişleri ile giriş ivme kayıtları (Nokta *O*) sunulmuştur. Aynı zamanda Şekil 11 (a)'de aynı beş deprem hareketi için model derinliği boyunca belirlenen üç farklı noktadan elde edilmiş amplifikasyon değerleri sunulmuştur. Buradan model tabanından üst zemin tabakalarına çıkıldıkça, deprem pik ivmesinde artış olduğu görülmektedir. Pik ivme değerlerindeki bu artışın nedeni, yüzeydeki zemin tabakasının malzeme özellikleri ile kayma dalgası hızının, altta bulunan zemin tabakalarından daha düşük olması ile açıklanabilir. Elastik dalga enerjisinin korunumu nedeniyle, enerji akışının da sabit kalması gerekmektedir; bu nedenle kayma dalgası hızındaki azalım hareketin genliğinde bir atışa yol açmaktadır. Ayrıca sismik dalgalar yüzeye ulaştığında enerjilerinin çoğu geri yansımaktadır. Bunun sonucunda, yüzeydeki zemin tabakaları aynı anda hem yukarıdan hem de aşağıdan gelen dalgaların etkisi altında olacaktır (Tavakoli vd., 2019). Bu durum yüzeydeki ivme artışını açıklamaktadır.

Amplifikasyon faktöründeki değişim, model yüzeyinde alınan noktalarda da incelenmiştir (Şekil 11 (b)). Burada görüldüğü üzere, en yüksek amplifikasyon faktörü değeri *A* noktasında (şevin taç bölgesi) meydana gelmektedir. *A* noktasından uzaklaştıkça amplifikasyon faktörü değerinin azaldığı görülmektedir. Bu durum da elastik dalga enerjisin korunumu ve şevin geometrisiyle açıklanabilir (Maleki vd., 2023). Elastik dalga enerjisinin korunumu gereği, dalga ilerledikçe enerji akışı sabit kalır; bu nedenle, sismik dalga serbest alan koşullarından duvar yüzeyine girdiğinde, dalga hareketinin akışı *A* noktasında yoğunlaşmaktadır. Bu durum maksimum amplifikasyonun şevin taç bölgesinde meydana gelmesine neden olmaktadır. Ayrıca yatay düzlemde şevin taç bölgesinden uzaklaştıkça amplifikasyon faktörü değerlerinin azaldığı görülmektedir. Bu durum, model yüzeyinde geometrik etkinin enerjinin yoğunlaştığı *A* noktasından uzaklaştıkça azaldığını göstermektedir (Tavakoli vd., 2019).



Şekil 10. Farklı Deprem Hareketleri Neticesinde Model Tabanından (*O* Noktası) ve Model Yüzeyinden (*D* Noktası) Alınan İvme-Zaman Kayıtları: (a) Imperial Valley, 1979 (b) Hector Mine, 1999 (c) Parkfield, 2004 (d) Mammoth Lake, 1980 (e) Kobe, 1975

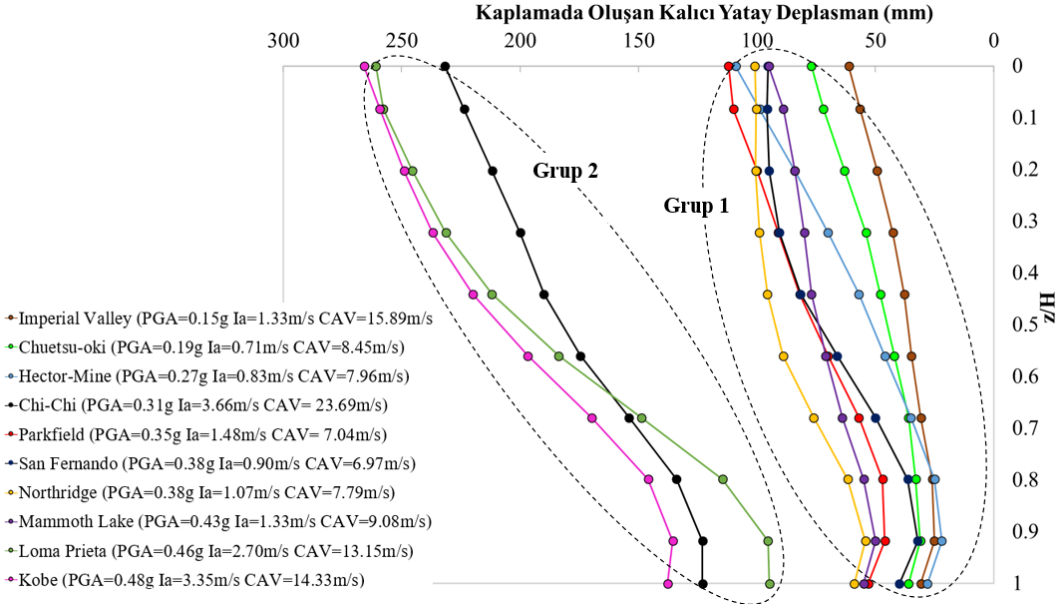


Şekil 11. Model Üzerinde Alınan Belirli Noktalarda Pik İvmede Meydana Gelen Değişim: (a) Model Yüzeyinde (*A*, *B*, *C* Noktaları), (b) Model Derinliği Boyunca (*O*, *E*, *D* Noktaları)

Kaplamada Meydana Gelen Yatay Deplasman

Şev modeline uygulanan on deprem hareketinin sonucunda kaplamada oluşan yatay kalıcı deplasman değerleri Şekil 12'de verilmiştir. Grafikten sismik hareketler neticesinde oluşan deplasman değerlerinin iki ayrı grupta toplandığı gözlemlenmektedir. Bu gruplardan ilki (Grup 1), Imperial Valley (PGA=0.15g), Chuetsu-oki (PGA=0.19g), Hector Mine (PGA=0.27g), Parkfield (PGA=0.35g), San Fernando (PGA=0.38g), Northridge (PGA=0.38g) ve Mammoth Lake (PGA=0.43g) depremlerinden kaydedilen, deplasman değerlerini içermektedir. Diğer grup (Grup 2) ise Chi-Chi (PGA=0.31g), Loma Prieta (PGA=0.46g) ve Kobe (PGA=0.48g) depremlerinin neden olduğu Grup 1'e göre nispeten daha büyük deplasman değerlerinin elde edildiği analiz sonuçlarını kapsamaktadır.

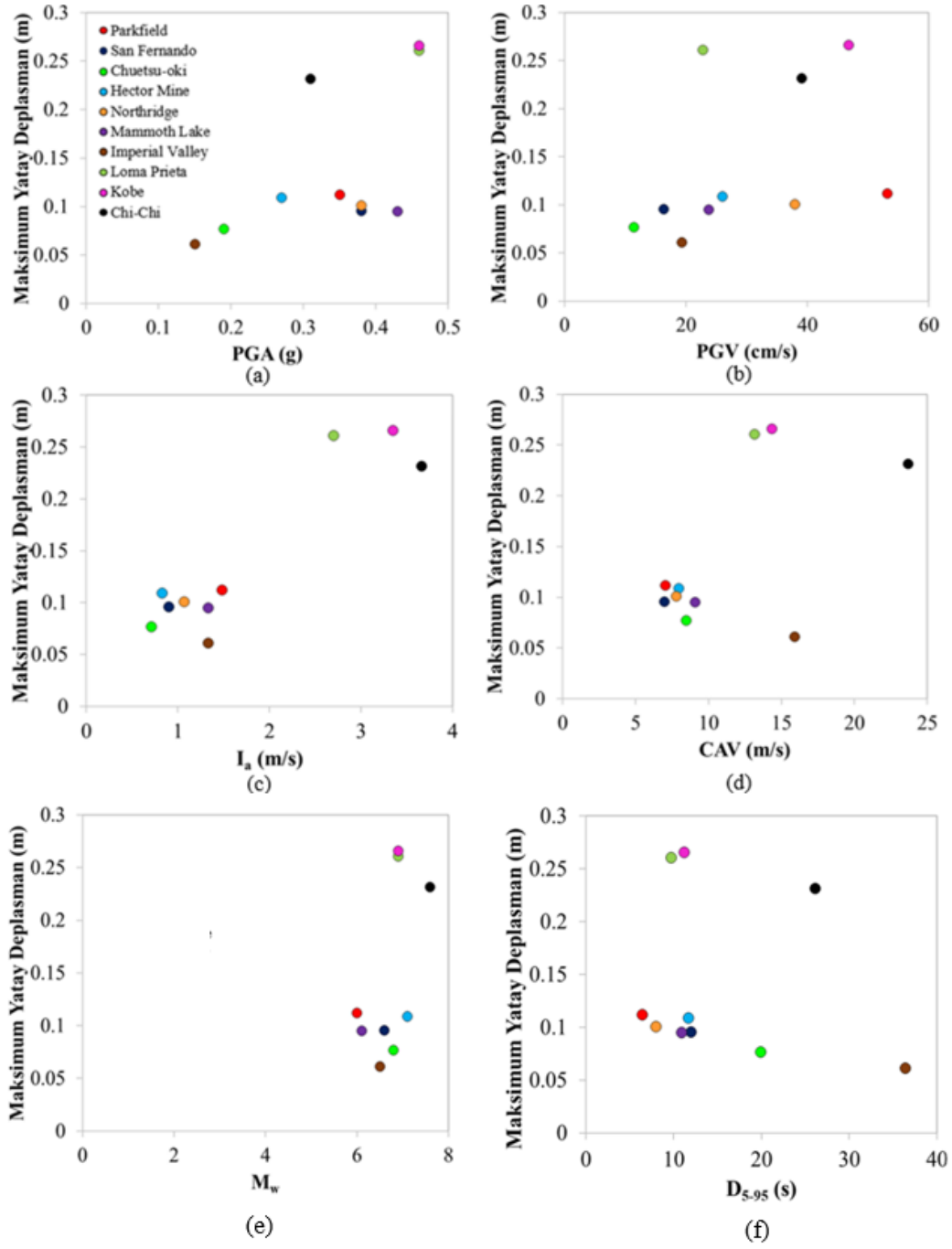
Grup 1'de meydana gelen deplasman değerlerinin, duvar yüksekliğinin yaklaşık olarak %5-9'u arasında meydana geldiği ve pik ivme değeri arttıkça kaplamada meydana gelen maksimum deplasman değerinin de arttığı görülmektedir. Aynı pik ivme değerine sahip (0.38g) San Fernando ve Northridge depremlerinde, daha uzun süreli olan ve daha büyük Arias Şiddeti değerine sahip Northridge depreminde daha yüksek deplasman meydana geldiği görülmektedir. Grup 2'deki deformasyonlara neden olan üç depremin özellikle çok yüksek pik yer ivmesi (PGA), Arias Şiddeti (I_a) ve Kümülatif Mutlak Hız (CAV) gibi deprem karakteristiklerine sahip olmasına atfedilebilir. Burada hangi deprem karakteristiğinin, zemin çivili duvarların yatay deformasyon davranışında baskın olduğunu netleştirmek için, duvar yüzeyinde gözlemlenen maksimum yer değiştirme değerleri, Şekil 13 ve Şekil 14'te verilen, PGA: Pik yer ivmesi (g), PGV: Pik yer hızı (cm/s), $D_{5\text{-}95}$: T=5-95 s için önemli süre, I_a: Arias Şiddeti (m/s), CAV: Kümülatif Mutlak Hız (m/s) ve M_w: Magnitüd gibi çeşitli deprem parametreleri için ayrı ayrı incelenmiştir. Farklı deprem özelliklerine göre yatay deplasman değerleri incelendiğinde, Şekil 12'ye benzer bir gruplaşma olduğu gözlemlenmektedir. Şekil 13 (a)'te, pik yer ivmesi ve maksimum yatay deplasman değerleri verilmiştir. Şekilde, PGA değerlerinden elde edilen deformasyon değerlerinin yaklaşık 0.4g'ye kadar iki belirgin kümeye gruplandığı görülmektedir. Buradan, tahmin edildiği üzere yüksek pik yer ivmesine sahip deprem hareketleri neticesinde yüksek deplasman değerlerini gözlemlenebileceği sonucunu çıkarmak mümkündür. Ancak, dikkati çeken önemli bir husus, 0.31g PGA değerine sahip Chi-Chi depremi neticesinde oluşan maksimum deplasman değerinin, büyük yer değiştirmelerin gerçekleştiği Grup 2'de yer almasıdır. Bu durumun nedeni, Chi-Chi yer hareketinin, analizlerde uygulanan on deprem hareketi içinde en yüksek Arias Şiddeti ve CAV değerine sahip olması olarak değerlendirilmektedir. Bu durum, zemin çivili duvarların sismik tasarımında kullanılan tek deprem karakteristiği olan pik yer ivmesinin (FHWA, 2015) yanı sıra diğer deprem özelliklerinin de (I_a, CAV, PGV, vb.) duvarın deformasyon davranışında önemli bir rol oynadığını kanıtlamaktadır.



Şekil 12. Deprem Hareketleri Neticesinde Kaplamada Meydana Gelen Yatay Deplasman

Bir deprem karakteristiği olarak Arias Şiddeti, enerji salınımını temsil eden çok önemli bir parametredir; bu değer, ivme kaydının yatay ve düşey bileşenlerinin toplamını içerir; ayrıca depremin sarsıntı süresinin ve frekans içeriğinin zamana bağlı değişimini kapsar (Kayen ve Mitchell, 1997). I_a ve maksimum yatay deplasman değerlerinin dağılımı Şekil 13 (c)'te gösterilmiştir. Buradan, modelde oluşan yatay deplasman davranışında Arias Şiddetinin pik yer ivmesi değerlerinden daha etkili olduğu açıkça görülmektedir. Yüksek deformasyonların meydana geldiği üç deprem

hareketinin Arias Şiddeti değerleri, düşük deformasyonların meydana geldiği deprem hareketlerine ait Arias Şiddeti değerlerinden ortalama 2 kat büyüktür. Daha açık bir şekilde bir karşılaştırma yapmak gerekirse PGA=0.43g ve I_a=1.33 m/s sahip Mammoth Lake depreminde duvarda gözlemlenen maksimum yatay deplasman 11 cm iken, PGA=0.46g, I_a=2.70m/s olan Loma Prieta depreminde 26 cm maksimum deplasman gerçekleşmiştir. Ayrıca PGA=0.35g, I_a=1.48m/s olan Parkfield depreminde 11.2 cm deplasman meydana gelirken, pik yer ivmesi daha düşük olan, PGA=0.31g, I_a= 3.66m/s değerine sahip Chi-Chi depreminde oluşan maksimum yatay deplasman 23 cm'dir. Dolayısıyla, buradan pik yer ivmesi benzer olan deprem hareketlerinde Arias Şiddeti değerinin deformasyon davranışında belirleyici ve önemli bir faktör olduğu görülmektedir. Pik yer ivmesi değerinden bağımsız olarak, depremin frekans içeriğini ve süresini kapsayan I_a değerleri arttıkça, maksimum deplasman değeri de artmaktadır. Şekil 13(b)'te deprem hareketlerinin pik hız değerleri ile, duvarda oluşan maksimum deformasyon dağılımları verilmiştir. Buradan, pik yer hızı değerleri ile duvarda oluşan deplasman arasında etkili bir ilişki olduğu görülmektedir; deplasman değerleri artan PGV değerleriyle artmaktadır.



Şekil 13. Farklı Deprem Karakteristiklerine Göre Duvarda Oluşan Maksimum Deplasman Dağılımı

Şekil 13 (c)'te dikkati çeken bir diğer hususta, on deprem hareketi içinde en yüksek Arias Şiddeti değerine (I_a=3.66m/s) sahip Chi-Chi depreminden sonra oluşan maksimum deplasman değerinin Grup 2'de bulunan diğer iki deprem hareketinden Loma Prieta (I_a=2.7m/s), Kobe (I_a=3.35m/s) daha düşük olmasıdır. Bu durumun nedeni, bu depremin Grup 2'deki diğer yer hareketlerine kıyasla daha düşük bir PGA değerine sahip olması olarak değerlendirilmektedir.

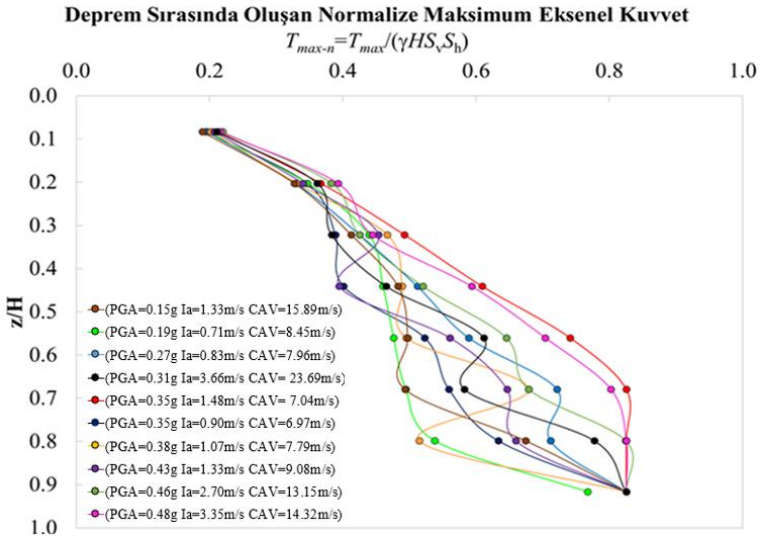
Kümülatif Mutlak Hız değerlerinin, deplasman davranışı üzerindeki etkisi Şekil 13 (d)'te incelenmiştir. Her iki grupta yer alan deplasman değerleri incelendiğinde genellikle CAV değerleri arttıkça deplasman değerlerinin de arttığı görülmektedir. Ayrıca, Grup 1'deki diğer altı depremle karşılaştırıldığında oldukça yüksek kabul edilebilecek CAV değerine sahip olan Imperial Valley depremi sonucunda oluşan en küçük yatay deplasman meydana gelmiştir. Bu durumun, depremin en düşük pik yer ivmesi değerine (0.15g) sahip olmasından kaynaklandığı düşünülmektedir. Şekil 13 (e) ve (f)'te sırasıyla depremin magnitüdü (M_w) ve T=5-95s için önemli süre (D_{5-95}) göre deprem sonunda elde edilen maksimum yatay deplasman dağılımı incelenmiştir. Buradan, benzer D_{5-95}, M_w değerlerine sahip deprem hareketlerinin farklı deformasyon davranışları sergileyebileceğini açıkça göstermektedir. Dolayısıyla bu deprem karakteristiklerinin zemin çivili bir duvarın dinamik koşullar altında yatay deformasyon davranışında belirleyici parametreler olmadığı sonucu çıkarılmaktadır.

Maksimum Eksenel Kuvvet

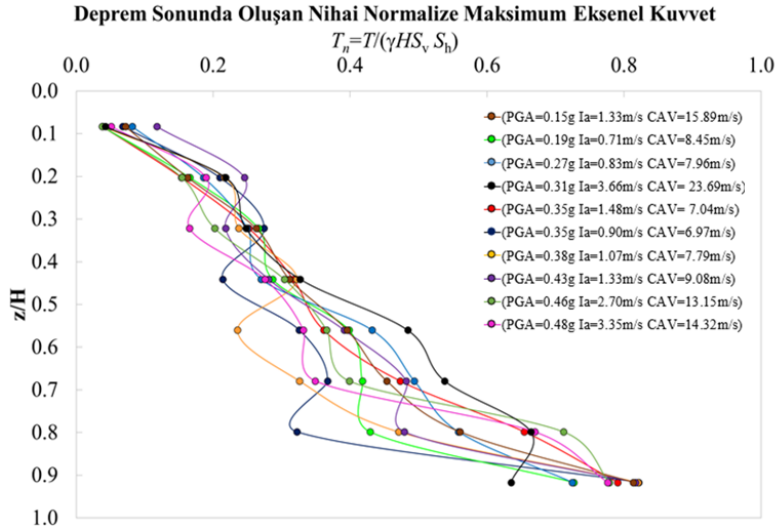
Bu bölümde, on ayrı deprem hareketi altında gerçekleştirilen dinamik analiz sürecinde elde edilen maksimum çivi kuvvetleri (T_{max}) ile ve de deprem hareketi sonucunda çivilerde meydana gelen maksimum çivi çekme kuvvetleri (T) incelenmiştir. Şekil 14'te ve Şekil 15'de sırasıyla deprem esnasında ve deprem sonrasında oluşan çivi kuvvetleri normalize edilerek sunulmuştur. Normalize edilmiş kuvvetler Denklem 4.1 kullanılarak hesaplanmıştır (FHWA, 2015).

$$T_{\max-n} = \frac{T_{\max}}{\gamma H S_v S_H} \tag{4.1}$$

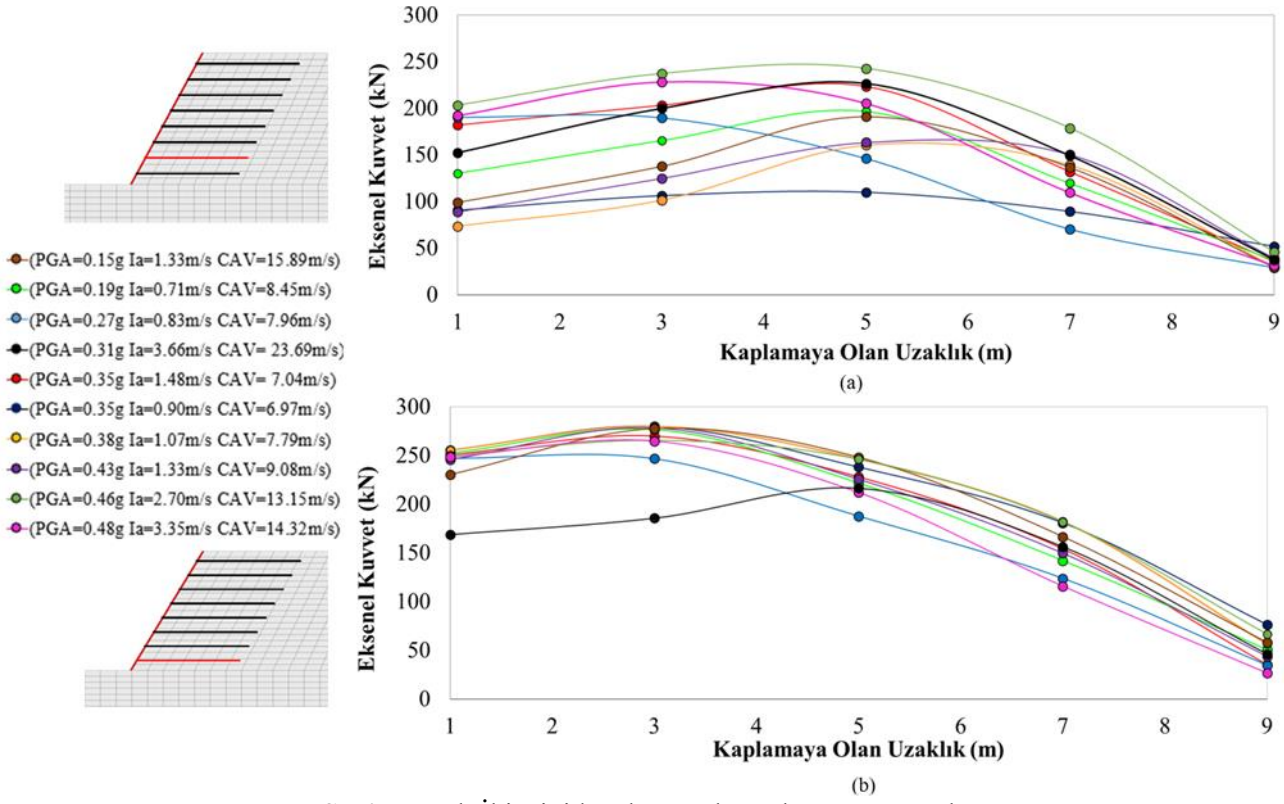
Her iki grafikte de maksimum çivi kuvvetlerinin alt üç sıra çivide meydana geldiği görülmektedir. Bu durumun nedeninin, üst sırada kalan çivilerin yenilme zarfı içinde kalması dolayısıyla, üzerinde gerilme oluşmadığı için sisteme minimum seviyede katkı sağlaması olduğu düşünülmektedir. Dolayısıyla alt sırada kalan çiviler, yenilme zarfının dışında kalan aktif uzunlukları vasıtasıyla sistemde en yüksek çekme yükünü karşılayarak yenilmeye karşı direnmektedir. Maksimum çivi kuvvetlerinin oluştuğu alt iki sıradaki çivi kuvveti dağılımı ise deprem sonunda elde edilen maksimum çekme yükleri için Şekil 16'da verilmiştir. En alt çivide San Fernando depremi haricinde tüm çivilerde maksimum yükün aynı yerde ve kaplama yakınında meydana geldiği görülmektedir ve çivilerde oluşan nihai maksimum yük değerleri birbirine oldukça yakındır. Alttan ikinci sırada yer alan çivilerde ise büyük deplasmanların oluştuğu üç deprem de en büyük çekme kuvvetlerinin oluştuğu görülmektedir.



Şekil 14. Deprem Esnasında Çivilerde Oluşan Maksimum Kuvvetler



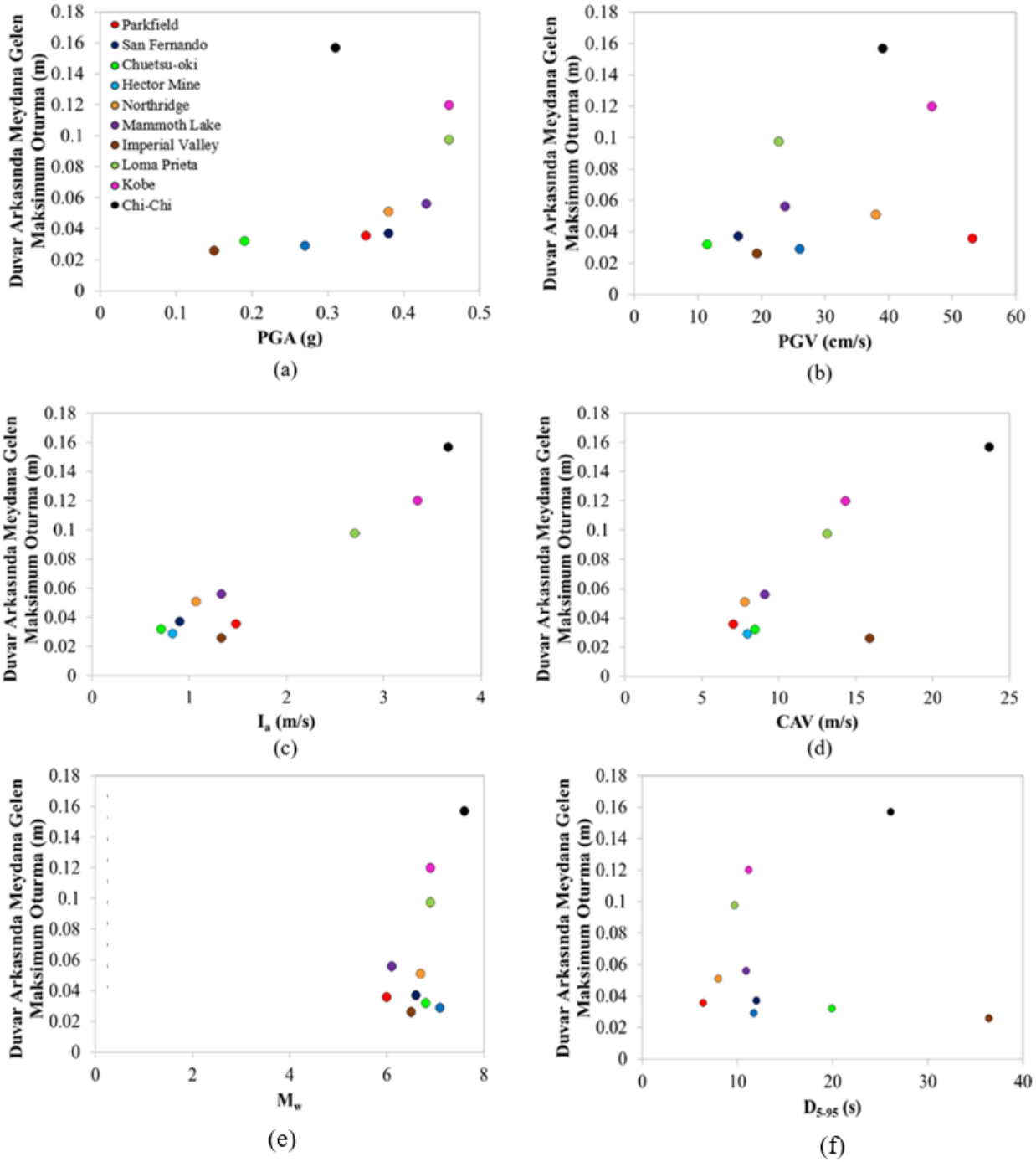
Şekil 15. Deprem Sonunda Çivilerde Oluşan Maksimum Kuvvetler



Şekil 16. Alt İki Çivide Oluşan Eksenel Kuvvet Dağılımı

Duvar Arkasında Oluşan Maksimum Düşey Deplasman

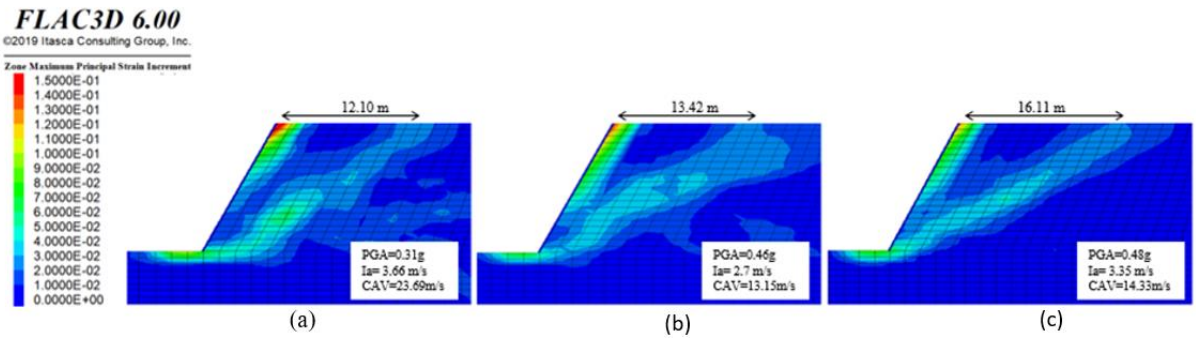
Bu bölümde, dinamik analizler sonucunda duvarın arkasında meydana gelen maksimum oturma değerleri, deprem karakteristikleri göz önüne alınarak incelenmiştir. Şekil 17 (a)'de, pik yer ivmesi değerlerinin oturma davranışını doğrudan etkilediği görülmektedir; oturma belirli bir deformasyon değerine kadar pik yer ivmesi ile doğru orantılı olarak artmaktadır. Yüksek oturma değerlerinin gözlemlendiği deprem hareketlerinde pik ivmenin yanında, özellikle yüksek I_a ve CAV değerlerinin de etkisi olduğu görülmektedir (Şekil 17 (c)-(d)). PGV değerlerine göre düşey deplasman dağılımı incelendiğinde, maksimum oturma davranışının bu değerle birlikte arttığı görülmektedir. Ayrıca depremin magnitüdü (M_w) ve T=5-95s için önemli süre (D_{5-95}) göre deprem sonunda duvar arkasında oluşan maksimum düşey deplasman dağılımı incelenmiştir. Buradan, benzer D_{5-95}, M_w değerlerine sahip deprem hareketlerinin farklı düşey deformasyon davranışı gösterdiği anlaşılmaktadır. Dolayısıyla bu deprem karakteristiklerinin zemin çivili bir duvarın dinamik koşullar altında şev arkasında oluşan oturma davranışında belirleyici parametreler olmadığı sonucu çıkarılmaktadır.



Şekil 17. Farklı Deprem Karakteristiklerine Göre Duvar Arkasında Oluşan Maksimum Düşey Deplasman Dağılımı

Kayma Düzlemleri

Gerçekleştirilen dinamik analizler neticesinde, elde edilen kayma düzlemleri Şekil 18'de verilmiştir. Yüksek deformasyonların gerçekleştiği, nispeten yüksek pik yer ivmesi, Arias Şiddeti ve Kümülatif Mutlak Hız değerlerine sahip üç deprem neticesinde oluşan kayma düzlemleri sunulmuştur. Burada, kayma düzlemleri ile şevin tepe noktası arasındaki yatay mesafeler ölçülerek çivi etkin boyları incelenmiştir. Özellikle üst üç sıra çivinin kayma düzleminin içinde kaldığı görülmektedir. Buradan dinamik yüklemenin, üst sıralardaki çivilerin eksenel kuvveti üzerinde bir etkisi olmadığı sonucuna varılabilir. Bu durum alt sıra çivilerde maksimum çivi kuvvetlerinin oluşması durumunu açıklamaktadır.



Şekil 18. Deprem Hareketi Sonunda Oluşan Kayma Düzlemleri: (a) Chi-Chi (b) Loma Prieta (c) Kobe

SONUÇLAR

Bu çalışmada zemin çivileriyle güçlendirilmiş şev modeli, bir sonlu farklar yazılımı olan FLAC3D'de modellenerek, farklı karakteristik özelliklere sahip on ayrı deprem hareketi altında dinamik analize tabi tutulmuştur. Zemin çivili duvarların dinamik tasarımında genel olarak pseudo-statik analiz yöntemlerine dayalı metotlardan faydalanılmaktadır. Bu yöntemler, depremin pik ivmesine bağlı olarak belirlenen sismik katsayının tahmin edilmesini ve bu katsayı ile sismik yüklerin duvarın kayma düzlemi içinde kalan kütlesine etkitilmesine dayanır. Oysa, deprem dalgalarını tek bir parametre ile ifade etmek çoğu koşulda yeterli olmamaktadır. Pik ivmenin yanında diğer deprem karakteristikleri de zemin çivili şev sisteminin dinamik davranışında etkili olmaktadır. Bu amaçla bu çalışma kapsamında oluşturulan şev modelinde diğer deprem karakteristiklerinin etkisinin araştırılması amaçlanmıştır.

Öncelikle model tabanından etkitilen girdi hareketinin, yüzeye kadar olan yayılımı sırasında meydana gelen amplifikasyon değerleri incelenmiştir. Burada, model tabanından yüzeye çıkarken, pik yer ivmesinde bir atış söz konusu oluğu belirlenmiştir. Bu durum, elastik dalga enerjisinin korunumuna dayanarak açıklanmıştır. Aynı zamanda model tabanından model yüzeyine çıktıkça, üst tabakalarda bulunan zeminlerin rölatif sıklığı ve kayma dalgası hızı azaldığı için dalga genliğinde meydana gelen bir atış beklenen bir durumdur. Benzer şekilde, modelin taç bölgesinde seçilen *A* noktasından belirli uzaklıklarda tanımlanmış üç noktada da zemin büyütmesi etkisi gözlemlenmiştir. Bu koşulda en büyük amplifikasyon faktörünün *A* noktasında meydana geldiği görülmüştür. Bu durum da yine elastik dalga enerjinin korunumu ve geometrik etki ile açıklanmıştır.

Bu çalışmada dikkati çeken bir diğer husus, sismik hareketler neticesinde oluşan deplasman değerlerinin iki ayrı grupta toplanmasıdır. Grup 1, pik ivme aralığı 0.15g-0.43g, I_a değeri 0.71m/s-1.33m/s aralığında değişen depremler neticesinde 5-11 cm aralığında gelişen deplasmanları kapsamaktadır. Grup 2 ise pik ivme değerleri 0.31g-0.48g, I_a değerleri 2.70m/s-3.66m/s arasında bulunan ve 23-27cm aralığında deplasmanın gerçekleştiği üç deprem hareketini içermektedir. Özellikle, 0.43g'ye kadar pik ivmeye sahip depremlerin etkisi altında kaplama yüzeyinde duvar yüksekliğinin %5-9'u oranında deplasman meydana gelirken, yatay deplasman davranışında, pik yer ivmesinin belirleyici olduğu belirlenmiştir. Pik ivme değeri arttıkça yatay deformasyon da artmaktadır. Pik yer ivmesi eşit ve 0.38g olan San Fernando ve Northridge depremleri incelendiğinde, Northridge depreminin daha uzun süreli olması ve daha yüksek Arias Şiddeti ve CAV değerine sahip olması nedeniyle, bu depremde meydana gelen deplasmanın San Fernando depremine kıyasla daha yüksek olduğu gözlemlenmektedir. Aynı pik ivmeye sahip depremlerde frekans içeriğinin ve deprem süresinin deplasman davranışını etkilediği görülmektedir. Sırasıyla 0.46g ve 0.48g pik ivmeli Loma Prieta ve Kobe depremleri neticesinde deplasmanların Grup 1'e göre yaklaşık iki kat arttığı gözlemlenmiştir. Dikkate değer bir bulgu ise, PGA=0.31g olan ve çok yüksek CAV=23.69m/s ve I_a=3.66m/s değerlerine sahip Chi-Chi deprem hareketi sonunda yaklaşık 23 cm deplasman meydana gelmesidir. Bu değer daha yüksek pik ivmeli fakat düşük I_a ve CAV değerlerine sahip Parkfield (0.35g), San Fernando (0.38g), Northridge (0.38g), ve Mammoth Lake Parkfield (0.43g) depremleri neticesinde bulunan deplasman değerlerinden daha büyüktür. Bu durum, pik ivme değerinin deformasyon davranışını değerlendirmede yeterli bir gösterge olamayacağını ortaya koymaktadır. Analizler, pik ivmenin yanında Arias Şiddeti ve CAV değerlerinin dayanma yapısı deplasmanları üzerinde belirleyici bir etkisi olduğunu göstermektedir

Deprem hareketi sırasında ve sonrasında çivilerde gelişen maksimum çivi kuvvetleri incelenmiştir. Burada, maksimum çivi kuvvetlerinin alt iki sıra çivide oluştuğu, üst üç sıra çivilerin ise sisteme katkısının düşük olduğu gözlemlenmiştir. Yüksek deformasyonların gerçekleştiği üç ayrı deprem hareketi neticesinde oluşan kayma düzlemleri incelendiğinde ilk üç sıra çivinin kayma düzlemi içerisinde yer aldığı ve gerilme alamadığı görülmüştür.

Duvar arkasında meydana gelen oturma davranışı incelendiğinde genel olarak pik ivmeye bağlı olarak oturma değerlerinin de arttığı görülmekte olup, Arias Şiddeti değerinin özellikle yüksek deformasyonun görüldüğü nispeten yüksek karakteristik özelliklere sahip depremlerde oturma davranışını yöneten parametre olduğu belirlenmiştir. CAV değerinin artmasıyla düşey deformasyonun arttığı; fakat oldukça yüksek Kümülatif Mutlak Hız ve Arias Şiddeti değerine sahip olmasına rağmen en küçük yatay ve düşey deformasyon davranışı gösteren Imperial Valley depreminin sismik davranışında en önemli faktörün en düşük pik yer ivmesine sahip olması sonucu çıkarılmıştır. Pik yer hızı değerlerine göre, düşey deplasman değerleri incelendiğinde bu değerin artışıyla deplasman değerlerinin arttığı; fakat diğer deprem parametrelerinin (PGA, I_a ve CAV) daha etkili olduğu görülmüştür. Depremin magnitüd ve T=5-95sn için önemli süresinin deformasyon davranışı etkisinde önemli bir etkisi olduğu görülmemiştir.

Bu çalışmadan elde edilen bulgulara göre, pik ivme değerinin deformasyon davranışını değerlendirmede yeterli bir parametre olmadığı ortaya konmuştur. Zemin çivili duvarların sismik tasarımı için başvurulan yönetmeliklerde, depremin süresini ve frekans içeriğini yansıtan deprem karakteristiklerinin etkisini dikkate alan bir yöntem bulunmamaktadır. Dinamik tasarımın, maksimum ivme değerine bağlı belirlenen sismik bir katsayıya dayandırılması göz önünde bulundurulduğunda, bu çalışmanın sonuçlarının literatüre ve zemin çivili duvarların tasarım uygulamalarına önemli katkılar sağlayacağı düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

Alver, O. (2023). *Development Of Lateral Load Resistance-Deflection Curves For Piles In Cohesionless Soils Under Earthquake Excitation*. Istanbul Technical University.

Ardiaca, D. . (2009). Mohr-Coulomb parameters for modelling of concrete structures. Içinde *Plaxis Bulletin* (s. No. Spring, ss. 12–15).

Arias, A. (1979). A Measure of Earthquake Intensity. Içinde *Seismic Design for Nuclear Power Plants, (R.J. Hansen, ed.)* (R.J. Hanse, ss. 483–83). MIT Press.

Barar, O., Felio, G. Y., Vucetic, M., & Chapman, R. (1990). Performance of soil nailed walls during the October 17, 1989, Loma Prieta earthquake. *Proceedings of the forty-third Canadian geotechnical conference*, 73–165.

Başbuğ, E., Cengiz, C., & Güler, E. (2021). 1-g Shaking table tests to determine the behavior of geosynthetic reinforced soil walls under seismic loads. *Transportation Geotechnics*, *30*(November 2020). https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2021.100597

Baziar, M. H., Ghadamgahi, A., & Brennan, A. J. (2021). Centrifuge study of seismic response of soil-nailed walls supporting a footing on the ground surface. *Geotechnique*. https://doi.org/10.1680/jgeot.21.00157

Darendeli, M. B. (2001). *Development of a new family of normalized modulus reduction and material damping curves*. The university of Texas at Austin.

Fan, C., Liu, H., Cao, J., & Ling, H. I. (2020). Responses of reinforced soil retaining walls subjected to horizontal and vertical seismic loadings. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, *129*(May 2019), 105969. https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2019.105969

FHWA. (2015). Soil Nail Walls Reference Manual. *Soil Nail Walls Reference Manual. FHWA-NHI-14-007: No. 132085, 132085*, 425. https://www.fhwa.dot.gov/engineering/geotech/pubs/nhi14007.pdf

Ghadamgahi, A., Baziar, M. H., & Brennan, A. J. (2019). International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE). *Earthquake Geotechnical Engineering for Protection and Development of Environment and Constructions*, 536–537. https://doi.org/10.1007/978-3-319-73568-9_174

Giri, D., & Sengupta, A. (2009). Dynamic behavior of small scale nailed soil slopes. *Geotechnical and Geological Engineering*, *27*(6), 687–698. https://doi.org/10.1007/s10706-009-9268-x

Giri, D., & Sengupta, A. (2010a). Dynamic behavior of small-scale model of nailed steep slopes. *Geomechanics and Geoengineering*, *5*(2), 99–108. https://doi.org/10.1080/17486020903497415

Giri, D., & Sengupta, A. (2010b). Dynamic behavior of small-scale model slopes in shaking table tests. *International Journal of Geotechnical Engineering*, *4*(1), 1–11. https://doi.org/10.3328/IJGE.2010.04.01.1-11

Gökgöz, A. (2021). *Zemin Çivisi İle Güçlendirilmiş Şevlerin Gerilme-Deformasyon Esaslı Yöntemler İle Değerlendirilmesi*. Cerrahpaşa, İstanbul Ünİversİtesİ-Lisansüstü Eğitim Enstitüsü.

Gokgoz, A., & Kelesoglu, M. K. (2024). Three Dimensional Finite Difference Analysis of Key Parameters. Içinde *KSCE Journal of Civil Engineering*. Elsevier Inc. https://doi.org/10.1016/j.kscej.2024.100027

Halabian, A. M., Sheikhbahaei, A. M., & Hashemolhosseini, S. H. (2010). Analysis of soil nailed walls under seismic excitations using finite difference method. *9th US National and 10th Canadian Conference on Earthquake Engineering 2010, Including Papers from the 4th International Tsunami Symposium*, *7*(1350), 5745–5754.

Halabian, A. M., Sheikhbahaei, A. M., & Hashemolhosseini, S. H. (2012). Three dimensional finite difference analysis of soil-nailed walls under static conditions. *Geomechanics and Geoengineering*, *7*(3), 183–196. https://doi.org/10.1080/17486025.2012.661468

Itasca. (2019). *FLAC3D Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions* (6.0). Itasca Consulting Group, Inc. http://docs.itascacg.com/flac3d700/contents.html#

Jennings, P. (1985). Ground Motion parameters that influence structural damage. Içinde *Scholl RE, King JL (eds) Strong ground motion simulation and engineering applications*. EERI Publication 85-02, Earthquake Engineering Research Institute.

Jones, A. M. C. (1999). *Soil nailing: an investigation of lifetime performance*. University of Wales.

Joyner, W., & Boore, D. M. (1988). Measurement, characterization, and prediction of strong ground motion. *Earthquake Engineering and Soil Dynamics II - Recent Advances in Ground-Motion Evaluation: Proceedings of the Specialty Conference*, 43–102.

Kayen, R., & Mitchell, R. (1997). Assessment of liquefaction potential during earthquakes by Arias Intensity. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering (ASCE)*, *123*(12), 1162–1174.

Kiran, A. (2021). *Yüzeysel temelli yapılarda sıvılaşmaya bağlı oturmaların sayısal analizi*. İstanbul University-Cerrahpasa.

Kramer, S. (1996). *Geotechnical Earthquake Engineering*. Prentice-Hall.

Kuhlemeyer, R. L., & Lysmer, J. (1973). Finite Element Method Accuracy for Wave Propagation Problems. *Journal of the Soil Dynamics Division*, *99*, 421–427.

Lin, P., Bathurst, R. J., & Liu, J. (2017). Statistical Evaluation of the FHWA Simplified Method and Modifications for Predicting Soil Nail Loads. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*.

Liu, H., Hung, C., & Cao, J. (2018). Relationship between Arias intensity and the responses of reinforced soil retaining walls subjected to near-field ground motions. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, *111*(November 2017), 160–168. https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2018.04.022

Lysmer, J., & Kuhlemeyer, R., L. (1969). Finite Dynamic Model for Infinite Media. *Journal of the Engineering Mechanics Division*, *95*(4), 859–877. https://doi.org/10.1061/JMCEA3.0001144

Maleki, M., Khezri, A., Nosrati, M., & Hosseini, S. M. M. M. (2023). Seismic amplification factor and dynamic response of soil-nailed walls. *Modeling Earth Systems and Environment*, *9*(1), 1181–1198. https://doi.org/10.1007/s40808-022-01543-y

Marzionna, J. D., Maffei, C. E. M., Ferreira, A. A., & Caputo, A. N. (1998). Análise, projeto e execução de escavações e contenções. *Hachich, W., Falconi, FF, Saes, J. L.*

Mejia, L. H., & Dawson, E. M. (2006). Earthquake deconvolution for FLAC. *4th International FLAC symposium on numerical modeling in geomechanics*.

Mesrabadi, M., Ardakani, A., & Lashgari, A. (2023). Investigation of seismic displacement of nailed wall under near field earthquakes using hardening soil with small strain behavioral model. *Journal of Science and Engineering Elites*, *12*(47), 84–92.

Mokhtari, M., Barkhordari, K., & Abbasi, S. (2020). A comparative study of the seismic response of soil-nailed walls under the effect of near-fault and far-fault ground motions. *Journal of Engineering Geology*, *13*(5), 121–146. https://www.sid.ir/FileServer/JE/101052020S0503

Panah, A. K., & Majidian, S. (2013). 2D numerical modelling of soil-nailed structures for seismic improvement. *Geomechanics and Engineering*, *5*(1), 37–55. https://doi.org/10.12989/gae.2013.5.1.037

Sahoo, S., Manna, B., & Sharma, K. G. (2015). Stability analysis of steep nailed slopes under seismic condition using 3-D finite element method. *International Journal of Geotechnical Engineering*, *9*(5), 536–540. https://doi.org/10.1179/1939787914Y.0000000084

Sahoo, S., Manna, B., & Sharma, K. G. (2016). Seismic Stability Analysis of Un-Reinforced and Reinforced Soil Slopes. *Geo-China 2016*, *3*, 74–81. https://doi.org/10.1061/9780784480007.009

Sahoo, S., Manna, B., & Sharma, K. G. (2021). Shaking Table Tests to Evaluate the Seismic Performance of Soil Nailing Stabilized Embankments. *International Journal of Geomechanics*, *21*(4), 1–14. https://doi.org/10.1061/(asce)gm.1943-5622.0001981

Seed, H. B., & Idriss, I. M. (1970). Soil Moduli and Damping Factors for Dynamic Response Analyses [Report No. EERC 70-10]. *Earthquake engineering reserach center*, *December*, 48.

Sheikhbahaei, A. M., Halabian, A. M., & Hashemolhosseini, S. H. (2010). Analysis of soil nailed walls under harmonic dynamic excitations using finite difference method. *9th US National and 10th Canadian Conference on Earthquake Engineering 2010, Including Papers from the 4th International Tsunami Symposium*, *7*, 5745–5754.

Tavakoli, H., Kutanaei, S. S., & Hosseini, S. H. (2019). Assessment of seismic amplification factor of excavation with support system. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, *18*(3), 555–566. https://doi.org/10.1007/s11803-019-0521-x

Zamiran, S., Ghojavand, H., & Saba, H. (2012). Numerical analysis of soil nail walls under seismic condition in 3D form excavations. *Applied Mechanics and Materials*, *204–208*(Iran 1990), 2671–2676. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.204-208.2671

Zhang, Y., Chen, G., Wu, J., Zheng, L., & Zhuang, X. (2012). Numerical simulation of seismic slope stability analysis based on tension-shear failure mechanism. *Geotechnical Engineering*, *43*(2), 18–28.

KSÜ Mühendislik Bilimleri Dergisi, 28(2), 2025
Araştırma Makalesi

KSU J Eng Sci, 28(2), 2025
Research Article

Kahramanmaras Sutcu Imam University
Journal of Engineering Sciences

Geliş Tarihi : 05.01.2025
Kabul Tarihi : 18.03.2025

Received Date : 05.01.2025
Accepted Date : 18.03.2025

DEEP LEARNING METHODOLOGIES FOR NUCLEI SEGMENTATION AND MITOSIS DETECTION IN HISTOPATHOLOGICAL IMAGES ANALYSIS

HİSTOPATOLOJİK GÖRÜNTÜ ANALİZİNDE ÇEKİRDEK SEGMENTASYONU VE MİTOZ TESPİTİ İÇİN DERİN ÖĞRENME YÖNTEMLERİ

Refik SAMET[1] (ORCID: 0000-0001-8720-6834)
Nooshin NEMATİ[1*] (ORCID: 0000-0002-5306-0344)
Emrah HANCER[2,3] (ORCID: 0000-0002-3213-5191)
Serpil SAK[4] (ORCID: 0000-0003-3666-3095)
Bilge Ayca KİRMİZİ[4] (ORCID: 0000-0003-3192-1921)
Zeynep YİLDİRİM[1] (ORCID: 0000-0001-5846-9256)

[1]Ankara University, Department of Computer Engineering, Ankara, Turkiye
[2]Victoria University of Wellington, School of Engineering and Computer Science, Wellington, New Zealand
[3]Mehmet Akif Ersoy University, Department of Software Engineering, Burdur, Turkiye
[4]Ankara University, Department of Pathology, Ankara, Turkiye.

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Nooshin NEMATİ, nntolakan@ankara.edu.tr

ABSTRACT

Histopathological image analysis is a pivotal area of medical research that leverages deep learning to derive quantitative insights from Hematoxylin and Eosin (H\&E) stained images. This study aims to enhance the analysis of H\&E breast cancer histopathology images by developing deep learning methodologies focused on nuclei and mitosis. Nuclei provide essential information for disease diagnosis, while mitosis is crucial for cancer grading and prognosis prediction. We propose two methodologies: the first segments nuclei using a U-shaped semantic segmentation architecture called CompSegNet; the second detects and classifies mitotic cells through a hybrid approach combining object detection and fuzzy classification algorithms. To evaluate the effectiveness of these methodologies, we introduce two new publicly available datasets: NuSeC (Nuclei Segmentation and Classification) and MiDeSeC (Mitosis Detection, Segmentation, and Classification). These datasets not only validate our methodologies but also provide valuable resources for developing deep learning models in histopathological image analysis.

Keywords: Breast cancer, digital pathology, mitosis detection, nuclei segmentation, histopathology.

ÖZET

Histopatolojik görüntü analizi, Hematoksilin ve Eozin (H&E) boyalı görüntülerden nicel bilgiler elde etmek için derin öğrenmeyi kullanan tıbbi araştırmaların önemli bir alanıdır. Bu çalışma, H&E ile boyanmış meme kanseri histopatoloji görüntülerinin analizini, çekirdekler ve mitoz üzerine odaklanmış derin öğrenme metodolojileri geliştirerek geliştirmeyi amaçlamaktadır. Çekirdekler, hastalık teşhisi için hayati bilgiler sağlarken, mitoz, kanser derecelendirmesi ve prognoz tahmini için kritik öneme sahiptir. İki metodoloji öneriyoruz: Birincisi, çekirdekleri CompSegNet adlı U-şekilli bir anlamsal segmentasyon mimarisi kullanarak segment emektedir; ikincisi ise mitotik hücreleri tespit edip sınıflandırmak için nesne tespiti ve bulanık sınıflandırma algoritmalarını birleştiren hibrit bir yaklaşım uygulamaktadır. Bu metodolojilerin etkinliğini değerlendirmek için, kamuya açık iki yeni veri seti sunuyoruz: NuSeC (Çekirdek Segmentasyonu ve Sınıflandırması) ve MiDeSeC (Mitoz Tespiti, Segmentasyonu ve Sınıflandırması). Bu veri setleri, yalnızca metodolojilerimizi doğrulamakla kalmayıp, aynı zamanda histopatolojik görüntü analizi için derin öğrenme modellerinin geliştirilmesine yönelik değerli kaynaklar sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Meme kanseri, dijital patoloji, mitoz tespiti, çekirdek segmentasyonu, histopatoloji.

ToCite: SAMET, S., NEMATİ, N., HANCER, E., SAK, S., KİRMİZİ. B.A., & YİLDİRİM, Z., (2025). DEEP LEARNING METHODOLOGIES FOR NUCLEI SEGMENTATION AND MITOSIS DETECTION IN HISTOPATHOLOGICAL IMAGES ANALYSIS. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 28(2), 785-801.

INTRODUCTION

Histopathological image analysis represents a pivotal frontier in medical research, leveraging computer algorithms to extract quantitative insights from histopathological images. This transformative process extracts crucial information for disease diagnosis, tumor grading, and treatment response assessment. Specifically, Hematoxylin and Eosin (H\&E) stained images, a prevalent category of histopathological imagery, utilize dual dyes, hematoxylin and eosin, to highlight distinct cellular components. Hematoxylin imparts a blue hue to cell nuclei, while eosin imparts a pink shade to cell cytoplasm and interstitial tissue, including collagen fibers (Chen et al., 2018). The intricacies of this staining process bring forth diverse tissue structures, notably nuclei and mitosis, which are essential for diagnosing and categorizing numerous diseases.

Nuclei segmentation is a cornerstone in histopathological image analysis, representing the initial stride toward extracting quantitative information about cellular composition, morphology, and pathological alterations within tissues. This process facilitates the identification and segmentation of cancerous nuclei based on size, shape, and texture, gauges cancer stage by quantifying the size and quantity of cancerous nuclei, and contributes to cancer grading by assessing the aggressiveness of these cells, ultimately providing invaluable information for predicting patient prognosis (Naylor et al., 2017). The meticulous analysis of nuclei in H\&E histopathology images is imperative for precise diagnoses, offering profound insights into cell and tissue health and function.

Mitosis is the process by which a single parent cell divides to produce two identical daughter cells. This carefully controlled event occurs in all eukaryotic cells. When evaluating mitosis in breast and other human tumors, pathologists typically examine H\&E-stained sections within a standardized area. Detecting mitosis in histopathological image analysis serves various purposes, especially in the diagnosis and grading of cancer. The mitotic count, which reflects the number of mitotic cells in a given tissue area, is associated with tumor aggressiveness and patient prognosis (Swarts et al., 2014). Accurate evaluation requires robust tissue fixation and processing to focus on definitive mitoses while distinguishing them from apoptotic cells and artifacts.

Recent advancements in deep learning have marked substantial progress in nuclei segmentation and mitosis detection within histopathological image analysis (Sohail et al., 2021). These methods are capable of comprehending intricate features of nuclei and mitotic cells, achieving remarkable accuracy and precision. Despite this progress, several challenges persist, including variability in nuclear shapes, sizes, staining intensities, overlapping nuclei, and artifacts (Khan et al., 2021). Moreover, deep learning models are prone to overfitting, particularly with small or non-representative datasets, which may lead to excellent performance on training data but poor generalization to new data. The clinical applicability of these methods remains limited due to inconsistencies in annotation quality and the need for more robust and generalizable models (Nemati et al., 2023).

To address these issues, we propose deep-learning methodologies for histopathological image analysis. The proposed methodology for nuclei segmentation initially employs multiple data preprocessing strategies to standardize and enhance image quality, ensuring consistency across datasets. Following preprocessing, it utilizes a recently introduced U-shaped architecture called CompSegNet to effectively capture both local and global features for accurate nuclei segmentation (Traoré et al., 2024). The second methodology focuses on mitosis detection and begins with Macenko color normalization to reduce staining variations and improve image uniformity, which is crucial for reliable detection across diverse samples. Then it uses the YOLOv8 architecture to accurately identify mitotic cells. Finally, fuzzy-based classification algorithms are used to classify the detected mitoses, leveraging their ability to manage uncertainties and overlapping class boundaries, thereby enhancing the robustness and accuracy of the classification process. Moreover, we introduce two publicly available datasets, NuSeC and MiDeSeC, designed for the development of robust models in nuclei segmentation and mitosis detection tasks.

The main contributions of the study can be summarized as follows:

- The introduction of nuclei segmentation methodology. It involves a preprocessing stage that normalizes image color variations and resizes images into non-overlapping patches, followed by the CompSegNet architecture, which includes an encoder for feature extraction, a Transformer bottleneck for integrating

information, a decoder for reconstructing segmentation maps, and a segmentation head for creating final nuclei masks.

- The introduction of mitosis detection methodology. It involves preprocessing with Macenko color normalization, detecting mitotic cells using YOLOv8, and classifying them with fuzzy-based algorithms to handle uncertainties and improve accuracy.
- The design of the NuSeC dataset comprises 100 images capturing over 6000 nuclei structures within breast cancer at a 40× magnification.
- The design of the MiDeSeC dataset, featuring 50 images with more than 500 mitosis structures within breast cancer at a 40× magnification.

The paper is structured as follows. Section 2 reviews pertinent literature on nuclei datasets and their applications in nuclei segmentation and mitosis detection. Section 3 details the materials and methods used in the study, while Section 4 presents the results and discussion. Finally, Section 5 concludes the paper and suggests future research directions.

RELATED WORKS

Review on Nuclei Segmentation and Mitosis Detection

Deep Learning Methods for Nuclei Segmentation Table 1 provides a comprehensive summary of various deep learning methods used for mitosis detection, listing the corresponding datasets and techniques implemented. The field has seen a diverse range of approaches, reflecting the continuous evolution and exploration of mitosis detection techniques. Several studies, such as those by (Hancer et al. 2023; Chen et al., 2020; Hassan et al., 2021), have employed the MoNuSeg dataset, utilizing methods like REMFA-Net, U-Net, and Efficient Stain-Aware. This variety underscores the importance of tailoring methodologies to specific dataset characteristics and the challenges posed by nuclei segmentation. The detailed descriptions of the corresponding methods are provided as follows.

Graham et al. (2019) presented a CNN model for automatic nuclear segmentation and classification in H\&E-stained histology images. The model utilizes the distances of nuclear pixels to their centers to separate clustered nuclei, ensuring accurate segmentation. It also includes a dedicated classification branch for nucleus type prediction. The method demonstrates superior performance across multiple datasets and introduces a new colorectal adenocarcinoma dataset with 24,319 annotated nuclei. Le Dinh et al. (2022) explored automated cell nuclei segmentation using deep learning. Nested U-Net with EfficientNet as the encoder implemented on CryonuSeg dataset. The model has achieved a Dice score of 0.929, AJI of 0.604, and PQ of 0.503. Chen et al. (2020) proposed REMFA-Net, an automatic nuclei segmentation method for histopathology images using rotation-equivariant and multi-level feature aggregation. It incorporates group equivariant convolutions for better segmentation and a U-Net3+ based strategy to bridge the semantic gap. Key innovations include a new decoder module, improved skip connections, and a semantic enhancement block. REMFA-Net has been evaluated on the MoNuSeg dataset.

Hancer et al. (2023) presented an imbalance-aware nuclei segmentation method for H\&E-stained histopathology images. It includes a preprocessing stage with resizing, augmentation, and normalization, along with a lightweight U-Net using a generalized Dice loss layer. Evaluated on the MoNuSeg2018 dataset. The method outperforms recent approaches in AJI and IoU metrics. Hassan Dinh et al. (2021) proposed a stain-aware nuclei segmentation method for multi-center WSIs using deep learning. Unlike single-stain normalization, it selects multiple stain templates via clustering and trains separate models for each. Segmentation masks are combined using the Choquet integral. The method outperforms approaches evaluated on a multi-center, multi-organ dataset, with an AJI of 0.7323 and an F1-score of 0.8932, while maintaining fewer parameters. Hoorali et al. (2022) proposed an improved UNet++ for microscopic tissue image segmentation. It has been enhanced with multi-scale feature fusion with new skip connections and integrates squeeze-and-excitation inception blocks. Various backbones strengthen feature extraction, while batch normalization, dropout, and LReLU improve convergence and generalization. A weighted hybrid loss addresses class imbalance, and marker-based watershed has been converted from semantic to instance segmentation. Khan et al. (2023) introduced TransUNet-Lite, a lightweight and efficient model for nuclei segmentation, addressing challenges such as variable image sizes and data imbalance. The model uses a convolution-based feature extractor, an external attention module, a fast token selector, and skip connections to maintain contextual information. It

processes patches instead of resized images to preserve aspect ratios. Evaluated on the 2018 Science Bowl dataset, TransUNet-Lite achieved a DSC of 0.9308 and IoU of 0.8795, outperforming state-of-the-art networks.

Table 1. A summary of deep-based methods for nuclei segmentation

Reference	Datasets	Methods
Hancer et al. (2023)	MoNuSeg	Lightweight U-Net
Chen et al., (2020)	MoNuSeg	REMFA-Net
Hlavcheva et al., (2019)	BreCaHAD	ConvNet
Aatresh et al., (2021)	TNBC	Kidney-SegNet
Liu et al. (2021)	TNBC	MDC-net
Hoorali et al., (2022)	MoNuSAC	Improved UNet++
Graham et al., (2019)	MoNuSAC	HoVer-Net
Ilyas et al., (2022)	PanNuke	TSFD-Net
Obeid et al., (2022)	PanNuke, CoNSep	NucDETR
Le Dinh et al., (2022)	CryonuSeg	Nested U-Net, EfficientNet
Hassan Dinh et al., (2021)	CryonuSeg, MoNuSeg	Efficient Stain-Aware
Khan et al. (2023)	Science Bowl	TransUNet-Lite

Deep Learning Methods for Mitosis Detection Table 2 summarizes different deep-based approaches employed for mitosis detection with their reference, datasets used, and methods employed. It is an attempt to learn and understand the current state of development in the field of mitosis detection, which is thematically heterogeneous. According to studies conducted by Khan et al. (2022**),** Yancey R (2023**),** and Maroof et al. (2020), the ICPR14 dataset was employed, wherein methods like SM-Detector, Faster R-CNN, Random Forest, and SVM were applied. These studies show that there should be careful selection of approaches that identify and address the unique identities of a dataset and can-do mitotic detection. (Yancey R, 2023) spread their investigation into both using YOLO and Faster R-CNN on the ICPR14 and ICPR12 datasets. This is an important move, suggesting that it realizes the need for robustness across the importance of using several architectures with different learning features, and various datasets, resulting in performance improvement. The detailed descriptions of the corresponding methods are provided as follows.

Dodballapur et al. (2019) presented a two-stage method for mitotic detection using cell masks. In the first stage, Mask R-CNN generates cell masks with high recall and low precision. The second stage refines detection by classifying cells as mitotic or non-mitotic using hand-crafted and deep features. Evaluated on ICPR 2012 and 2014 datasets, the method outperforms fully supervised segmentation and feature-based approaches, demonstrating effective mask transferability between datasets. Hamidinekoo et al. (2017) enhanced mitosis detection in breast histology images using RGB Histogram Specification for stain normalization. A modified deep CNN was trained on raw and normalized images across multiple datasets, improving staining and scanner variations robustness. Results showed a stable detection performance, enabling a generalizable mitosis detection model. Jahanifar et al. (2022) proposed a two-stage mitosis detection framework combining fast candidate segmentation (EUNet) and candidate refinement (EfficientNet-B7). EUNet accurately detects candidates at lower resolution, speeding up detection, while EfficientNet-B7 refines them. Domain generalization methods ensure robustness against domain shifts. The model achieves state-of-the-art performance on three large mitosis datasets, winning the MIDOG21 and MIDOG22 challenges. It also processes 1,124 TCGA breast cancer slides, generating over 620K potential mitotic figures. Khan et al. (2022) introduced SMDetector, a deep learning model for detecting small objects like mitotic and non-mitotic

nuclei in breast cancer images. It uses dilated layers in the backbone to prevent small objects from disappearing, improving detection. The model achieves an overall average precision (AP) of 0.5031 and average recall (AR) of 0.559, outperforming existing models on the ICPR 2014 (Mitos-Atypia-14) dataset. For mitotic nuclei, it achieves an AP of 0.6849, AR of 0.5986, and an F-measure of 0.6388. Maroof et al. (2020) addressed the challenge of nuclei segmentation in histopathology using transfer learning. The proposed approach leverages a pre-trained model as the backbone of a classical encoder-decoder architecture. A comparative study on the Triple Negative Breast Cancer dataset reveals that U-Net with EfficientNetB3 as the backbone performs best, improving the Dice score and Intersection over Union (IoU) values.

Table 2. A summary of deep-based methods for mitosis detection

Reference	Data sets	Methods
Khan et al., (2022)	ICPR14	SMDetector
Maroof et al., (2020)	ICPR14	Random Forest, SVM
Yancey R, (2023)	ICPR14, ICPR12	YOLO, Faster R-CNN
Li et al., (2018)	ICPR14, ICPR12	DeepMitosis
Dodballapur et al., (2019)	ICPR14, ICPR12	Mask R-CNN
Hamidinekoo et al., (2017)	ICPR14, AMIDA13	Faster R-CNN, YOLOv5
Sohail et al., (2021)	TUPAC16	MitosRes-CNN
Bertram et al., (2020)	TUPAC16	RetinaNet
Jahanifar et al., (2022)	MIDOG22	EUNet
Aubreville et al., (2023)	MIDOG21	RetinaNet

The different methods and datasets used still highlight the motivation to overcome the challenges of mitosis detection, such as inconsistencies in staining, dataset characteristics, and the need for accurate and robust detection across various datasets. This variety also indicates ongoing research into new architectures that integrate deep learning with traditional components, as well as modern algorithms like the Krill Herd Algorithm combined with fuzzy logic for decision-making processes. The advancements in both conventional and modern techniques demonstrate the necessity of diverse approaches to effectively address the challenges associated with mitosis detection in histopathological images.

Review on Histopathology Datasets

Review on Nuclei Datasets Table 3 offers a comprehensive overview of several key nuclei datasets utilized in histopathology image analysis. These datasets vary in terms of image sizes, magnifications, and sources. Some datasets, such as TNBC and CRYONUSEG, have been manually annotated, while others, like PanNuke and CoNSeP, use semi-automatic annotation. This highlights the differences in annotation quality among these datasets; for instance, the MoNuSeg dataset is recognized to have some annotation errors (Verdicchio et al., 2023). The TNBC and CRYONUSEG datasets have manual annotations; however, due to their relatively small size, they are not highly generalizable on their own. In contrast, PanNuke and CoNSeP, being much larger with semi-automated annotations, offer greater generalizability but may not achieve the same level of accuracy as manually annotated datasets. Additionally, the limited size of datasets like NuCLS (Amgad et al., 2022) constrains generalizability when training and evaluating deep learning models. Furthermore, breast cancer subtypes, such as the invasive ductal carcinoma, bias in the BCWD dataset (Wolberg & Mangasarian, 1992), present challenges in constructing generalizable models. Moreover, datasets like NuCLS suffer from significant annotation inconsistencies, which adversely affect the quality of training and evaluation in deep learning models. In conclusion, there is a pressing need for new breast cancer histopathology datasets that are larger, more diverse, and contain higher-quality annotations. Such datasets would support the development of more accurate and generalizable deep learning models for breast cancer diagnosis and prognosis.

Table 3. Nuclei datasets in literature

Datasets	Image size	Source	Nuclei Count	Organs Count
CoNSeP (Graham et al., 2019)	1000×1000	UHCW	24,319	1
MoNuSeg (Kumar et al., 2017)	1000×1000	TCGA	21,623	7
PanNuke (Gamper et al., 2020)	WSI	TCGA	205,343	19
MoNuSAC (Verma et al., 2020)	81×113,1422×2162	UHCW	46,909	4
CryoNuSeg (Mahbod et al., 2021)	512×512	TCGA	7,596	10
CPM-17 (Vu et al., 2019)	500×500 - 600×600	TCGA	7,570	4
CRCHisto (Sirin et al., 2016)	500×500	UHCW	29,756	1
NuCLS (Amgad et al., 2022)	WSI	TCGA	222,396	1
Lizard (Graham et al., 2021)	1,016×917	TCGA	495,179	1
TNBC (Naylor., 2018)	512×512	WSI	4,056	1

Review on Mitosis Datasets Table 4 provides a comprehensive review of datasets relevant to mitosis detection, detailing their magnification levels, scanner types, and image sizes. The ICPR12, AMIDA13, and ICPR14 datasets are relatively small, with a primary focus on breast cancer studies. In contrast, while the TUPAC16 dataset is larger, it lacks diversity in tissue types. The MIDOG21 and MIDOG22 datasets stand out as the largest and most diverse, featuring images from various scanners, tissue types, and species. However, the WSIs in MIDOG21 exhibit variability in tissue quality, including out-of-focus areas and regions with necrosis, introducing a diverse set of challenging negative examples that have not undergone formal evaluation. The MIDOG++ dataset represents the latest advancement, building upon MIDOG21 and MIDOG22. It includes a meticulously curated collection of Region of Interest (ROI) images extracted from 503 histological specimens, covering seven distinct tumor types with diverse morphological characteristics. The dataset contains an extensive set of 11,937 annotations specifically marking mitotic figures. While it aims for accuracy, the possibility of labeling errors or domain shifts in mitotic figures remains a consideration.

Table 4. Mitosis datasets in the literature

Datasets	Scanner	Image size	Cases
ICPR12 (Ludovic et al., 2013)	Scanner A&H, 10-band microscope	A:2084×2084, H:2250×2252, M:1360×1360	5
AMIDA13(Veta et al., 2014)	Scope XT scanner	2000×2000	23
ICPR14 (Roux et al., 2014)	scanner A&H	A:1539×1376, H:1663×1485	21
TUPAC16 (Veta et al., 2019)	Leica SCN400	2000×2000	73
MIDOG21(Wilm et al., 2021)	4 different Scanners	WSI	50
MIDOG22 (Aubreville et al., 2023)	5 different Scanners	WSI	403
MIDOG++ (Aubreville et al., 2023)	5 different Scanners	WSI	494

MATERIALS AND METHODS

Designed Histopathological Datasets

The datasets introduced for histopathological image analysis are presented as follows:

NuSeC Dataset This dataset was curated using H&E-stained breast tissue slides from 25 anonymous cases obtained from the Ankara University Faculty of Medicine, Department of Pathology archive. These patients underwent surgery (excisional biopsy, lumpectomy, or mastectomy) with a diagnosis of invasive breast carcinoma. The selected glass slides were scanned using a 3D HISTECH Panoramic Scanner P250 flash 3 to produce whole slide images (WSIs). A pathologist first marked regions with the highest nuclei activity. The most representative invasive tumor areas were selected, ensuring good fixation, high cellularity, and the absence of artifacts or necrosis.

The NuSeC dataset generation process is described as follows. In the first stage, image patches of 1024×1024 pixels were extracted from TIFF images in RGB 8-bit format. In the second stage, the nuclei of tumor cells in these patches were manually annotated one by one using QuPath (Bankhead et al., 2017), a tool designed for visualization, analysis, and annotation of WSIs in pathology. A pathologist from our research team reviewed the annotated tumor nuclei in the extracted patches. In the final stage, the resulting image files were appropriately named. This dataset was meticulously designed to represent a wide range of age groups, ensuring diversity and a comprehensive collection of breast tissue morphology. The NuSeC dataset consists of 100 images, with 75 allocated for training and 25 reserved for testing.

MiDeSeC Dataset This dataset was curated using H&E-stained breast tissue slides from 25 anonymous cases from the Ankara University Faculty of Medicine, Department of Pathology archive. The patients underwent surgery (excisional biopsy, lumpectomy, or mastectomy) with a diagnosis of invasive breast carcinoma. The selected glass slides were scanned using a 3D HISTECH Panoramic Scanner P250 flash 3 to obtain whole slide images (WSIs). A pathologist annotated the tumor areas on each slide, excluding stromal components and benign breast tissue from this study. Only the most representative invasive tumor areas with good fixation, high cellularity, and no artifacts or necrosis were selected. Typical and atypical mitotic figures within these tumor areas were identified and marked.

In the next stage, 1024×1024-pixel regions were cropped from these selected tumor fields and extracted in RGB 8-bit format from the TIFF images. The QuPath program was used to annotate these extracted patches, and the pathologist manually marked typical and atypical mitotic figures. Finally, the annotated images and their corresponding coordinate files (in Excel format) were prepared for use in deep learning algorithms. Two thirds of the images were reserved for training, with the remaining third for testing. Test and training sets were randomly selected.

Proposed Methodologies

The deep learning methodologies proposed for histopathological image analysis are presented as follows:

Nuclei Segmentation Methodology The structure of the suggested nuclei segmentation methodology is presented in Figure 1. The fundamental stages of the nuclei segmentation methodology are described as follows:

a) Preprocessing Stage: Preprocessing is applied to enhance image quality and prepare the data for segmentation. Images were resized to 1024×1024 pixels and divided into 256×256 non-overlapping patches for input into the architecture. Notice that color normalization was not applied to the NuSeC dataset, as it consists solely of single-organ tissue, which does not exhibit the color variations found in the other datasets.

b) Segmentation Stage: Due to its notable success in nuclei segmentation tasks, we selected CompSegNet (Traoré et al., 2024), a recently introduced U-shaped architecture. The CompSegNet architecture comprises four key components: the encoder, bottleneck, decoder, and segmentation head. The encoder transforms the input image into compact, low-dimensional feature representations. Acting as a bridge between the encoder and decoder, the bottleneck facilitates the transfer of information. The decoder then reconstructs the encoded representations into pixel-wise segmentations, restoring the original spatial resolution of the image. Finally, the segmentation head generates the final segmentation masks.

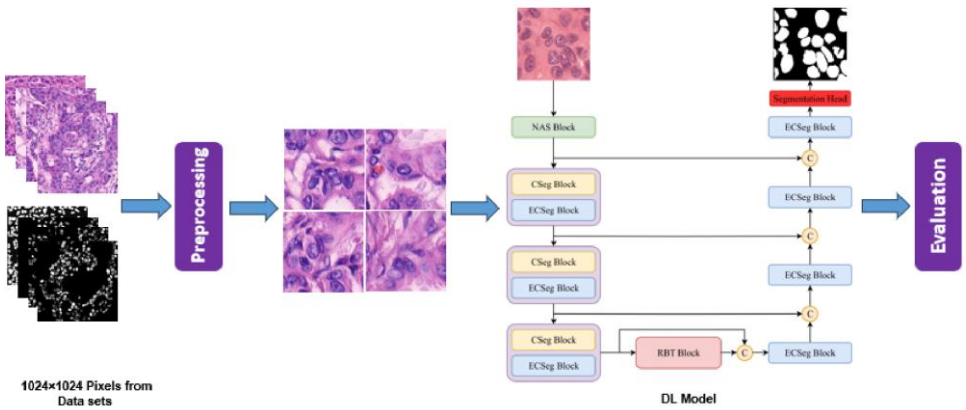


Figure 1. The overall structure of the nuclei segmentation methodology

The encoder begins with a stem block that processes an input image $I \in R^{H\times W\times 3}$, producing a feature map $f_1 \in R^{H\times W\times 3}$. This is followed by three encoder blocks that progressively reduce the spatial size of the feature map while increasing its channel dimensions. The final encoder block is followed by a Residual Bottleneck Transformer (RBT) block, which integrates the translation invariance and local sensitivity of CNNs with the global context encoding capability of Transformers. The decoder path upscales the encoded representations and concatenates them with corresponding feature maps from the encoder. The segmentation head then outputs the final mask, $f_{10} \in R^{H\times W\times N}$, where N represents the number of target classes.

CompSegNet (Traoré et al., 2024) has demonstrated superior performance in handling complex tissue structures, largely due to its ability to capture both local and global contextual information effectively. The architecture's use of CNNs for spatial feature extraction, combined with Transformers for capturing long-range dependencies, ensures accurate segmentation even in cases of overlapping nuclei and varying nuclear shapes and sizes. Moreover, the integration of a bottleneck layer enhances the network's ability to compress and process high-dimensional data efficiently, making it highly suitable for medical image segmentation tasks, where precision is critical (https://github.com/mltraore/CompSegNet).

Mitosis Detection Methodology The overall methodology for mitosis detection and classification from H&E-stained histopathology images is presented in Figure 2. The fundamental stages of the mitosis detection methodology are described as follows:

a) Preprocessing Stage: Macenko (Macenko et al., 2009) method is applied to find the stain vectors W in each image based on the color inside the tumor area. Since the Optical Density (OD) value is 0 when the corresponding light is not absorbed, the task is to find the minimum value and then use the corresponding pixels projected onto the geodesic direction as the two terminal stain vectors of the stain vectors. Macenko method is often used in the H&E-stained dyeing of histological images because it can erase the color difference very well, the texture features of the image become relevant, and the network robustness is improved.

b) Object Detection Stage: In the object detection stage, YOLOv8, a single-stage object detector, is employed. YOLOv8 architecture consists of three modules: backbone, neck, and head. Backbone, having pre-training weight, plays an important role in reducing the spatial resolution of the image and an increase feature resolution thereof through residual and dense blocks, which deal with vanishing gradient-type problems and enhance information flow. The backbone is mainly forms Composed of the convolution of too many C2f blocks, ending with SPPF. SPPF plays a critical role in saving parameters and computational resources that make the architecture suitable for real-time object detection tasks. The neck section deals with pyramidal feature extraction, allowing for a generalization of the model to objects of various sizes and scales. The neck feature incorporates 1 concatenation without any restriction on absolute channel numbers, thereby reducing effective model parameters and tensor size, thereby introducing efficiency. The head consists of two CNN layers producing class probabilities and the regression producing abjectness scores and bounding box coordinates. The CNN layers are configured with a 3×3 kernel size, a stride of 1, and padding of 1, ensuring precise localization of objects.

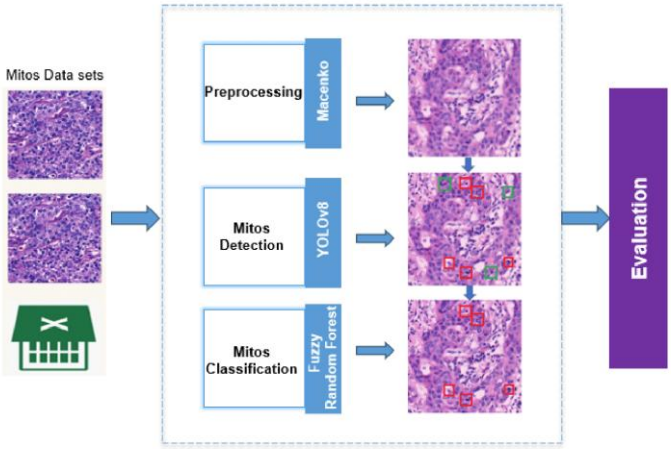


Figure 2. The overall structure of the mitosis detection methodology

YOLOv8 utilizes anchor box-free detection, which predicts the center of the object directly, leading to improvements in both accuracy and speed. With its 225 layers, 11.1 million parameters, and 28.7 GFLOPs, YOLOv8 provides

robust performance for mitosis detection tasks. Fine-tuning hyperparameters during training further optimizes its performance.

c) Classification Stage: In this stage, fuzzy-based classification algorithms are applied to distinguish mitotic cells from non-mitotic cells. We selected three classification algorithms for this task. The first, Fuzzy Random Forest (FRF) (Bonissone et al., 2010), is an ensemble method based on fuzzy decision trees. FRF combines the stability of multiple classifier systems with the randomness needed to increase tree diversity, while also utilizing fuzzy logic to handle imperfect data. First, it minimizes bias in random feature selection and addresses some aspects of data imbalance by modifying fuzzy membership degrees based on class distribution. The second algorithm is Fuzzy K-Nearest Neighbors (FKNN), which allocates class membership according to the sample's proximity to members of other classes as opposed to attributing a specific class to data points. This feature enables FKNN to locate memberships of data instances in multiple classes quite effectively in the face of uncertainty and hence improves classification accuracy. Finally, Fuzzy Min-Max (FMM) in a single data pass through the data compound fully performs the learning phase and is applied in either a classification or clustering role. FMM will be working towards fine-tuning and determination of class boundaries by performing three main processes: expansion, overlap testing, and contraction. These fuzzy-based techniques are chosen to manage overlapping classes, uncertainty, and imprecision in the data to ensure an optimal detection system for mitosis in cancer research.

Our motivation to integrate YOLOv8 with fuzzy-based classification methods stems from the need to address the challenges of mitosis detection in histopathological images, such as high inter-class variability, overlapping structures, and staining inconsistencies. YOLOv8, being a state-of-the-art object detection model, offers real-time detection capabilities with high precision and recall. However, due to the ambiguity in distinguishing mitotic figures from similar-looking non-mitotic structures, a conventional threshold-based classification approach may not be sufficient. To mitigate this issue, we incorporated fuzzy classification techniques (Fuzzy Random Forest, Fuzzy K-Nearest Neighbors, and Fuzzy Min-Max) to refine the classification stage. These methods are particularly effective in handling uncertainty and overlapping class boundaries, which are common in mitosis detection. The fuzzy-based classifiers improve robustness by allowing for gradual membership assignment rather than strict binary categorization, enhancing detection performance, as demonstrated by our experimental results.

EXPERIMENT DESIGN

Parameter Settings

Experiments are carried out on a PC with NVIDIA RTX4000 GPU, Intel (R) Xeon (R) W-2245 CPU@3.90GHz, and 64GB System RAM using Python interfaces via Google Colab and Matlab platforms. To assess the effectiveness of the proposed nuclei segmentation methodology, we compare it with the U-Net [54] and DeepLabv3+ (He et al., 2016) architectures. DeepLabv3+ is implemented using five different pretrained models. The motivation for choosing DeepLabv3+ stems from its ability to handle complex segmentation tasks through atrous convolution, which enables capturing multi-scale contextual information and preserving fine details. This makes it particularly well-suited for tasks like nuclei and mitosis detection in biomedical imaging. The parameter settings for the segmentation architectures used in nuclei segmentation are provided in Table 5. Moreover, the parameters for mitosis detection using YOLOv8 include a maximum of 100 epochs, a batch size of 2, a learning rate of 0.0001, and a weight decay of 0.001. The model utilizes a Conv2D stem block with 64 channels, and the optimization is performed using Stochastic Gradient Descent with Momentum (SGDM).

To demonstrate the effectiveness of the proposed nuclei segmentation and mitosis detection methodologies, in addition to the NuSeC and MiDeSeC datasets, two widely used datasets were employed: MoNuSeg 2018 (Kumar et al., 2019) and ICPR 2012. The MoNuSeg 2018 dataset consists of 30 training images representing seven organs (breast, liver, kidney, prostate, bladder, colon, and stomach) with 21,623 manually annotated nuclei, as well as a test set of 14 images from organs like breast, kidney, prostate, bladder, colon, lung, and brain, with 7,223 annotations. Notably, the test set introduces the lung and brain, which are absent in the training data. All images are sourced from patient slides in The Cancer Genome Atlas (TCGA) at a 40× magnification. Annotations were initially created by engineers and verified by an expert pathologist. The ICPR 2012 dataset, designed for mitosis detection in breast cancer histology, includes five H&E-stained images scanned using multiple devices, featuring 50 high power fields (HPFs) and a total of 648 mitotic cell annotations across various scanners. The dataset includes RGB and multispectral images, with ground truth annotations provided by a pathologist.

Table 5. Parameters Settings for Nuclei Segmentation

Parameters	DeepLabv3+	U-Net	CompSegNet
Initial learning rate	0.01	0.01	1,00E-03
Max epochs	100	100	100
Mini batch size	1	1	-
L2 regularization	0.0001	0.0001	-
Momentum	0.9	0.09	-
Gradient threshold	0.05	0.05	-
loss-weight	-	-	α= 0.2
Optimization	SGDM	SGDM	SGDM

Evaluation Metrics

To verify the performance of the nuclei segmentation, we use the following metrics:

a) Dice Coefficient (DC): This metric measures the similarity between the predicted and ground truth segmentation masks and is defined as:

$$Dice = \frac{2\times TP}{(TP+FP)+(TP+FN)} \quad (1)$$

Where TP, FP, and FN represent true positives, false positives, and false negatives, respectively.

b) Aggregated Jaccard Index (AJI): This metric measures the agreement between predicted and ground truth masks, focusing on the shared areas between the masks and penalizing non-overlapping regions. AJI is particularly useful for evaluating algorithms dealing with irregularly shaped objects:

$$AJI = \frac{\sum_{i=1}^{N} G_i \cap S_i}{\sum_{i=1}^{N} G_i \cup S_i + \sum_{S_{k\in U}} S_k} \quad (2)$$

Where N is the number of ground truth nuclei, G_i is the set of ground truth nuclei, S_i is the set of matching segmented nuclei, and S_k is the set of segmented nuclei not matched to any ground truth nuclei. To evaluate the performance of the mitotic detection methodology, we use the following metrics:

c) Precision: This metric measures how accurate the positive predictions are and is defined as:

$$Precision = \frac{TP}{TP+FP} \quad (3)$$

Where TP (True Positive) refers to the count of mitoses that are accurately identified as ground-truth mitoses among those detected, while FP (False Positive) indicates the number of mitoses that are incorrectly identified as ground-truth among the detected mitoses.

c) Recall: This metric represents the fraction of identified mitotic cells out of the total actual mitotic cells:

$$Recall = \frac{TP}{TP+FN} \quad (4)$$

Where FN (False Negative) represents the number of true mitoses that were missed by the detection.

e) F1-score: This metric is the harmonic mean of precision and recall, providing a balanced measure of model performance:

$$F1-Score = 2 \times \frac{Precision \times Recall}{Precision + Recall} \quad (5)$$

EXPERIMENT RESULTS

Results of Nuclei Segmentation

The results for nuclei segmentation across the NuSeC and MoNuSeg datasets are presented in Table 6 in terms of the AJI and DC metrics. The best values are denoted in bold. Furthermore, some visual results of the proposed methodology are provided in Fig. 3.

Table 6. Results on NuSeC and MoNuSeg Datasets

Methods	NuSeC		MoNuSeg	
	AJI	Dice	AJI	Dice
DeepLabv3+ & ResNet50	0.668	0.788	0.680	0.792
DeepLabv3+ & ResNet18	0.654	0.775	0.679	0.785
DeepLabv3+ &Xception	0.648	0.763	0.681	0.768
DeepLabv3+ & MobileNetv2	0.643	0.710	0.650	0.770
DeepLabv3+ & InceptionResNetv2	0.625	0.751	0.654	0.760
U-Net	0.576	0.670	0.645	0.670
Proposed	0.677	0.807	0.705	0.697

The performance of the segmentation methods on the NuSeC dataset varies across different architectures. The proposed methodology demonstrates the strongest results, achieving the highest scores across both the AJI and Dice metrics, indicating its superior ability to segment nuclei in this dataset. Among the DeepLabv3+ variants, the model using ResNet50 closely follows, showing strong performance in capturing the structural details of nuclei. The ResNet18 variant shows good performance, with just a minor drop in accuracy when compared to ResNet50. Other models, like Xception and MobileNetv2, yield relatively lower results, suggesting that these backbones are not as effective for this particular task. Additionally, while the U-Net architecture is often utilized for segmentation, it faces challenges with the NuSeC dataset, resulting in the lowest performance. This indicates that it struggles to manage the complexities of this dataset compared to the more sophisticated DeepLabv3+ and the proposed approach.

The results for the MoNuSeg dataset show a similar trend, with the proposed methodology achieving the highest AJI, which underscores its superior ability to accurately delineate the boundaries of essential factors in nuclei segmentation. Although the Dice coefficient suggests there is some room for improvement in pixel-wise overlap, AJI is the more critical metric for this task, as it more accurately reflects the model's ability to manage boundary detection, a vital component in segmentation challenges like MoNuSeg. Among the DeepLabv3+ models, ResNet50 demonstrates strong performance, with an AJI that is only slightly lower than that of the proposed method, making it a dependable choice for nuclei segmentation. Although ResNet18 outperforms ResNet50 in terms of the Dice coefficient, its slightly lower AJI suggests that it may not capture boundary details as effectively, despite better pixel-level segmentation. Other configurations, such as Xception and MobileNetv2, perform less effectively, with lower AJI values, indicating they struggle more with boundary accuracy. Moreover, the proposed method has lower Dice performance on the MoNuSeg dataset, but AJI is the more critical metric as it better reflects boundary detection, a key challenge in segmentation. AJI assesses segmentation accuracy more reliably by accounting for object-level splitting and merging errors, unlike Dice, which is pixel-based and can be misleading in cases of overlapping or densely packed nuclei. Since MoNuSeg includes nuclei of varying sizes and shapes, Dice may be lower due to minor boundary shifts, while AJI provides a more accurate evaluation. Our analysis shows that the model outperforms existing methods in AJI, with Dice variations mainly influenced by boundary sensitivity.

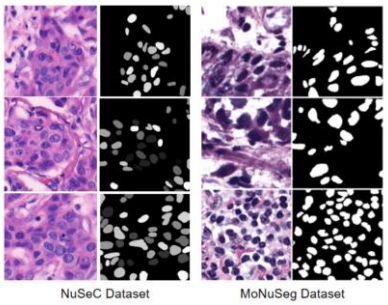


Figure 3. Some visual results of the proposed nuclei segmentation methodology on the NuSeC and MoNuSeg datasets.

Table 7. Comparisons with Recent Studies on MoNuSeg

Reference	AJI	Methods
Li et al., (2019)	0.652	Dual U-Net
Chen et al., (2020)	0.653	REMFA-Net
Guo et al., (2023)	0.703	SAC-Net
Hassan Dinh et al., (2021)	0.7323	Efficient Stain-Aware
Ahmed (2024)	0.652	accurate deep learning
Proposed	0.705	CompSegNet

The results in Table 7 present a comparison of several methods on the MoNuSeg dataset, highlighting their respective AJI scores. The proposed model achieved an AJI score of 0.705, demonstrating its competitive performance in nuclei segmentation. It outperforms methods such as Dual U-Net (0.652) and Efficient Stain-Aware (0.652), which struggle to capture fine-grained details of nuclei in histopathological images, leading to lower segmentation accuracy. REMFA-Net, with an AJI of 0.653, shows a slight improvement over Dual U-Net and Efficient Stain-Aware, but still falls behind the proposed model, possibly due to challenges in multi-scale nuclei segmentation. SAC-Net, achieving an AJI of 0.703, shows an improvement by refining feature maps and enhancing the network's ability to detect smaller nuclei, but does not surpass the proposed model's performance. CompSegNet, with an AJI of 0.705, matches the performance of the proposed model, indicating that both methods are effective for segmentation. However, the proposed model stands out in terms of its ability to handle complex features and segmentation nuances, likely due to specific design choices or techniques aimed at improving performance. Guo et al. (2023) and Hassan Dinh et al. (2021) achieved AJI values of 0.703 and 0.7323, respectively. Hassan Dinh et al.'s method achieved the highest AJI, showing its strength in accurately segmenting nuclei in this challenging dataset. These higher AJI values reflect the ongoing advancements in deep learning models tailored for nuclei segmentation. In conclusion, the proposed model demonstrates competitive performance, matching or exceeding the results of state-of-the-art methods like SAC-Net and CompSegNet. The trend of increasing AJI values highlights the continuous progress in refining deep learning architectures for accurate nuclei segmentation.

Results of Mitosis Detection

The results for mitosis detection across the MiDeSeC and ICPR12 datasets are presented in Table 8 in terms of Precision, Recall, and F1-Score. The best values are denoted in bold. Furthermore, some visual results of the proposed mitosis detection methodology are provided in Figure. 4.

Table 8. Results of Mitosis Detection on MiDeSeC and ICPR12 Datasets

Methods	MiDeSeC			ICPR12		
	Precision	Recall	F1-Score	Precision	Recall	F1-Score
YOLOv8	0.825	0.814	0.819	0.863	0.800	0.831
YOLOv8 + FMM	0.831	0.800	0.815	0.830	0.823	0.826
YOLOv8 + FKNN	0.869	0.860	0.869	0.880	0.870	0.875
YOLOv8 + FRF	0.895	0.870	0.882	0.932	0.894	0.913

For the MiDeSeC dataset, the methodology that combines YOLOv8 with FRF demonstrates the best overall performance, achieving the highest precision and recall, which translates into the best F1-Score of 0.882. This combination significantly outperforms the other methods, with YOLOv8 + FKNN also showing strong performance but trailing behind slightly in all metrics. The standalone YOLOv8 and YOLOv8 + FMM approaches perform similarly, but they fall short compared to the other enhanced methods, indicating that feature refinement techniques like FRF and FKNN are crucial to improve detection accuracy in this dataset. In the ICPR12 dataset, the combination of YOLOv8 and FRF stands out with an impressive F1-Score of 0.913, making it the leading method. This approach's strong precision and recall highlight its effectiveness in accurately identifying mitotic events within the dataset. Although YOLOv8 paired with FKNN also shows commendable performance, achieving an F1-Score of 0.875, it falls short of FRF in both precision and recall. The basic YOLOv8 method demonstrates decent precision but has a slightly lower recall, resulting in an F1-Score of 0.831. On the other hand, YOLOv8 combined with FMM performs a bit worse than the standalone YOLOv8, showing slightly reduced precision and F1-Score, indicating that this

enhancement may not be as effective for the ICPR12 dataset. The F1-Score of 0.913 achieved by the proposed method on the ICPR12 dataset stands out as highly competitive when compared to various studies in the literature. Recent advancements in leading models like YOLO have positioned them at the forefront of object detection. Moreover, running multiple versions of YOLO in parallel and properly scaling the dataset for specific tasks are effective strategies to boost overall performance (Yancey R, 2023). Another method for obtaining cell masks involves using these generated masks to detect mitosis. In the initial processing stage, the Mask R-CNN network creates cell masks. This approach was evaluated using the ICPR12 and ICPR14 datasets. The findings suggest that the masks learned from the smaller ICPR12 dataset can be effectively transferred to the ICPR14 dataset, which does not have cell mask annotations (Sebai et al., 2020). This score reflects the model's balanced precision and recall, showcasing its effectiveness in accurately detecting mitosis events. Achieving an F1-Score above 0.9 in mitosis detection tasks is regarded as a strong outcome, especially on challenging datasets like ICPR12, which feature complex cellular structures. This highlights the robustness and reliability of the proposed methodology in the realm of mitosis detection research.

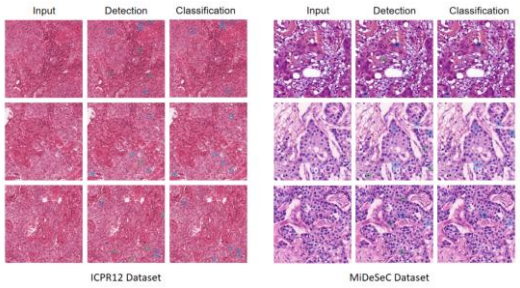


Figure 4. Some visual results of the proposed mitosis detection methodology on ICPR12 dataset. The false positive (FP) and false negative (FN), incorrectly detected, are represented in green, while the true positive (TP), accurately classified, is depicted in blue.

Table 9. Comparisons with Recent Studies on ICPR2012

Reference	F1-Score	Methods
Yancey R, (2023)	0.83	Deep Mitosis
Li et al., (2018)	0.79	ResNet 50 and YOLOv5
Dodballapur et al., (2019)	0.90	Mask R-CNN
Sebai et al., (2020)	0.802	SegMitos
Han et al., (2021)	0.85	PSPNet
Tashk et al., (2020)	0.709	CLBP+SVM
Wang et al., (2021)	0.735	Cascaded ensemble CNN
Proposed	0.913	YOLOv8 + FRF

The proposed method in Table 9, YOLOv8 + FRF, demonstrates superior performance on the ICPR2012 dataset, achieving the highest F1-score of 0.913, which outperforms all other methods. This result highlights the effectiveness of combining the YOLOv8 backbone with the Feature Refinement Framework (FRF), which enhances the model's ability to detect mitotic cells in complex histopathological images. In comparison, other state-of-the-art methods, such as Deep Mitosis (0.83) and ResNet50 + YOLOv5 (0.79), show lower performance, mainly due to their reliance on less refined feature extraction techniques. Mask R-CNN, with an F1-score of 0.90, also performs well but falls short of the proposed method due to challenges in detecting mitotic cells in crowded or textured areas. Similarly, methods like SegMitos (0.802) and PSPNet (0.85) offer reasonable performance but lack the specialized refinement and attention mechanisms that improve the proposed model's accuracy. Traditional methods like CLBP+SVM (0.709) and Cascaded Ensemble CNN (0.735) exhibit lower F1-scores, primarily due to their limitations in capturing fine-grained features of mitotic cells. Overall, the proposed YOLOv8 + FRF method excels in mitosis detection, offering more accurate and robust results in complex histopathological images compared to existing techniques.

CONCLUSION

In this study, we introduced two deep learning methodologies for nuclei segmentation and mitosis detection in histopathological image analysis. Leveraging the CompSegNet architecture for segmentation and combining YOLOv8 with fuzzy-based classification techniques for detection, our approaches achieved high accuracy and robustness across challenging datasets. Another significant contribution of this study is the introduction of two new publicly available datasets, NuSeC and MiDeSeC, designed to support the development and benchmarking of robust models for nuclei segmentation and mitosis detection tasks. These datasets provide a valuable resource for the research community, promoting further advancements in automated histopathological image analysis. Moving forward, our methodologies offer a promising direction for clinical applications, with the potential to enhance diagnostic accuracy in cancer grading and treatment planning. Future work will focus on expanding the datasets and refining the models to improve generalizability and clinical applicability in diverse medical settings.

Acknowledgment

This work is supported by Turkish Scientific and Research Council (TUBITAK) under Grant No.121E379.16.

REFERENCES

Aatresh, A. A., Yatgiri, R. P., Chanchal, A. K., Kumar, A., Ravi, A., Das, D., & Kini, J. (2021). Efficient deep learning architecture with dimension-wise pyramid pooling for nuclei segmentation of histopathology images. *Computerized Medical Imaging and Graphics*, 93, 101975. https://doi.org/10.1016/j.compmedimag.2021.101975.

Amgad, M., Atteya, L. A., Hussein, H., Mohammed, K. H., Hafiz, E., Elsebaie, M. A., & Cooper, L. A. (2022). NuCLS: A scalable crowdsourcing approach and dataset for nucleus classification and segmentation in breast cancer. *GigaScience*, 11, giac037. https://doi.org/10.1093/gigascience/giac037.

Aubreville, M., Stathonikos, N., Bertram, C. A., Klopfleisch, R., Ter Hoeve, N., Ciompi, F., & Breininger, K. (2023). Mitosis domain generalization in histopathology images—the MIDOG challenge. *Medical Image Analysis*, 84, 102699. https://doi.org/10.1016/j.media.2022.102699.

Aubreville, M., Wilm, F., Stathonikos, N., Breininger, K., Donovan, T. A., Jabari, S., & Bertram, C. A. (2023). A comprehensive multi-domain dataset for mitotic figure detection. *Scientific data*, *10*(1), 484. https://doi.org/10.1038/s41597-023-02327-4.

Bankhead, P., Loughrey, M. B., Fernández, J. A., Dombrowski, Y., McArt, D. G., Dunne, P. D., & Hamilton, P. W. (2017). QuPath: Open source software for digital pathology image analysis. *Scientific reports*, 7(1), 1-7. https://doi.org/10.1038/s41598-017-17204-5.

Bertram, C. A., Veta, M., Marzahl, C., Stathonikos, N., Maier, A., Klopfleisch, R., & Aubreville, M. (2020). Are pathologist-defined labels reproducible? Comparison of the TUPAC16 mitotic figure dataset with an alternative set of labels. In *Interpretable and Annotation-Efficient Learning for Medical Image Computing: Third International Workshop, iMIMIC 2020, Second International Workshop, MIL3ID 2020, and 5th International Workshop, LABELS 2020, Held in Conjunction with MICCAI 2020, Lima, Peru, October 4–8, 2020, Proceedings 3*, 204-213. Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-61166-8_22.

Bonissone, P., Cadenas, J. M., Garrido, M. C., & Díaz-Valladares, R. A. (2010). A fuzzy random forest. *International Journal of Approximate Reasoning*, 51(7), 729-747. https://doi.org/10.1016/j.ijar.2010.02.003.

Chen, L. C., Zhu, Y., Papandreou, G., Schroff, F., & Adam, H. (2018). Encoder-decoder with atrous separable convolution for semantic image segmentation. In *Proceedings of the European conference on computer vision (ECCV)*, 801-818. https://doi.org/10.48550/arXiv.1802.02611.

Chen, Y., Li, X., Hu, K., Chen, Z., & Gao, X. (2020). Nuclei segmentation in histopathology images using rotation equivariant and multi-level feature aggregation neural network. In *2020 IEEE International Conference on Bioinformatics and Biomedicine (BIBM)*, 549-554. IEEE. https://doi.org/10.1109/BIBM49941.2020.9313413.

Dodballapur, V., Song, Y., Huang, H., Chen, M., Chrzanowski, W., & Cai, W. (2019). Mask-driven mitosis detection in histopathology images. In *2019 IEEE 16th International Symposium on Biomedical Imaging (ISBI 2019)*, 1855-1859. IEEE. https://doi.org/10.1109/ISBI.2019.8759164.

Gamper, J., Koohbanani, N. A., Benes, K., Graham, S., Jahanifar, M., Khurram, S. A., & Rajpoot, N. (2020). Pannuke dataset extension, insights and baselines. *arXiv preprint arXiv:2003.10778*. https://doi.org/10.48550/arXiv.2003.10778.

Graham, S., Jahanifar, M., Azam, A., Nimir, M., Tsang, Y. W., Dodd, K., & Rajpoot, N. M. (2021). Lizard: A large-scale dataset for colonic nuclear instance segmentation and classification. In *Proceedings of the IEEE/CVF international conference on computer vision*, 684-693. https://doi.org/10.48550/arXiv.2108.11195.

Graham, S., Vu, Q. D., Raza, S. E. A., Azam, A., Tsang, Y. W., Kwak, J. T., & Rajpoot, N. (2019). Hover-net: Simultaneous segmentation and classification of nuclei in multi-tissue histology images. *Medical image analysis*, 58, 101563. https://doi.org/10.1016/j.media.2019.101563.

Hamidinekoo, A., & Zwiggelaar, R. (2017). Stain colour normalisation to improve mitosis detection on breast histology images. In *Deep Learning in Medical Image Analysis and Multimodal Learning for Clinical Decision Support: Third International Workshop, DLMIA 2017, and 7th International Workshop, ML-CDS 2017, Held in Conjunction with MICCAI 2017, Québec City, QC, Canada, September 14, Proceedings 3*, 213-221. Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-67558-9_25.

Hancer, E., Traore, M., Samet, R., Yıldırım, Z., & Nemati, N. (2023). An imbalance-aware nuclei segmentation methodology for H&E stained histopathology images. *Biomedical Signal Processing and Control*, 83, 104720. https://doi.org/10.1016/j.bspc.2023.104720.

Hassan, L., Abdel-Nasser, M., Saleh, A., A. Omer, O., & Puig, D. (2021). Efficient stain-aware nuclei segmentation deep learning framework for multi-center histopathological images. *Electronics*, 10(8), 954. https://doi.org/10.3390/electronics10080954.

He, K., Zhang, X., Ren, S., & Sun, J. (2016). Deep residual learning for image recognition. In *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition*, 770-778. https://doi.org/10.1109/CVPR.2016.90.

Hlavcheva, D., Yaloveha, V., & Podorozhniak, A. (2019). Application of convolutional neural network for histopathological analysis. *Advanced Information Systems*, *3*(4), 69-73. https://doi.org/10.20998/2522-9052.2019.4.10.

Hoorali, F., Khosravi, H., & Moradi, B. (2022). Automatic microscopic diagnosis of diseases using an improved UNet++ architecture. *Tissue and Cell*, *76*, 101816. https://doi.org/10.1016/j.tice.2022.101816.

Ilyas, T., Mannan, Z. I., Khan, A., Azam, S., Kim, H., & De Boer, F. (2022). TSFD-Net: Tissue specific feature distillation network for nuclei segmentation and classification. *Neural Networks*, 151, 1-15. https://doi.org/10.1016/j.neunet.2022.02.020.

Jahanifar, M., Shephard, A., Zamanitajeddin, N., Raza, S. E. A., & Rajpoot, N. (2022). Stain-robust mitotic figure detection for MIDOG 2022 challenge. *arXiv preprint arXiv:2208.12587*. https://doi.org/10.1016/j.media.2024.103132.

Jiang, S., & Li, J. (2022). TransCUNet: UNet cross fused transformer for medical image segmentation. *Computers in Biology and Medicine*, 150, 106-207. https://doi.org/10.1016/j.compbiomed.2022.106207.

Khan, M. S., Ali, S., Lee, Y. R., Kang, M. K., Park, S. Y., Tak, W. Y., & Jung, S. K. (2023). TransUNet-lite: A robust approach to cell nuclei segmentation. In *Proceedings of the 2023 7th International Conference on Medical and Health Informatics*, 251-258. https://doi.org/10.1145/3608298.3608344.

Khan, H. U., Raza, B., Shah, M. H., Usama, S. M., Tiwari, P., & Band, S. S. (2023). SMDetector: Small mitotic detector in histopathology images using faster R-CNN with dilated convolutions in backbone model. *Biomedical Signal Processing and Control*, 81, 104-414. https://doi.org/10.1016/j.bspc.2022.104414.

Khan, M. Z., Gajendran, M. K., Lee, Y., & Khan, M. A. (2021). Deep neural architectures for medical image semantic segmentation. *IEEE Access*, 9, 83002-83024. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3086530.

Kumar, N., Verma, R., Anand, D., Zhou, Y., Onder, O. F., Tsougenis, E., & Sethi, A. (2019). A multi-organ nucleus segmentation challenge. *IEEE transactions on medical imaging*, 39(5), 1380-1391. https://doi.org/10.1109/TMI.2019.2947628.

Kumar, N., Verma, R., Sharma, S., Bhargava, S., Vahadane, A., & Sethi, A. (2017). A dataset and a technique for generalized nuclear segmentation for computational pathology. *IEEE transactions on medical imaging*, 36(7), 1550-1560. https://doi.org/10.1109/TMI.2017.2677499.

Le Dinh, T., Lee, S. H., Kwon, S. G., & Kwon, K. R. (2022). Cell nuclei segmentation in cryonuseg dataset using nested unet with efficientnet encoder. In *2022 International Conference on Electronics, Information, and Communication (ICEIC)*, 1-4. IEEE. https://doi.org/10.1109/ICEIC54506.2022.9748537.

Li, C., Wang, X., Liu, W., & Latecki, L. J. (2018). DeepMitosis: Mitosis detection via deep detection, verification and segmentation networks. *Medical image analysis*, 45, 121-133. https://doi.org/10.1016/j.media.2017.12.002.

Liu, X., Guo, Z., Cao, J., & Tang, J. (2021). MDC-net: A new convolutional neural network for nucleus segmentation in histopathology images with distance maps and contour information. *Computers in Biology and Medicine*, 135, 104543. https://doi.org/10.1016/j.compbiomed.2021.104543.

Ludovic, R., Daniel, R., Nicolas, L., Maria, K., Humayun, I., Jacques, K., & Catherine, G. (2013). Mitosis detection in breast cancer histological images An ICPR 2012 contest. *Journal of pathology informatics*, 4(1), 8. https://doi.org/10.4103/2153-3539.112693.

Maarouf, C., Benomar, M. L., & Settouti, N. (2021). Pre-trained backbones effect on nuclei segmentation performance. In *Mediterranean Conference on Pattern Recognition and Artificial Intelligence*, 108-118. Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-031-04112-9_8.

Macenko, M., Niethammer, M., Marron, J. S., Borland, D., Woosley, J. T., Guan, X., & Thomas, N. E. (2009). A method for normalizing histology slides for quantitative analysis. In *2009 IEEE international symposium on biomedical imaging: from nano to macro*, 1107-1110. IEEE. https://doi.org/10.1109/ISBI.2009.5193250.

Mahbod, A., Schaefer, G., Bancher, B., Löw, C., Dorffner, G., Ecker, R., & Ellinger, I. (2021). CryoNuSeg: A dataset for nuclei instance segmentation of cryosectioned H&E-stained histological images. *Computers in biology and medicine*, *132*, 104-349. https://doi.org/10.1016/j.compbiomed.2021.104349.

Maroof, N., Khan, A., Qureshi, S. A., ul Rehman, A., Khalil, R. K., & Shim, S. O. (2020). Mitosis detection in breast cancer histopathology images using hybrid feature space. *Photodiagnosis and photodynamic therapy*, *31*, 101-885. https://doi.org/10.1016/j.pdpdt.2020.101885.

Naylor, P., Laé, M., Reyal, F., & Walter, T. (2017). Nuclei segmentation in histopathology images using deep neural networks. In *2017 IEEE 14th international symposium on biomedical imaging (ISBI 2017)*, 933-936. IEEE. https://doi.org/10.1109/ISBI.2017.7950669.

Naylor, P., Laé, M., Reyal, F., & Walter, T. (2018). Segmentation of nuclei in histopathology images by deep regression of the distance map. *IEEE transactions on medical imaging*, 38(2), 448-459. https://doi.org/10.1109/TMI.2018.2865709.

Nemati, N., Samet, R., Hancer, E., Yildirim, Z., & Akkas, E. E. (2023). A Hybridized Deep Learning Methodology for Mitosis Detection and Classification from Histopathology Images. *Journal of Machine Intelligence and Data Science (JMIDS)*, *4*(1), 35-43. https://doi.org/10.11159/jmids.2023.005.

Obeid, A., Mahbub, T., Javed, S., Dias, J., & Werghi, N. (2022). NucDETR: end-to-end transformer for nucleus detection in histopathology images. In *International Workshop on Computational Mathematics Modeling in Cancer Analysis*, 47-57. Cham: Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-031-17266-3_5.

Qin, J., He, Y., Zhou, Y., Zhao, J., & Ding, B. (2022). REU-Net: Region-enhanced nuclei segmentation network. *Computers in Biology and Medicine*, 146, 105-546. https://doi.org/10.1016/j.compbiomed.2022.105546.

Ronneberger, O., Fischer, P., & Brox, T. (2015). U-net: Convolutional networks for biomedical image segmentation. In *Medical image computing and computer-assisted intervention–MICCAI 2015: 18th international conference, Munich, Germany, October 5-9, 2015, proceedings*, 3(18), 234-241. Springer International Publishing. https://doi.org/10.48550/arXiv.1505.04597.

Roux, L., Racoceanu, D., Capron, F., Calvo, J., Attieh, E., Le Naour, G., & Gloaguen, A. (2014). Mitos & atypia. *Image Pervasive Access Lab (IPAL), Agency Sci., Technol. & Res. Inst. Infocom Res., Singapore, Tech. Rep*, 1, 1-8.

Sebai, M. (2020). Improved SegMitos framework for mitosis detection in breast cancer histopathology images. In *2020 IEEE International Conference on Artificial Intelligence and Information Systems (ICAIIS)*, 102-106. IEEE. https://doi.org/10.1109/ICAIIS49377.2020.9194877.

Sebai, M., Wang, T., & Al-Fadhli, S. A. (2020). PartMitosis: a partially supervised deep learning framework for mitosis detection in breast cancer histopathology images. *IEEE Access*, 8, 45133-45147. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2978754.

Sirinukunwattana, K., Raza, S. E. A., Tsang, Y. W., Snead, D. R., Cree, I. A., & Rajpoot, N. M. (2016). Locality sensitive deep learning for detection and classification of nuclei in routine colon cancer histology images. *IEEE transactions on medical imaging*, *35*(5), 1196-1206. https://doi.org/10.1109/TMI.2016.2525803.

Sohail, A., Khan, A., Wahab, N., Zameer, A., & Khan, S. (2021). A multi-phase deep CNN based mitosis detection framework for breast cancer histopathological images. *Scientific Reports*, 11(1), 6215. https://doi.org/10.1038/s41598-021-85652-1.

Swarts, D. R., van Suylen, R. J., den Bakker, M. A., van Oosterhout, M. F., Thunnissen, F. B., Volante, M., & Speel, E. J. M. (2014). Interobserver variability for the WHO classification of pulmonary carcinoids. *The American journal of surgical pathology*, *38*(10), 1429-1436. https://doi.org/10.1097/PAS.0000000000000300.

Traoré, M., Hancer, E., Samet, R., Yıldırım, Z., & Nemati, N. (2024). CompSegNet: An enhanced U-shaped architecture for nuclei segmentation in H&E histopathology images. *Biomedical Signal Processing and Control*, *97*, 106699. https://doi.org/10.1016/j.bspc.2024.106699.

Verdicchio, M., Brancato, V., Cavaliere, C., Isgrò, F., Salvatore, M., & Aiello, M. (2023). A pathomic approach for tumor-infiltrating lymphocytes classification on breast cancer digital pathology images. *Heliyon*, *9*(3). https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e14371.

Verma, R., Kumar, N., Patil, A., Kurian, N. C., Rane, S., Graham, S., & Sethi, A. (2021). MoNuSAC2020: A multi-organ nuclei segmentation and classification challenge. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 40(12), 3413-3423. https://doi.org/10.1109/TMI.2021.3085712.

Veta M, Viergever MA, Pluim JPW, Stathonikos N, van Diest PJ. MICCAI Grand Challenge: Assessment of mitosis detection algorithms (AMIDA13). Computer Vision and Pattern Recognition 2014. https://doi.org/10.1016/j.media.2014.11.010.

Vu, Q. D., Graham, S., Kurc, T., To, M. N. N., Shaban, M., Qaiser, T., & Farahani, K. (2019). Methods for segmentation and classification of digital microscopy tissue images. *Frontiers in bioengineering and biotechnology*, 7, 53. https://doi.org/10.3389/fbioe.2019.00053.

Wilm, F., Marzahl, C., Breininger, K., & Aubreville, M. (2021). Domain adversarial RetinaNet as a reference algorithm for the MItosis DOmain generalization challenge. In *International Conference on Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention*, 5-13. Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.48550/arXiv.2108.11269.

Wolberg, W. (1992). Breast cancer Wisconsin (original). *UCI Machine Learning Repository*, 110. https://doi.org/10.24432/C5HP4Z.

Yancey, R. (2023). Parallel YOLO-based Model for Real-time Mitosis Counting. 10.24132/CSRN.3201.32.

Yancey, R. E. (2022). Deep Feature Fusion for Mitosis Counting. In *2022 3rd International Conference on Pattern Recognition and Machine Learning (PRML)*, 151-158. IEEE. https://doi.org/10.1109/PRML56267.2022.9882245.

Yang, G., Huang, J., He, Y., Chen, Y., Wang, T., Jin, C., & Sengphachanh, P. (2022). GCP-Net: A Gating Context-Aware Pooling Network for Cervical Cell Nuclei Segmentation. *Mobile Information Systems*, 2022(1), 7511905. https://doi.org/10.1155/2022/7511905.

KSÜ Mühendislik Bilimleri Dergisi, 28(2), 2025
Araştırma Makalesi

KSU J Eng Sci, 28(2), 2025
Research Article

Kahramanmaras Sutcu Imam University
Journal of Engineering Sciences

Geliş Tarihi : 05.01.2025
Kabul Tarihi :23.03.2025

Received Date : 05.01.2025
Accepted Date : 23.03.2025

TÜRKÇE SAĞLIK DANIŞMANLIĞINDA BÜYÜK DİL MODELLERİNİN HASTA-DOKTOR İLETİŞİMİNDE KULLANIM POTANSİYELİ

THE POTENTIAL USE OF LARGE LANGUAGE MODELS IN PATIENT-DOCTOR COMMUNICATION IN TURKISH HEALTH CONSULTATION

Muhammed Kayra BULUT[1] (ORCID: 0009-0000-3107-7121)
Banu DİRİ[2*] (ORCID: 0000-0002-6652-4339)

[1] Yıldız Teknik Üniversitesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Muhammed Kayra BULUT, kayrabulut39@gmail.com

ÖZET

Bu çalışma, Türkçe sağlık danışmanlığında kullanılan dört farklı büyük dil modelinin (doktor-meta-llama-3-8b, doktor-LLama2-sambanovasystems-7b, doktor-Mistral-trendyol-7b ve doktor-llama-3-cosmos-8b) performansını değerlendirmektedir. Modeller, 321.179 hasta-doktor soru-cevap çiftinden oluşan Patient Doctor Q&A TR 321179 veri kümesi üzerinde ince ayar yapılarak eğitilmiştir. Performans ölçümünde BLEU ve BERT skor gibi sentetik değerlendirmelerin yanı sıra, Elo puanlaması ile uzman doktorların yanıt kalitesi incelemeleri de kullanılmıştır. Sonuçlar, doktor-LLama2-sambanovasystems-7b modelinin genel başarı bakımından en iyi performansı sergilediğini göstermiş, bu model uzman doktor incelemelerinden de 3.25 puan almıştır. Öte yandan, doktor-Mistral-trendyol-7b modeli %18,4 ile en düşük zararlı yanıt oranına sahip model olarak öne çıkmıştır. Bu çalışma, Türkçe sağlık hizmetlerinde yapay zekâ destekli sanal doktor asistanlarının potansiyelini göstermekte ve dile özgü modellerin geliştirilmesinin önemini vurgulamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Doğal dil işleme, sağlık yapay zekası, Türkçe dil modelleri, LLM ince ayarı, sanal doktor asistanı

ABSTRACT

This study evaluates the performance of four different large language models used in Turkish healthcare consultancy: doctor-meta-llama-3-8b, doctor-LLama2-sambanovasystems-7b, doctor-Mistral-trendyol-7b, and doctor-llama-3-cosmos-8b. The models were fine-tuned using the Patient Doctor Q&A TR 321179 dataset, which consists of 321,179 patient-doctor question-answer pairs. Performance was measured using synthetic evaluations such as BLEU and BERT scores, as well as expert doctor reviews of response quality through Elo scoring. The results showed that the doctor-LLama2-sambanovasystems-7b model demonstrated the best overall performance, receiving a score of 3.25 from expert doctor evaluations. On the other hand, the doctor-Mistral-trendyol-7b model stood out with the lowest harmful response rate at 18.4%. This study highlights the potential of AI-powered virtual doctor assistants in Turkish healthcare services and emphasizes the importance of developing language-specific models.

Keywords: Natural language processing, health artificial intelligence, Turkish language models, LLM fine-tuning, virtual doctor assistant

ToCite: BULUT, M. K., & DİRİ, B., (2025). TÜRKÇE SAĞLIK DANIŞMANLIĞINDA BÜYÜK DİL MODELLERİNİN HASTA-DOKTOR İLETİŞİMİNDE KULLANIM POTANSİYELİ. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 28(2), 802-822.

GİRİŞ

Günümüzde sağlık hizmetlerinde hasta-doktor iletişiminin yetersizliği, tıbbi bilgilere erişimdeki zorluklar ve sağlık profesyonellerinin iş yükünün fazlalığı önemli sorunlar olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu sorunlar, hastaların doğru ve zamanında sağlık hizmetine erişimini kısıtlamakta, tedavi süreçlerini olumsuz etkilemekte ve sağlık sisteminin verimliliğini düşürmektedir.

Son zamanlarda yapay zeka ve doğal dil işleme alanındaki ilerlemeler, Büyük Dil Modelleri (Large Language Model - LLM) gibi teknolojilerin ortaya çıkmasını ve gelişimini hızlandırmıştır (Brown, 2020; Vaswani, 2017). Bu modeller, insan dilini anlama ve doğal dil oluşturma özellikleriyle öne çıkarken, bilhassa sağlık gibi ileri uzmanlığa ihtiyaç duyulan alanlarda kullanım potansiyelleri oldukça fazladır (Park vd., 2020). Sağlık hizmetlerinde doğru ve hızlı bilgi paylaşımının hayati öneme hâiz olması, bu alanda LLM'lerin kullanımını daha da önemli hale getirmektedir (Jiang vd., 2017).

Sağlık alanında LLM'lerin kullanımı, hasta-doktor iletişiminin kolaylaştırılması, tıbbi bilgilerin daha anlaşılır hale getirilmesi ve sağlık uzmanlarına destek sağlanması gibi çeşitli avantajlar vadetmektedir (Chikhaoui vd., 2022). Ancak, bu teknolojinin sağlık gibi hayati bir alanda kullanılabilmesi için, modellerin özel olarak eğitilmeleri ve performanslarının ayrıntılı bir biçimde değerlendirilmesi lazımdır (Peng vd., 2019). BERT bazlı değerlendirme yöntemleri, metin benzerliğini anlamlandırmada başarılı sonuçlar vermiştir (Zhang vd., 2019). Özellikle farklı modellerin performansını kıyaslamalı analiz yoluyla incelemek, model seçimi ve iyileştirmesi konusunda yol gösterici olmaktadır (Chiang vd., 2024).

LLM'lerin büyük boyutları ve yüksek enerji ile işlem gücü tüketimi, sağlık hizmetlerinde uygulanabilirliklerini sınırlayan faktörlerdendir. Bu nedenle, daha az parametreye sahip, enerji ve işlem gücü açısından daha verimli, işe özel LLM'lerin oluşturulması hedeflenmektedir. Parametre sayısının az olması, modellerin daha az işlem gücü gerektirmesi ve böylece enerji tüketiminin azaltılması anlamına gelmektedir. Bu durum, sağlık hizmetlerinde yapay zeka uygulamalarının daha sürdürülebilir ve erişilebilir olmasına katkı sağlayacaktır.

Bu araştırmanın önemi, hasta-doktor iletişiminin geliştirilmesi ihtiyacı, tıbbi bilgilerin daha anlaşılır hale getirilmesi gerekliliği ve sağlık uzmanlarına destek sağlanması gereğinden kaynaklanmaktadır. Ayrıca, Türkçe sağlık alanında yapay zeka destekli çözümlerin eksikliği göz önüne alındığında, bu çalışma alandaki önemli bir boşluğu doldurmayı hedeflemektedir. Özelleştirilmiş ve daha küçük parametreli modellerin geliştirilmesiyle, hem doğruluk hem de enerji verimliliği açısından avantajlı sistemlerin oluşturulması amaçlanmaktadır.

Bu çalışmanın temel amacı, Türkçe sağlık verileri üzerinde Büyük Dil Modellerinin (LLM) ince ayar performansını inceleyerek literatüre özgün katkılar sağlamayı amaçlamaktadır. Çalışmanın başlıca faydaları şunlardır:

- **Hasta-doktor iletişimi alanına özel LLM'ler oluşturmak:** Genel amaçlı LLM'lerin yerine, hasta-doktor iletişimine odaklanan özelleştirilmiş modeller geliştirilmiştir. Bu sayede, iletişimin hassasiyeti ve doğruluğu artırılmıştır.

- **Geliştirilen LLM'lerin kapsamlı kıyaslamasını yapmak:** Dört farklı modelin performansı, çeşitli ölçütler ve değerlendirme yöntemleri kullanılarak detaylı bir şekilde karşılaştırılmıştır. Bu kapsamlı analiz, modellerin güçlü ve zayıf yönlerinin belirlenmesine olanak tanımıştır.

- **Özgün hasta-doktor iletişimi veri kümesi oluşturmak:** Çalışma kapsamında, 321.179 soru-cevap çiftinden oluşan geniş ve özgün bir Türkçe hasta-doktor iletişimi veri kümesi oluşturulmuştur. Bu veri kümesi, gelecekteki araştırmalar için önemli bir kaynak niteliğindedir.

- **Çok yönlü değerlendirme yaklaşımı geliştirmek:** Modellerin performansı, sentetik testler, yapay zeka hakemliği ve uzman değerlendirmesi olmak üzere üç ayrı ölçüm yöntemiyle değerlendirilmiştir. Bu çok yönlü yaklaşım, modellerin gerçek dünya uygulamalarındaki başarısını daha güvenilir bir şekilde ölçmeye olanak tanımıştır.

- **Enerji ve donanım verimliliğini artırmak:** Trilyon seviyesindeki parametre sayısına sahip devasa modeller yerine, onların yaklaşık %0,4'ü kadar parametre içeren daha küçük ve verimli modeller kullanılmıştır. Bu sayede, enerji tüketimi ve donanım gereksinimleri önemli ölçüde azaltılmıştır.

Bu çalışma kapsamda, Turkish-Llama-8b-v0.1 (ytu-ce-cosmos, 2024), Meta-Llama-3-8B (meta-llama, 2024), SambaLingo-Turkish-Chat (Sambanovasystems, 2024) ve Trendyol-LLM-7b-chat-v1.8 (Trendyol, 2024) modelleri üzerinde ince ayar yapılmış ve doktor-llama-3-cosmos-8b, meta-llama-3-8b, doktor-LLama2-sambanovasystems-7b ve doktor-Mistral-trendyol-7b büyük dil modelleri oluşturulmuştur. Modellerin performansları, BLEU, BERT skor ölçütleri kullanılarak ölçülmüş, bunun yanında uzman değerlendirmeleri ve yapay zeka hakemliğinde kıyaslamalı analizler yapılmıştır. Uzman değerlendirmelerinin istatistiksel anlamdaki karşılıkları da ANOVA ve CRONBACH ölçütleriyle analiz edilmiştir. Bu modeller seçilirken LLM Turkish Leaderboard'daki sıralamaları ve farklı mimarilere sahip olmaları göz önünde bulundurulmuştur (LMSYS Chatbot Arena Leaderboard, 2024). Makalenin ana hedefi, LLM'lerin hasta-doktor ilişkilerindeki potansiyelini ortaya koymaktır. Bu doğrultuda, modellerin tıbbi bilgileri hastaların daha kolay anlayabileceği bir dille açıklama, hasta sorularını yanıtlama ve sağlık çalışanlarına yardımcı olma gibi görevlerdeki performansları incelenmiştir. Sağlık hizmetlerinde doğru ve hızlı bilgi paylaşımının hayati önemi göz önünde bulundurularak, Türkçe sağlık alanında özelleşmiş yapay zeka çözümlerinin geliştirilmesi amaçlanmıştır.

Bununla birlikte, yapay zeka uygulamalarının sağlık sektöründe kullanımı, etik ve yasal zorlukları da beraberinde getirmektedir (Chikhaoui vd., 2022). Özellikle hasta mahremiyeti, veri güvenliği ve tıbbi bilgilerin doğruluğu gibi konular, bu teknolojilerin uygulanmasında önemli etik sorunlar oluşturabilir. Bu nedenle, araştırmada modellerin etik açıdan kullanılabilirliği de ortaya konulmuştur.

LİTERATÜR ÖZETİ

Büyük Dil Modellerinin (LLM) sağlık verileriyle ilgili uygulamaları, yapay zekanın son yıllardaki popülerleşmesiyle birlikte araştırmacılar tarafından yoğun ilgi gören önemli bir alan haline gelmiştir. Bu alanda LLM'lerin sağlık verilerinde kullanımı ve performansı (Peng vd., 2019), hasta-doktor iletişimindeki rolü (Park vd., 2020), tıbbi bilgi çıkarımı ve özetlemeleri (Akyon vd., 2021), klinik karar destek sistemleri, etik ve yasal konular (Chikhaoui vd., 2022), Türkçe LLM'ler (Bulut ve Diri, 2024; Kesgin vd., 2024) ve LLM'lerin performans ölçütleri gibi önemli konular ön plana çıkmaktadır.

Yapılan önemli araştırmalar arasında, Peng ve arkadaşlarının elektronik sağlık kayıtlarından klinik anlam çıkarma başarısını inceleyen çalışması bulunmaktadır (Peng vd., 2019). Bu çalışmada, önceden eğitilmiş dil modellerinin biyomedikal doğal dil işleme görevlerindeki performansları değerlendirilmiştir. Sonuçlar, BERT ve ELMo gibi modellerin, sağlık verilerinde başarılı bir şekilde kullanılabileceğini göstermiştir. Bu da LLM'lerin sağlık alanındaki potansiyelini ortaya koymaktadır.

Park ve arkadaşları, yapay zekanın sağlık hizmetlerindeki mevcut uygulamalarını ve karşılaşılan sorunları ele almıştır (Park vd., 2020). Özellikle yapay zeka teknolojilerinin tıbbi görüntü analizi, akıllı IoT cihazları, sinyal ve in-vitro tanı analizleri ve elektronik sağlık kayıtları gibi alanlardaki kullanımını incelemişlerdir. Çalışma, yapay zeka'nın sağlık sektöründe giderek daha fazla yer aldığını ve bu teknolojilerin etkili bir şekilde entegre edilmesi için klinik yaklaşımların ve yasal düzenlemelerin dikkate alınması gerektiğini vurgulamaktadır.

Yıldız ve Alper tarafından yapılan araştırma, ChatGPT'nin sağlık alanında Türkçe ve İngilizce yanıtlarını karşılaştırmaktadır (Yıldız ve Alper, 2023). Beş gastroenteroloji uzmanının değerlendirmesine göre, ChatGPT'nin Türkçe yanıtları İngilizce kadar doğru ancak daha az kapsamlı bulunmuştur. Buna rağmen yanıtlar "yetersiz" kategorisinde değerlendirilmemiştir. Çalışma, yapay zeka dil modellerinin Türkçe tıbbi amaçlar için kullanılabilirliğini göstermektedir.

Singhal ve arkadaşları tarafından geliştirilen Med-PaLM 2 çalışması, tıbbi LLM'lerin uzman düzeyinde performans potansiyelini göstermiştir (Singhal vd., 2025). PaLM 2 temel alınarak tıbbi alanda özel olarak ince ayarlanmış bu model, "ensemble refinement" ve "chain of retrieval" stratejileriyle geliştirilmiştir. MedQA testinde %86,5 başarı oranıyla önceki versiyonundan %19 daha iyi performans sergilemiştir. Klinik değerlendirmelerde, doktorlar sekiz klinik eksenden dokuzunda Med-PaLM 2'nin cevaplarını insan doktorlarınkine tercih etmişlerdir. Gerçek dünya tıbbi sorularına yönelik pilot çalışmada, uzmanlar Med-PaLM 2'yi %65 oranında genel pratisyenlere tercih etmiş ve cevapların güvenliği konusunda olumlu değerlendirmeler yapmışlardır. Bu çalışma, Türkçe sağlık danışmanlığı için geliştirilecek LLM'lere önemli bir referans sunmaktadır.

Labrak ve arkadaşlarının geliştirdiği "BioMistral" projesi, medikal alan için özelleştirilmiş açık kaynaklı dil modellerinden oluşan bir koleksiyondur (Labrak vd., 2024). Mistral tabanlı ve PubMed Central üzerinde ileri eğitimli bu model, 10 farklı tıbbi soru cevaplama görevinde mevcut açık kaynaklı modellerden daha iyi performans göstermiştir. Model 7 farklı dilde test edilmiş, doğruluk ve kalibrasyon analizleri yapılmıştır. BioMistral, Türkçe sağlık danışmanlığı modellerine içgörüler sunmakta ve çokdilli medikal doğal dil işleme uygulamaları için önemli bir referans oluşturmaktadır.

Li ve arkadaşlarının geliştirdiği "Agent Hospital" çalışması, hastaların, hemşirelerin ve doktorların tümünün büyük dil modelleri tarafından desteklenen otonom ajanlar olduğu sanal bir hastane simülasyonu sunmaktadır (Li vd., 2024). Bu simülasyon hastalık başlangıcından iyileşme sürecine kadar tüm tedavi aşamalarını kapsamaktadır. SEAL (Simulacrum-based Evolutionary Agent Learning) paradigması altında, doktor ajanlar binlerce hasta ajanını tedavi ederek ve tıbbi kaynakları inceleyerek zamanla gelişmektedir. Evrimleşen doktor ajanlar, on binlerce simüle hasta tedavisinden sonra MedQA kıyaslama testinde mevcut yöntemlerden daha iyi performans göstermiştir. Bu çalışma sağlık hizmetlerindeki yapay zeka uygulamalarına yenilikçi bir perspektif kazandırmaktadır.

Yılmaz'ın çalışması, Gemini ve ChatGPT 3.5 modellerinin blefarit (göz kapağı iltihabı) hakkında hasta eğitim materyali sunma yeteneğini değerlendirmiştir (Yılmaz, 2024). PEMAT aracı kullanılarak yapılan analizde, her iki model de hastalığın önemli yönlerini kapsamıştır. Ancak Flesch-Kincaid okunabilirlik skorları, hasta eğitim materyalleri için önerilen 60-70 aralığının oldukça altında kalmıştır (Gemini: 38,75; ChatGPT 3.5: 26,35). Bu sonuçlar, LLM'lerin sağlık bilgisi sunma potansiyeli taşıdığını, fakat mevcut içeriklerin hedef kitle için fazla karmaşık olabileceğini ve erişilebilirlik açısından geliştirilmesi gerektiğini göstermektedir.

Chikhaoui ve arkadaşları , sağlık sektöründe yapay zeka uygulamalarının etik ve yasal zorluklarını incelemişlerdir (Chikhaoui vd., 2022). Çalışmada, yapay zeka'nın tıp alanında kullanılmasının etik sorunları, özellikle veri gizliliği, hasta mahremiyeti ve sorumluluk konuları ele alınmıştır. Yazarlar, yapay zeka teknolojilerinin güvenli ve etik bir şekilde kullanılabilmesi için yasal çerçevelerin ve düzenlemelerin oluşturulmasının önemini vurgulamışlardır. Ayrıca, bu teknolojilerin sağlık hizmetlerinde etkin bir şekilde kullanılabilmesi için uluslararası işbirliğinin gerekliliğine dikkat çekmişlerdir.

Türkçe dil modelleri alanında, Bulut ve Diri, tamamen Türkçe verilerle eğitilmiş LLM tabanlı sanal doktor asistanlarının geliştirilmesini ele almışlardır (Bulut ve Diri, 2024). Bu çalışmada, LLama2, LLama3 ve Mistral tabanlı dört farklı model, Türkçe hasta-doktor yazılı iletişimindeki performansları açısından incelenmiştir. Sonuçlar, Türkçe sağlık hizmetlerinde yapay zeka destekli sanal doktor asistanlarının potansiyelini göstermekte ve Türkçeye özgü tıbbi sohbet robotlarının geliştirilmesine katkıda bulunmaktadır.

Benzer şekilde, Kesgin ve arkadaşları, Türkçe dil modellerinin geliştirilmesi ve değerlendirilmesi üzerine çalışmalar yapmışlardır (Kesgin vd., 2024). Bu araştırmada, Türkçe için özel olarak eğitilmiş cosmosGPT modelleri tanıtılmış ve farklı boyutlardaki Türkçe dil modellerinin performansları on farklı değerlendirme veri kümesinde incelenmiştir. Sonuçlar, Türkçe dil modellerinin performansını artırmak için özel olarak eğitilmiş modellerin, çok dilli modellere kıyasla daha iyi sonuçlar verdiğini göstermiştir.

LLM'lerin sağlık alanındaki uygulamalarının sabit soru-cevap sistemlerinin ötesine geçmesi gerektiğini gösteren önemli çalışmalar bulunmaktadır. Fan ve arkadaşları, 'AI Hospital' adlı çok ajanlı bir simülasyon çerçevesi geliştirerek, LLM'lerin gerçek klinik ortamlardaki performansını değerlendirmenin yeni bir yolunu sunmuştur. Bu sistem, doktorlar (başarısı ölçülmek istenen LLM'ler tarafından yönetilen) ve hastalar, muayene uzmanları ve baş hekimler (oyuncu olmayan karakterler – non-player characters - NPC) arasındaki dinamik etkileşimleri simüle etmektedir (Fan ve diğ, 2024).

Ayrıca, Akyon ve arkadaşları, Türkçe metinlerden otomatik soru üretimi ve soru cevaplama üzerine bir çalışma sunmuşlardır (Akyon vd., 2021). Çalışmada, mT5 modeli, Türkçe soru üretimi ve cevaplama için çoklu görevli bir ortamda eğitilmiştir. Bu model, TQuADv1, TQuADv2 ve XQuAD Türkçe bölümlerinde değerlendirilmiş ve çoklu görev yaklaşımının tek görevli ayara göre daha iyi performans gösterdiği belirlenmiştir. Bu çalışma, Türkçe doğal dil işleme alanında önemli bir katkı sağlamaktadır.

Bunun yanında Türkçe sağlık verileri oluşturma ve doğal dil işleme (NLP, Natural Language Processing) alanında önemli bir çalışma da, TurkMedNLI adlı Türkçe tıbbi doğal dil çıkarım veri kümesinin sunulmasıdır. Oğul ve

arkadaşları tarafından gerçekleştirilen bu çalışma, MedNLI veri kümesinin Türkçeye çevrilmesi ve Türkçe tıbbi doğal dil çıkarımı (Natural Language Inference - NLI) veri kümesinin oluşturulması üzerine odaklanmaktadır (Oğul vd., 2025). Büyük dil modellerini kullanarak tıbbi kısaltmaların doğru şekilde genişletilmesi, ölçü birimlerinin dönüştürülmesi ve klinik bağlamın korunması için özel bir çeviri ve işleme boru hattı geliştirilmiştir. Bu yaklaşım, Türkçe tıbbi Doğal Dil İşleme araştırmalarında veri eksikliği sorununu ele alarak, düşük kaynaklı diller için kaliteli tıbbi veri kümelerinin oluşturulmasına katkı sağlamaktadır.

Literatürde, Uçar ve arkadaşları tarafından gerçekleştirilen önemli bir çalışma bulunmaktadır (Ucar vd., 2025). Bu çalışmada, büyük dil modellerinin tıbbi soru cevaplama görevleri için ince ayar yapılarak performanslarının artırılması incelenmiştir. RoBERTa ve BERT gibi modeller, Healthline.com sitesinden elde edilen 6.800 tıbbi soru-cevap örneği kullanılarak eğitilmiş ve farklı modellerin performansları karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, BERT Large Uncased modelinin en yüksek başarıyı elde ettiğini ve büyük dil modellerinin tıbbi uygulamalarda etkili bir şekilde kullanılabileceğini göstermiştir. Bu çalışma, büyük dil modellerinin tıbbi alanlarda uyarlanmasının önemini vurgulamakta ve Türkçe sağlık verileri üzerinde gerçekleştirdiğimiz çalışmayla benzerlik taşımaktadır.

Güneş ve Ülkir, çoklu kipli (multimodal) LLM`lerin görsel nöroanatomi sorularındaki performanslarını radyolog ve anatomistlerle karşılaştırmalı olarak değerlendirmiştir. GPT4-V, GPT-4o, LLaVA ve Gemini 1.5 Flash modellerinin 100 adet görsel nöroanatomi sorusundaki doğruluk oranları incelenmiştir. Sonuçlara göre, radyolog %90 doğruluk oranıyla en yüksek performansı sergilerken, anatomist %67 doğruluk oranına ulaşmıştır. çoklu kipli LLM'ler arasında en iyi performansı %45 doğruluk oranıyla GPT-4o göstermiş, onu %35 ile Gemini 1.5 Flash, %22 ile GPT4-V ve %15 ile LLaVA takip etmiştir. Bu çalışma, multimodal LLM'lerin tıp alanında önemli bir potansiyele sahip olduğunu ancak nöroanatomik bölgeleri doğru tanımlama konusunda henüz tıbbi uzmanların doğruluk seviyesine ulaşamadığını ortaya koymaktadır (Güneş ve Ülkir, 2024).

Literatürden elde edilen bulgular, LLM'lerin sağlık alanında çok önemli bir potansiyele sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Bu teknolojiler, hasta-doktor iletişimini geliştirme, tıbbi veri analizi ve yorumlanması, otomatik soru cevaplama ve daha pek çok alanda önemli katkılar sağlayabilir. Ancak, bu teknolojilerin güvenli ve etik kullanımı için veri gizliliği, etik ilkeler ve yasal düzenlemeler gibi konularda daha fazla araştırma ve düzenlemeye ihtiyaç duyulmaktadır.

MATERYAL VE YÖNTEM

Bu bölümde araştırmanın temelini oluşturan veri kümesinin oluşturulma sürecinden, verinin temizlenmesi ve derleme aşamalarından bahsedilecektir.

Veri Kümesi ve Ön İşleme

Çalışmada kullanılan veri kümesi, Hugging Face platformunda bulunan “Patient Doctor Q&A TR 321179” adlı özel bir Türkçe hasta-doktor soru-cevap veri kümesidir. Bu veri kümesi, gerçek hasta-doktor verilerinden oluşan, 289.063 adet eğitim ve 32.116 adet test verisi olmak üzere toplam 321.179 soru-cevap çiftinden oluşmaktadır. Veri kümesinin içeriği, hastaların doktorlara sorduğu her türlü soruya karşılık ilgili doktorların verdiği cevaplardan oluşmaktadır. Bu veri kümesi dört farklı veri kümesinin birleştirilip karıştırılmasıyla oluşturulmuştur (Bulut, 2024a).

Veri kümelerinden ilki olan Patient Doctor Q&A TR 19583 (Bulut, 2024d), iCliniq platformundaki gerçek hasta soruları ve doktor yanıtlarının (Henry41, 2024) İngilizceden Türkçeye GPT-3.5-turbo ile çevrilmiş halidir. Toplam 19.583 veri içermektedir. Bu çeviri yapılırken aynı zamanda noktalama işaretleri düzeltilmiş, büyük/küçük harf kullanımı standardize edilmiş ve medikal terimler korunmuştur.

İkinci veri kümesi olan Patient Doctor Q&A TR 95588 (Bulut, 2024c), chat_doctor veri kümesinin (Avaliev, 2024) yine GPT-3.5-turbo ile İngilizceden Türkçeye çevrilmiş versiyonudur ve aynı düzenlemeler bu veri kümesi için de geçerlidir. Bu veri kümesi 95.588 eğitim ve 11.949 test verisi olmak üzre toplam 107.537 veriden oluşmaktadır. Üçüncü veri kümesi Patient Doctor Q&A TR 5695 (Bulut, 2024b) ise doctor-id-qa veri kümesinin (Hermansyah, 2024) Endonezceden Türkçeye çevirisidir ve benzer şekilde düzenlenmiştir. Bu veri kümesi 5.694 eğitim ve 633 test verisi olmak üzere toplam 6.327 veri içermektedir.

Son olarak Patient Doctor Q&A TR 167732 (Bulut, 2024e), doktorsitesi veri kümesinin (Bayram, 2024) temizlenmiş halidir ve bu Türkçe veri kümesinde önemli düzenlemeler yapılmıştır. Bu veri kümesiyse 167.732 eğitim ve 20.000 test verisi olmak üzre toplam 187.732 veriden oluşmaktadır. Bu düzenlemeler vesilesiyle bağlam bağımlı cümleler, mahremiyete halel getirebilecek içerikler, doktorların reklamları ve çeşitli iletişim bilgileri kaldırılmıştır. Bilhassa önceki konuşmalara referans veren ifadeler, hasta ve doktorların kişisel bilgileri, özel hayata dair detaylar, muayenehane adresi, çalışma saatleri, özel tanıtımlar ve iletişim bilgileri gibi içerikler de temizlenmiştir.

Dört farklı veri kümesinin birleştirilmesi sürecinde, veri kümelerinin yalnızca soru ve cevap kolonları alınarak işlem yapılmıştır. Yapılan bu kapsamlı birleştirme işlemi sonucunda toplam 321.179 soru-cevap çiftinden oluşan gayet zengin bir veri kümesi ortaya çıkarılmıştır. Bu kapsamlı veri kümesinin %90'ı eğitim olarak ayrılırken, kalan %10'luk kısım test verisi olarak kullanılmak üzere ayrılmıştır. Veri kümesinin güvenilirliğini ve kullanılabilirliğini artırmak maksadıyla hem eğitim hem de test verileri **Mersenne Twister** algoritması kullanılarak karıştırılmış ve son kontroller özenle yapılarak veri kümesinin bütünlüğü sağlanmıştır (Matsumoto ve Nishimura, 1998).

Tablo 1. Veri Kümesi Dağılımları

Veri Kümesi	İçerdiği Veri Miktarı	Patient Doctor Q&A TR 321179 Veri Kümesindeki Oranı (%)
Patient Doctor Q&A TR 19583	19.583	6,097
Patient Doctor Q&A TR 95588	107.537	33,482
Patient Doctor Q&A TR 5695	6.387	1,989
Patient Doctor Q&A TR 167732	187.732	58,45

Verilerin ana veri kümesi olan "Patient Doctor Q&A TR 321179" içindeki dağılımı Tablo 1'de verilmiştir. Veri kümesi eğitim ve test verisi olarak bölünürken de bu oranlar korunmuştur. Bununla beraber belirtmek gerekir ki, her bir veri kümesinden eşit oranda eğitim ve test verisi alınması stratejik bir karardır ve bu yaklaşım, modelin farklı kaynaklardan gelen verileri dengeli bir şekilde öğrenmesini ve yine modelin dengeli bir şekilde test edilmesini sağlayarak modelin performansını optimize etmeye yardımcı olmuştur. Bu metodoloji, veri kümesinin çeşitliliğini korurken aynı zamanda modelin genelleme yeteneğini de güçlendirmiştir.

Veri kümesi yapısına örnek olması açısından şu soru cevap çiftleri verilebilir:

Soru 1: Merhaba, benim 21 aylık bir oğlum var. Doğduğundan beri karnının üzerinde ve bacak arasında lekeler var, sanki yanık lekesi gibi alalı. Normal doktor kontrolüne götürdük, doktor bir şey demedi ama ben çok rahatsız oluyorum bu durumdan. Bir hastalık belirtisi falan olabilir mi?

Cevap 1: Merhaba, doktorunuz eğer ciddi bir durum olsaydı bunun bilgisini size verirdi. Ancak tespit edemediği bir şey ise görmeden bir şey söylemek sağlıklı olmaz. Geçmiş olsun.

Soru 2: Merhaba hocam, babamda bel fıtığı var, fizik tedaviye gitti. Doktor romatizma da şüphelenip MR istedi, MR sonucunu size yazacağım, bilgilendirirseniz sevinirim. Solda sakroiliak eklem anterior superior kısmında sakral ve iliak yüzde minimal kontur düzensizliği ve subkondral minimal skleroz izlenmiş olup, dejeneratif değişiklikler lehine değerlendirilmiştir. Bunun dışında bilateral sakroiliak eklem aralık, ilişki ve konturları tabii izlenmiş olup, ekleme komşu kemiklerin morfoloji ve sinyal intensiteleri tabii izlenmiştir. İnceleme alanına giren sakral ve omber vertebralar ile iliak kemiklerin korteks devamlılıkları ile kortikal medüller sinyal intensite dağılımları doğaldır. İnceleme alanına giren kas ve yumuşak dokular, cilt-cilt altı yağlı dokular ve pelvik yapılar tabiidir.

Cevap 2: MR raporu önemli bir problem göstermiyor. Normal bir MR sayılabilir.

Soru 3: Merhaba, yaklaşık bir haftadır yaşadığınız çarpıntı şikayetiyle doktora gittim. EKG, kan tahlili vs temiz çıktı. Holter takıldı, 24 saat süreyle kalp atım hızı ort 105, max 140 şeklinde bir sonuç çıktı. HDL 32, LDL 135,

trigliserid olması gerekenden yüksek. Doktorum stresten olmuştur, önemli bir şey yok dedi. Ben tatmin olmadım, bu durum normal mi, aydınlatırsanız sevinirim. Teşekkür ederim. İyi çalışmalar.

Cevap 3: Geçmiş olsun. Holter takılıyken sizi rahatsız eden şikayetiniz yine oldu fakat holterde anormal bir şey çıkmadı ise endişe edecek bir şey yoktur. Fakat bazen çarpıntıya sebep olan kalp problemi tespit etmek zor olabilir. Eğer holter takılıyken şikayetiniz olmadı ise daha ileri araştırma veya takip gerekir. Çarpıntı şikayetiniz olduğunda EKG çekilebilirse kalp probleminden kaynaklanıp kaynaklanmadığı anlaşılır. Saygılarımla.

Veri kümesi bu verilerden çok daha uzun ya da çok daha kısa birçok soru-cevap çifti içermektedir. Yukarıdaki örneklem sırası, gerçek veri kümesindeki sıradan bağımsızdır.

Kullanılan Modeller

Çalışmada dört farklı büyük dil modeli kullanılmıştır:

- **doktor-meta-llama-3-8b**

Meta AI tarafından geliştirilen Llama ailesinin üçüncü nesli olan Meta-Llama-3-8B (Meta AI, 2024), 8 milyar parametre içermekte ve haleflerine göre daha gelişmiş doğal dili anlama ve metin oluşturma özelliklerine sahiptir (meta-llama, 2024). Her ne kadar 70 milyar parametreye sahip bir varyasyonu da mevcut olsa, bu varyasyonu çalıştıracak donanıma ulaşmanın zorluğu ve maliyetli olması nedeniyle 8 milyar parametreli versiyon kullanılmak zorunda kalınmıştır. Bu model; soru cevaplama, metin anlama ve özetleme gibi birçok görevde kapsamlı bir yelpazede kullanılabilir. Bilhassa Türkçe gibi düşük kaynaklı dillerde de başarılı sonuçlar ortaya koyması, modelin yaygın bir kullanım potansiyeli olduğunu göstermektedir.

- **doktor-LLama2-sambanovasystems-7b**

SambaNova Systems tarafından geliştirilen ve Türkçe dili için özel olarak ince ayar yapılarak eğitilmiş olan bu sohbet modeli, "SambaLingo-Turkish-Base" üzerine mesajlaşmaya uyumlu hâle getirilmiş ve DPO (Direct Preference Optimization) yöntemiyle eğitilmiştir (Sambanovasystems, 2024). Llama-2-7b modelini temel alan SambaLingo-Turkish-Base, 7 milyar parametre içermekte ve Türkçe diline özel olarak uyarlanmış durumdadır (Touvron vd., 2024). Model, Cultura-X veri kümesinin Türkçe bölümünden alınan 42 milyar token ile eğitilmiş olup, SFT (Supervised fine-tuning) ve DPO olmak üzere iki aşamalı bir ince ayar sürecinden geçirilmiştir. Bu kapsamlı eğitim ve uyarlama süreci, modelin Türkçe dili üzerindeki performansını ve doğal dil işleme performansını belirgin derecede geliştirmektedir. Böylece model, Türkçe dili için geliştirilmiş gayet kapsamlı bir yapay zeka modeli olma niteliğini taşımaktadır.

- **doktor-Mistral-trendyol-7b**

  Trendyol tarafından geliştirilen ve bilhassa Türkçe dili üzerinde ince ayar yapılmış olan bu LLM, 7 milyar parametre içermekle birlikte Türkçe için özelleştirilmiştir (Trendyol, 2024). Bu model, Türkçe doğal dil işleme alanındaki önemli bir girişim sayılabilir; yerel dil anlama ve üretme konusundaki başarısıyla dikkatleri üzerine çekmektedir.

- **doktor-llama-3-cosmos-8b**

YTÜ Bilgisayar Mühendisliği COSMOS Araştırma Grubu tarafından geliştirilen ve Meta-Llama-3-8B modeli üzerinde ince ayar yapılan bu LLM, toplam 8 milyar parametreye sahip olup, Türkçe verilerle eğitim sürecinden geçirilmiştir (ytu-ce-cosmos, 2024). Toplam 30GB boyutundaki Türkçe veri kullanılması, modelin Türkçe dil anlama ve üretme becerilerini fark edilir bir biçimde geliştirmektedir.

İnce Ayar Süreci

Bu bölümde, ince ayar sürecinde kullanılan hiperparametrelerden ve eğitim stratejisinden bahsedilecektir. Özellikle derin öğrenme modellerinin performansını doğrudan etkileyen bu hiperparametrelerin doğru seçimi (Chen et al., 2022), modelin hem hızlı hem de kararlı bir şekilde öğrenmesini sağlamaktadır (Hoffmann et al., 2022).

- **Hiperparametreler**

  Öğrenme oranı (learning rate), modelin ağırlıklarının her adımda ne kadar güncelleneceğini belirleyen kritik bir hiperparametredir ve bu çalışmada 1×10^4 olarak belirlenmiştir. Bu değerin seçimi gayet önemlidir zira çok yüksek bir öğrenme oranı modelin aşırı büyük adımlarla öğrenerek en iyi noktayı kaçırmasına sebep olabilirken, çok düşük olması durumundaysa modelin çok yavaş öğrenerek yerel minimumlara takılabilme riski taşır (Hoffmann et al., 2022). Literatürdeki çalışmalar detaylı bir şekilde incelenerek, bu değerin 1×10^4 olarak belirlenmesinin en iyi sonuçları vereceği gözlemlenmiş ve bundan dolayı çalışmada bu değer tercih edilmiştir. Bu seçim, modelin hem yeterince hızlı öğrenmesine vesile olurken hem de aşırı büyük adımlardan kaçınarak daha stabil bir eğitim süreci geçirmesine olanak tanımaktadır (Devlin, 2018).

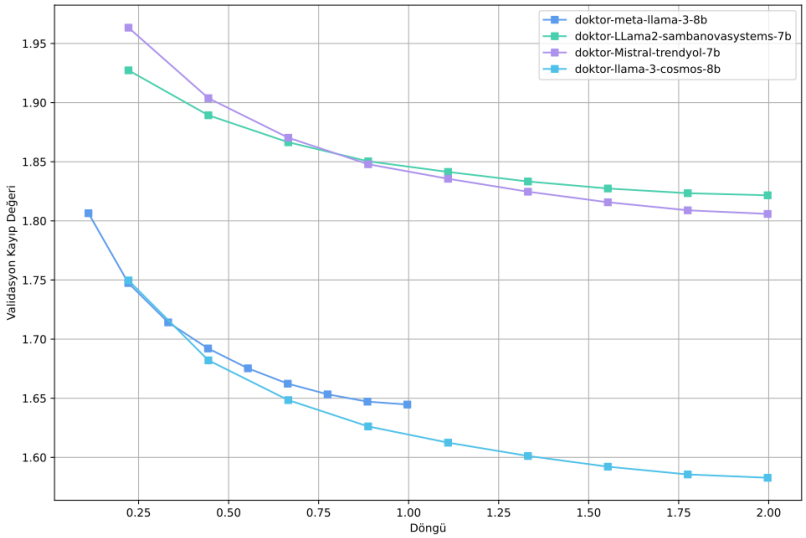
  Isınma adımları (Warmup Steps), eğitim sürecinin başlangıç aşamasında öğrenme oranını tedrici olarak artıran önemli bir teknik olup, bu çalışmada 2000 adım olarak belirlenmiştir. Bu teknik, eğitimin başlangıcında düşük öğrenme oranıyla başlayarak modelin ani ağırlık güncellemelerinden korunmasını sağlarken, bununla birlikte gradyan patlaması problemini önlemektedir. Bu kademeli artış vesilesiyle, model veri kümesine ve öğrenme işine daha yumuşak bir şekilde uyum sağlama fırsatı bulur, bu da eğitim sürecinin başarısını ve modelin performansını önemli ölçüde artırır. Bilhassa karmaşık modellerde, bu ısınma periyodu modelin başlangıç aşamasında karşılaşabileceği potansiyel sorunları minimize ederek daha stabil bir eğitim süreci sağlar.

  Meta-Llama-3-8B ve diğer modeller için **eğitim döngüsü (epoch)** sayıları farklı olarak belirlenmiş olup, Meta-Llama-3-8B için 1 döngü, diğer modeller için ise 2 döngü kullanılmıştır. Bu farklılığın temel saiki Şekil 1'de görüldüğü gibi, Meta-Llama modelinin doğrulama kaybı (validation loss) değerinin birinci döngünün sonlarına doğru düz bir çizgi çizmeye başlaması ve en iyi seviyeye ulaşmasıdır. Diğer modeller olan doktor-LLama2-sambanovasystems-7b, doktor-Mistral-trendyol-7b ve doktor-llama-3-cosmos-8b ise ikinci döngünün ortalarına doğru düz bir çizgi çizmeye başlamış, bu da eğitimin bu noktada optimum seviyeye ulaştığını göstermiştir. Her döngüde modeller tüm veri kümesini bir kez görürken, bu döngü sayıları aşırı öğrenmeyi önleyecek ve yeterli öğrenmeyi sağlayacak şekilde belirlenmiştir. Eğitim sürecinin başarısı, tüm modellerin başlangıçta yüksek olan validation loss değerlerinin eğitim ilerledikçe düşmesiyle kanıtlanmış, aynı zamanda bu değerler hesaplama kaynaklarının verimli kullanılmasını da göz önünde bulundurarak optimize edilmiştir.

  Maksimum sekans uzunluğu modeller arasında farklılık göstermekte olup, SambaLingo-Turkish-Chat modeli için 4096 token, diğer modeller için ise 8192 token olarak belirlenmiştir. Bu değer, modellerin tek seferde işleyebileceği maksimum token sayısını belirleyen önemli bir parametredir ve modelin uzun bağlamları anlayabilme yeteneğini doğrudan etkilemektedir. Aynı zamanda, bu parametre modelin bellek kullanımını da önemli ölçüde etkilediğinden, her modelin kendi mimarisi ve kapasitesi göz önünde bulundurularak optimize edilmiştir. Bu farklı token uzunlukları, modellerin performansını ve verimli çalışmasını sağlamak için özel olarak seçilmiş olup, her modelin kendi yapısal özelliklerine ve kullanım amaçlarına uygun şekilde ayarlanmıştır.

  Öğrenme oranı planlayıcısı, eğitim sürecinde doğrusal bir yapıda tasarlanmış olup, modelin öğrenme sürecini optimize etmek için önemli bir rol oynamaktadır. Bu planlayıcı, eğitimin başlangıç aşamasında daha yüksek bir öğrenme oranıyla başlayarak modelin hızlı öğrenmesini sağlar ve zaman içerisinde bu oranı doğrusal bir şekilde azaltır. Bu doğrusal azalış sayesinde, eğitimin sonlarına doğru daha hassas bir öğrenme süreci gerçekleşir ve model daha ince ayarlamalar yapabilir. Bu yaklaşım, modelin başlangıçta hızlı öğrenmesini sağlarken, ilerleyen aşamalarda daha stabil ve hassas bir şekilde optimize olmasına olanak tanır, böylece eğitim sürecinin verimliliği ve modelin performansı maksimize edilmiş olur.

Ağırlık azaltma parametresi bu çalışmada 0,01 olarak belirlenmiş olup (Wu ve Sun, 2022), bu değer modelin aşırı öğrenmesini engellemek için kullanılan önemli bir regularizasyon tekniğidir. Bu teknik, model parametrelerinin büyüklüğünü kontrol ederek ağın genelleme yeteneğini artırır ve eğitim sürecinde gradyan patlamasını önlemeye yardımcı olur. Ağırlık azaltma, eğitim sırasında ağırlıkları küçülterek zamanla daha küçük değerlere ulaşmalarını sağlar, bu da modelin aşırı özelleşmesini engelleyerek daha iyi bir genelleme performansı elde edilmesine katkıda bulunur. Bu değer, literatürdeki yaygın kullanım aralığı olan 0,1 ile 0,0001 arasındaki değerler göz önünde bulundurularak seçilmiş ve modelin optimal performans göstermesi için ayarlanmıştır.



Şekil 1. Doğrulama Kayıp Eğrileri

Bu çalışmada **optimizasyon algoritması** olarak 8-bit AdamW kullanılmış olup, bu algoritma standart AdamW'nin 8-bitlik versiyonu olarak modelin ağırlıklarını güncellemek için optimize edilmiş bir yapıya sahiptir (Dettmers et al., 2021). Bu algoritma, bellek kullanımını önemli ölçüde azaltırken aynı zamanda eğitim hızını da artırmaktadır.

Modelin sayısal hesaplamalarında ise **hassasiyet formatı** olarak BF16 tercih edilmiştir. Bu format, FP32'ye göre daha az bellek kullanımı sağlarken, FP16'ya kıyasla daha geniş bir dinamik aralık sunmakta ve eğitim stabilitesini korumaktadır. Bu iki özelliğin bir arada kullanılması, modelin hem verimli bir şekilde eğitilmesini hem de yüksek performans göstermesini sağlamakta, aynı zamanda hesaplama kaynaklarının da optimal kullanımına olanak tanımaktadır.

- ## Eğitim Stratejisi

Eğitim stratejisi, modellerin Türkçe tıbbi metinleri daha iyi anlayabilmesi ve performansını artırmak amacıyla özel olarak tasarlanmış olup, bu stratejinin merkezinde **LoRA** (Low-Rank Adaptation) tekniğinin kullanımı yer almaktadır. Bu teknik, modelin tüm parametrelerini güncellemek yerine düşük boyutlu matrisler ekleyerek eğitimi önemli ölçüde hızlandırmayı başarmıştır. LoRA'nın kullanımı sayesinde bellek kullanımı minimize edilmiş ve eğitim süresi önemli ölçüde kısaltılmıştır. Teknik kullanılırken rank değeri "r=8" olarak belirlenmiştir. Bu yaklaşım, özellikle büyük dil modellerinin eğitiminde karşılaşılan hesaplama maliyeti ve kaynak kullanımı gibi zorlukları aşmada etkili bir çözüm sunmuş, aynı zamanda modelin performansından ödün vermeden daha verimli bir eğitim süreci sağlamıştır.

Unsloth kütüphanesi, eğitim sürecini optimize etmek için özel olarak tercih edilmiş olup, özellikle ince ayar sürecindeki bellek kullanımını önemli ölçüde azaltmak için kullanılmıştır (Unsloth, 2024). Bu kütüphane, eğitim sürecini yaklaşık 2 kat hızlandırırken, bellek kullanımını %70 oranında azaltmayı başarmış ve

modelin doğruluk oranından herhangi bir ödün vermeden kaynak verimliliği sağlamıştır. Unsloth'un kullanımı, özellikle Llama-3 ve Mistral gibi büyük dil modellerinin eğitiminde önemli avantajlar sağlamış, bu da eğitim sürecinin hem daha hızlı hem de daha verimli bir şekilde tamamlanmasına olanak tanımıştır.

Veri kümesi hazırlığı, modelin eğitim sürecinde önemli bir adım olarak gerçekleştirilmiş olup, bu süreçte öncelikle Endonezce ve İngilizce dillerindeki veriler Türkçe'ye çevrilmiş ve mevcut Türkçe veri kümesi ile birleştirilmiştir. Kapsamlı bir veri temizleme ve standardizasyon işlemi gerçekleştirilmiş, bu süreçte verilerin iletişim bilgileri, özel isimler ve bağlam bağımlı cümleleri titizlikle ayıklanmıştır. Bu hazırlık aşaması, yapay zeka modelinin başarısını doğrudan etkileyecek temel adımlardan biri olarak değerlendirilmiştir. Bu işlemlerin yapılmasında, daha büyük ve genel bir model olan gpt-3.5-turbo'dan yardım alınmıştır (OpenAI, 2024a).

Değerlendirme ve **kaydetme** stratejisi, modelin eğitim sürecini güvence altına almak ve performansını düzenli olarak izlemek için kapsamlı bir şekilde tasarlanmıştır. Model performansı, loss metriği kullanılarak her 57.800 adımda bir değerlendirilmiş, bu da modelin öğrenme sürecinin düzenli olarak takip edilmesini sağlamıştır. Olası teknik sorunlara karşı bir önlem olarak, model her 10.000 adımda bir eğitim yapılan cihazın beklenmedik kapanma durumlarına karşı otomatik olarak kaydedilmiştir. Bu düzenli kontrol noktaları sayesinde, herhangi bir kesinti durumunda eğitimin en son kaydedilen noktadan devam edebilmesi sağlanmış ve böylece eğitim sürecinin güvenliği ve sürekliliği garanti altına alınmıştır. Bu stratejik yaklaşım, hem modelin eğitim sürecinin güvenilirliğini artırmış hem de performans izleme ve değerlendirme süreçlerinin sistematik bir şekilde yürütülmesini sağlamıştır.

Google Colab platformunda Tesla **A100** 40 GB GPU kullanılarak gerçekleştirilen eğitim sürecinde, Cosmos LLama 19,4 saat, Meta LLama 11,38 saat, SambaLingo 17,46 saat ve Trendyol modeli 19,3 saat sürede eğitimlerini tamamlamış olup, bu stratejik yaklaşım ve donanım seçimi, modellerin verimli ve etkili bir şekilde eğitilmesini sağlamış, özellikle Tesla A100 GPU'nun sunduğu yüksek hesaplama gücü ve tensor core mimarisi sayesinde eğitim süreleri optimize edilmiş ve yapay zeka uygulamaları için benzersiz bir hızlanma elde edilmiştir (NVIDIA, 2024; Google, 2024b).

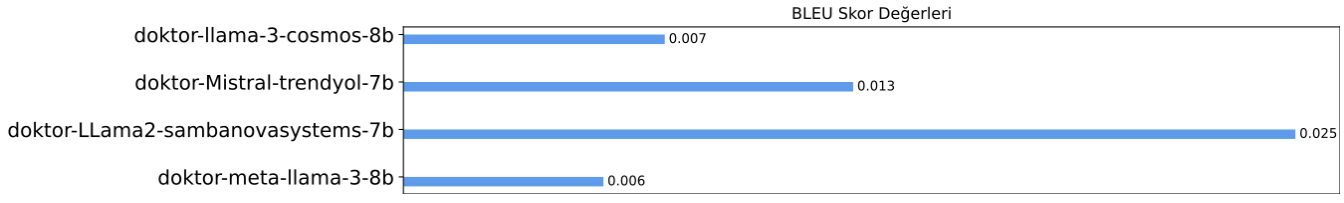
DENEYSEL SONUÇLAR

Bu bölümde, makale kapsamında gerçekleştirilen çalışmaların sonucunda elde edilen bulgular detaylı olarak sunulmaktadır. Araştırmanın temel amacı doğrultusunda, geliştirilen modellerin performansları farklı açılardan değerlendirilmiş ve karşılaştırmalı analizler yapılmıştır. Modellerin başarımları sentetik değerlendirme ölçütleri, yapay zeka hakemliğinde değerlendirme ve uzman değerlendirmesi sonuçları olmak üzere üç ana başlık altında incelenecektir.

Modellerin Sentetik Sonuçlara Göre Analizi

Bu bölümde, ince ayar yaptığımız dört LLM'in performansları sentetik ölçütler yardımıyla kıyaslanacaktır.

- **BLEU Skor Sonuçları**

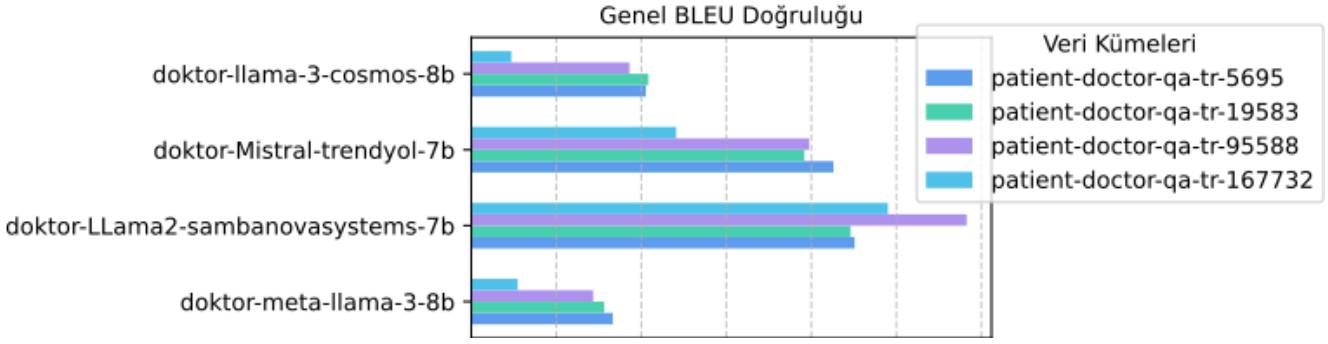


Şekil 2. Genel BLEU Skorları

Şekil 2, dört farklı dil modelinin BLEU skor değerlerini karşılaştırmaktadır. BLEU skoru, modellerin ürettiği metinlerin referans metinlere ne kadar benzediğini ölçen önemli bir ölçüttür. Şekil 2'deki sonuçların detaylı analizine göre, doktor-LLama2-sambanovasystems-7b modeli 0,025 BLEU skoru ile en yüksek performansı gösterirken, doktor-Mistral-trendyol-7b modeli 0,013 BLEU skoru ile ikinci sırada yer almıştır. Üçüncü sırada 0,007 BLEU skoru ile doktor-llama-3-cosmos-8b modeli bulunurken, doktor-meta-llama-3-8b modeli 0,006 BLEU skoru ile en düşük

performansı sergilemiştir. Bu sonuçlar, modellerin ürettiği metinlerin referans metinlere olan yakınlığını göstermektedir.

Bu sonuçlara göre, Parametre sayısının fazla olması her zaman daha iyi performans anlamına gelmemektedir, çünkü 8B parametreye sahip modeller, 7B parametreli modellere göre daha düşük performans göstermiştir. Türkçe dil yapısına ve sağlık alanına özel eğitilmiş modeller olan sambanovasystems ve trendyol daha iyi performans sergilemiştir. Ayrıca, BLEU skorlarının genel olarak düşük olması (1'e yakın değil), metin üretimi görevinin zorluğunu ve daha fazla iyileştirme potansiyeli olduğunu ortaya koymaktadır.



Şekil 3. Veri Kümesi Özelinde BLEU Skorları

Şekil 3'te gösterildiği üzere, dört farklı modelin patient-doctor-qa-tr-5695, patient-doctor-qa-tr-19583, patient-doctor-qa-tr-95588 ve patient-doctor-qa-tr-167732 veri kümeleri üzerindeki BLEU doğruluk skorları karşılaştırılmıştır. Şekil 3'ün sonuçlarına göre, doktor-LLama2-sambanovasystems-7b modeli en yüksek performansı patient-doctor-qa-tr-95588 veri kümesinde yaklaşık 0,029 skorla göstermiştir. Model, diğer veri kümelerinde de tutarlı bir şekilde 0,020-0,025 aralığında başarı göstermiş ve tüm veri kümelerinde diğer modellere göre daha iyi performans sergilemiştir.

Şekil 3'teki veriler incelendiğinde, doktor-Mistral-trendyol-7b modelinin en iyi performansı patient-doctor-qa-tr-5695 veri kümesinde yaklaşık 0,021 skorla gösterdiği görülmektedir. Model, tüm veri kümelerinde 0,012-0,021 aralığında tutarlı bir başarı göstermiş ve genel olarak ikinci en iyi performansa sahip model olmuştur.

Şekil 3'te görüldüğü gibi, doktor-meta-llama-3-8b modeli veri kümeleri arasında 0,003-0,008 aralığında nispeten düşük ve tutarlı bir performans göstermiştir. Modelin en düşük performansı patient-doctor-qa-tr-167732 veri kümesinde gözlemlenmiştir.

Şekil 3'ün sonuçlarına göre, doktor-llama-3-cosmos-8b modeli tüm veri kümelerinde 0,002-0,010 aralığında değişen en düşük performansı göstermiştir. Model, en iyi sonucunu patient-doctor-qa-tr-5695 veri kümesinde elde etmiştir.

Genel olarak bakıldığında, 7b parametreli modeller olan doktor-LLama2-sambanovasystems-7b ve doktor-Mistral-trendyol-7b'nin, 8b parametreli modellere kıyasla daha üstün bir performans sergilediği görülmüştür. İlginç bir şekilde, veri kümesinin büyüklüğü ile modellerin performansı arasında doğrudan bir korelasyon gözlenmemiştir. Özellikle dikkat çeken bir nokta, Türkçe'ye özel eğitilmiş modeller olan sambanovasystems ve trendyol'un diğer modellere göre daha başarılı sonuçlar elde etmesidir.

- **BERT Skor Sonuçları**

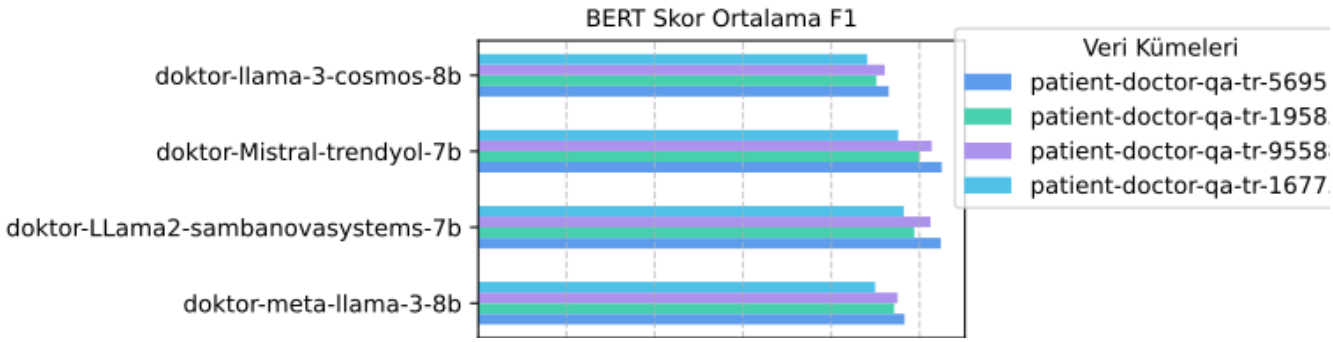


Şekil 4. BERT Skor F1 Değeri

Şekil 4'de dört farklı dil modelinin BERT Skor F1 değerlerini karşılaştırmaktadır. BERT Skor, modellerin ürettiği metinlerin referans metinlere anlamsal benzerliğini ölçen önemli bir metriktir. Grafikteki sonuçları detaylı olarak analiz edelim:

Şekil 4'te gösterilen dört farklı dil modelinin BERT skor F1 değerleri karşılaştırıldığında, doktor-LLama2-sambanovasystems-7b modelinin 0,494 F1 skoru ile en yüksek performansı gösterdiği görülmektedir. Bu sonuç, modelin ürettiği metinlerin anlamsal olarak referans metinlere en yakın olduğunu kanıtlamaktadır. Yine Şekil 4'teki verilere göre, doktor-Mistral-trendyol-7b modeli 0,491 F1 skoru ile ikinci sırada yer alırken, doktor-meta-llama-3-8b modeli 0,46 F1 skoru ile üçüncü sırada ve doktor-llama-3-cosmos-8b modeli 0,449 F1 skoru ile son sırada yer almaktadır.

Şekil 4'e göre, ilk iki model arasındaki minimal fark (0,003), her iki modelin de Türkçe sağlık metinlerini anlamsal olarak başarılı bir şekilde işleyebildiğini göstermektedir. 8B parametreli modellerin 7B parametreli modellere göre daha düşük performans göstermesi, parametre sayısının tek başına başarıyı belirlemediğini ortaya koymaktadır. Ayrıca, en yüksek ve en düşük skorlar arasındaki göreceli olarak küçük fark (0,045), tüm modellerin makul bir seviyede performans sergilediğine işaret etmektedir.



Şekil 5. Veri Kümesi Özelinde BERT Skor F1 Skorları

Şekil 5'te gösterilen dört farklı modelin farklı veri kümeleri üzerindeki BERT skor F1 performansları karşılaştırıldığında, doktor-LLama2-sambanovasystems-7b modelinin en yüksek performansı patient-doctor-qa-tr-5695 veri kümesinde yaklaşık 0,52 skorla gösterdiği görülmektedir. Model, diğer veri kümelerinde de tutarlı bir şekilde 0,48-0,51 aralığında başarı göstermiş ve çoğu veri kümesinde diğer modellere göre daha iyi performans sergilemiştir. Şekil 5'teki verilere göre, doktor-Mistral-trendyol-7b modeli en iyi performansını patient-doctor-qa-tr-5695 veri kümesinde yaklaşık 0,53 skorla göstermiş ve tüm veri kümelerinde 0,475-0,525 aralığında tutarlı bir başarı sergileyerek genel olarak ikinci en iyi performansa sahip model olmuştur.

Şekil 5'in sonuçlarına göre, doktor-meta-llama-3-8b modeli veri kümeleri arasında 0,449-0,48 aralığında nispeten düşük ve tutarlı bir performans göstermiş, en düşük performansını ise patient-doctor-qa-tr-167732 veri kümesinde sergilemiştir. Diğer yandan, doktor-llama-3-cosmos-8b modeli tüm veri kümelerinde 0,44-0,465 aralığında değişen en düşük performansı göstermiş ve en iyi sonucunu patient-doctor-qa-tr-5695 veri kümesinde elde etmiştir.

Genel olarak baktığımızda, 7b parametreli modeller olan doktor-LLama2-sambanovasystems-7b ve doktor-Mistral-trendyol-7b'nin, 8b parametreli modellere kıyasla daha üstün bir performans sergilediği görülmüştür. Benzer bir şekilde, veri kümesinin büyüklüğü ile modellerin performansı arasında doğrudan bir korelasyon gözlenmemiştir. Özellikle dikkat çeken bir nokta, Türkçe'ye özel eğitilmiş modeller olan sambanovasystems ve trendyol'un diğer modellere göre daha başarılı sonuçlar elde etmesidir.

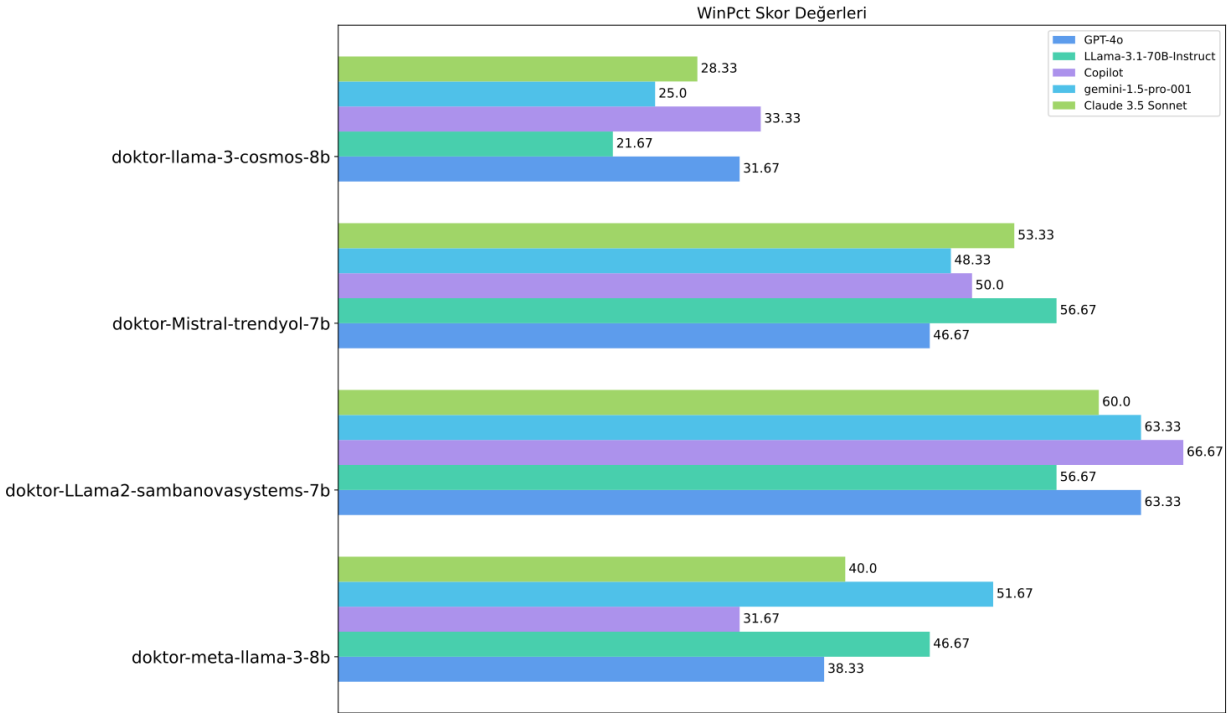
- **Yapay Zeka Hakemliğinde Değerlendirme**

Yapay zeka hakemliğinde, bizim eğittiğimiz modellerin her birine 20 soru sorulup cevapları daha gelişmiş yapay zeka modellerince değerlendirilmiştir. Bu değerlendirmenin sonuçları Şekil 6'da gösterilmiştir:

Şekil 6'da gösterilen GPT-4 (OpenAI, 2024c) hakemliğinin sonuçlarına göre, doktor-LLama2-sambanovasystems-7b modeli %63,33 ile en yüksek başarıyı elde etmiştir. Bunu %46,67 ile doktor-Mistral-trendyol-7b takip ederken, doktor-meta-llama-3-8b %38,33 ve doktor-llama-3-cosmos-8b %31,67 ile daha düşük performans sergilemiştir. Bu sonuçlar, sambanovasystems modelinin GPT-4 değerlendirmesinde açık ara önde olduğunu göstermektedir.

LLaMA 3.1 70B hakemliğinde ilginç bir sonuç ortaya çıkmış, doktor-LLama2-sambanovasystems-7b ve doktor-Mistral-trendyol-7b modelleri %56,67 ile eşit ve en yüksek performansı göstermiştir. Doktor-meta-llama-3-8b %46,67 ile orta düzeyde kalırken, doktor-llama-3-cosmos-8b %21,67 ile belirgin şekilde düşük bir performans sergilemiştir.

Microsoft Copilot (Microsoft, 2024) hakemliğinde, doktor-LLama2-sambanovasystems-7b modeli %66,67 ile en yüksek skoru elde etmiştir. doktor-Mistral-trendyol-7b %50 ile ikinci sırada yer alırken, doktor-llama-3-cosmos-8b %33,33 ve doktor-meta-llama-3-8b %31,67 ile daha düşük performans göstermiştir. Bu sonuçlar, sambanovasystems modelinin tutarlı başarısını bir kez daha kanıtlamıştır.



Şekil 6. Yapay Zeka Hakemliğinde Kazanma Yüzdeleri

Gemini 1.5 Pro hakemliğinde de doktor-LLama2-sambanovasystems-7b %63,33 ile liderliğini sürdürmüştür. İlginç bir şekilde, bu değerlendirmede doktor-meta-llama-3-8b %51,67 ile ikinci sıraya yükselmiş, doktor-Mistral-trendyol-7b %48,33 ile üçüncü olmuş ve doktor-llama-3-cosmos-8b %25ile son sırada yer almıştır.

Claude 3.5 Sonnet (Anthropic, 2024) hakemliğinde de benzer bir sıralama görülmüş, doktor-LLama2-sambanovasystems-7b %60 ile en yüksek performansı göstermiştir. Doktor-Mistral-trendyol-7b %53,33, doktor-meta-llama-3-8b %40ve doktor-llama-3-cosmos-8b %28,33 ile sıralanmıştır. Bu sonuçlar, farklı hakem modeller arasında tutarlı bir değerlendirme olduğunu göstermektedir.

Tüm hakem değerlendirmelerinin genel bir analizi yapıldığında, doktor-LLama2-sambanovasystems-7b modelinin tüm hakem değerlendirmelerinde ya en yüksek puanı aldığı ya da en yüksek puanlardan birine sahip olduğu görülmektedir. Bu tutarlı başarı, modelin genel kalitesini ve güvenilirliğini kanıtlar niteliktedir. Diğer yandan, doktor-llama-3-cosmos-8b modeli tüm hakem değerlendirmelerinde genellikle en düşük performansı göstermiş, bu da modelin iyileştirmeye ihtiyaç duyduğuna işaret etmektedir. Doktor-Mistral-trendyol-7b ve doktor-meta-llama-3-8b modelleri ise değerlendirmelerde genellikle orta sıralarda yer almış, bu da bu modellerin kabul edilebilir ancak geliştirilebilir bir performans sergilediğini göstermektedir. Bilhassa dikkat çeken bir nokta, farklı hakem modeller arasında görülen tutarlı değerlendirme sonuçlarıdır, bu da değerlendirme sürecinin güvenilirliğini desteklemektedir.

- **Uzman Değerlendirmesi Sonuçları**

Uzman değerlendirmesi kapsamında, farklı uzmanlık alanlarından 20 doktor tarafından modellerin performansı değerlendirilmiştir. Değerlendirme sürecinde, rastgele seçilen 20 hasta sorusuna modellerin verdiği yanıtlar, -10 ile

+10 arasında puanlanmıştır. Burada -10 yanıtın çok zararlı ve yanlış yönlendirici olduğunu, +10 ise yanıtın çok faydalı ve eksiksiz olduğunu göstermektedir. 0 puan ise yanıtın ne faydalı ne de zararlı olduğunu ifade etmektedir.



Şekil 7. Uzmanlar Tarafından Değerlendirme Sonuçları

Şekil 7'de sunulan değerlendirme sonuçları, özellikle sağlık alanında insan hayatını doğrudan etkileyen bir konuda yapay zeka modellerinin performansını göstermesi açısından büyük önem taşımaktadır. SambaLingo-Turkish-Chat modelinin 3,25 ortalama puanla en yüksek değerlendirmeyi alması, modelin Türkçe sağlık iletişiminde daha doğal ve anlaşılır yanıtlar üretebildiğini göstermektedir. Trendyol-LLM-7b-chat-v1.8'in 2,79 ve Meta-Llama-3-8B'nin 2,43 puanla orta düzeyde performans sergilemeleri, bu modellerin klinik ortamlarda kullanılabilir olmakla birlikte geliştirilmeye açık olduklarını işaret etmektedir. Turkish-Llama-8b-v0.1 modelinin -0,23 puanla negatif değerlendirme alması ise, sağlık gibi hassas bir alanda kullanılmadan önce ciddi iyileştirmelere ihtiyaç duyulduğunu göstermektedir. Bu sonuçlar, yapay zeka modellerinin doktor-hasta iletişiminde destekleyici bir araç olarak kullanılabileceğini, ancak insan doktorların yerini alamayacağını bir kez daha vurgulamaktadır.

Bunun yanında, Tablo 2'deki veriler, farklı modellerin hastalara yönelik verdiği yanıtların "yararlı," "zararlı" ve "nötr" olmak üzere üç kategoride sınıflandırıldığını göstermektedir. Dikkate değer ilk bulgu, doktor-LLama2-sambanovasystems-7b modelinin en yüksek yararlı cevap oranına (%71,1) sahip olmasıdır. Bu, modelin hastaların sorularına çoğunlukla olumlu veya işe yarar nitelikte yanıt verebildiğini göstermesi bakımından önemlidir. Bununla birlikte aynı modelin %21,1 gibi hatırı sayılır bir zararlı cevap oranına sahip olması, özellikle sağlık gibi hassas bir alanda tek başına yeterince güvenli olmadığını da ortaya koymaktadır.

Tablo 2. Yarar-Zarar Oranı

Model	Yararlı Cevap (%)	Zararlı Cevap (%)	Nötr Cevap (%)
doktor-Mistral-trendyol-7b	69,4	18,4	12,2
doktor-meta-llama-3-8b	62,6	21,3	16,1
doktor-llama-3-cosmos-8b	42,1	33,8	24,1
doktor-LLama2-sambanovasystems-7b	71,1	21,1	7,8

Öte yandan doktor-Mistral-trendyol-7b modeli, yararlı cevap yüzdesi açısından (%69,4) ilk modele göre ufak bir farkla geride kalırken, zararlı cevap oranının %18,4 seviyesinde olması bakımından daha avantajlı bir konumda görünmektedir. Sağlık alanında "yanlış yönlendirici" veya "zararlı" addedilebilecek yanıtların sayısını olabildiğince azaltmak önemli olduğu için, bu model çok daha düşük bir risk profili sunmaktadır. Dolayısıyla hem toplamda epey yüksek bir yararlı cevap oranına sahip olması hem de nispeten az sayıda zararlı cevap üretmesi, onu uygulamada tercih edilebilir kılmaktadır.

doktor-meta-llama-3-8b modeline bakıldığında, yararlı cevap oranının %62,6 ile orta düzeyde kaldığı; zararlı cevap oranınınsa %21,3 düzeyine çıktığı görülür. Bu değerler, modeli önceki iki seçeneğe göre daha az güvenilir hâle getirmektedir. Son olarak doktor-llama-3-cosmos-8b modelinin %42,1 oranında yararlı cevaba kıyasla %33,8 zarar oranına sahip olması, bu modelin sağlık uygulamaları bağlamında iyileştirmeye en çok ihtiyaç duyan seçenek olduğu anlamına gelmektedir.

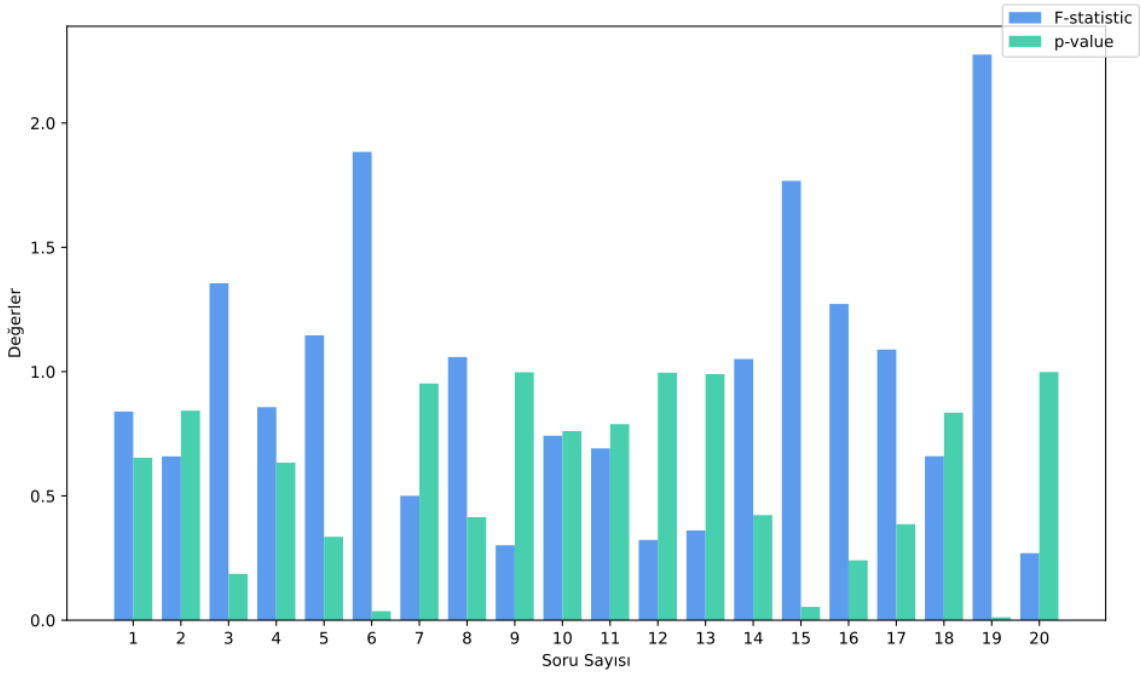
Genel olarak bakıldığında, sağlık sektöründe yapay zeka tabanlı danışmanlık veya destek sistemleri tasarlanırken yalnızca yüksek "yararlı cevap" oranına odaklanmak yeterli değildir; aynı zamanda "zararlı" veya yanıltıcı cevapların asgari düzeye indirilmesi şarttır. Nitekim tabloda da görüldüğü üzere, bazı modeller yüksek yararlılık sergilerken zararlı cevap oranlarını da yüksek tutabilmektedir. Bu nedenle karar vericiler, model seçiminde "en az zararlı" yanıtlara öncelik vermenin mi yoksa "en yüksek yararlılık" oranına ulaşmanın mı daha öncelikli olduğuna iyi karar vermelidir. Özellikle insan sağlığını ilgilendiren konularda, tek bir yanlış bilginin dahi ciddi sonuçlar doğurabileceği

göz önüne alındığında, risk yönetimini merkeze koyan bir yaklaşımın benimsenmesi öneme haizdir. sambanovasystems-7b modeli daha yüksek yararlı cevap oranına sahip olmasına rağmen sağlık gibi önemli bir alanda zaralı cevap verilmemesi daha elzemdir.

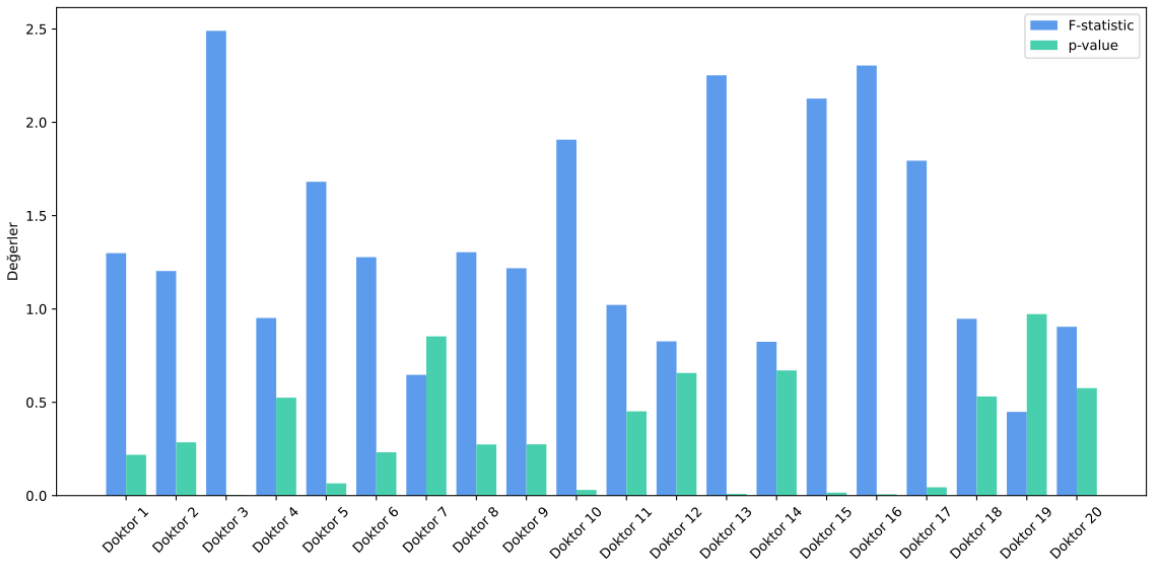
- **ANOVA Sonuçları**

Şekil 8'de 20 farklı doktorun değerlendirme sonuçları görülmektedir. F-istatistik bazı doktorlar için oldukça yüksektir. Özellikle Doktor 3, Doktor 13 ve Doktor 16'nın F-istatistik değerleri 2.0'ın üzerindedir. Bu durum doktorların değerlendirmeleri arasında istatistiksel olarak anlamlı farklılıklar olduğunu göstermektedir.

P-değerlerine baktığımızda, çoğu durumda 0,05'in altında olduğu görülmektedir. Bu da değerlendirmeler arasındaki farklılıkların istatistiksel olarak anlamlı olduğunu doğrulamaktadır. Özellikle Doktor 10, 15 ve 16'nın p-değerleri çok düşüktür.



Şekil 8. Soruların ANOVA Skorları

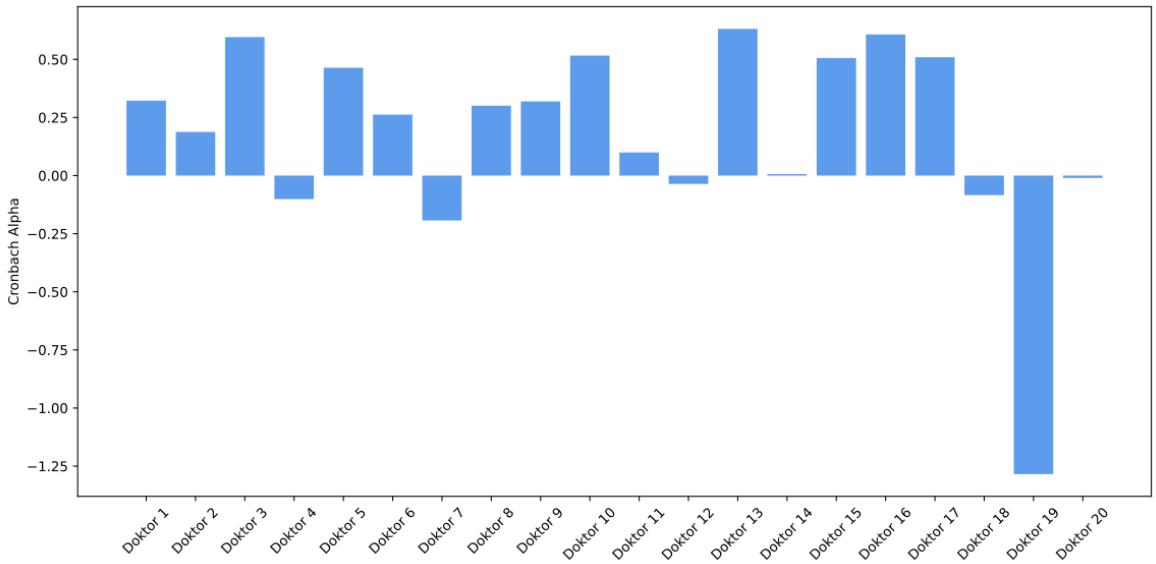


Şekil 9. Doktorların ANOVA Skorları

Şekil 9'da ise soru bazında ANOVA sonuçları gösterilmektedir. Soru 19'un yaklaşık 2,2 ile en yüksek F-istatistik değerine sahip olduğu görülmektedir. Bu durum, soruya verilen cevaplar arasında önemli farklılıklar olduğunu göstermektedir. Örneğin soru 12, 13 ve 20'nin p-değerleri 0,05'in üzerindedir. Bu sorularda değerlendirmeler arasındaki farklılıklar istatistiksel olarak anlamlı değildir.

Bu sonuçlar, hem doktorlar arasında hem de sorular arasında değerlendirme farklılıkları olduğunu göstermektedir. Bu farklılıklar bazı durumlarda istatistiksel olarak anlamlıdır. Bu da değerlendirmelerin subjektif olabileceğini ve doktorların farklı kriterlere göre değerlendirme yapabileceğini gösterir.

- **CRONBACH Sonuçları**



Şekil 10. Doktorların CRONBACH Skorları

Şekil 10'da sunulan 20 farklı doktorun değerlendirmelerine ait Cronbach Alfa değerleri incelendiğinde, -1,25 ile +0,75 arasında değişen bir dağılım gözlenmektedir. En yüksek tutarlılığı yaklaşık 0,6 değeriyle Doktor 3 gösterirken, en düşük tutarlılık yaklaşık -1,25 değeriyle Doktor 19'da görülmüştür. Değerlendirmeye katılan doktorların çoğunluğunun 0 ile 0,5 arasında değerler alması, genel olarak orta düzeyde bir tutarlılığın varlığına işaret etmektedir. Bu sonuçlar, doktorların yapay zeka modellerini değerlendirirken farklı bakış açılarına sahip olduklarını ve değerlendirme kriterlerini yorumlamada bireysel farklılıklar gösterdiklerini ortaya koymaktadır.

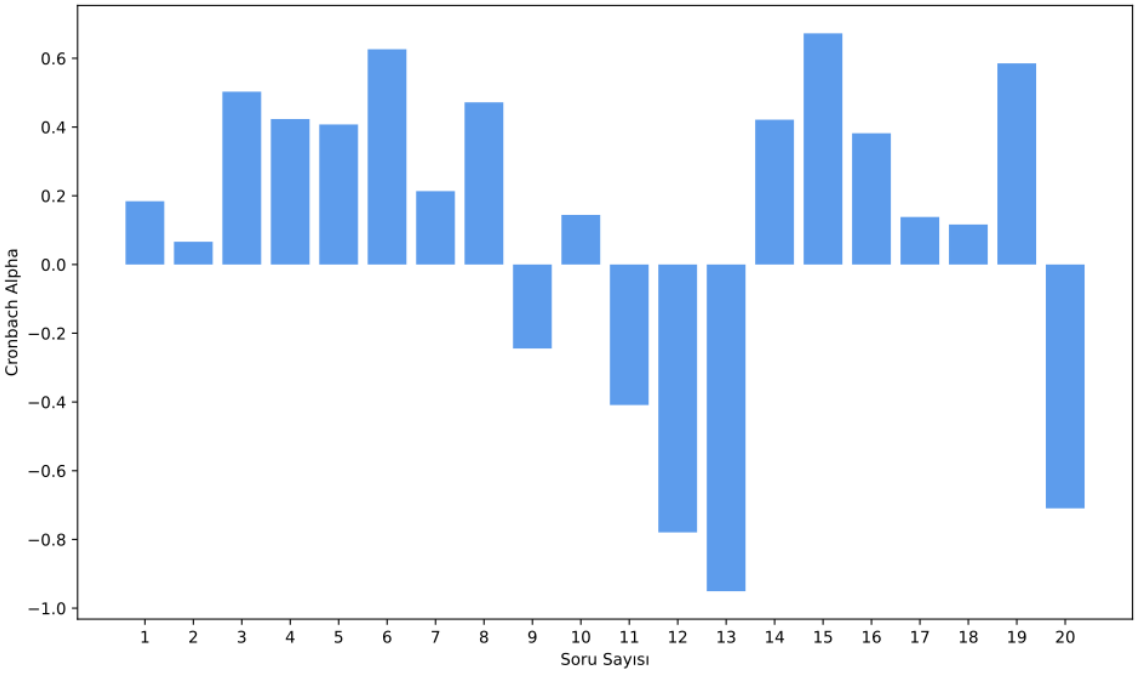
Şekil 11'de gösterilen soru bazındaki Cronbach Alfa değerleri analiz edildiğinde, en yüksek tutarlılığın yaklaşık 0,65 değeriyle 15. soruda, en düşük tutarlılığın ise yaklaşık -0,95 değeriyle 13. soruda görüldüğü tespit edilmiştir. Soruların yaklaşık yarısının pozitif, diğer yarısının negatif değerler alması, değerlendirme sürecinde önemli bir varyasyon olduğunu göstermektedir.

Bu sonuçlar, hem doktor hem de soru bazında önemli tutarlılık farklılıklarının varlığına işaret etmektedir. Bazı doktorlar ve sorular için tutarlılığın oldukça düşük olması ve genel olarak değerlendirmelerde orta düzeyde bir tutarlılık gözlenmesi, değerlendirme sürecinin standardizasyonunun artırılması ve değerlendiriciler arası tutarlılığın iyileştirilmesi gerektiğini açıkça ortaya koymaktadır.

- **Bulgular**

Yapılan denemeler sonucunda doktor-LLama2-sambanovasystems-7b modeli, BLEU ve BERT skor gibi tüm objektif ölçütlerde en yüksek başarımı göstermiş, uzman değerlendirmelerinde ve Elo (Elo, 1978) puanlaması ortalamasında da birinci sırada yer almıştır. doktor-Mistral-trendyol-7b modeli ikinci en iyi performansı sergilemiştir. doktor-meta-llama-3-8b modeli, genel amaçlı bir model olmasına rağmen makul bir performans göstererek çoğu ölçütte üçüncü sırada yer alırken, doktor-llama-3-cosmos-8b modeli çoğu değerlendirme ölçütünde en düşük

performansı sergilemiştir. ANOVA ve Cronbach alfa skorları, değerlendirmelerde doktor ve soru bazında belirgin varyasyonlar olduğunu göstermekle birlikte, genel olarak orta düzeyde bir tutarlılığın varlığına işaret etmektedir.



Şekil 11. Soruların CRONBACH Skorları

Özellikle dikkat çeken bir nokta, uzman değerlendirmeleri ile sentetik ölçütler (BLEU, ROUGE, vb.) ve yapay zeka hakemliklerinin sonuçları arasında güçlü bir korelasyon gözlenmesidir. Bu durum, farklı değerlendirme yöntemlerinin birbirini desteklediğini ve sonuçların güvenilirliğini artırdığını göstermektedir. Bu bulgular, Türkçe sağlık alanında kullanılacak dil modellerinin seçiminde ve geliştirilmesinde önemli içgörüler sunmaktadır.

Bu bulgular, özel alanlara özgü dil modellerinin genel amaçlı modellere göre daha iyi performans gösterdiğini desteklemektedir. Literatürde de benzer şekilde, alanına özel eğitilmiş modellerin performans avantajları vurgulanmaktadır. Örneğin, Peng ve arkadaşları, biyomedikal metinlerde önceden eğitilmiş dil modellerinin performansını incelemiş ve alanına özel eğitilen modellerin genel amaçlı modellere göre daha başarılı olduğunu göstermiştir (Peng vd., 2019). Benzer şekilde, Kesgin ve arkadaşları, Türkçe dil modellerinin geliştirilmesi ve değerlendirilmesinde alanına özel eğitilmiş modellerin daha iyi performans sergilediğini belirtmişlerdir (Kesgin vd., 2024).

doktor-meta-llama-3-8b modelinin genel amaçlı bir model olmasına rağmen makul bir performans göstermesi, genel amaçlı modellerin de belirli bir seviyede başarılı olabileceğini göstermektedir. Ancak, doktor-llama-3-cosmos-8b modelinin çoğu değerlendirme ölçütünde en düşük performansı sergilemesi, model ne kadar Türkçe için eğitilmiş olsa da, talimat odaklı eğitimin en az dil özelinde eğitim kadar önemli olduğunu göstermiştir. Bu durum, modellerin eğitiminde kullanılan veri kümesi büyüklüğü, kalitesi ve eğitim hedefinin görev özelindeki performans üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir.

Bunlarla beraber, GPT-4o (OpenAI, 2024b) gibi yüksek parametre sayısına sahip genel amaçlı büyük dil modelleri, çok fazla işlem gücü ve VRAM gerektirmektedir. Bu durum, bu modellerin pratik uygulamalarda kullanımını sınırlayabilmektedir. Buna karşılık, bizim kullandığımız alanına özel ve daha az parametreye sahip modeller, daha az donanım gereksinimiyle çalışabilmekte ve enerji tüketimini azaltmaktadır. Böylece, daha verimli ve erişilebilir bir çözüm sunmaktadır.

SONUÇ, TARTIŞMA VE KISITLAMALAR

Sonuç

Bu çalışma, Türkçe sağlık verileri üzerinde ince ayar yapılan büyük dil modellerinin, hasta-doktor iletişiminin kalitesini artırmada ve tıbbi bilgiye daha güvenilir erişim sağlamada önemli bir potansiyel taşıdığını ortaya koymuştur. Elde edilen sonuçlar, dile ve alana özgü ince ayarın, genel amaçlı modellerin ötesinde somut avantajlar sunduğunu göstermektedir. İnsan uzman değerlendirmeleri, otomatik ölçütler ve yapay zeka hakemli karşılaştırmaların entegre bir şekilde kullanılması sayesinde, bu modellerin performansındaki belirgin artış net bir şekilde gözlemlenmiştir. Özellikle, doktor-LLama2-sambanovasystems-7b modeli genel başarı açısından öne çıkarken, doktor-Mistral-trendyol-7b modeli ise ürettiği içeriklerin zararlı olma riskinin düşük tutulması bakımından dikkat çekmiştir. Bu bulgular, yalnızca model çıktılarının nicel performansını değil, aynı zamanda sağlık alanında uygulanabilirliğin önemli boyutları olan hasta mahremiyeti, veri güvenliği, etik karar verme ve yasal sorumluluk gibi unsurları da kapsamlı bir şekilde değerlendirmeye olanak tanımıştır.

Çalışmamızın asıl katkısı, mevcut literatürde çoğunlukla benzer alanlarda gerçekleştirilen çalışmaların ötesine geçerek, Türkçe sağlık verilerinin özgün dil yapısı ve terminolojisinin dikkate alındığı, çok boyutlu bir değerlendirme yaklaşımının uygulanmasıdır. Bu yöntem, yalnızca model çıktılarının nicel ölçülerini sunmakla kalmayıp, sağlık alanında uygulanabilirliğin önemli boyutları olan hasta mahremiyeti, veri güvenliği, etik karar verme ve yasal sorumluluk gibi unsurları da tartışmaya açmıştır.

Bununla birlikte, elde edilen bulgular, LLM'lerin klinik bağlamda kullanılması için gerekli olan ince ayarın sağladığı avantajların yanı sıra, mevcut teknolojinin uygulanması sırasında karşılaşılan temel engelleri de gözler önüne sermektedir. Bu açıdan çalışma, yalnızca mevcut performansın tekrarı değil; aynı zamanda Türkçe sağlık alanında model adaptasyonunun, güvenlik ve etik gerekliliklerle birlikte nasıl iyileştirilebileceği konusunda yeni bakış açıları sunmaktadır.

Gelecek çalışmalar için önerilerimiz, sağlık alanında yapay zeka uygulamalarının daha kapsamlı ve etkili hale getirilmesini hedeflemektedir. Özellikle görüntü, ses ve metin verilerini birlikte işleyebilen multimodal modellerin sağlık alanında kullanımının araştırılması, teşhis ve tedavi süreçlerinde daha bütüncül bir yaklaşım sağlayabilir. Aynı zamanda, daha büyük ve çeşitli Türkçe sağlık veri kümelerinin oluşturulması ve model mimarilerinin Türkçe dil yapısına göre optimize edilmesi, modellerin performansını önemli ölçüde artırabilir.

Veri güvenliği ve gizliliğine yönelik çözümlerin geliştirilmesi, hasta mahremiyetinin korunması açısından kritik öneme sahiptir. Bu bağlamda, Sağlık Bakanlığı gibi kurumlarla işbirliklerinin artırılması, hem veri kaynaklarının zenginleştirilmesi hem de yasal ve etik çerçevenin güçlendirilmesi açısından büyük önem taşımaktadır. Bu önerilerin hayata geçirilmesi, Türkiye'de sağlık alanında yapay zeka uygulamalarının daha güvenilir ve etkili bir şekilde kullanılmasına katkı sağlayacaktır.

Tartışma

Çalışmamızın literatürdeki benzer araştırmalardan farkı ve üstünlüğü, kullanılan veri kümesinin kapsamı, model kıyaslama stratejilerinin derinliği, istatistiksel analiz yöntemlerinin kullanımı ve etik boyutun değerlendirilmesinde yatmaktadır.

Öncelikle, Uçar ve arkadaşlarının çalışmasında yaklaşıma dayalı olarak 6.800 örnek kullanılmasına karşın, çalışmamızda çeşitli kaynaklardan birleştirilen ve temizleme işlemleri sonrasında 321.179 soru-cevap çiftinden oluşan çok daha geniş ve zengin bir veri kümesi kullanılmıştır (Ucar vd., 2025). Bu durum, modellerin daha geniş bir örneklem üzerinde eğitilmesini ve dolayısıyla sonuçların genellenebilirliğini artırmaktadır. Bu çalışmada aynı mimariye sahip BERT tabanlı modeller kullanılıp karşılaştırılmıştır. Buna karşın, çalışmamızda sağlık verilerine özgü ince ayar gerçekleştirmek amacıyla, Meta-Llama-3-8B, SambaLingo-Turkish-Chat, Trendyol-LLM-7b-chat-v1.8 ve Turkish-Llama-8b-v0.1 gibi farklı mimarileri de içeren modeller, aynı veri kümesi üzerinde görev özelinde kıyaslandı. Böylece, hem aynı temel mimari üzerinde modellerin dil özelinde eğitilme başarımı hem de farklı mimarilerin başarımları detaylı bir şekilde ortaya konulabildi.

Ayrıca, pek çok çalışmada model performansları yalnızca temel ölçütler (doğruluk, BLEU, ROUGE vb.) üzerinden ölçülürken, biz çalışmamızda Elo puanlaması, kazanma yüzdesi gibi daha karmaşık işler için daha ölçücü olan

karşılaştırma yöntemlerinin yanı sıra, ANOVA, Cronbach alfa gibi istatistiksel yöntemleri de kullanarak, elde edilen sonuçların tutarlılığını ve güvenilirliğini ölçmeye yönelik bir değerlendirme çerçevesi oluşturduk. Bu vesileyle, modellerin performans farkları anlamlı istatistiksel delillerle desteklenmiş ve karşılaştırmalar daha sağlam temellere oturtulmuştur.

Diğer yandan, Chikhaoui ve arkadaşları, yapay zekanın sağlık alanındaki etik ve hukuki zorluklarını detaylı olarak ele almışlardır (Chikhaoui vd., 2022). Çalışmamız esas olarak modellerin teknik performansına odaklanmış olsa da, hasta-doktor iletişimi gibi hassas bir uygulama alanında, uzman değerlendirmeleri aracılığıyla model cevaplarının etik uygunluğu, yanlılık ve zarar üretme riskleri gibi konular da incelenmiştir. Böylece, hem sayısal hem de niteliksel değerlendirme yöntemlerini entegre ederek sağlık hizmetlerinde kullanılabilirliğe dair kapsamlı bir bakış açısı sunulmuştur.

Kısıtlamalar ve Öneriler

Çalışmamızda karşılaşılan temel kısıtlamalar arasında veri kümesi boyutu ve çeşitliliğinin sınırlı olması, hesaplama kaynaklarının kısıtlı olması, test edilen model sayısı ve çeşitliliğinin artırılabilir olması ve değerlendirme metriklerinin genişletilebilir olması yer almaktadır. Bu kısıtlamalar, özellikle sağlık alanı gibi hassas ve önemli bir konuda daha kapsamlı sonuçlar elde edilmesini sınırlandırmıştır. Ayrıca, mevcut hesaplama kaynaklarının sınırlı olması, daha büyük ve karmaşık modellerin test edilmesini zorlaştırmış ve potansiyel olarak daha iyi performans gösterebilecek birçok modelin değerlendirme dışı kalmasına neden olmuştur.

Bu kısıtlamaların aşılması için öncelikle daha geniş ve çeşitli veri kümelerinin oluşturulması, farklı model mimarilerinin test edilmesi ve daha kapsamlı değerlendirme ölçütlerinin geliştirilmesi önerilmektedir. Özellikle Türkçe sağlık alanında daha zengin ve çeşitli veri kümelerinin oluşturulması, modellerin performansını artırabilir ve daha güvenilir sonuçlar elde edilmesini sağlayabilir. Bunun yanı sıra, etik ve hukuki çerçevenin güçlendirilmesi, hasta mahremiyetinin korunması ve verilerin güvenli bir şekilde işlenmesi açısından büyük önem taşımaktadır. Gelecekteki çalışmalarda, bu önerilerin dikkate alınması ve uygulanması, Türkçe sağlık alanında daha etkili ve güvenilir yapay zeka modellerinin geliştirilmesine katkı sağlayacaktır.

KAYNAKLAR

Akyon, F. C., Cavusoglu, D., Cengiz, C., Altinuc, S. O., & Temizel, A. (2021). Automated question generation and question answering from Turkish texts. arXiv preprint arXiv:2111.06476.

Anthropic. (2024). Claude: A New AI Assistant by Anthropic. Erişim adresi: https://www.anthropic.com/news/claude-3-5-sonnet (Erişim tarihi 16/08/2024).

LMSYS Chatbot Arena Leaderboard. (2024). LMSYS Chatbot Arena Leaderboard. Retrieved August 16, 2024, from https://chat.lmsys.org/?leaderboard

Avaliev, A. (2024). Chat Doctor Dataset. Erişim adresi: https://huggingface.co/datasets/avaliev/chat_doctor (Erişim tarihi 18/08/2024).

Bayram, M. A. (2024). Türkçe Tıbbi Soru-Cevap Veri Seti [Veri seti]. https://doi.org/10.5281/zenodo.12770916 (Erişim adresi: https://zenodo.org/record/12770916).

Brown, T. B. (2020). Language models are few-shot learners. arXiv preprint arXiv:2005.14165.

Bulut, M. K. (2024a). Patient Doctor Q&A TR 321179. https://doi.org/10.5281/zenodo.12798934 (Erişim adresi: https://doi.org/10.5281/zenodo.12798934).

Bulut, M. K. (2024b). Patient Doctor Q&A TR 5695. Erişim adresi: https://huggingface.co/datasets/kayrab/patient-doctor-qa-tr-5695.

Bulut, M. K. (2024c). Patient Doctor Q&A TR 95588. Erişim adresi: https://huggingface.co/datasets/kayrab/patient-doctor-qa-tr-95588.

Bulut, M. K. (2024d). Patient Doctor Q&A TR 19583. Erişim adresi: https://huggingface.co/datasets/kayrab/patient-doctor-qa-tr-19583.

Bulut, M. K. (2024e). Patient Doctor Q&A TR 167732. Erişim adresi: https://huggingface.co/datasets/kayrab/patient-doctor-qa-tr-167732.

Bulut, M. K., & Diri, B. (2024f). Artificial Intelligence Revolution in Turkish Health Consultancy: Development of LLM-Based Virtual Doctor Assistants. In 2024 8th International Artificial Intelligence and Data Processing Symposium (IDAP) (pp. 1–6). IEEE.

Chikhaoui, E., Alajmi, A., & Larabi-Marie-Sainte, S. (2022). Artificial intelligence applications in healthcare sector: ethical and legal challenges. Emerging Science Journal, 6(4), 717–738.

Chiang, W.-L., Li, Z., Lin, Z., Sheng, Y., Wu, Z., Zhang, H., Zheng, L., Zhuang, S., Zhuang, Y., & Zhou, D. (2024). Chatbot Arena: An Open Platform for Evaluating LLMs by Human Preference. arXiv preprint arXiv:2403.04132 [cs.AI].

Chen, Y., Nayman, N., Greenfeld, D., Gal, Y., & Berant, J. (2022). Towards learning universal hyperparameter optimizers with transformers. Advances in Neural Information Processing Systems, 35, 32053–32068.

Dettmers, T., Lewis, M., Shleifer, S., & Zettlemoyer, L. (2021). 8-bit optimizers via block-wise quantization. arXiv preprint arXiv:2110.02861.

Devlin, J. (2018). BERT: Pre-training of deep bidirectional transformers for language understanding. arXiv preprint arXiv:1810.04805.

Elo, A. E., & Sloan, S. (1978). The rating of chessplayers: Past and present. New York: Arco Pub.

Fan, Z., Tang, J., Chen, W., Wang, S., Wei, Z., Xi, J., ... & Zhou, J. (2024). AI Hospital: Benchmarking large language models in a multi-agent medical interaction simulator. arXiv preprint arXiv:2402.09742.

Google. (2024a). Gemini: Google's AI Model for Multimodal Understanding. Erişim adresi: https://deepmind.google/technologies/gemini/pro/ (Erişim tarihi 16/08/2024).

Google. (2024b). Google Colab. Erişim adresi: https://colab.google/ (Erişim tarihi 08/09/2024).

Güneş, Y. C., & Ülkir, M. (2024). Comparative Performance Evaluation of Multimodal Large Language Models, Radiologist, and Anatomist in Visual Neuroanatomy Questions. Uludağ Üniversitesi Tıp Fakültesi Dergisi, 50(3), 551-556.

Henry41. (2024). iCliniq Medical QA Dataset. Erişim adresi: https://www.kaggle.com/datasets/henry41148/icliniq-medical-qa.

Hermansyah, I. D. (2024). Doctor-ID-QA Dataset. Erişim adresi: https://huggingface.co/datasets/hermanshid/doctor-id-qa.

Hoffmann, J., Borgeaud, S., Mensch, A., Buchatskaya, E., Cai, T., Rutherford, E., de Las Casas, D., Hendricks, L. A., Welbl, J., Clark, A., Hennigan, T., Noland, E., Millican, K., van den Driessche, G., Damoc, B., Guy, A., Osindero, S., Simonyan, K., Elsen, E., Rae, J. W., Vinyals, O., & Sifre, L. (2022). Training compute-optimal large language models. arXiv preprint arXiv:2203.15556.

Kesgin, H. T., Yuce, M. K., Dogan, E., Uzun, M. E., Uz, A., Seyrek, H. E., Zeer, A., & Amasyali, M. F. (2024). Introducing cosmosGPT: Monolingual Training for Turkish Language Models.

Labrak, Y., Bazoge, A., Morin, E., Gourraud, P. A., Rouvier, M., & Dufour, R. (2024). Biomistral: A collection of open-source pretrained large language models for medical domains. arXiv preprint arXiv:2402.10373.

Li, J., Lai, Y., Li, W., Ren, J., Zhang, M., Kang, X., ... & Liu, Y. (2024). Agent hospital: A simulacrum of hospital with evolvable medical agents. arXiv preprint arXiv:2405.02957.

Matsumoto, M., & Nishimura, T. (1998). Mersenne twister: a 623-dimensionally equidistributed uniform pseudo-random number generator. ACM Transactions on Modeling and Computer Simulation (TOMACS), 8(1), 3-30.

Meta AI. (2024). LLaMA 3.1: Meta's Next-Generation Large Language Model. Erişim adresi: https://huggingface.co/meta-llama/Meta-Llama-3.1-70B (Erişim tarihi 08/08/2024).

meta-llama. (2024). meta-llama/Meta-Llama-3-8B. Erişim adresi: https://huggingface.co/meta-llama/Meta-Llama-3-8B (Erişim tarihi 16/08/2024).

Microsoft. (2024). GitHub Copilot: AI-Powered Code Completion by Microsoft. Erişim adresi: https://copilot.microsoft.com/ (Erişim tarihi 16/08/2024).

NVIDIA. (2024). NVIDIA A100 Tensor Core GPU. Erişim adresi: https://www.nvidia.com/tr-tr/data-center/a100/ (Erişim tarihi 08/08/2024).

Oğul, İ. Ü., Soygazi, F., & Bostanoğlu, B. E. (2025). TurkMedNLI: a Turkish medical natural language inference dataset through large language model based translation. PeerJ Computer Science, 11, e2662.

OpenAI. (2024a). GPT-3.5 Turbo. Erişim adresi: https://platform.openai.com/docs/models/gpt-3-5-turbo (Erişim tarihi 15/07/2024).

OpenAI. (2024b). GPT-4o: OpenAI's Language Model. Erişim adresi: https://openai.com/index/hello-gpt-4o/ (Erişim tarihi 16/08/2024).

OpenAI. (2024c). GPT-4: OpenAI's Language Model. Erişim adresi: https://openai.com/index/gpt-4/ (Erişim tarihi 21/08/2024).

Park, C.-W., Seo, S. W., Kang, N., Ko, B., Choi, B. W., Park, C. M., Chang, D. K., Kim, H., Kim, H., Lee, H., Jang, J., Ye, J. C., Jeon, J. H., Seo, J. B., Kim, K. J., Jung, K.-H., Kim, N., Paek, S., Shin, S.-Y., ... Yoon, H.-J. (2020). Artificial intelligence in health care: Current applications and issues. Journal of Korean Medical Science, 35(42), e379. https://doi.org/10.3346/jkms.2020.35.e379

Peng, Y., Yan, S., & Lu, Z. (2019). Transfer learning in biomedical natural language processing: an evaluation of BERT and ELMo on ten benchmarking datasets. arXiv preprint arXiv:1906.05474.

Sambanovasystems. (2024). sambanovasystems/SambaLingo-Turkish-Chat. Erişim adresi: https://huggingface.co/sambanovasystems/SambaLingo-Turkish-Chat (Erişim tarihi 16/08/2024).

Singhal, K., Tu, T., Gottweis, J., Sayres, R., Wulczyn, E., Amin, M., ... & Natarajan, V. (2025). Toward expert-level medical question answering with large language models. Nature Medicine, 1-8.

Trendyol. (2024). Trendyol/Trendyol-LLM-7b-chat-v1.8. Erişim adresi: https://huggingface.co/Trendyol/Trendyol-LLM-7b-chat-v1.8 (Erişim tarihi 16/08/2024).

Touvron, H., Martin, L., Stone, K., Albert, P., Almahairi, A., Babaei, Y., Bashlykov, N., Batra, S., Bhargava, P., Bhosale, S., Bikel, D., Blecher, L., Canton Ferrer, C., Chen, M., Cucurull, G., Esiobu, D., Fernandes, J., Fu, J., Fu, W., Fuller, B., Gao, C., Goswami, V., Goyal, N., Hartshorn, A., Hosseini, S., Hou, R., Inan, H., Kardas, M., Kerkez, V., Khabsa, M., Kloumann, I., Korenev, A., Koura, P. S., Lachaux, M.-A., Lavril, T., Lee, J., Liskovich, D., Lu, Y., Mao, Y., Martinet, X., Mihaylov, T., Mishra, P., Molybog, I., Nie, Y., Poulton, A., Reizenstein, J., Rungta, R., Saladi, K., Schelten, A., Silva, R., Smith, E. M., Subramanian, R., Tan, X. E., Tang, B., Taylor, R., Williams, A., Kuan, J. X., Xu, P., Yan, Z., Zarov, I., Zhang, Y., Fan, A., Kambadur, M., Narang, S., Rodriguez, A., Stojnic, R., Edunov, S., & Scialom, T. (2023). Llama 2: Open foundation and fine-tuned chat models. arXiv preprint arXiv:2307.09288.

Ucar, A., Nayak, S., Roy, A., Taşcı, B., & Taşcı, G. (2025). A Comprehensive Study on Fine-Tuning Large Language Models for Medical Question Answering Using Classification Models and Comparative Analysis. arXiv preprint arXiv:2501.17190.

Unsloth. (2024). Unsloth: Finetune Llama 3.1, Mistral, Phi & Gemma LLMs 2–5x faster with 80% less memory. Erişim adresi: https://github.com/unslothai/unsloth (Erişim tarihi 08/08/2024).

Vaswani, A. (2017). Attention is all you need. Advances in Neural Information Processing Systems.

Wu, S., & Sun, M. (2022). Exploring the efficacy of pre-trained checkpoints in text-to-music generation task. arXiv preprint arXiv:2211.11216.

Yıldız, M. S., & Alper, A. (2023). Can ChatGPT-4 diagnose in Turkish: a comparison of ChatGPT responses to health-related questions in English and Turkish. Journal of Consumer Health on the Internet, 27(3), 294-307.

ytu-ce-cosmos. (2024). ytu-ce-cosmos/Turkish-Llama-8b-v0.1. Erişim adresi: https://huggingface.co/ytu-ce-cosmos/Turkish-Llama-8b-v0.1 (Erişim tarihi 16/08/2024).

Zhang, T., Kishore, V., Wu, F., Weinberger, K. Q., & Artzi, Y. (2019). BERTScore: Evaluating text generation with BERT. arXiv preprint arXiv:1904.09675.

KSÜ Mühendislik Bilimleri Dergisi, 28(2), 2025
Araştırma Makalesi

KSU J Eng Sci, 28(2), 2025
Research Article

Kahramanmaras Sutcu Imam University
Journal of Engineering Sciences

Geliş Tarihi : 08.01.2025
Kabul Tarihi :16.02.2025

Received Date : 08.01.2025
Accepted Date : 16.02.2025

KİMYASAL MODİFİKASYON SONRASI TERMAL OLARAK STABİLİZE EDİLEN VİSKOZ RAYON LİFLERİN YAPISAL ANALİZİ

STRUCTURAL ANALYSIS OF THERMALLY STABILIZED VISCOSE RAYON FIBERS AFTER CHEMICAL MODIFICATION

Kemal Şahin TUNÇEL [1*] (ORCID: 0000-0001-5095-6543)

[1] Siirt Üniversitesi, El Sanatları Bölümü, Siirt, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Kemal Şahin TUNÇEL, kemalsahintuncel@gmail.com

ÖZET

Bu çalışmada, viskoz rayon liflerin fosforik asitle kimyasal modifikasyonu sonrası termal stabilizasyon sürecinde meydana gelen yapısal değişimleri analiz edilmiştir. Viskoz rayon lifleri öncelikle %4'lük fosforik asit çözeltisi ile muamele edilmiş ve ardından 160°C'den 250°C'ye kadar değişen sıcaklıklarda termal olarak stabilize edilmiştir. Stabilizasyon sonrasında elde edilen numunelerin karakterizasyonunda kızılötesi spektroskopisi (FT-IR), X-ışını kırınımı (XRD), termogravimetrik analiz (TGA) ve diferansiyel taramalı kalorimetri (DSC) teknikleri kullanılmıştır. Kızılötesi spektroskopisinden elde edilen bulgular, hidroksil grupların dehidrasyonunu ve aromatik yapıların oluşumunu göstermiştir. XRD analizinde, artan sıcaklıklarla selüloz-II kristal yapısının amorf faza dönüştüğü ve 250°C'de tamamen kaybolduğu gözlenmiştir. TGA termogramları, modifikasyonun maksimum ağırlık kaybı sıcaklığını düşürdüğünü ve kömürleşme verimini %13,2'den %50'ye yükselttiğini göstermiştir. DSC analizleri, endotermik pik sıcaklığının 330°C'den 215°C'ye kaydığını ve dehidrasyon reaksiyonlarının hızlandığını göstermiştir. Fosforik asidin, selülozun ayrışma mekanizmasını değiştirerek karbonizasyon verimini artırdığı, lifleri ileri karbonizasyon süreçlerine hazırladığı ve termal olarak stabilize edilen viskoz rayonun aktif karbon lif üretimi için uygun bir öncü (precursor) olabileceği anlaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Viskoz rayon, fosforik asit, termal stabilizasyon, FTIR, XRD

ABSTRACT

In this study, the structural changes that occurred during the thermal stabilization process after chemical modification of viscose rayon fibers with phosphoric acid were analyzed. Viscose rayon fibers were first treated with 4% phosphoric acid solution and then thermally stabilized at temperatures ranging from 160°C to 250°C. Infrared spectroscopy (FT-IR), X-ray diffraction (XRD), thermogravimetric analysis (TGA) and differential scanning calorimetry (DSC) techniques were used in the characterization of the samples obtained after stabilization. The findings obtained from infrared spectroscopy showed the dehydration of hydroxyl groups and the formation of aromatic structures. In XRD analysis, it was observed that the cellulose-II crystal structure transformed into the amorphous phase with increasing temperatures and completely disappeared at 250°C. TGA thermograms showed that the modification decreased the maximum weight loss temperature and increased the char yield from 13.2% to 50%. DSC analyses showed that the endothermic peak temperature shifted from 330°C to 215°C and dehydration reactions accelerated. It was concluded that phosphoric acid increased the carbonization yield by changing the decomposition mechanism of cellulose and prepared the fibers for further carbonization processes, and it was understood that thermally stabilized viscose rayon is a suitable precursor for the production of activated carbon fiber.

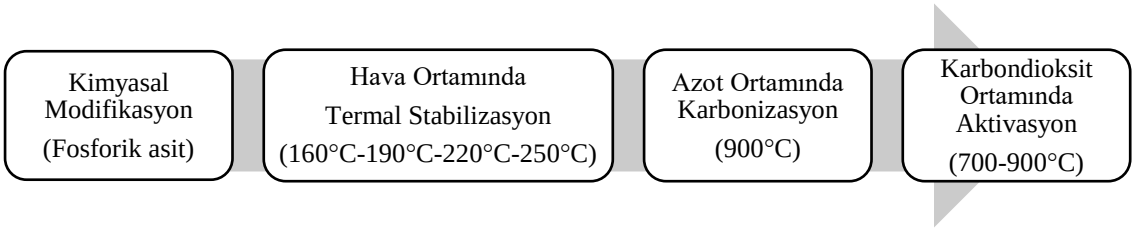
Keywords: Viscose rayon, phosphoric acid, thermal stabilization, FTIR, XRD

ToCite: TUNÇEL, K. Ş., (2025). KİMYASAL MODİFİKASYON SONRASI TERMAL OLARAK STABİLİZE EDİLEN VİSKOZ RAYON LİFLERİN YAPISAL ANALİZİ. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 28(2), 823-834.

GİRİŞ

Aktif karbon lifler, desorpsiyon, adsorpsiyon, gözenekli yapı ve geniş bir yüzey alanı gibi özellikleri nedeniyle ön plana çıkmakta ve ayrıca, endüstriyel ve tıbbi uygulama alanlarında genellikle ayırma ve saflaştırma amaçlı membran olarak kullanılmaktadırlar (Hina vd., 2018; Sun vd., 2005). Poliamid (Rahman vd., 2022; Demirel vd., 2024), polietilen (Röding vd., 2022), pamuk (Hariri vd., 2024), kenevir (Gül, 2025a) gibi pek çok malzeme karbon lif öncüsü (precursor) olarak denenmiş olsa da, yine de en popüler öncü malzemeler poliakrilonitril (PAN), viskoz rayon ve zift'dir (Tunçel vd., 2021). Endüstriyel faaliyet alanlarının genişlemesi birçok farklı alanda üretim tesislerinin kurulmasını da beraberinde getirmekte fakat bu durum aynı zamanda atık su problemlerini ve çevre kirliliğini de arttırmaktadır (Gupta ve Suhas, 2009). Son yıllarda artan çevre kirliliği, yüksek enerji gereksinimi ve en önemlisi sürdürülebilirlik gibi temel sorunlar yenilenebilir kaynaklardan elde edilen aktif karbonları değerli hale getirmiştir. Doğal selülozik liflerde, bir aktif karbon öncüsü olarak kullanılabiliyor olsa da (Hariri vd., 2024), rejenere selülozik bir lif olan viskoz rayonun sürekli filament yapısı onu diğer selüloz esaslı doğal liflere kıyasla öne çıkarmaktadır.

Selüloz esaslı aktif karbon üretiminde iki farklı yaklaşım benimsenmektedir. Bunlardan birincisi, selülozik lifin çok düşük ısıtma hızlarında piroliz edilmesidir ki bu durum uzun stabilizasyon süreleri nedeniyle çok iktisadi değildir. İkincisi ise; termal stabilizasyon öncesinde uygun güç tutuşur özellikli malzemelerin life aplikasyonudur (Dumanlı ve Windle, 2012). Bu yöntem dehidrasyon mekanizmasını iyileştirir ve ağırlık kaybını azaltarak daha yüksek kömürleşme verimi sağlamaktadır (Dumanlı ve Windle, 2012; X. Huang, 2009; Zeng vd., 2005). Bu nedenle günümüzde en yaygın kullanılan yöntemdir. Yenilenebilir bir biyopolimer olan selülozdan elde edilen viskoz rayon esaslı liflerin aktif karbona dönüşümü; 300°C'den daha düşük bir sıcaklıkta oksijen içeren bir ortamda termal olarak stabilizasyonu (oksidasyon), ardından inert bir ortamda ki genellikle azot ortamında 900°C civarında bir karbonizasyonu ve karbonize edilen liflerin karbondioksit ortamında 700°C ile 900°C arasındaki bir sıcaklıkta aktivasyonunu içermektedir (J.-M. Huang vd., 2001). Elde edilen aktif karbon liflerin mekanik ve fiziksel özelliklerinin yanı sıra mikro yapısı da termal stabilizasyon aşamasından oldukça fazla etkilenmektedir. Bu kritik aşama rayon liflerinin bir sonraki süreçlerde karşılaşabileceği yüksek sıcaklıklara hazırlamak için gerekli bir aşama olup genellikle 200°C ile 300°C arasındaki bir sıcaklıkta oksijen içeren bir ortamda gerçekleşmektedir (Worasuwannarak vd., 2003; Yang ve Yu, 1996). Fakat bu aşamadan önce, viskoz rayon lifleri çeşitli güç tutuşur özellikli kimyasal maddelerle modifiye edilebilmektedir. Bu kimyevi maddeler selülozun hidroksil grupları üzerinden yapıya bağlanarak termal stabilizasyon sürecini kısaltırlar, kömürleşme verimini artırırlar, daha az yanıcı gaz ve katran oluşumu sağlayarak bir nevi selülozun ayrışma mekanizmasını değiştirirler (Kandola vd., 1996). Kimyasal modifikasyonun uygulandığı işlemlerde viskoz rayon esaslı aktif karbon lif üretimi en genel olarak Şekil 1'deki proses adımlarından oluşmaktadır. Fakat mevcut çalışma sadece ilk iki adımı (kimyasal modifikasyon ve termal stabilizasyon) içermekte olup diğer üretim aşamaları bu çalışmanın konusu değildir.



Şekil 1. Viskoz Rayon Esaslı Aktif Karbon Üretim Adımları

Selülozik liflerin termal stabilizasyonunda en önemli reaksiyonlarından biri dehidrasyon reaksiyonlarıdır. Viskoz rayon liflerinin en temel yapıtaşı olan selülozun $(C_6H_{10}O_5)_n$ her bir glikoz birimi birden fazla hidroksil grup içermekte ve bu hidroksil grupların konumu selülozun dehidrasyonu üzerinde önemli bir etkiye sahiptir (Zhang vd., 2011). Termal stabilizasyon sırasında uygulanan ısıl işlemlerle birlikte ısıya maruz kalan selüloz yapısından hidroksil grupları su moleküllerine dönüşerek ayrılır ve böylece selüloz bir su molekülü kaybederek kısmen dehidrasyona uğramış olur. Yüksek sıcaklık dehidrasyonları sonucunda selülozun yüzeyindeki son hidrasyon tabakasının da uzaklaşması halinde, deformasyona bağlı kristal yapıda çok önemli değişimler meydana gelmektedir (Fang ve Catchmark, 2014). Bu nedenle dehidrasyon reaksiyonlarının kontrollü olarak gerçekleşmiş olması termal stabilizasyonun başarısı için önemlidir. Viskoz rayon liflerinin termal stabilizasyonunda da PAN liflerinin termal stabilizasyon aşamasındaki gibi çok yüksek olmayan ısıtma hızlarının kullanılması uygun olacaktır (Hou vd., 2008).

Mevcut çalışmada bir kimyasal modifikasyon maddesi olarak fosforik asidin seçilmesinin temel nedeni; ucuz, kolay temin edilebilir ve çevre dostu olmasında kaynaklanmaktadır. Önceki bir çalışmada (Tunçel, 2020) fosforik asidin

viskoz rayon liflerinin termal stabilizasyonuna olan etkisi sabit bir sıcaklıkta farklı stabilizasyon sürelerinde incelenmiştir ve detaylı bir yapısal karakterizasyon yapılmamıştır. Bu nedenle termal stabilizasyondan önce viskoz rayon lifinin termal kararlılığını iyileştirmek için, fosforik asidin potansiyel bir modifikasyon maddesi olarak kullanımıyla ilgili daha fazla araştırmanın gerekli olduğu belirlenmiş olup ayrıca bu çalışmada termal stabilizasyon süresi değil termal stabilizasyon sıcaklığı bir değişken olarak seçilmiştir. Bu çalışmanın temel amacı, termal stabilizasyon öncesinde gerçekleştirilen fosforik asit modifikasyonunun viskoz rayon liflerinin oksidasyonunu 160°C, 190°C, 220°C ve 250°C sıcaklıklarda nasıl etkilediğini belirlemek ve oluşan yapısal değişimi analiz etmektir. Yapısal karakterizasyonu tanımlamak için, kızılötesi spektroskopisi (FT-IR), X-ışını kırınımı (XRD), termogravimetrik analiz (TGA) ve diferansiyel taramalı kalorimetri (DSC) gibi teknikler kullanılmış olup böylece viskoz rayon liflerinin yapısal değişimleri hava ortamındaki sıcaklığın bir fonksiyonu olarak değerlendirilmiştir.

MATERYAL VE YÖNTEM

Materyalin Hazırlanması

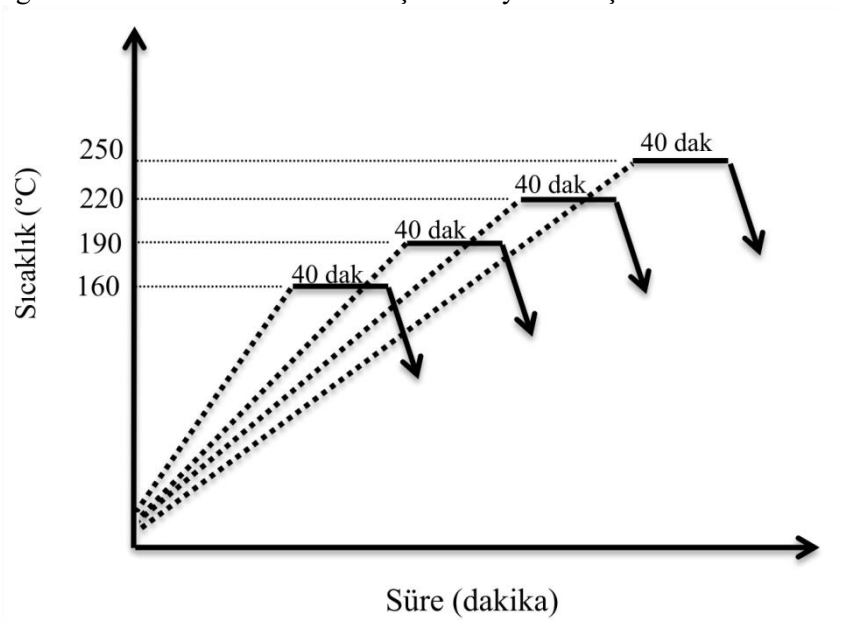
Mevcut çalışmada 32 tex iplik numarası ve 24 mikron lif kalınlığına sahip viskoz rayon bobin kullanılmıştır. Kimyasal modifikasyon için kullanılan fosforik asit ise %85 konsantrasyonda olup Kimetsan firmasından tedarik edilmiştir. Deneysel çalışmalar öncesinde kullanılacak olan iplikler seyreltik bir alkol çözeltisi içerisinde kısa süre bekletilmiş ve böylece lifin üretim aşamasından sonra yüzeyinde kalan yağların uzaklaştırılması sağlanmıştır. Daha sonra lifler taşmalı su ile yıkanmış ve ardından kurutulmuştur.

Kimyasal Modifikasyon

Kimyasal modifikasyon işlemi; termal stabilizasyon öncesinde, viskoz rayon liflerin %4'lük fosforik asit içeren sulu çözeltide 50°C'de 10 dakika süreyle muamele edilmesiyle gerçekleştirilmiştir. Hazırlanan çözeltinin işlem sıcaklığındaki pH değeri 1,45 olarak ölçülmüştür. Modifikasyon işlemi sonrasında lifler kurutulmuş, numunelerin işlem öncesi ve sonrası ağırlık farkları hesaplanmıştır. Bu hesaplamalar, yaklaşık %5 oranında bir kimyasal yükleme gerçekleştiğini göstermektedir. Kimyasal yükleme sonrasında iplik numarası 33,6 tex olarak ölçülmüştür.

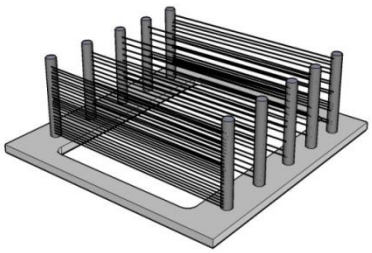
Termal Stabilizasyon

Viskoz rayon liflerin termal stabilizasyon işleminde tek adımlı bir ısıl işlem prosedürü kullanılmış ve Şekil 2'de gösterilmiştir. Bu prosedürü göre, kimyasal modifikasyon sonrasında viskoz rayon lifleri 160°C'den 250°C'ye kadar değişen 4 farklı stabilizasyon sıcaklığında hava sirkülasyonlu bir fırın içerisinde 40 dakika bekletilmiştir. Isıl işlemler sırasında 160°C'ye kadar, ısıtma hızı 2°C/dakika ve sonrasında 160°C ile 250°C arasında ısıtma hızı 1°C/dakika olarak uygulanırken, soğutma hızı dakikada 1°C olacak şekilde ayarlanmıştır.



Şekil 2. Tek Adımlı Termal Stabilizasyon Prosedürü

Termal stabilizasyon sırasından ipliklere herhangi bir ek gerilim uygulanmazken, numuneler Şekil 3'te görüldüğü gibi bir paslanmaz çelik levhaya sarılarak liflerdeki mevcut moleküler oryantasyonun kaybolmaması sağlanmıştır.



Şekil 3. Termal Stabilizasyon Sırasında İpliklerin Görünümü

Çalışma içerisinde elde edilen numunelere belirli kodlar verilmiş olup çalışmanın geri kalanında bu kodlar kullanılacaktır. Kimyasal modifikasyon sonrasında termal olarak stabilize edilen viskoz rayon numunelerine stabilizasyon sıcaklık ve süresine bağlı olarak verilen kodlar Tablo 1'de listelenmiştir.

Tablo 1. Termal Stabilizasyon Sonrası Elde Edilen Numunelerin Kodları

Numune kodu	Sıcaklık (°C)	Süre (dakika)
S1	160	40
S2	190	40
S3	220	40
S4	250	40

Veri Toplama

Kızılötesi spektroskopisi testleri, Perkin Elmer marka bir FT-IR cihazı kullanılarak 4000 cm^{-1} ile 450 cm^{-1} dalga sayısı arasındaki bölge için 2 cm^{-1} çözünürlük ile gerçekleştirildi. X-ışını kırınımı ölçümleri, 2θ açısı 5° ile 40° arasında değişen bir Bruker AXS D8 model XRD cihazıyla gerçekleştirildi. Termogravimetrik analiz ölçümlerinde Perkin Elmer TGA Diamond sistemi kullanılarak termogramlar oluşturuldu. Numuneler 950°C'lik maksimum sıcaklığa ulaşana kadar 10°C/dakika oranında ısıtmaya tabi tutuldu. İnert bir atmosfer sağlamak için, test boyunca 200 ml/dakika oranında sürekli bir azot gazı akışı uygulandı. Diferansiyel taramalı kalorimetri testleri, Perkin Elmer Diamond DSC sistemi kullanılarak gerçekleştirildi. DSC analizi sırasında uygulanan ısıtma hızı 10°C/dakika ve maksimum sıcaklık 425°C olarak ayarlandı.

X-ışını kristalinitesi (Xc), denklem (1) kullanılarak elde edildi. Buna göre; numunelerdeki kristalinite derecesini tahmin etmek için kristalin tepe noktalarının altında kalan alanın, toplam (kristalin+amorf) alana oranı baz alındı. Burada; Ac, kristalin tepe noktalarının toplam alanını verirken; Aa, amorf bölge alanını vermektedir.

$$\mathrm{Xc} = \frac{A_c}{A_a + A_c} \text{ x } 100\% \quad (1)$$

X-ışını dönüşüm indeksi (%), denklem (2) kullanılarak elde edildi. Burada ΣIo, ham viskoz rayon liflerinin tüm karakteristik XRD tepelerinin toplam şiddetini temsil ederken; ΣI, fosforik asit emdirilmiş ve ardından termal olarak stabilize edilmiş numunelerin tüm karakteristik XRD tepelerinin toplam şiddetini temsil etmektedir.

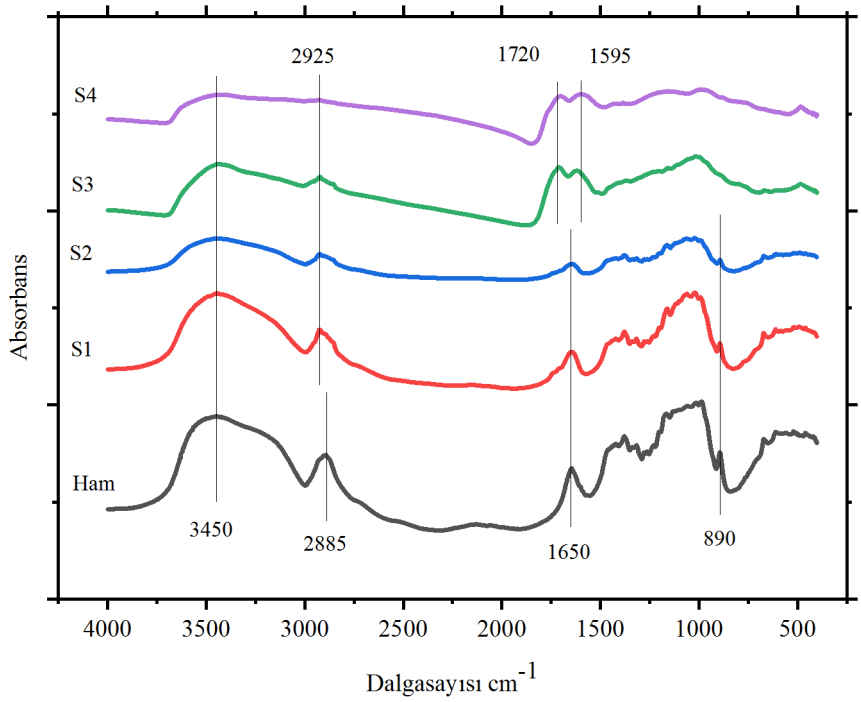
$$\mathrm{X-ışını\ dönüşüm\ indeksi}\ (\%) = \frac{\Sigma \mathrm{I_o} - \Sigma \mathrm{I}}{\Sigma \mathrm{I_o}} \text{ x } 100\% \quad (2)$$

BULGULAR VE TARTIŞMALAR

Kızılötesi Spektroskopisi (FT-IR)

Kızılötesi spektroskopisi, fosforik asit modifikasyonu sonrasında termal olarak stabilize edilen viskoz rayon liflerinin fonksiyonel gruplarındaki değişiklikleri izlemek için kullanıldı. Kimyasal modifikasyon için kullanılan fosforik asidin selüloz hidroksil grupları üzerinden life bağlandığı ve selülozun ayrışma mekanizmasını değiştirdiği bilinmektedir (Kandola vd., 1996). Şekil 4, ham ve kimyasal modifikasyon sonrası termal olarak stabilize edilen numunelerin 4000 ile 450 cm^{-1} dalga sayıları arasındaki kızılötesi spektrumlarını göstermektedir. Kimyasal

modifikasyon sonrası termal olarak stabilize edilen numunelerin kızılötesi spektrumlarının detaylı incelemesi, viskoz rayon liflerinin yapısındaki önemli değişimleri göstermiştir.



Şekil 4. Ham ve Kimyasal Modifikasyon Sonrası Termal Olarak Stabilize Edilen Viskoz Rayon Liflerinin Kızılötesi Spektrumları

Ham viskoz rayon liflerinin kızılötesi spektrumunda, 4000 ile 3000 cm^{-1} arasındaki bölge serbest molekül içi ve moleküller arası hidrojen bağlı OH grubu titreşimlerine tanımlanmaktadır. 3700 ile 3100 cm^{-1} dalga sayıları arasında merkezi 3450 cm^{-1} olan geniş yayvan bir tepe noktası görülmektedir. Bu geniş yayvan pik selülozun molekül içi hidrojen bağlı -OH gruplarının varlığını belirtmektedir. Stabilizasyon sıcaklığındaki artışa bağlı olarak bu tepe noktasının şiddetinin büyük oranda azaldığı fakat tam olarak yok olmadığı görülmektedir. Moleküller arası hidrojen bağlı -OH gerilme titreşimlerine atanan tepe noktası ise, merkezi 3175 cm^{-1} olan tepenin civarında yer almaktadır. Moleküller arası hidrojen bağlarının, molekül içi hidrojen bağlarına göre sıcaklık farklılıklarına daha hassas olduğu bilinmektedir (Dadashian vd., 2005).

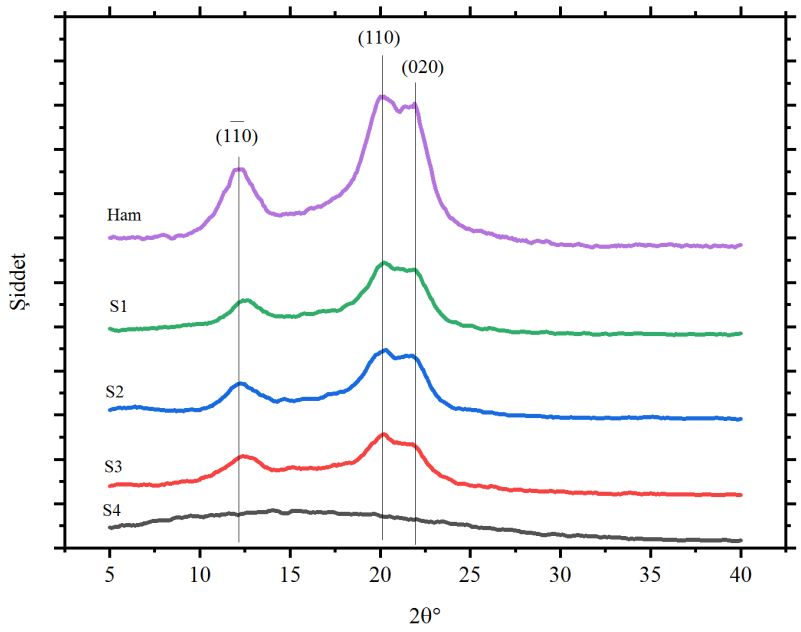
Stabilizasyon sırasındaki ısıl işlemler nedeniyle selüloz yapısında bulunan hidroksil grupları moleküller arası ya da molekül içi reaksiyonlara bağlı olarak su kaybetmektedir. Bunun sonucunda, hidroksil grupların sayısında azalma olur ve -OH gerilme titreşimlerinin şiddeti azalmaktadır. Bu durum, stabilizasyon aşaması boyunca meydana gelen dehidrasyon reaksiyonlarının açık bir göstergesi olarak kabul edilmektedir. 3000 ile 2800 cm^{-1} dalga sayıları arasında metilen gerilme titreşimleri yer almaktadır. Ham viskoz rayon spektrumunda 2885 cm^{-1}'de konumlanan CH_2 gerilme titreşimlerinin konumu, S1, S2 ve S3 numunelerinin spektrumlarında 2925 cm^{-1} dalga sayısına doğru kaymıştır. Bu durum, kimyasal modifikasyon sonrası düşük stabilizasyon sıcaklıklarında dahi metilen gruplarında önemli moleküler değişiklikler oluşmasının bir göstergesidir. CH_2 gerilmeleri de stabilizasyon sıcaklığı arttıkça benzer bir şekilde pik şiddetlerinde azalma sergilemiştir. Bu değişim, dehidrojenasyon reaksiyonlarının meydana geldiğini göstermektedir. Isıl işlem sıcaklıklarındaki artışa bağlı olarak, hidroksil ve metilen gruplarında meydana gelen hidrojen kayıpları dehidrasyon ve dehidrojenasyon reaksiyonlarının birlikte gerçekleştiğini düşündürmektedir.

Ham viskoz rayon spektrumunda 1650 cm^{-1}'de konumlanan bir tepe noktası görülmekte olup bu tepenin varlığı ham numunenin fiziksel olarak emmiş olduğu nemden kaynaklanmaktadır ve şiddetini sıcaklık artışıyla birlikte giderek kaybetmektedir. 1720 cm^{-1}'deki karbonil bandı S3 ve S4 numunelerinin termal olarak stabilize edildiği işlem sıcaklıklarında güçlü ve geniş bir dublet sergiler ve yaklaşık 1595 cm^{-1}'de C=C gerilme titreşimine bağlı yeni bir tepe noktası ortaya çıkar (Gül, 2025b). Özellikle S4 numunesinde karbon karbon çift bağların daha şiddetli olduğu görülmüştür. Bu değişim, stabilize edilmiş numunelerde aromatik yapıların varlığını desteklemektedir.

Ham viskoz rayon liflerinin yaklaşık olarak 1400 ile 800 cm^{-1} dalga sayıları arasında selüloz-II kristal yapısından kaynaklanan bazı absorbsiyon pikleri gözükmektedir (Carrillo vd., 2003). Özellikle 890 cm^{-1}'de konumlanıp selülozik halkadaki C-O-C titreşimlerine atanan tepe noktasının şiddetinin ısıl işlem sıcaklıklarındaki artışla birlikte azaldığı ve S3 ile S4 numunelerinde şiddetini tamamen kaybettiği görülmüştür. Bu durum, aromatik yapıların oluşumu nedeniyle selüloz halkasından hidrojen atomlarının kademeli olarak ortadan kalktığını göstermektedir (Puziy vd., 2005). Kızılötesi spektroskopisi sonuçları, termal stabilizasyon sırasındaki kimyasal reaksiyonların fosforik asit tarafından katalize edildiğini göstermiştir.

X-Işını Kırınımı (XRD)

X-ışını kırınımı tekniği, fosforik asit modifikasyonu sonrasında termal olarak stabilize edilen viskoz rayon liflerinin kristal yapısındaki değişiklikleri izlemek için kullanıldı. Yaş çekim yöntemiyle elde edilen viskoz rayon lifinin kristal yapısı pamuk lifinin selüloz-I yapısına karşılık selüloz-II olarak ifade edilmektedir (Colom ve Carrillo, 2002). Şekil 5, ham ve kimyasal modifikasyon sonrası termal olarak stabilize edilen numunelerin 5° ile 40° (2θ) açıları arasındaki bölge için X-ışını kırınım izlerini göstermektedir.



Şekil 5. Ham ve Kimyasal Modifikasyon Sonrası Termal Olarak Stabilize Edilen Viskoz Rayon Liflerinin X-Işını Kırınım İzleri

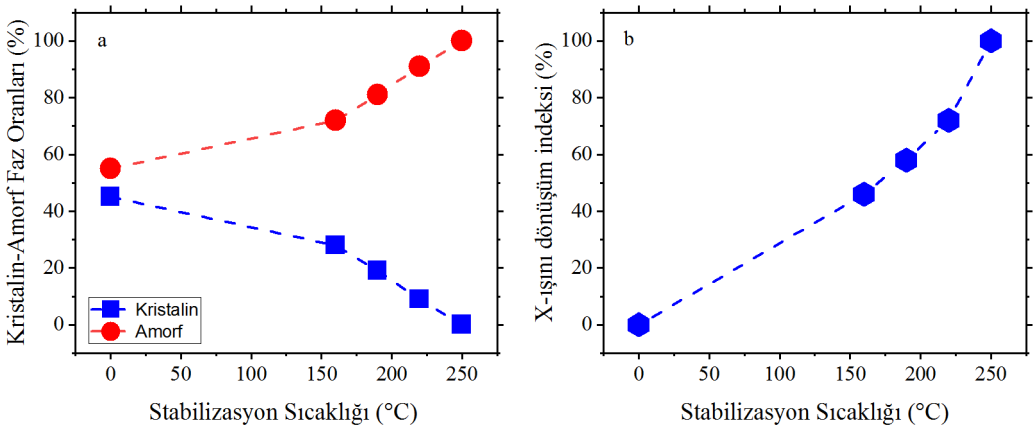
Tüm numunelerin X-ışını kırınım izlerinin incelenmesi 3 farklı yansımayı ortaya çıkarmıştır. Ham viskoz rayon lifinin X-ışını kırınım izi; ($1\bar{1}0$), (110) ve (020) olarak indekslenen, 0,441 nm, 0,728 nm ve 0,405 nm d-aralıklarına sahip 3 karakteristik tepe noktasıyla ifade edilir. Bu kırınım izleri için birim hücre parametreleri (a=0,810 nm, b=0,903 nm, c=1,031 nm ve γ=117,1º) selüloz-II kristalinin monoklinik fazının bir karakteristiği olarak karşımıza çıkmaktadır. (110) yansımasının şiddeti, ($1\bar{1}0$) ve (020) yansımalarının şiddetleriyle kıyaslandığında en güçlü kırınım izine sahiptir. Bu durum, zincir moleküllerinin selüloz halkalarının (110) düzleminde zincirler arası hidrojen bağları oluşturmasından kaynaklanabilir (Chaudhuri vd., 1983).

Ham numune selüloz-II yapısının kristalinitesi stabilizasyon sırasındaki ısıl işlem sıcaklıklarındaki artışa bağlı olarak önemli değişimler sergilemiştir. Ham viskoz rayon lifinin ($1\bar{1}0$), (110) ve (020) olarak indekslenen kırınım izleri için sırasıyla 2θ açıları şu şekildedir: 12,2º - 20,1º ve 21,9º'dir. Verilen kırınım izlerine dayanarak, görünür kristalinitenin stabilizasyon sıcaklığının artmasıyla kademeli bir şekilde azaldığı görülmektedir. S1, S2 ve S3 numunelerinin X-ışını kırınım izlerine dikkatli bir şekilde bakıldığında, 3 farklı 2θ açısında bulunan yansıma şiddetlerinin de kademeli olarak azaldığı görülmüş olmasına rağmen hala 2θ =20,1º'de indekslenen (110) yansımasının diğerlerinden daha şiddetli olduğu fark edilmektedir. Bu durum, tipik bir dekristalizasyon yani amorflaşma sürecinin gerçekleştiğini göstermektedir ve bu süreç termal stabilizasyon boyunca devam etmiştir. Özellikle S4 numunesi için termal stabilizasyon sonrasında selüloz-II kristal yapısının tamamen kaybolduğu ve %100

oranında bir amorflaşma gerçekleştiği görülmüştür. Fakat S1, S2 ve S3 numunelerinin ise azda olsa selüloz-II kristal yapısını koruduğu anlaşılmaktadır.

(110) yansımanın şiddetinin artan ısıl işlem sıcaklılarıyla ilişkili olarak kademeli bir şekilde azalması, (110) düzlemindeki zincirler arası hidrojen bağlarının kimyasal modifikasyon sonrası gerçekleşen stabilizasyon sıcaklıklarıyla ortadan kaybolması şeklinde yorumlanabilir (Chaudhuri vd., 1983). Bu durum kızılötesi spektroskopisinden elde edilen verilerle de tutarlı gözükmektedir. ($1\bar{1}0$) ve (020) yansımalarının kademeli olarak azalması muhtemelen oksidatif stabilizasyon aşaması sırasında gerçekleşen dekristalizasyon sürecinin neticesinde bozulan kafes yapısından kaynaklanmaktadır. Ayrıca, artan ısıl işlem sıcaklıklarıyla birlikte tüm yansıma zirvelerinin genişlikleri de kristalit boyutunun giderek azaldığını gösterir derecede genişledi. Bu genişleme, artan sıcaklıkla birlikte kristal kafeste düzensiz bir yapının oluşumunun bir başka göstergesidir. Aslında, ısıl işlem sıcaklığının 160ºC'den 250ºC'ye artması sonucu kristalin yapı öncelikle kristalden para-kristaline ve ardından daha sonra amorf faza dönüşmektedir.

X-ışını kırınımı izlerinden elde edilen tepelerin altında kalan alanlar, denklem (1) kullanılarak kristalin ve amorf fazların oranlarını belirlemek için kullanıldı. Formülasyon sonucu elde edilen veriler, ısıl işlem sıcaklığına bağlı olarak azalan görünür X-ışını kristalinitesi ve artan amorf faz oranlarını göstermektedir. Görünür kristalinitenin oranı %45'ten %0'a düşerken, amorf fazın oranı %55'ten %100'e ulaşmıştır (Şekil 6a). Selüloz II yansımalarının şiddetleri, X-ışını dönüşüm indeksini belirlemek için denklem (2) kullanılarak hesaplanmıştır. S1 numunesinden (160ºC) S4 numunesinin (250ºC) elde edilmesine kadar ki geçen sürede sıcaklıkta meydana gelen artış nedeniyle, X-ışını dönüşüm indeks değeri %46'dan %100'e artış göstermiştir (Şekil 6b). Fosforik asit ön işleminin ardından hava ortamında gerçekleşen stabilizasyon, selüloz-II kristalinin yapısını bozarak, amorf faz miktarını ve merdiven benzeri (ladder) yapılara sahip aromatik grupların oranını artırmıştır.



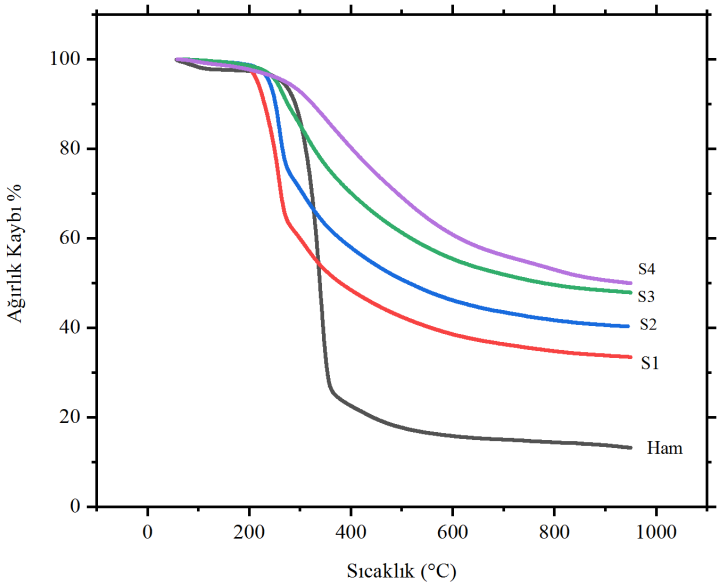
Şekil 6. a. Kristalin ve Amorf Faz Oranlarındaki Değişim (%) **b.** X-Işını Dönüşüm İndeksi (%)

Termogravimetrik Analiz (TGA)

Termogravimetrik analiz, fosforik asit modifikasyonu sonrasında termal olarak stabilize edilen viskoz rayon liflerinin stabilizasyon sıcaklığının bir fonksiyonu olarak termal kararlılıklarını izlemek için kullanıldı. Termal analiz eğrileri kullanılarak, viskoz rayonun fosforik asit modifikasyonu ve çeşitli sıcaklıklarda stabilizasyonun liflerin pirolizi üzerindeki etkisi açıklanmaktadır. Şekil 7, ham ve kimyasal modifikasyon sonrası termal olarak stabilize edilen numunelerin 50°C ile 950°C arasındaki bölge için TGA termogramlarını göstermektedir. Daha küçük sıcaklık aralığında meydana gelen ağırlık kayıplarının daha hızlı ayrışma reaksiyonları anlamına geldiği ve bunun da daha düşük kömürleşme verimiyle ilişkili olduğu bilinmektedir.

Deneysel numunelerin termal bozunma sırasındaki ağırlık kayıp oranları ve tepe noktalarının tespiti için termogravimetrik eğrilerin birinci dereceden türevleri alınmıştır ve elde edilen yeni türev termogravimetrik eğriler Şekil 8'de verilmiştir. Ham viskoz rayonun TGA termogramına göre 250°C'ye kadar olan ağırlık kayıpları selülozun dehidrasyonuyla ilişkilidir. Ardından ağırlık kayıplarının 380°C'ye kadar selülozun termal olarak ayrışmasının devamıyla ilerlediği ve 340°C'de maksimum ağırlık kaybının oluştuğu gözlendi. 950°C'nin sonunda ham viskoz rayon için kömürleşme verimi %13,2 olarak bulundu. Bu oran çok fazla sayıda termal parçalanma işleminin gerçekleştiğini ve çok yüksek oranda ağırlık kaybının ortaya çıktığını göstermiştir. Kimyasal modifikasyon sonrası

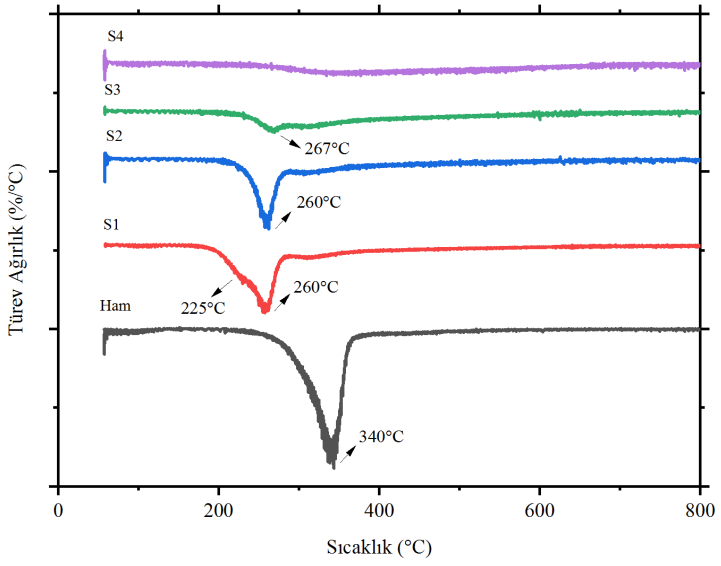
termal olarak stabilize edilen numunelerin (S1, S2, S3 ve S4) TGA termogramlarının daha geniş sıcaklık aralığına genişlediği görülmüştür. Ayrıca türev termogravimetrik eğrilerindeki maksimum ağırlık kaybının yaşandığı sıcaklık değerlerinin ise daha düşük sıcaklıklara kaydığı anlaşılmıştır.



Şekil 7. Ham ve Kimyasal Modifikasyon Sonrası Termal Olarak Stabilize Edilen Viskoz Rayon Liflerinin TGA Termogramları

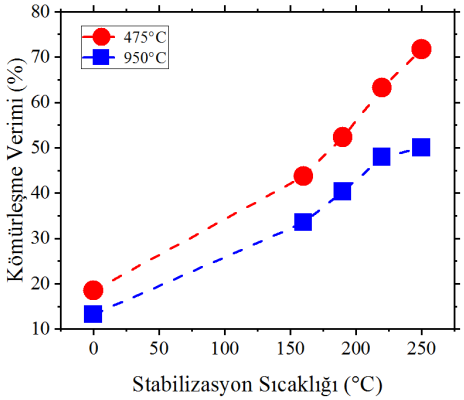
Ham viskoz rayon 340°C'de maksimum ayrışma hızıyla keskin ve güçlü bir pik gösterirken, S1 numunesi 260°C'de maksimum ayrışma hızına sahip keskin bir pik ve 225°C'de omuz şeklinde görünen küçük ve geniş bir tepe gösterdi. Bu tepe, selüloz yapısının moleküler ağırlığındaki önemli değişimlere işarettir. S2 numunesi için maksimum termal ayrışma sıcaklığı da 260°C'de gerçekleşti fakat bu numune için herhangi bir ekstra omuz şeklinde tepe gözlenmedi. S3 numunesinde ise maksimum termal ayrışma 267°C'de gerçekleşti ve son olarak S4 numunesinde selüloz-II yapısının tamamen bozulması nedeniyle çok fazla genişlemiş zayıf bir tepe oluşumu meydana geldi.

S1 numunesinde 950°C'deki kömürleşme verimi %13,2'den %33,5'e, S2 numunesinde %40,3'e, S3 numunesinde %47,9'a ve son olarak S4 numunesinde ise %50'ye kadar yükseldiği görülmüştür (Şekil 9). Özellikle stabilizasyonun erken sıcaklıklarında kömürleşme veriminde meydana gelen yükseliş oranının daha fazla olduğu anlaşılmıştır.



Şekil 8. Ham ve Kimyasal Modifikasyon Sonrası Termal Olarak Stabilize Edilen Viskoz Rayon Liflerinin Türev Termogravimetrik Eğrileri

Sonuç olarak, Fosforik asidin etkili bir kataliz maddesi olarak dâhil edilmesinin ardından gerçekleşen termal stabilizasyonun selülozun maksimum bozunma sıcaklığında önemli bir düşüşe yol açtığı, kömürleşme verimini artırdığı, katranlı maddelerin oluşumunu engellediği ve numuneleri karbonizasyon ve aktivasyon gibi aşamalara hazır hale getirdiği anlaşılmıştır.

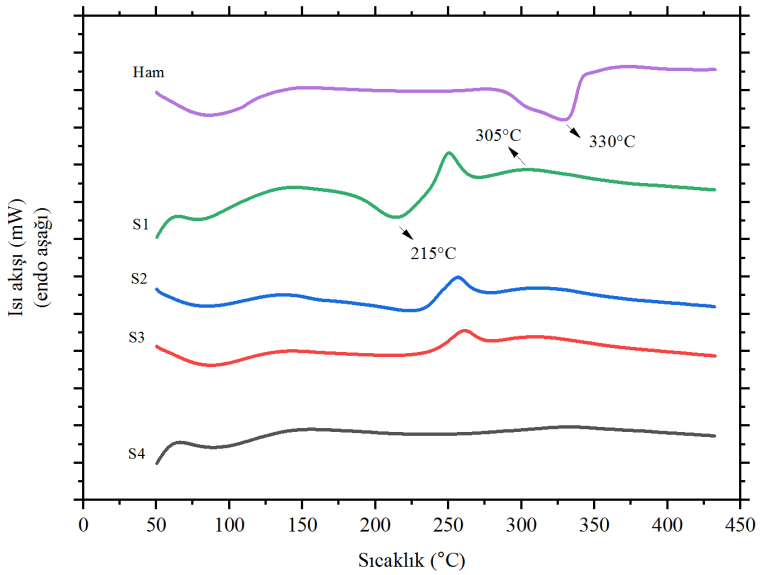


Şekil 9. 475°C ve 950°C'de Kömürleşme Verimleri (%)

Diferansiyel Taramalı Kalorimetri (DSC)

Diferansiyel taramalı kalorimetri, fosforik asit modifikasyonu sonrasında termal olarak stabilize edilen viskoz rayon liflerinin stabilizasyon sıcaklığının bir fonksiyonu olarak ısı kapasitesindeki değişim izlenerek termal özellikleri hakkında bilgi sahibi olmak için kullanıldı. Şekil 10, ham ve kimyasal modifikasyon sonrası termal olarak stabilize edilen numunelerin 50°C ile 425°C arasındaki bölge için DSC termogramlarını göstermektedir. Ham viskoz rayonun merkezi 85°C'de olan bir endoterm tepe verdiği görülmüş olup bu geniş yayvan tepenin suyun fiziksel emilimi nedeniyle oluşan nemin buharlaşmasıyla ilişkili olduğu bilinmektedir. Diğer yandan, 283°C sıcaklıkta başlayıp 345°C'ye kadar devam eden ve merkezi 330°C olan başka bir endotermik tepe noktası görülmektedir. Bu endoterm pik, selülozun depolimerizasyonunun bir sonucu olarak ortaya çıkmıştır.

Ham viskoz rayonun pirolizi sırasında dehidrasyon ve depolimerizasyon gibi reaksiyonlar bir arada gerçekleşmektedir. Levoglukozan tipik olarak depolimerizasyonun bir yan ürünü olarak üretilir ve ayrışma ürünlerinin buharlaşması sırasında bir endoterm veya aromatizasyon sırasında ekzotermik bir aktivite sergiler. Ham numunenin DSC termogramında 250°C'ye kadarki bölgede ekzotermik tepe noktalarının bulunmaması, düşük karbon verimine dayalı buharlaşma yan ürünlerinin üretimiyle sonuçlanan depolimerizasyon ve dehidrasyon reaksiyonlarını içeren bazı ekzotermik reaksiyonların varlığını da düşündürmektedir.



Şekil 10. Ham ve Kimyasal Modifikasyon Sonrası Termal Olarak Stabilize Edilen Viskoz Rayon Liflerinin DSC Termogramları

Fosforik asit etkileşiminde, depolimerizasyondan ziyade dehidrasyonu destekleyen iki endotermik tepe noktasının oluşması beklenir. Fosforik asitle ön işlem, ağırlıklı olarak faydalı dehidrasyon süreçlerinin geliştirilmesi nedeniyle karbon üretimini artırır. Termal olarak stabilize edilmiş numunelerin DSC termogramları, fosforik asit modifikasyonunun ve ardından gerçekleştirilen stabilizasyonun önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir. Selülozun kimyasal modifikasyonu, ham numune termogramlarında 330°C olan endotermik tepe noktasının S1 numunesi için 215°C'ye doğru yaklaşık 115°C'lik bir kayma ortaya çıkardığını göstermiştir. Fosforik asitle ön işlemden geçirilip ardından hava ortamında stabilizasyona tabi tutulan viskoz rayonun endoterm pik sıcaklığında meydana gelen bu kayma, X-ışını kırınımı verilerinden elde edilen bilgiler ışığında kristalinitedeki azalmadan kaynaklanabilmektedir.

Isıl işlem sıcaklıklarındaki artışla birlikte bu endoterm tepe noktası altında kalan alan da giderek azalmıştır. Endotermik alanın azalması ve sonunda ortadan kaybolması, fosforik asitle modifikasyonun termal işlemler sırasında gerçekleşen depolimerizasyon olaylarını geciktirdiğini göstermektedir. Bu durum, aynı zamanda TGA'dan elde edilen kömürleşme verim değerlerinin de neden daha yüksek olarak bulunduğunu açıklamaktadır. Ayrıca, S1 numunesinde selülozun dehidrasyonu nedeniyle 90°C ile 210°C arasında beliren ve artan stabilizasyon sıcaklığıyla azalan bir ekzoterm tepe gözlenmiştir. Bunun dışında diğer bir ekzoterm ise 275°C ile 380°C arasında merkezi 305°C olan tepe noktasıdır. Bu tepe noktasının levoglukozan ayrışma yan ürünlerinin oksidasyonuyla bağlantılı olduğu düşünülmektedir.

SONUÇLAR

Bu çalışmada, viskoz rayon liflerinin fosforik asit ile kimyasal modifikasyonu sonrası termal stabilizasyon süreçleri incelenmiş ve yapısal değişiklikler detaylı bir şekilde analiz edilmiştir. Kimyasal modifikasyon, liflerin termal stabilizasyon performansını artırarak karbonizasyon gibi ileri süreçlere hazırlanmasını sağlamıştır. Termal stabilizasyon sırasında farklı sıcaklıklarda (160°C, 190°C, 220°C ve 250°C) gözlemlenen reaksiyonlar ve yapı değişiklikleri, liflerin fiziksel ve kimyasal özelliklerine önemli katkılar sağlamıştır.

FT-IR analizleri, fosforik asidin selülozun hidroksil gruplarına bağlanarak dehidrasyon reaksiyonlarını hızlandırdığını ve aromatik yapıların oluşumunu desteklediğini göstermiştir. XRD sonuçları, selüloz-II kristal yapısının artan stabilizasyon sıcaklıklarında amorf faza dönüştüğünü, özellikle 250°C'de tamamen kaybolarak %100 amorf bir yapıya ulaştığını ortaya koymuştur. TGA analizleri, fosforik asit modifikasyonunun termal bozunmayı düzenlediğini ve kömürleşme verimini artırdığını ortaya koymuştur. Ham viskoz rayonun 950°C'deki kömürleşme verimi %13,2 iken, S4 numunesinde bu oran %50'ye yükselmiştir. Bu, fosforik asidin etkili bir katalizör olarak ayrışmayı kontrol ederek katran oluşumunu engellediğini ve karbonizasyon verimliliğini artırdığını göstermektedir. DSC analizlerinde ise endotermik pik sıcaklıklarının modifikasyon sonrasında belirgin bir şekilde azaldığı ve dehidrasyon mekanizmalarının hızlandığı gözlemlenmiştir. Çalışmanın bulguları, fosforik asit modifikasyonunun viskoz rayon liflerinin yapısal dayanıklılığını artırarak karbonizasyon süreçlerine uygun hale getirdiğini ve aktif karbon lif üretiminde önemli bir katkı sağladığını göstermektedir. Kimyasal modifikasyonun liflerin termal stabilizasyon sürecine olan etkisi, düşük sıcaklıklarda bile yüksek karbonizasyon verimi ve azaltılmış yan ürün oluşumu sağlamıştır.

Sonuç olarak, fosforik asit ile modifiye edilmiş viskoz rayon lifleri, çevre dostu ve ekonomik özellikleriyle sürdürülebilir aktif karbon üretimi için potansiyel bir malzeme olarak öne çıkmaktadır. Bu çalışma, viskoz rayon liflerinin kimyasal modifikasyon ve termal stabilizasyon süreçlerinin optimizasyonuna yönelik önemli bir referans sağlamaktadır. Gelecekteki çalışmalar, farklı kimyasal modifikasyon ajanlarının ve daha ileri süreçlerin etkisini inceleyerek bu alandaki bilgi birikimini artıracaktır.

KAYNAKLAR

Carrillo, F., Colom, X., Valldeperas, J., Evans, D., Huson, M., & Church, J. (2003). Structural Characterization and Properties of Lyocell Fibers after Fibrillation and Enzymatic Defibrillation Finishing Treatments. *Textile Research Journal, 73*(11), 1024–1030. https://doi.org/10.1177/004051750307301114

Chaudhuri, N. K., Aravindanath, S., & Betrabet, S. M. (1983). Electron Diffraction Study of Regenerated Cellulose Fibers. *Textile Research Journal, 53*(11), 701–705. https://doi.org/10.1177/004051758305301111

Colom, X., & Carrillo, F. (2002). Crystallinity Changes in Lyocell and Viscose-type Fibres by Caustic Treatment. *European Polymer Journal, 38*(11), 2225–2230. https://doi.org/10.1016/S0014-3057(02)00132-5

Dadashian, F., Yaghoobi, Z., & Wilding, M. A. (2005). Thermal Behaviour of Lyocell Fibres. *Polymer Testing, 24*(8), 969–977. https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2005.08.005

Demirel, T., Tunçel, K. Ş., & Karacan, I. (2024). An Evaluation of the Beneficial Effects of Polyamide 6's Thermal Stabilization by Ferric Chloride Complexation as a Novel Carbon Fiber Precursor. *Fibers and Polymers*, 25, 1301–1312. https://doi.org/10.1007/s12221-024-00523-6

Dumanlı, A. G., & Windle, A. H. (2012). Carbon Fibres from Cellulosic Precursors: A review. *Journal of Materials Science, 47*(10), 4236–4250. https://doi.org/10.1007/s10853-011-6081-8

Fang, L., & Catchmark, J. M. (2014). Structure Characterization of Native Cellulose during Dehydration and Rehydration. *Cellulose, 21*(6), 3951–3963. https://doi.org/10.1007/s10570-014-0435-8

Gupta, V. K. & Suhas. (2009). Application of Low-cost Adsorbents for Dye Removal – A review. *Journal of Environmental Management, 90*(8), 2313–2342. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2008.11.017

Gül, A. (2025a). A Study on Structural Changes during the Thermal Stabilization Stage of Hemp Fibers Impregnated with Phosphoric Acid Before Carbonization and Activation. *Fibers and Polymers*, Early Access. https://doi.org/10.1007/s12221-024-00835-7

Gül, A. (2025b). Investigation of the Structural Transformations of Phosphoric Acid Impregnated Viscose Rayon Fibers during the Thermal Stabilization Stage before Carbonization. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 40*(2), 749–760. https://doi.org/10.17341/gazimmfd.1357056

Hariri, H., Tunçel, K. Ş., & Karacan, I. (2024). Structure and Properties of Thermally Stabilized and Ecologically Friendly Organic Cotton Fibers as a New Activated Carbon Fiber Precursor. *Fibers and Polymers, 25*(8), 2925–2933. https://doi.org/10.1007/s12221-024-00648-8

Hina, K., Zou, H., Qian, W., Zuo, D., & Yi, C. (2018). Preparation and Performance Comparison of Cellulose-based Activated Carbon Fibres. *Cellulose, 25*(1), 607–617. https://doi.org/10.1007/s10570-017-1560-y

Hou, Y., Sun, T., Wang, H., & Wu, D. (2008). Effect of Heating Rate on the Chemical Reaction during Stabilization of Polyacrylonitrile Fibers. *Textile Research Journal, 78*(9), 806–811. https://doi.org/10.1177/0040517507090500

Huang, J.-M., Wang, I.-J., & Wang, C.-H. (2001). Preparation and Adsorptive Properties of Cellulose-based Activated Carbon Tows from Cellulose Filaments. *Journal of Polymer Research, 8*(3), 201–207. https://doi.org/10.1007/s10965-006-0152-6

Huang, X. (2009). Fabrication and Properties of Carbon Fibers. *Materials, 2*(4), 2369–2403. https://doi.org/10.3390/ma2042369

Kandola, B. K., Horrocks, A. R., Price, D., & Coleman, G. V. (1996). Flame-Retardant Treatments of Cellulose and Their Influence on the Mechanism of Cellulose Pyrolysis. *Journal of Macromolecular Science, Part C: Polymer Reviews*. https://doi.org/10.1080/15321799608014859

Puziy, A. M., Poddubnaya, O. I., Martínez-Alonso, A., Suárez-García, F., & Tascón, J. M. D. (2005). Surface Chemistry of Phosphorus-containing Carbons of Lignocellulosic Origin. *Carbon, 43*(14), 2857–2868. https://doi.org/10.1016/j.carbon.2005.06.014

Rahman, M. M., Demirel, T., Tunçel, K. Ş., & Karacan, I. (2022). The Beneficial Effect of Eco-friendly Chemical Impregnation on the Thermal Stabilization Process of Poly(hexamethylene adipamide) Multifilament. *Journal of Molecular Structure*, 1259, 132718. https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2022.132718

Röding, T., Langer, J., Barbosa, T. M., Bouhrara, M., & Gries, T. (2022). A Review of Polyethylene-based Carbon Fiber Manufacturing. *Applied Research,*1(3), e202100013. https://doi.org/10.1002/appl.202100013

Sun, J., Wu, L., & Wang, Q. (2005). Comparison about the Structure and Properties of PAN-based Activated Carbon Hollow Fibers Pretreated with Different Compounds Containing Phosphorus. *Journal of Applied Polymer Science, 96*(2), 294–300. https://doi.org/10.1002/app.21385

Tunçel, K. Ş. (2020). Fosforik Asidin Rejenere Selüloz Esaslı Lifler Üzerine Etkisi. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 8*(2), 605–611. https://doi.org/10.21923/jesd.516920

Tunçel, K. Ş., Demirel, T., & Karacan, I. (2021). Poliakrilonitril Esaslı Karbon Lif Özelliklerini Etkileyen Faktörler Ve Alternatif Stabilizasyon Çalışmaları. In B. Nergis, S. Bardak, M. Kayar, & A. F. Mendi (Eds.), *Mühendislik Alanında Araştırma ve Değerlendirmeler* (1st ed., pp. 67–96). Ankara: Gece Kitaplığı.

Worasuwannarak, N., Hatori, S., Nakagawa, H., & Miura, K. (2003). Effect of Oxidation Pre-treatment at 220 to 270 °C on the Carbonization and Activation Behavior of Phenolic Resin Fiber. *Carbon*, *41*(5), 933–944. https://doi.org/10.1016/S0008-6223(02)00426-8

Yang, M.-C., & Yu, D.-G. (1996). Influence of Oxidation Conditions on Polyacrylonitrile-Based, Activated Hollow Carbon Fibers. *Textile Research Journal*, *66*(2), 115–121. https://doi.org/10.1177/004051759606600209

Zeng, F., Pan, D., & Pan, N. (2005). Choosing the Impregnants by Thermogravimetric Analysis for Preparing Rayon-Based Carbon Fibers. *Journal of Inorganic and Organometallic Polymers and Materials*, *15*(2), 261–267. https://doi.org/10.1007/s10904-005-5543-3

Zhang, M., Geng, Z., & Yu, Y. (2011). Density Functional Theory (DFT) Study on the Dehydration of Cellulose. *Energy & Fuels*, *25*(6), 2664–2670. https://doi.org/10.1021/ef101619e

KSÜ Mühendislik Bilimleri Dergisi, 28(2), 2025
Araştırma Makalesi

KSU J Eng Sci, 28(2), 2025
Research Article

Kahramanmaras Sutcu Imam University
Journal of Engineering Sciences

Geliş Tarihi : 10.01.2025
Kabul Tarihi : 22.01.2025

Received Date : 10.01.2025
Accepted Date : 22.01.2025

HAVA GÖRÜNTÜLERİNİN DERİN ÖĞRENMESİ KULLANILARAK DAĞINIK FOTOVOLTAİK PİLLERİN OTOMATİK HARİTALANMASI VE SEGMENTASYONU

AUTOMATIC MAPPING AND SEGMENTATION OF SCATTERED PHOTOVOLTAIC BATTERIES USING DEEP LEARNING OF AERIAL IMAGERY

Sinan ALTUN[1] (ORCID: 0000-0002-2356-0460)

[1] Kahramanmaraş İstiklal İmam Üniversitesi, Yapı İşleri ve Teknik Daire Başkanlığı, Kahramanmaraş, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Sinan ALTUN, s.altun@yaani.com

ÖZET

Güneş enerjisi sistemleri arasında fotovoltaik piller aracılığıyla elektrik enerjisi üretimi, dünya genelinde yaygın bir eğilim haline gelmiştir. Güneş enerjisinin sınırsız bir kaynak olarak değerlendirilmesi ve geleneksel enerji santrallerinin yüksek sera gazı emisyonlarının fotovoltaik pillerle elektrik üretiminde bir engel teşkil etmemesi, küresel ısınmanın tehdit oluşturduğu günümüzde bu yöntemi oldukça cazip kılmaktadır. Bu çalışmada, Türkiye'nin önde gelen üç metropolü olan İstanbul, Ankara ve İzmir'deki dağıtık fotovoltaik sistemler, hava görüntüleri aracılığıyla incelenmiştir. İnceleme süreci, derin öğrenme teknikleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bilgilerimize göre, Türkiye'de bu alanda gerçekleştirilen ilk araştırmadır. Ülkede fotovoltaik sistemlere dair hava görüntülerini içeren bir veri seti bulunmadığı için, test veri setinin oluşturulmasında Google Earth platformu kullanılmıştır. Çalışmanın amacı, dünya genelinde ilgi gören hava fotoğraflarını kullanarak Türkiye'de güneş enerjisi sistemleri pazarının büyüme potansiyelini araştırmaktır. Elde edilen sınıflandırma ve segmentasyon sonuçları başarılı olup, dünya genelindeki benzer hava görüntüleri ile Türkiye için güneş enerjisi sistemleri pazar analizi yapılabileceğini ortaya koymaktadır. Sınıflandırma skorları: AlexNet AUC skoru 0.9, GoogLeNet 0.87 ve Inception için 0.83

Anahtar Kelimeler: Fotovoltaik, hava görüntüleri, derin öğrenme, görüntü segmentasyonu

ABSTRACT

Among solar energy systems, the generation of electrical energy through photovoltaic cells has become a widespread trend worldwide. The fact that solar energy is considered as an unlimited resource and the high greenhouse gas emissions of conventional power plants do not constitute an obstacle in electricity generation with photovoltaic cells makes this method very attractive today, when global warming is a threat. In this study, distributed photovoltaic systems in three leading metropolises of Turkey, Istanbul, Ankara, and Izmir, are analysed through aerial imagery. The investigation process was carried out using deep learning techniques. To the best of our knowledge, this is the first research in this field in Turkey. Since there is no dataset containing aerial images of photovoltaic systems in the country, Google Earth platform was used to create the test dataset. The aim of the study is to investigate the growth potential of the solar energy systems market in Turkey by using aerial photographs, which have attracted worldwide attention. The classification and segmentation results obtained are successful and reveal that solar energy systems market analysis can be made for Turkey with similar aerial images around the world. Classification scores: AUC value is 0.9 for AlexNet, 0.87 for GoogLeNet, and 0.83 for Inception.

Keywords: Photovoltaic, Aerial imagery, Deep learning, Image segmentation

ToCite: ALTUN, S., (2025). AUTOMATİC MAPPİNG AND SEGMENTATİON OF SCATTERED PHOTOVOLTAİC BATTERİES USİNG DEEP LEARNİNG OF AERİAL IMAGERY. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 28(2), 835-850.

INTRODUCTION

Human society is progressively harnessing solar radiation for energy production. In 2020, global electricity consumption for building heating reached 260,300 TWh, representing approximately 50% of total final energy usage; of this, solar thermal (ST) applications contributed 407 TWh (Weiss & Spörk, 2021). Notably, the global photovoltaic (PV) market is currently expanding at a rate that surpasses that of the ST market (IEA PVPS task 1 et al., 2021) and has consistently outperformed expectations over the past decade (Jaxa-Rozen & Trutnevyte, 2021; Victoria et al., 2021; Creutzig et al., 2017). In 2020, photovoltaic power generation reached approximately 997 TWh, which constituted around 4% of the global electricity demand (IEA PVPS task 1 et al., 2021).
Solar power system (SPS) technology is characterized by its scalability, simplicity, and modularity, which contribute to lowering overall unit costs and mitigating investment risks (Wilson et al., 2020). This accessibility allows a diverse array of stakeholders globally to acquire, install, and utilize photovoltaic or solar thermal (ST) technologies. Notably, small-scale ST systems designed for the direct heating of buildings or facilities represent approximately 60% of total installations (Weiss & Spörk, 2021). In a similar vein, the photovoltaic market constitutes about 40% of distributed energy systems (IEA PVPS task 1 et al., 2021).

The considerable diversity in system sizes and applications presents challenges for stakeholders attempting to monitor historical deployments of solar thermal (ST) and photovoltaic (PV) systems, thereby complicating the assessment of global trends. The International Energy Agency Photovoltaic Power Systems Program (IEA PVPS) gathers data on the methods employed by various countries for the registration of stationary PV systems and advocates for the establishment of a compulsory database for PV systems in these nations (IEA PVPS et al., 2020). Nevertheless, in certain countries that have adopted registration databases, smaller systems may be legally connected to the grid without being officially registered, resulting in a lack of formal documentation regarding their presence (IEA PVPS et al., 2020; Stowell et al., 2020; Kasmi et al., 2022; Kausika et al., 2021). It is unrealistic to anticipate that all countries will be able to implement and maintain such a database in accordance with IEA PVPS recommendations in the foreseeable future.

A viable method for the manual documentation of fixed photovoltaic (PV) systems involves the assessment and estimation of PV system sizes through remote sensing aerial imagery obtained from satellites or aircraft, coupled with advanced deep machine learning techniques. This approach has garnered significant interest in the academic community (Ren et al., 2022). Utilizing this methodology, researchers have successfully developed databases that accurately pinpoint the locations of PV systems and categorize the types of buildings or land utilized for these installations (Kruitwagen et al., 2021; Xia et al., 2021). Furthermore, these databases can be integrated with socioeconomic data to facilitate population studies. This technique also holds promise for identifying off-grid and behind-the-meter PV systems that may be unregistered or inadequately represented to distribution system operators (DSOs) (Kausika et al., 2021). However, for effective documentation using this method, the PV systems must be observable from aerial perspectives and exhibit distinct characteristics from conventional components, which limits the detection of vertical or high-tilt systems, as well as building-integrated photovoltaics (BIPV). To date, the majority of research in this area has concentrated on the creation of training images (Bradbury et al., 2016; Kasmi et al., 2022) or the development and validation of methodologies, rather than on the generation of comprehensive statistics. Nonetheless, three notable projects have employed this approach to compile inventories of PV systems. The DeepSolar project (Wang et al., 2022) successfully identified 1.47 million PV systems across the United States using remote sensing imagery from June 2016 to September 2018, producing maps of industrial and utility-scale photovoltaic installations and generation in three global regions. The Dutch Cadastral Office reported the identification of 156,637 buildings. Additionally, Rausch et al. (2020) and Mayer et al. (2022) utilized neural network classification in conjunction with aerial imagery and 3D building data to ascertain the location, capacity, tilt, and azimuth of existing PV systems, comparing their findings with a database of 1 million buildings in the PV register.
This research seeks to advance the scientific understanding of the identification of small decentralized photovoltaic (PV) systems by employing a convolutional neural network (CNN) for aerial image classification. The study utilizes aerial imagery from a combined area across three major cities in Turkey. While similar assessments have been extensively conducted in the United States (Malof et al., 2019), the Netherlands (Kausika et al., 2021), and Germany (Rausch et al., 2020), this investigation aims to illustrate the practical application of the algorithm as both an inventory tool and a statistical method, thereby contributing to the enhancement of solar market development analyses specific to Turkey.

The Turkish photovoltaic (PV) market has traditionally been characterized by a predominantly small yet stable off-grid sector, primarily catering to holiday residences, rural homes, marine applications, and caravans. Although

Turkey lacks large-scale PV installations, the cumulative capacity of installed systems reached 8,479 MW by June 2022, accounting for 8.35% of the nation's total installed capacity (ENERJİ, 2023).

Significant advancements in agronomy, biology, informatics, agricultural robotics (Agri-robots), and artificial intelligence are driving a transformation in modern agriculture from a labor-intensive framework to a data-centric approach. Among the innovative Agri-robots, unmanned aerial vehicles (UAVs) equipped with high-resolution sensors and specialized application systems are increasingly essential for gathering multi-scale agricultural data and executing site-specific interventions. The integration of UAVs and DL is crucial for the acquisition, processing, analysis, decision-making, and implementation of agricultural information. This work begins by outlining the fundamental components of PA, UAVs, and DL, while summarizing their significant research advancements (Wang et al., 2025).

The integration of computer vision with machine learning offers a promising solution to these challenges by combining real-time observations of cloud cover with surface data collected from diverse sources. This review highlights recent advancements in solar forecasting utilizing multisensor Earth observations, emphasizing the role of deep learning, which provides a robust theoretical framework for developing architectures that can extract pertinent information from data obtained from ground-based sky cameras, satellites, weather stations, and sensor networks. In summary, while machine learning holds significant promise for enhancing the accuracy and reliability of solar energy meteorology, further research is essential to fully harness its capabilities and to address existing limitations. Ultimately, this survey aims to attract greater interest in the innovative applications of UAVs and DL in PA among multidisciplinary researchers globally, fostering further impactful and practical investigations (Paletta et al., 2023).

The innovations brought by the study to the literature:
1. Creation of a data set for aerial imagery in Turkey with software.
2. This study includes both classification and automatic segmentation of aerial images in Turkey.
3. Automatic segmentation of photovoltaic areas in aerial images with U-Net.

Figure 1 shows a block diagram summarizing the study. It can be seen from the block diagram that the study is a multi-faceted and deep study. In the first phase of the study, the dataset named OpenNRW_train_16 (Mayer et al., 2020) is used for model training. The test dataset was created by us through a long process on Google Earth. After examining the classification success of the trained models on the test dataset, we wanted to perform automatic segmentation of the test images. As can be seen in the block diagram, the images were first labeled manually with a lot of effort. Then the labeled images were automatically segmented using the U-Net model, and the success of this process was examined.

MATERIAL

For training and validation, we used the OpenNRW_train_16 open access dataset (Mayer et al., 2020), which is an upsampled dataset with a resolution of 0.05 m/pixel and contains 1,814 positive and 36,790 negative image frames from North Rhine-Westphalia, Germany.

To identify Photovoltaic Energy System installations in 3 metropolitan cities in Turkey, which is the core of our study, a test dataset was created using Google Earth (Google Earth, 2023). It took around 6 months to create the dataset from scratch. Since there are few building roof applications in city centers, the test dataset images consist of aerial images applied to rural areas and factory roofs. In the test dataset, 160 "positive" and 30,000 "negative" images were collected from the metropolitan areas of Istanbul, Ankara, and Izmir in Turkey. The images in the test dataset are scaled to 299 × 299 pixels as in the training dataset.

Figure 2 shows an example from the training dataset. It shows photovoltaic cells installed on the roof of a house. Figure 3 shows an image from the test dataset. This image was taken from Istanbul/Turkey, using Google Earth.

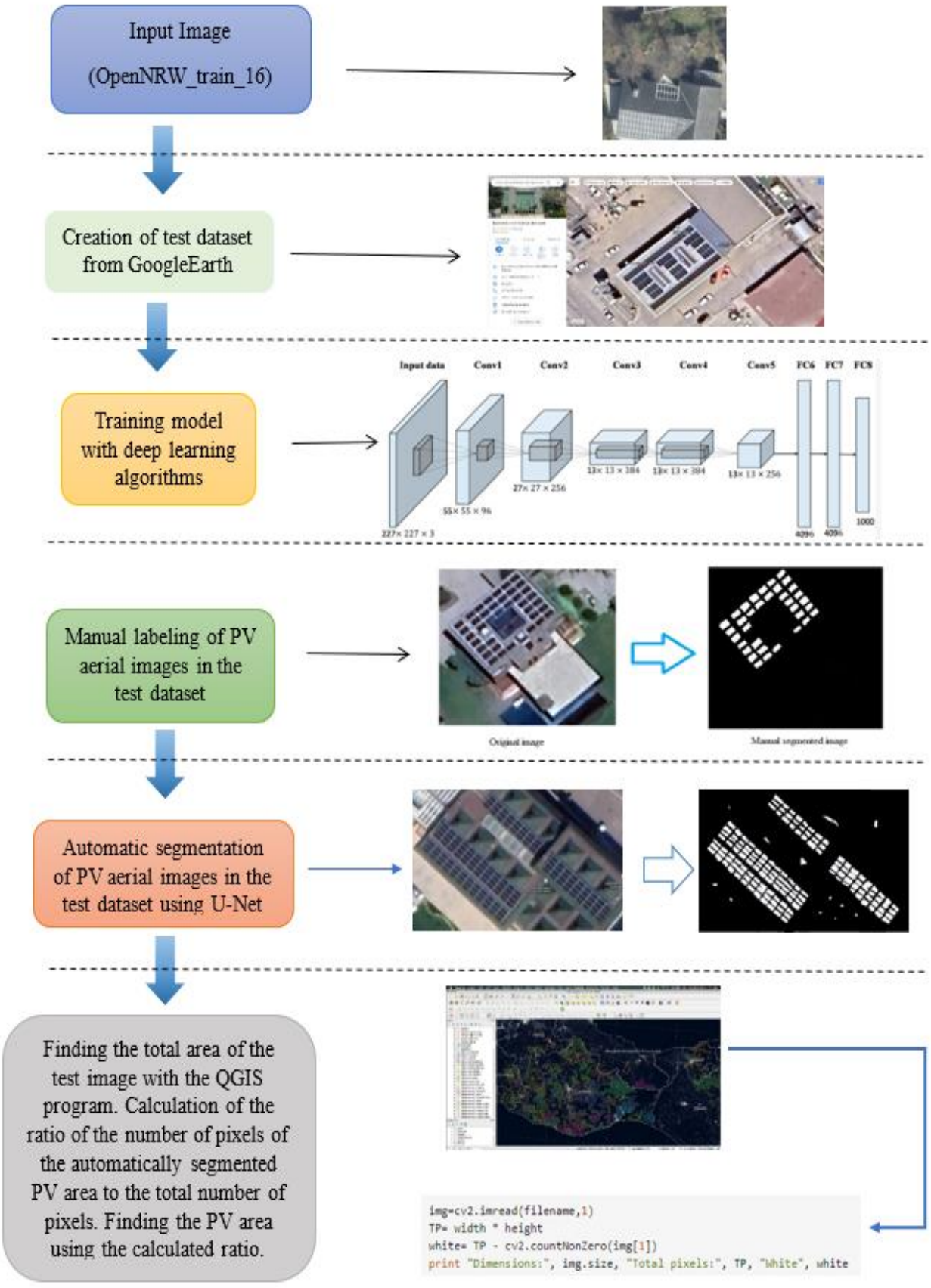


Figure 1. Processes Of The Study



Figure 2. Example From The Training Dataset



Figure 3. An Example From The Test Dataset

In the second phase of the study, images containing photovoltaic cells in the "positive" class were segmented to show the area covered by the batteries. In this phase, aerial images of photovoltaic cells in Turkey were used for training and testing. The 160 images in the "positive" class were carefully segmented manually. Figure 4 shows some examples of segmentation.

METHOD

Since there is no ready data for aerial images of photovoltaic batteries in Turkey, in the first part of the study, classification was made on image sections taken from Google Earth. The aim here is to collect aerial image sections containing photovoltaic batteries with the help of a computer by taking patches from a huge image map. Manual segmentation was performed by checking the accuracy of these images collected through computer software.

In the study, the ready dataset was trained using AlexNet, InceptionNet, and GoogLeNet models from Convolutional Neural Network (CNN) models. The classification success of these 3 trained models in the test dataset was examined (Hajabdollahi et al., 2020).

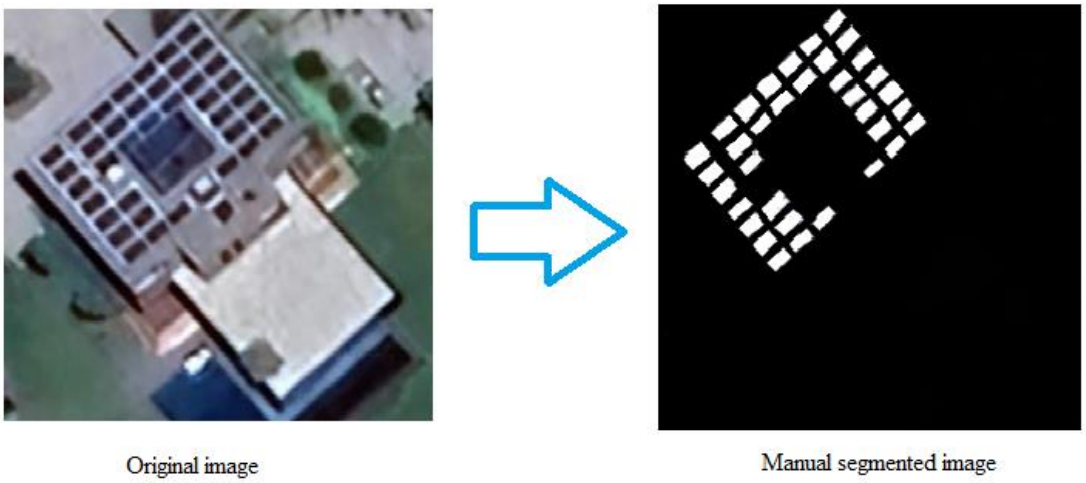


Figure 4. Segmented Image

Convolutional Neural Network

Convolutional neural networks (CNNs), often referred to as ConvNets, represent a specific category of neural networks designed for the analysis of data characterized by a grid-like structure, particularly images. Digital images serve as binary representations of visual information, comprising an array of pixels organized in a grid format. The values assigned to these pixels reflect their respective brightness and color (Garaj et al., 2021; Balcı and Alkan, 2025).

The human brain rapidly interprets a significant volume of information upon viewing an image. Each neuron operates within a specific receptive field and forms connections with other neurons to encompass the entire visual spectrum. Analogous to the functioning of neurons in a biological visual system, which respond to stimuli within a confined area known as the receptive field, neurons in a Convolutional Neural Network (CNN) similarly process data within their designated receptive fields. The architecture of these layers is structured such that basic patterns, such as lines and curves, are identified initially, while more intricate patterns, including surfaces and objects, are discerned at deeper layers. This framework enables computers to acquire visual perception capabilities.

In the forward pass, the kernel traverses the height and width of the image, generating a representation of the receptive field. This process results in a two-dimensional depiction of the image, referred to as an activation map, which illustrates the responses of the kernels at every spatial position within the image. The movement of the kernel is characterized by a parameter known as the pitch (Liu et al., 2024).

If we have an input of size W x W x D and several kernels Dout with spatial dimension F and fill amount P with S steps, the size of the output volume can be determined by the formula in Equation 1. This will give an output volume of size Wout x Wout x Dout. Figure 5 shows how the activation map is generated.

$$W_{out} = \frac{W - F + 2P}{S} + 1 \quad (1)$$

The success of the automatic classification process is visualized using the confusion matrix and ROC curve (Deng et al., 2016). Figure 6 shows how the confusion matrix is calculated.

Here; TP: Number of true positives, TN: Number of true, FP: Number of false positives, FN: False negatives.

In fact, different measures of classification success, such as accuracy, recall, and precision, are calculated from this matrix.

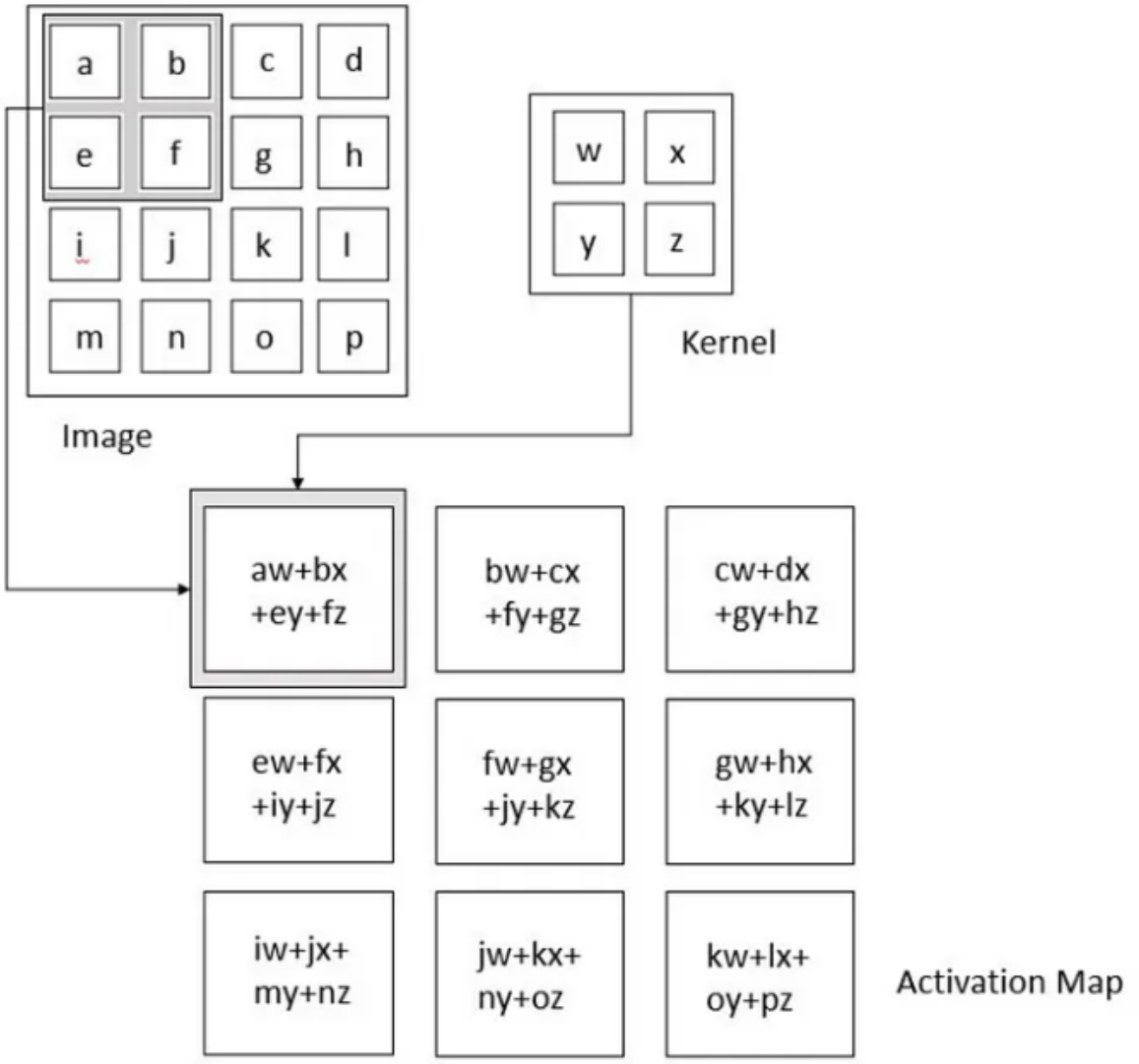


Figure 5. Convolution Process (Deep Learning, Ian Goodfellow, Yoshua Bengio, and Aaron Courville, MIT Press, 2016)

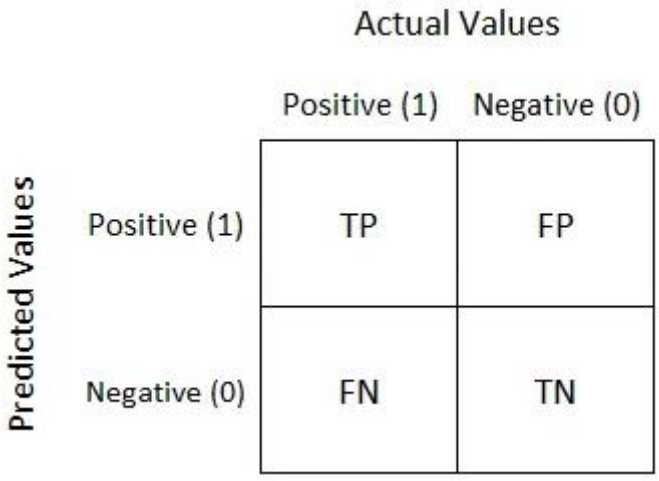


Figure 6. Confusion Matrix

Figure 7 simply shows how the ROC curve is plotted. Here, the X-axis is labeled FPR: False positive rate, and the Y-axis is TPR: True positive rate. The area under the curve gives us a numerical value between 0-1 to interpret the

result. This area is called the Area of Under Curve (AUC). TPR can also be called Recall or Sensitivity and is calculated according to Equation 2. Here; TP: Number of true positives, FN: Number of false negatives.

$$TPR = \frac{TP}{TP + FN} \tag{2}$$

FPR, which forms the x-axis, is calculated according to Equation 3. Here; FP: Number of false positives, TN: Number of true negatives.

$$FPR = \frac{FP}{TN + FP} \tag{3}$$

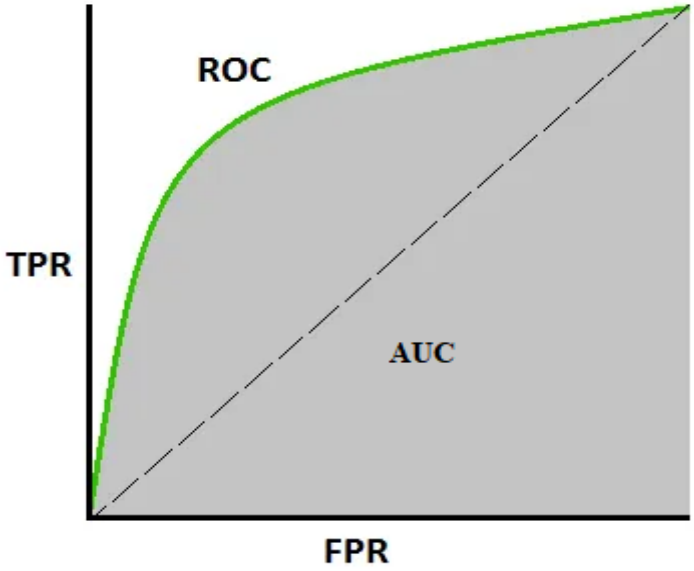


Figure 7. ROC Curve

U-Net

U-Net was initially developed for biomedical image segmentation. Its structure can be broadly categorized into a series of encoders succeeded by a series of decoders. In contrast to classification tasks, where the ultimate output of a deep learning model is of primary importance, semantic segmentation necessitates not only the ability to differentiate at the pixel level but also a method to map the distinctive features acquired at various stages of the encoder into the pixel domain. Typically, this involves utilizing a pre-trained classification network, such as VGG or ResNet, which employs convolutional layers to transform the input image into a multi-level feature representation, followed by max-pooling for subsampling. The decoder represents the latter portion of the architecture, aiming to semantically translate the features extracted by the encoder (which are of lower resolution) into the pixel space (which is of higher resolution) to facilitate dense classification. The decoder is composed of upsampling and feature fusion, followed by regularized convolution (Almalki et al., 2023; Yuan et al., 2023).

The success of image segmentation is calculated using Intersection over Union (IoU), also known as the Jaccard index. Figure 8 visualizes how the IoU score is calculated. It would be more accurate to examine Figure 8 and Equation 4 together to understand the score.

$$IoU(A,B) = \frac{(A \cap B)}{(A \cup B)} \tag{4}$$

In image segmentation, the ratio of the number of correctly predicted pixels to the number of Groundtruth pixels and the number of predicted pixels will give us the success of the segmentation with the IoU/Jaccard index.

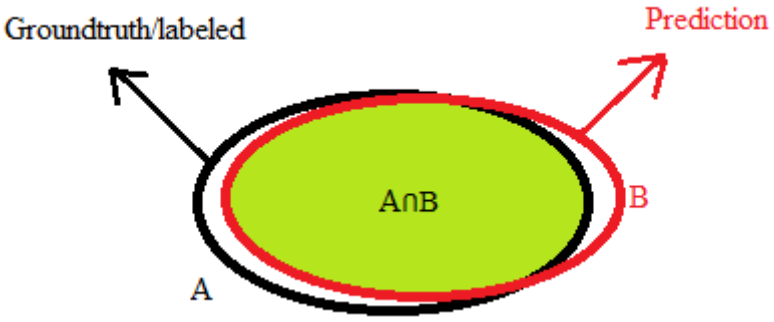


Figure 8. IoU

RESULTS

We employed the Convolutional Neural Network (CNN) deep learning approach to train our model. To enhance the performance of the CNN, we experimented with varying the number of layers within the architecture. Notable state-of-the-art CNN models include AlexNet, InceptionNet, and GoogLeNet. In the initial phase of our research, which focused on image classification, we utilized these three advanced CNN models to identify the most suitable one for our dataset. Each of the models was trained on the OpenNRW_train_16 open access dataset, comprising 1,814 positive and 36,790 negative image frames. Subsequently, the trained models were evaluated on a separate set of 160 "positive" images and 30,000 "negative" images, which had not been included in the training process and were manually sourced from Google Earth.

Three distinct deep learning algorithms were employed in this research, all of which represent cutting-edge techniques commonly referenced in existing literature. The confusion matrix serves a crucial role in the comprehensive analysis of classification outcomes. Illustrated in Figure 9 are the confusion matrices derived from the AlexNet, GoogLeNet, and Inception methodologies. Aerial images devoid of photovoltaic (PV) elements are categorized as "negative." The misclassification counts for "negatives" are recorded as 3123 for AlexNet, 3246 for GoogLeNet, and 3842 for Inception. While the misclassification figures across the three approaches are relatively close, AlexNet demonstrates the lowest incidence of "negative" misclassifications. Conversely, aerial images that include PV are designated as "positive," and Figure 9 also presents the classification results for each method. The misclassifications for the "positive" class were 17 for AlexNet, 20 for GoogLeNet, and 27 for Inception. Notably, the misclassification rates for "positives" differed from those for "negatives," with AlexNet emerging as the most effective method for the "positive" classification. Based on the confusion matrices depicted in Figure 9, it can be concluded that AlexNet is the most appropriate deep learning technique for our dataset.

Another method of interpreting the results of classification with classical and deep learning methods is the ROC curves. Figure 10 shows the ROC curves obtained with 3 different methods. In addition, AUC values showing the area under these curves were calculated and plotted. The area under the ROC curve takes a value between 0-1. The closer the classification is to 1, the more successful the classification is. However, calculating the AUC value as 1 is also undesirable due to the possibility of the method becoming rote. Figure 10 shows that the AUC value is 0.9 for AlexNet, 0.87 for GoogLeNet, and 0.83 for Inception. While AlexNet is the most successful method for classifying aerial images, Inception is the least successful of the three methods. In fact, the AUC value of 0.83 is an important classification success.

Although there are differences between the 3 methods in terms of calculating the confusion matrix and plotting the ROC curves, all 3 methods were quite successful. From this point of view, it is possible to interpret that the training and test images are suitable for processing with deep learning. Especially, the test dataset we obtained from the Google Earth application showed that it can be used in the classification process.

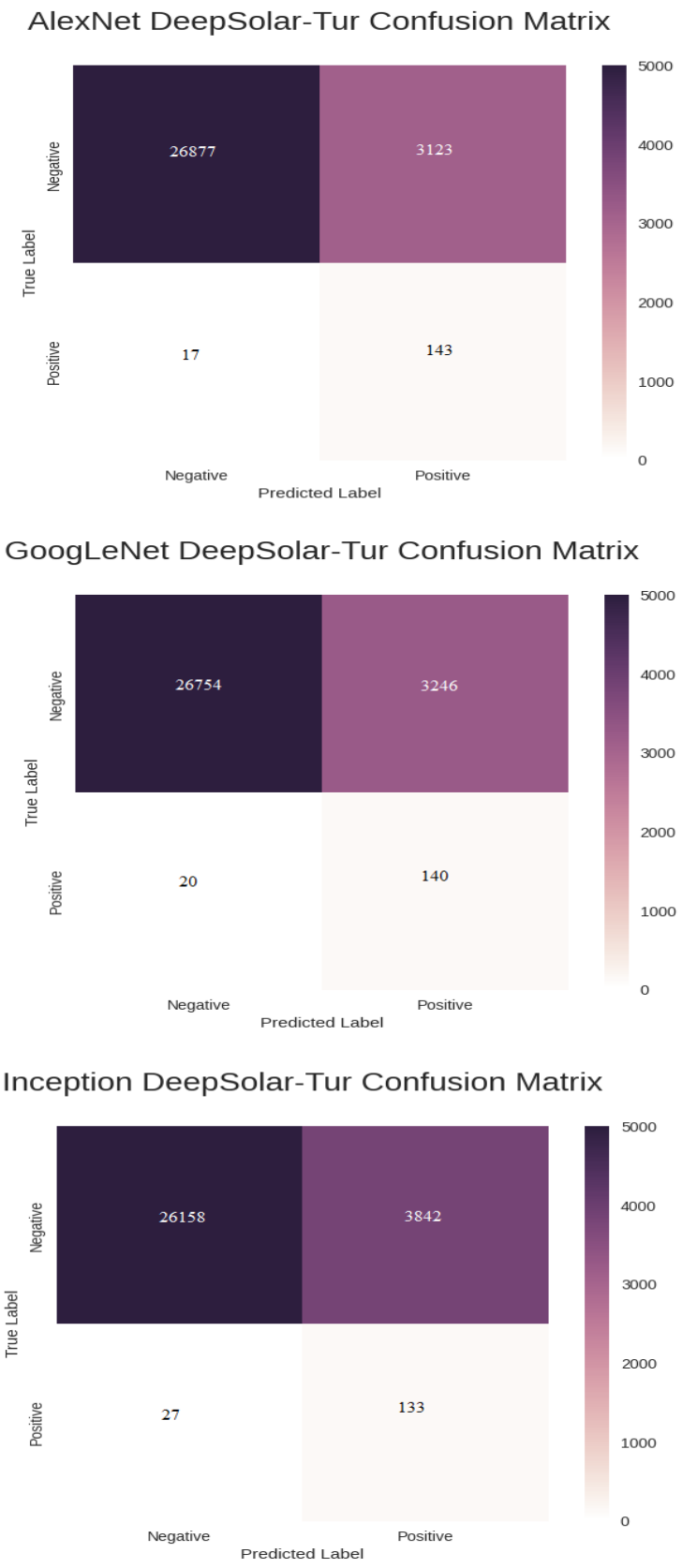


Figure 9. Confusion Matrices Of Classifications

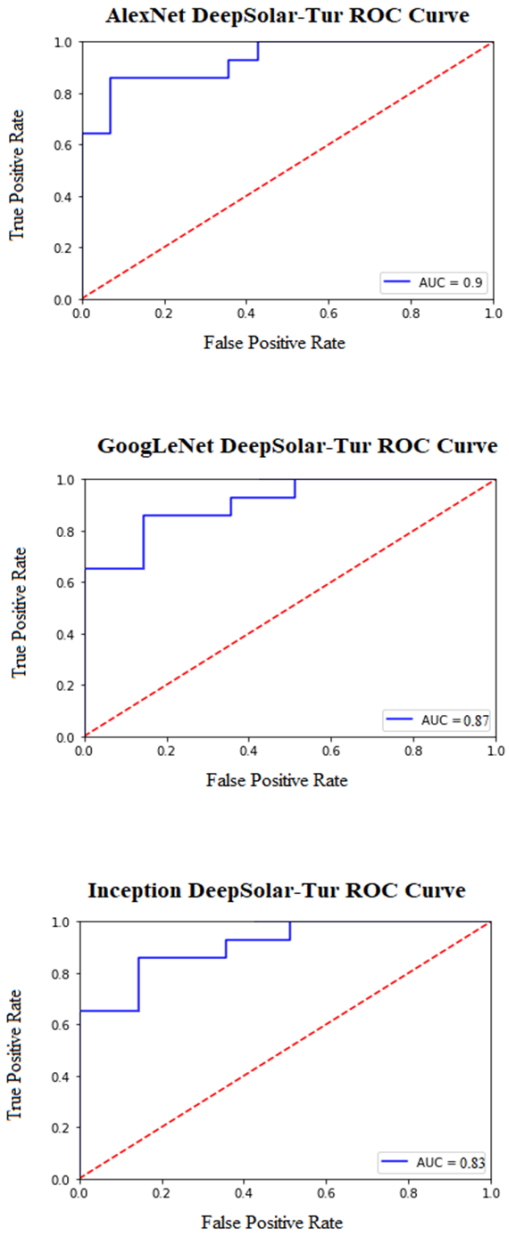


Figure 10. ROC Curves Of Classifications

U-Net segmentation is used in different disciplines and can offer high success. In our study, 2D U-Net segmentation was applied. Although the success of the segmentation is based on different scores, such as IoU, it is very important to get visual results for the application of the study. In this sense, the visual results of the segmentation obtained in our study are shown in Figure 11. As can be seen, the success of photovoltaic segmentation is also visually evident. The boundaries of the photovoltaics on the roof are clearly determined automatically. When Figure 11 is carefully analysed, the boundary of each cell is almost clear. If the clarity of the raw image in the dataset is increased, each cell in the photovoltaic system can be automatically segmented. According to our knowledge, our study is the first of its kind in Turkey. In the following stages, our study will be deepened to perform automatic segmentation at the cell level. In this way, photovoltaic applications can be planned automatically with computer software from the beginning.

Aerial images taken in different geographies may have different ambient illumination. Despite this, U-Net photovoltaic segmentation was performed at a high rate with an IoU score above 0.80, as can be seen in Figure 11. This also shows that automatic segmentation of photovoltaic areas from aerial images is possible.

Our study does not only include the classification of aerial images. Since PV detection using aerial images is the first in Turkey, to our knowledge, automatic segmentation was performed using the U-Net method at this stage of the study. We thought that visualizing the automatic segmentation would be more convenient in terms of interpreting the results, and Figure 11 shows the automatic segmentation results of some PV aerial images we randomly determined.

As can be seen in Figure 11, the automatic classifications were successful. PV locations from aerial images are clearly automatically classified. A more detailed examination of the segmentation is possible with the area calculation made at the last stage of the study. Table 1 includes the area calculation information made with manual labeling and the area calculation made with automatic segmentation. The 160 aerial images in the test dataset were obtained from Google Earth. Since the number of PVs in the images will vary, images were taken by zooming in to include all the PVs, and the size was set to 299x299 for classification. At this stage, the distance per pixel problem we encountered was solved with the QGis application (QGis, 2023). The application can be used without requiring any license. Since all 160 aerial images contain different pixel distances, pixel distance calculations were made in a study that took approximately 3 months.

Table 1 includes the PV area information obtained by manual segmentation (using QGis) and the PV area calculated by automatic segmentation (using QGis). Area information is given in square meters (m2). The total area of 7 different aerial images, manually labeled PV area, PV area calculated with automatic segmentation, and the ratio of PV areas to the whole area are given in Table 1. The ideal one for interpreting the results is the ratio of manual labeling to manual segmentation in the last row of Table 1. However, in making this interpretation, the limitation of calculating different regions as PV should not be ignored. The ratio calculation of around "1" for 7 different aerial images and the clear segmentation of PV areas in Figure 11 show that the process was successful.

CONCLUSION

The adverse consequences of fossil fuel consumption are now being experienced globally through various natural phenomena. In contemporary times, the longevity of fossil fuel resources has notably increased. In response, nations are entering into zero-emission agreements aimed at mitigating global warming and restoring the planet to its previous condition. The pervasive influence of electricity in our daily lives is indisputable, and it can be argued that the advancement of human civilization has accelerated significantly due to electricity. The advent of the internet and its electrically powered components has revolutionized access to information, allowing individuals of all ages to obtain diverse knowledge instantaneously, thereby eliminating the lengthy journeys that once characterized information retrieval. The generation of electricity, which is vital for human existence, has become increasingly critical, especially in light of the imminent threats posed by global warming. This urgency has prompted a shift towards clean energy sources for electricity production. Consequently, the concept of harnessing solar energy through photovoltaic cells has gained prominence. Initially, the first solar batteries exhibited low efficiency and incurred high installation costs. However, humanity has successfully addressed these challenges, enhancing battery efficiency and making installation more economically viable.

Countries like Turkey, situated in the solar belt, possess significant advantages regarding the availability of solar energy. Historically, individuals who harnessed solar energy for heating water have transitioned to utilizing it for electricity generation, which is essential across various sectors from production to consumption. The conversion of solar energy into electrical power holds the potential to evolve into a substantial industry. It would be reasonable to assert that nations that accurately recognize this potential and develop their infrastructure accordingly could lead the sector. Understanding the market dynamics of the photovoltaic industry is crucial for achieving market leadership. The utilization of aerial imagery can facilitate the assessment of photovoltaic cell deployment, with European nations such as Germany and the Netherlands actively engaging in research and providing support to scientists dedicated to advancing the sector. Turkey is endowed with abundant solar energy resources and has been making significant investments in solar panel manufacturing in recent years. However, there remains a gap in the creation of comprehensive data sets that could aid scientists in contributing to the industry. This study aims to address this deficiency and will serve as a valuable resource for professionals in the field.

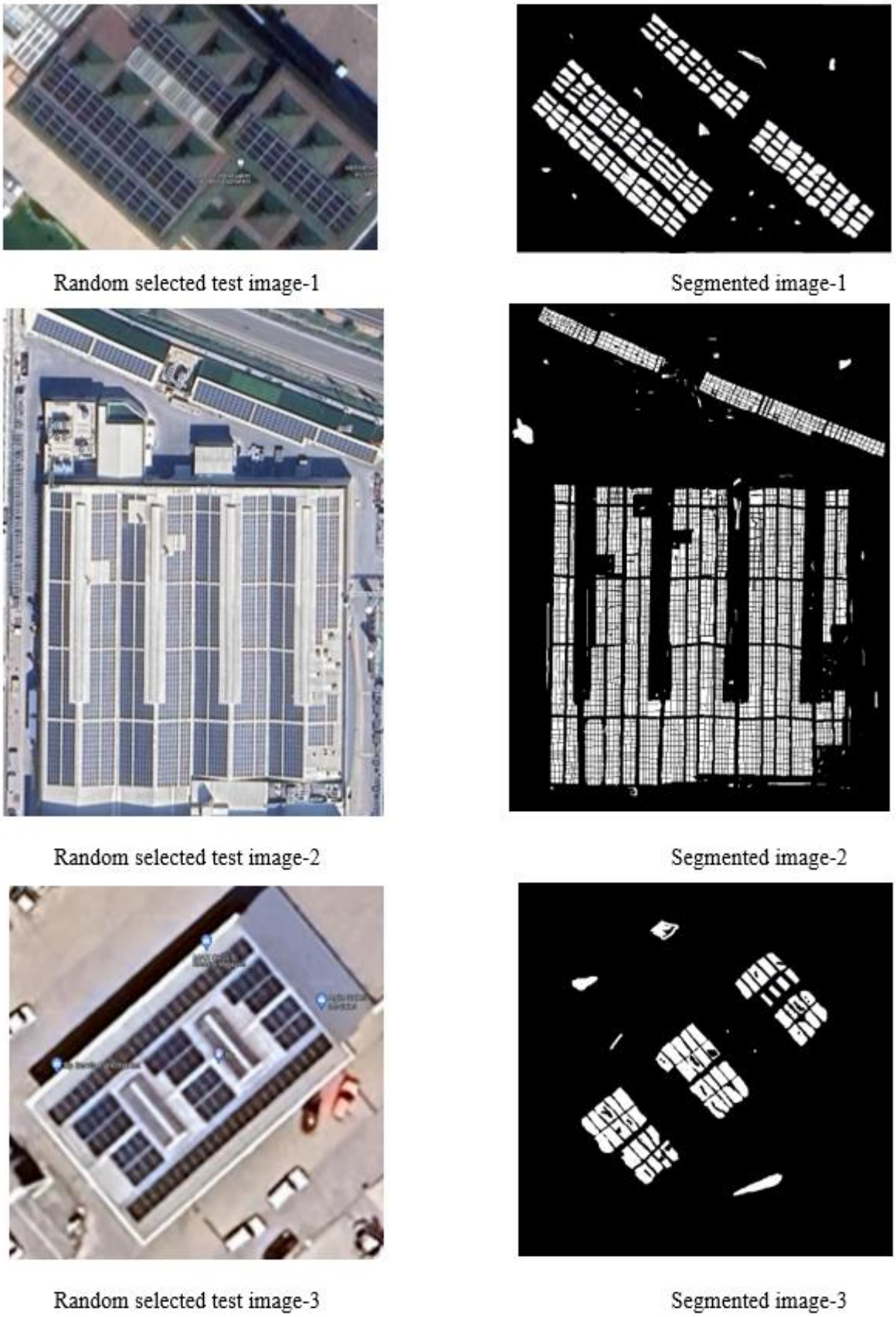


Figure 11. Automatic Segmentation Images

Table 1. PV Area Calculations

PV aerial image number	**1**	**3**	**57**	**93**	**101**	**150**	**158**
PV aerial image total area (m2)	2561	3012	1950	2103	2480	2961	3122
Ratio of manually segmented PV area to total aerial image area	0,351	0,291	0,398	0,255	0,312	0,401	0,398
Calculated area of manually segmented PV area (m2)	898,911	876,492	776,1	513,315	773,76	1187,361	1242,556
Ratio of automatic segmented PV area to total aerial image area	0,402	0,318	0,353	0,286	0,326	0,416	0,378
Calculated area of automatic segmented PV area (m2)	1029,522	957,816	688,35	601,458	808,48	1231,776	1180,116
Ratios of manual and automatic segmentation PV by area calculation	0,873	0,915	1,127	0,853	0,957	0,964	1,053

Our study examined the subject in depth, and the test data set and manual labeling were carried out with a long study. It is a comprehensive study that tries to calculate the area of the PV-containing aerial image by automatically segmenting it from the automatic classification of the aerial image containing PV. The results obtained are quite high and reveal that more detailed studies can be carried out in the field for the Turkish example.

REFERENCES

A Garai, S Biswas, S Mandal. A theoretical justification of warping generation for dewarping using CNN. Pattern Recognit., 109 (2021), https://doi.org/10.1016/j.patcog.2020.107621.

B Rausch, K Mayer, M-L Arlt, G Gust, P Staudt, C Weinhardt, et al. An enriched automated PV registry: combining image recognition and 3D building data. ArXiv (2020).

BB Kausika, D Nijmeijer, I Reimerink, P Brouwer, V. Liem. GeoAI for detection of solar photovoltaic installations in the Netherlands. Energy AI, 6 (2021), https://doi.org/10.1016/j.egyai.2021.100111.

C Wilson, A Grubler, N Bento, S Healey, Stercke S de, C Zimm. Granular technologies to accelerate decarbonization. Science (1979), 368 (2020), pp. 36-39.

D Stowell, J Kelly, D Tanner, J Taylor, E Jones, J Geddes, et al. A harmonised, high-coverage, open dataset of solar photovoltaic installations in the UK. Sci Data, 7 (2020), pp. 1-15, https://doi.org/10.1038/s41597-020-00739-0.

D Wang, M Zhao, Z li, S Xu, X Wu, X Ma, X Liu. A survey of unmanned aerial vehicles and deep learning in precision agriculture. EUR J AGRON, 164 (2025), https://doi.org/10.1016/j.eja.2024.127477.

Deep Learning by Ian Goodfellow, Yoshua Bengio and Aaron Courville published by MIT Press, 2016.

F Creutzig, P Agoston, JC Goldschmidt, G Luderer, G Nemet, RC. Pietzcker. The underestimated potential of solar energy to mitigate climate change. Nat Energy, 2 (2017), https://doi.org/10.1038/nenergy.2017.140.

G Kasmi, L Dubus, P Blanc, Y-M. Saint-Drenan. Towards unsupervised assessment with open-source data of the accuracy of deep learning-based distributed PV mapping Workshop on Machine Learning for Earth Observation (MACLEAN), in Conjunction with the ECML/PKDD 2022 (2022). p. hal-03778289.

Google Earth , Hava görüntüleri, https:// https://earth.google.com/web (Date of acces: 16/06/2023).

IEA PVPS task 1, Masson G, Kaizuka I, Bosch E, Plaza C, Scognamiglio A, et al. Trends in photovoltaic applications — 2022. 2022.

IEA PVPS, Fechner H, Johnston W, Neubourg G, Masson G, Ahm P, et al. Data model for PV systems — Data model and data acquisition for PV registration schemes and grid connection evaluations — Best practice and recommendations. 2020.

JM Malof, B Li, B Huang, K Bradbury, A. Stretslov. Mapping solar array location, size, and capacity using deep learning and overhead imagery. ArXiv (2019), abs/1902.1.

K Bradbury, R Saboo, TL Johnson, JM Malof, A Devarajan, W Zhang, et al. Distributed solar photovoltaic array location and extent dataset for remote sensing object identification. Sci Data, 3 (2016), pp. 1-9, https://doi.org/10.1038/sdata.2016.106.

K Mayer, B Rausch, ML Arlt, G Gust, Z Wang, D Neumann, et al. 3D-PV-Locator: Large-scale detection of rooftop-mounted photovoltaic systems in 3D. Appl Energy, 310 (2022), Article 118469, https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.118469.

K Mayer, Z Wang, ML Arlt, D Neumann, R. Rajagopal. DeepSolar for Germany: a deep learning framework for PV system mapping from aerial imagery. Proceedings of the 3rd International Conference on Smart Energy Systems and Technologies (SEST) (2020), pp. 11-16, https://doi.org/10.1109/SEST48500.2020.9203258.

Kasmi G, Saint-Drenan Y-M, Trebosc D, el Jolivet R, Leloux J, Sarr B, et al. A crowdsourced dataset of aerial images with annotated solar photovoltaic arrays and installation metadata, 2022, p. 1–12.

L Kruitwagen, KT Story, J Friedrich, L Byers, S Skillman, C. Hepburn. A global inventory of photovoltaic solar energy generating units. Nature, 598 (2021), pp. 604-610, https://doi.org/10.1038/s41586-021-03957-7.

L Liu , B Lin , Y Yang. Moving scene object tracking method based on deep convolutional neural network. Alex. Eng. J., 86 (2024).

M Balcı, A Alkan. Identification of wart treatment evaluation by using optimum ensemble based classification techniques. Biomed. Signal Process. Control., 95 (2024).

M Hajabdollahi, R Esfandiarpoor, E Sabeti, N Karimi, SMR Soroushmehr, S Samavi. Multiple abnormality detection for automatic medical image diagnosis using bifurcated convolutional neural network. Biomed., 57 (2020), https://doi.org/10.1016/j.bspc.2019.101792.

M Jaxa-Rozen, E. Trutnevyte. Sources of uncertainty in long-term global scenarios of solar photovoltaic technology. Nat Clim Chang, 11 (2021), pp. 266-273, https://doi.org/10.1038/s41558-021-00998-8.

M Victoria, N Haegel, IM Peters, R Sinton, A Jäger-Waldau, C del Cañizo, et al. Solar photovoltaics is ready to power a sustainable future. Joule, 5 (2021), pp. 1041-1056, https://doi.org/10.1016/j.joule.2021.03.005.

Q Paletta, G Terrén-Serrano, Y Nie, B li, J Bieker, W Zhang, L Dubus, S Dev, C Feng. Advances in solar forecasting: Computer vision with deep learning. ADV APPL ENERGY, 11 (2023), https://doi.org/10.1016/j.adapen.2023.100150.

QGis, https://qgis.org/en/site/(Date of acces: 10/06/2023).

S Ren, W Hu, K Bradbury, D Harrison-Atlas, L Malaguzzi Valeri, B Murray, et al. Automated extraction of energy systems information from remotely sensed data: a review and analysis. Appl Energy, 326 (2022), Article 119876, https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.119876.

SA Almalki, S Alsubai, A Alqahtani, AA, Alenazi. Denoised encoder-based residual U-net for precise teeth image segmentation and damage prediction on panoramic radiographs. J. Dent., 137 (2023), https://doi.org/10.1016/j.jdent.2023.104651.

TEİAŞ (2019), Elektrik İstatistikleri, Aylık Elektrik İstatistikleri, https://enerji.gov.tr/eigm-yenilenebilir-enerji-kaynaklar-gunes.

W Hu, K Bradbury, JM Malof, B Li, B Huang, A Streltsov, et al. What you get is not always what you see—pitfalls in solar array assessment using overhead imagery. Appl Energy, 327 (2022), Article 120143, https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.120143.

Weiss W, Spörk-Dür M. Solar heat worldwide — 2021 Edition. 2021.

X Deng, Q Liu, Y Deng, S Mahadevan. An improved method to construct basic probability assignment based on the confusion matrix for classification problem. Inf. Sci., 340-341 (2016). https://doi.org/10.1016/j.ins.2016.01.033.

Y Yuan, Z Li, W Tu, Y Zhu. Computed tomography image segmentation of irregular cerebral hemorrhage lesions based on improved U-Net. J. Radiat. Res. Appl. Sci., 16-3 (2023), https://doi.org/10.1016/j.jrras.2023.100638.

Z Wang, M-L Arlt, C Zanocco, A Majumdar, R. Rajagopal. DeepSolar++: Understanding residential solar adoption trajectories with computer vision and technology diffusion models. Joule (2022), pp. 1-15, https://doi.org/10.1016/j.joule.2022.09.011.

Z Xia, Y Li, R Chen, D Sengupta, X Guo, B Xiong, et al. Mapping the rapid development of photovoltaic power stations in northwestern China using remote sensing. Energy Rep, 8 (2022), pp. 4117-4127, https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.03.039.

KSÜ Mühendislik Bilimleri Dergisi,28(2), 2025
Araştırma Makalesi

KSU J Eng Sci, 28(2), 2025
Research Article

Kahramanmaras Sutcu Imam University
Journal of Engineering Sciences

Geliş Tarihi : 13.01.2025
Kabul Tarihi :06.02.2025

Received Date : 13.01.2025
Accepted Date : 06.02.2025

SYNTHESIS OF POLYANILINE-BASED CATALYSTS: PHOTOCATALYTIC DEGRADATION OF METHYLENE BLUE

POLİANİLİN İÇERİKLİ KATALİZÖRLERİN SENTEZİ: METİLEN MAVİSİNİN FOTOKATALİTİK DEGRADASYONU

Nazli TURKTEN[1] (ORCID: 0000-0001-9343-3697)
Yunus KARATAS[1*] (ORCID: 0000-0002-3826-463X)
Yelda YALCIN GURKAN[2] (ORCID: 0000-0002-8621-2025)

[1] Department of Chemistry, Kirsehir Ahi Evran University, 40100, Kirsehir, Türkiye
[2] Department of Chemistry, Tekirdag Namik Kemal University, 59030, Tekirdag, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Yunus KARATAS, ykaratas@ahievran.edu.tr

ABSTRACT

The increasing use of dyes in various industries has raised concerns regarding the potential release of harmful substances into the environment and their influence on human health. The incorporating style of polyaniline-based catalysts has attracted great interest in the field of photocatalysis, specifically for dye degradation from water. Polyaniline CuO (PANI-CuO) catalysts with varying PANI/CuO mole ratios (1:8, 1:1, and 8:1) were synthesized by *in-situ* chemical oxidation polymerization (PCI) and mechano-chemical preparation (PCS) methods. FTIR, XRD, and SEM analyses confirmed the presence of CuO and PANI in PCS catalysts. However, CuO particles were not detected in PCI specimens due to the dissolution of CuO in a highly acidic medium. The photocatalytic efficiency of prepared two different series of PANI-CuO catalysts was assessed by the degradation of methylene blue (MB) dye degradation for comparative purposes. The results implied that the preparation process significantly concerns the photocatalytic performance with PCI catalysts exhibiting higher MB photocatalytic degradation than PCS specimens. The PCI-18 specimen achieved 56% degradation of MB in 300 minutes.

Keywords: *In-situ* chemical oxidation polymerization, mechano-chemical preparation, methylene blue, PANI-CuO composites, photocatalysis.

ÖZET

Günümüzde boyalar birçok endüstride kullanılmakta olup, insan sağlığı üzerinde olumsuz etkileri olan zararlı maddelerin çevreye salınması endişe yaratmaktadır. Bu nedenle, polimer içerikli katalizörlerin hazırlanması ve sudan boyaların uzaklaştırılmasında kullanımı özellikle fotokataliz alanında büyük ilgi çekmektedir. Polianilin CuO (PANI-CuO) katalizörleri eş-anlı kimyasal oksidasyon polimerizasyonu (PCI) ve mekaniksel-kimyasal (PCS) olmak üzere iki farklı yöntem ile hazırlanmıştır. Bu yöntemlerde, PANI/CuO mol oranları (1:8, 1:1 ve 8:1) olacak şekilde kompozitler sentezlenmiştir. PCS katalizörlerinde, PANI ve CuO varlığı FTIR, XRD ve SEM analizleri kullanılarak saptanmıştır. Ancak, PCI örneklerinde yüksek asidik ortamda CuO çözünmesine bağlı olarak, CuO tanecikleri tespit edilememiştir. İki farklı seri olarak hazırlanan PANI-CuO katalizörlerinin fotokatalitik etkinliği, metilen mavisi (MB) kullanılarak, karşılaştırmalı olarak test edilmiştir. PCI katalizörlerinin MB boyasının fotokatalitik degradasyonunda PCS örneklerine kıyasla daha etkili olduğu gözlenmiştir. PCI-18 örneği kullanılarak, MB boyası %56 degradasyonuna 300 dakikada sonunda ulaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Eş-anlı kimyasal oksidasyon polimerizasyonu, fotokataliz, mekaniksel-kimyasal hazırlama, metilen mavisi, PANI-CuO kompozitleri.

ToCite: TURKTEN, N., KARATAS, Y. & YALCIN GURKAN, Y., (2025). SYNTHESIS OF POLYANILINE-BASED CATALYSTS: PHOTOCATALYTIC DEGRADATION OF METHYLENE BLUE. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 28(2), 851-862.

INTRODUCTION

With rapid growth and industrial development, extensive organic pollutants in manufacturing wastewater can pose a serious threat by being released into water bodies. Textile wastewater is one of the prominent environmental challenges due to its complex and diverse contaminants generated by textile manufacturing processes such as bleaching, dyeing, and sizing. Conventional treatment methods including biological and physical processes are inadequate to eliminate dyes. Consequently, comprehensive implementation of technology treatment is required to degrade various chemicals used in textile operations and solve secondary pollution issues. Advanced oxidation processes (AOPs) are chemical oxidation methods that use strong oxidants such as hydroxyl radicals, resulting in a non-selective reactivity with various organic pollutants. Furthermore, these methods generate hydroxylated or dehydrogenated products, which are then fragmented into smaller products (i.e., CO_2, H_2O, and inorganic ions). Among AOPs, photocatalysis is a promising sustainable method for dye removal from wastewater (Kallawar and Bhanvase, 2024; Khader et al., 2024; Khan et al., 2024). The photocatalytic mechanism for dye degradation proceeds under UV or visible light irradiation in the presence of a catalyst to generate electron/hole pairs. These pairs participate in redox reactions with adsorbed species on the photocatalyst surface, leading to the degradation of dyes into less harmless byproducts (Hoffmann et al., 1995; Khan et al., 2024).

Methylene blue (MB), one of the primary models of cationic dyes contains functional groups capable of dissociating into positively charged ions in an aqueous solution. MB is commonly used as a colorant in paper and textiles in the cotton dying process, also it is applied in pharmaceutical and self-care products. This dye can cause serious effects on humans, including increased heart rate, nausea, skin and eye irritation, and vomiting. Therefore, most articles have focused on various treatment techniques in the environmental remediation of MB (Lanjwani et al., 2024; Muzammal et al., 2024; Turkten et al., 2021b). Hence, up to now, numerous photocatalysts have been designed for the photocatalytic degradation of MB and further management is compulsory to remove MB using different catalysts (Khan et al., 2024; Lanjwani et al., 2024).

Recently, the design of conducting polymer-based catalysts has attracted great attention to reduce photogenerated electron/hole recombination and improve photocatalytic activity. Polyaniline (PANI) and its derivatives are among the most extensively studied conducting polymers coupled with semiconductor metal oxides used in photocatalytic applications for wastewater treatment (Sajith et al., 2024; Turkten et al., 2021a). In this regard, PANI-modified photocatalysts mostly combined with TiO_2 and ZnO semiconductors such as PANI-TiO_2 (Jangid et al., 2021; Rahman and Kar, 2020a, 2020b; Wang et al., 2010; Wang and Min, 2007; Yang et al., 2017), PANI-ZnO (Eskizeybek et al., 2012; Saravanan et al., 2016; Turkten et al., 2021b; Vijayalakshmi et al., 2021) have been prepared to remove MB and other synthetic dyes in wastewater. However, a few studies have been reported on the photocatalytic performance of PANI-CuO-based composites through the degradation of dyes and organic pollutants (Boucherdoud et al., 2024; Cui et al., 2024; Gelaw et al., 2022; Koysuren and Koysuren, 2023a,b; Nekooie et al., 2021; Rathore et al., 2020). Rathore and co-workers prepared chitosan-PANI-CuO nanocomposite using the batch adsorption method to remove methyl orange (Rathore et al., 2020). In another study, a series of boron-doped PANI-CuO composites was synthesized and photocatalytic degradation of MB was investigated (Koysuren and Koysuren, 2023a). The photocatalytic performances of PANI-CuO photocatalysts were studied on the degradation of MB (Boucherdoud et al., 2024), and MB dye and Cr(VI) (Koysuren and Koysuren, 2023b).

This research focused on a systematic kinetic study of the photocatalytic degradation of MB by prepared PANI-CuO composites via *in-situ* chemical oxidation polymerization and mechano-chemical methods. In addition to the limited studies reported on this subject in the literature, a systematic and comparative examination of these methods and the investigation of the structural and morphological differences depending on the preparation method by FTIR, XRD, and SEM analyses were aimed to fill an important gap in clarity.

MATERIALS AND METHODS

Materials

CuO, aniline (ANI), ammonium persulfate (APS), and HCl (37%), MB were purchased by Merck.

Preparation of PANI and PANI-CuO Composites

Polyaniline emeraldine salt (PANI) was prepared via *in-situ* chemical oxidation polymerization method, as described in our previous study (Turkten et al., 2023). CuO composites were synthesized by the mechano-chemical preparation method referred to as PCI composites and *in-situ* chemical oxidation polymerization method referred to as PCS composites as summarized as follows (Turkten et al., 2025). The mole ratios of PANI-CuO were 1:8, 1:1, and 8:1 and were named PCS-18, PCS-11, and PCS-81, respectively in PCS composites. Briefly, CuO and synthesized PANI (as described above) in 50 mL of distilled water stirred for 24 h. Then, the mixture was filtered and washed with distilled water. Finally, the solid product was dried at 80°C for 24 h. PCI composites were prepared at the initial ANI/CuO mole ratios of 1:8, 1:1, and 8:1 and were named PCI-18, PCI-11, and PCI-81, respectively. The initial mole ratio of ANI/APS was 1:1. Briefly, the representative synthesis of PCI-11 was given as follows: Firstly, 5.71 g (25 mmol) of APS was dissolved in 80 mL of 1 M HCl solution (Solution A). Solution B was obtained by adding 2.0 g (25 mmol) of CuO to 80 mL of 1 M HCl solution and ultrasonicated for 15 min. Then, 2.33 g (25 mmol) of ANI was added into Solution B which was placed in an ice bath. After that, Solution A was added dropwise into Solution B and stirred for another 24 h. Finally, the resulting product was filtered, washed, and dried at 80°C for 24 h.

Characterization

FTIR-ATR spectra were performed using a Thermo Scientific Nicolet 6700 Spectrometer. SEM analysis was carried out on a FEI-Philips XL30 Environmental Scanning Electron Microscope with an accelerating voltage of 10 kV. XRD data were acquired by a Rigaku-D/MAX-Ultima diffractometer (40 kV and 40 mA). Crystallite sizes (D, nm) of CuO, PCS, and PCI composites were determined by using the Scherrer equation (Equation 1) related to the (1 1 1) reflection plane of CuO (Scherrer, 1918).

$$D = K \lambda / (\beta \cos\theta) \quad (1)$$

K: 0.9, λ: 1.5418 Å, θ: Bragg angle, and β: full width at half maximum intensity (FWHM, radians).

Photocatalytic Activity Experiments

The photocatalytic activity of CuO nanoparticles was compared with two different series of PCS and PCI composites by observing the MB dye solution (10 mg/L) in the exposure time interval (t=0-300 min). A black-light fluorescent lamp (125 W) with a wavelength range of 300-420 nm at λ_{max}=365 nm was used in experiments. The suspension in the cylindrical Pyrex reaction vessel was prepared by adding an optimum amount of photocatalyst (0.25 mg/L) in a 50 mL MB solution. After that, the suspension was filtered at certain photocatalytic time intervals, followed by UV-vis analysis. The percent removal of MB dye was calculated using Equation (2).

$$\text{Decolorization, \%} = ((A_o - A) / A_{,o}))x100 \quad (2)$$

A_o: initial absorbance of MB dye
A_t: absorbance of MB dye at time t.

RESULTS AND DISCUSSION

Characterization of Photocatalysts

Characterization of PANI, CuO, PCS, and PCI specimens was reported previously and summarized as follows (Turkten et al., 2025). The main FTIR peaks of PANI were observed at 1585 cm^{-1} and 1481 cm^{-1} for the C=N and C=C stretching modes of the quinonoid and benzenoid rings, respectively (Deng et al., 2016) (Figure 1 (a)). The characteristic peak occurring at 1296 cm^{-1} was attributed to the C-N stretching mode of the aromatic amine structure. The peak at 1242 cm^{-1} was ascribed to the conducting protonated form of the polymer indicating the presence of C–$N^{+\bullet}$ stretching vibration in the polaron structure. The intense peak at 1110 cm^{-1} could belong to a vibrational mode of either B–NH^{+}=Q or B–$NH^{+\bullet}$–B (B: benzenoid, Q: quinone) charged units formation due to the protonation process (Ping, 1996; Trchová and Stejskal, 2011). The peaks in the 900 cm^{-1}-700 cm^{-1} region (at 818 cm^{-1} and 797 cm^{-1}) corresponded to the aromatic-ring and out-of-plane C–H deformation vibrations (Stejskal and Sapurina, 2008). The three characteristic peaks of monoclinic CuO observed at 594 cm^{-1}, 523 cm^{-1}, and 470 cm^{-1} were related to the stretching modes of the metal-oxygen (Cu-O) bond (Figures 1 (b) and (c)). A weak peak located at 1651 cm^{-1} belonging to the bending vibration (O-H group) of absorbed water on the surface (Borgohain et al., 2000). It could be seen from the FTIR spectra of PCS composites that the characteristic peaks of both PANI and CuO nanoparticles were exhibited in Figure 1 (b). The peaks belonging to PANI at 1585 cm^{-1} and 1481 cm^{-1} shifted to blue due to the

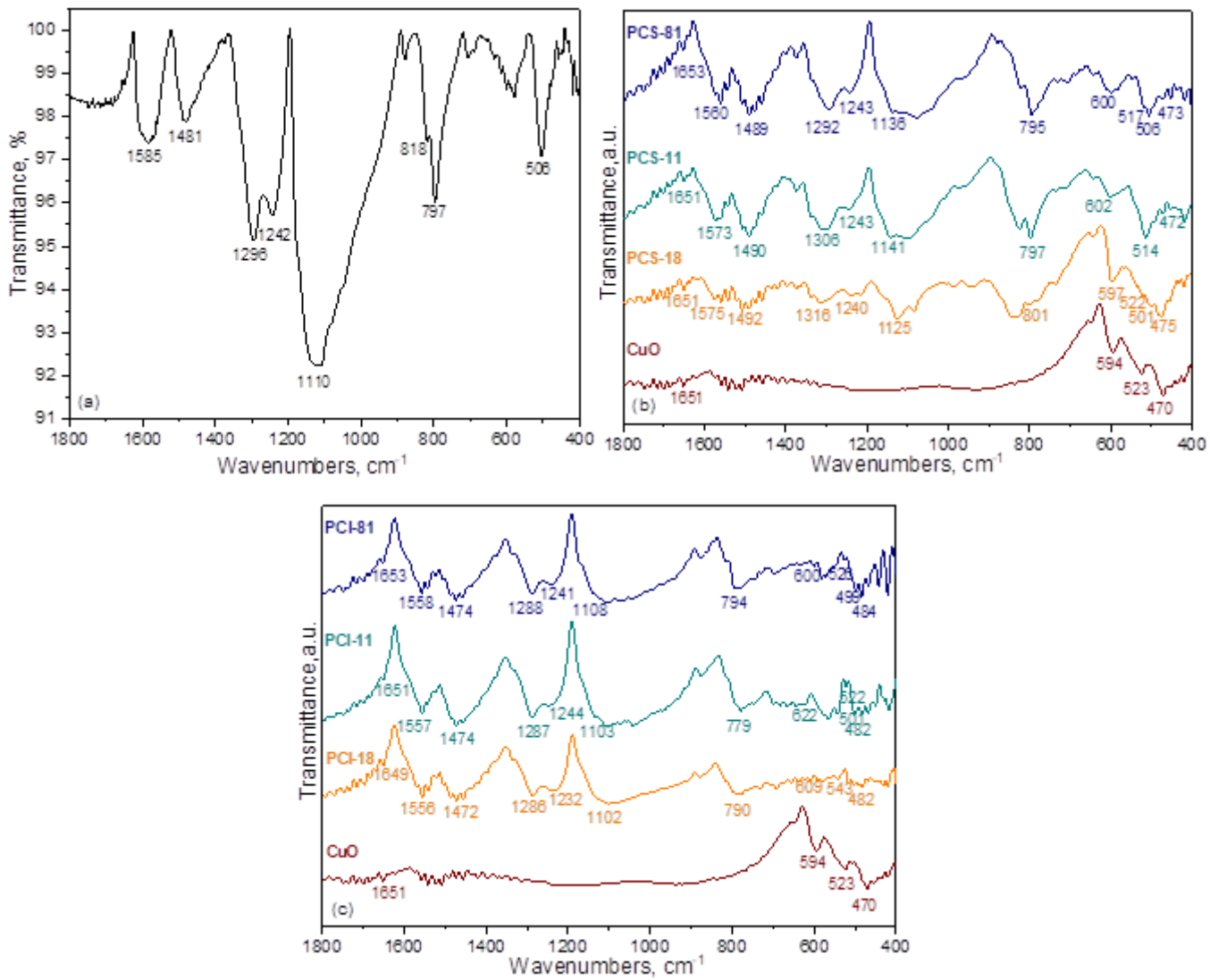


Figure 1. FTIR spectra of (a) PANI, (b) CuO and PCS-composites (c) CuO and PCI-composites.

electrostatic interaction between a charged structure of PANI and CuO nanoparticles in the spectrum of the PCS-81 composite, respectively (Singh and Shukla, 2020). For PCS-81 composite, the peaks at 1292 cm^{-1}, 1243 cm^{-1}, 1136 cm^{-1}, 795 cm^{-1}, and 506 cm^{-1} were ascribed to PANI while the peaks observed at 600 cm^{-1}, 517 cm^{-1}, and 473 cm^{-1} related to CuO. Depending on the increased amount of CuO, the quinonoid and benzenoid ring peaks corresponding to the backbone of PANI shifted, and their intensities also diminished gradually. All PCI composites revealed peaks only representing PANI that differed or changed in peak locations and intensities (Figure 1 (c)). The absence of CuO vibration signals was attributed to the instability of CuO in a highly acidic environment resulting in the dissolution of CuO and releasing Cu^{2+} ions (Fu et al., 2024; Turkten et al., 2025).

The XRD diffractograms of PANI, CuO, PCS-PANI, and PCI-PANI specimens are presented in Figure 2. The peaks of PANI at 2θ = 8.99º, 15.42º, 20.34º, 25.30º, and 27.18º could belong to the (0 0 1), (0 1 1), (0 2 0), (2 0 0), and (1 2 1) reflection semicrystalline planes, respectively (Jaroslav Stejskal et al., 1998).

The XRD diffractogram of CuO exhibited peaks at 2θ = 32.54°, 35.56°, 38.72°, 48.80°, 53.36°, 58.32°, 61.56°, 65.84°, 66.30°, 68.12°, 72.44°, and 75.02° corresponding to (1 1 0), (−1 1 1), (1 1 1), (−2 0 2), (0 2 0), (2 0 2), (−1 1 3), (0 2 2), (−3 1 1), (2 2 0), (3 1 1) and (0 0 4) planes of monoclinic CuO (JCPDS card no. 89-5895) (Devi et al., 2017).

The diffractogram of the PCS-81 and PCS-11 composites revealed semicrystalline PANI and crystalline monoclinic peaks of CuO with a slight spectral shift. The intensity of the PANI peaks decreased substantially depending upon

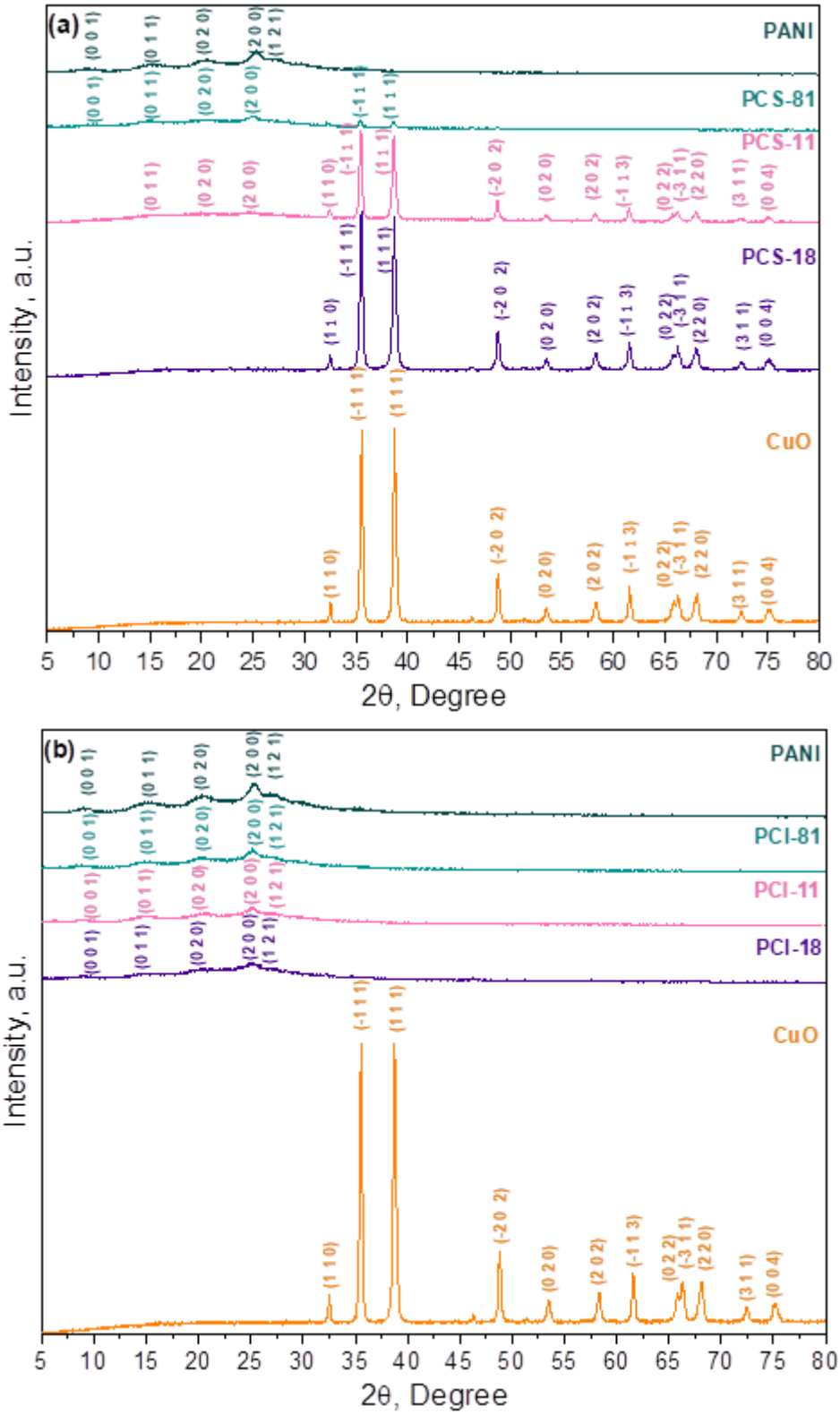


Figure 2. XRD diffractograms for (a) PANI, PCS-PANI composites, and CuO, (b) PANI, PCI-PANI composites, and CuO.

an increase in CuO amount in composites, while all semicrystalline peaks representing PANI disappeared in the PCS-18 composite as expected. However, XRD diffractograms of PCI composites presented only semicrystalline planes associated with PANI. The absence of characteristic reflections corresponding to CuO was a sign of CuO dissolution in a highly acidic medium and this finding was consistent with FTIR analysis.

The calculated crystallite size values of CuO, PCS-81, PCS-11, and PCS-18 specimens were 26 nm, 25 nm, 24 nm, and 23 nm respectively.

SEM images of PANI, CuO, PCS-PANI, and PCI-PANI specimens are presented in Figure 3. PANI revealed large globular-like structures, whereas CuO particles comprise various polyhedral forms. It was observed that the dominant morphology changed from PANI to CuO and the agglomeration tendency increased due to the increasing CuO amount in PCS composites. SEM images corresponded to PCI-81 and PCI-11 maintained the only typical PANI matrix although a loose cotton-like structure was observed in PCI-18 composite as reported in the literature (Ullah et al., 2014). The reason for this noticeable surface modification could be the change in coordination geometry of transition metal ion Cu^{2+} originated from the dissolution of CuO (Pandey et al., 2015). SEM results were consistent with the previously discussed FTIR and XRD analyses.

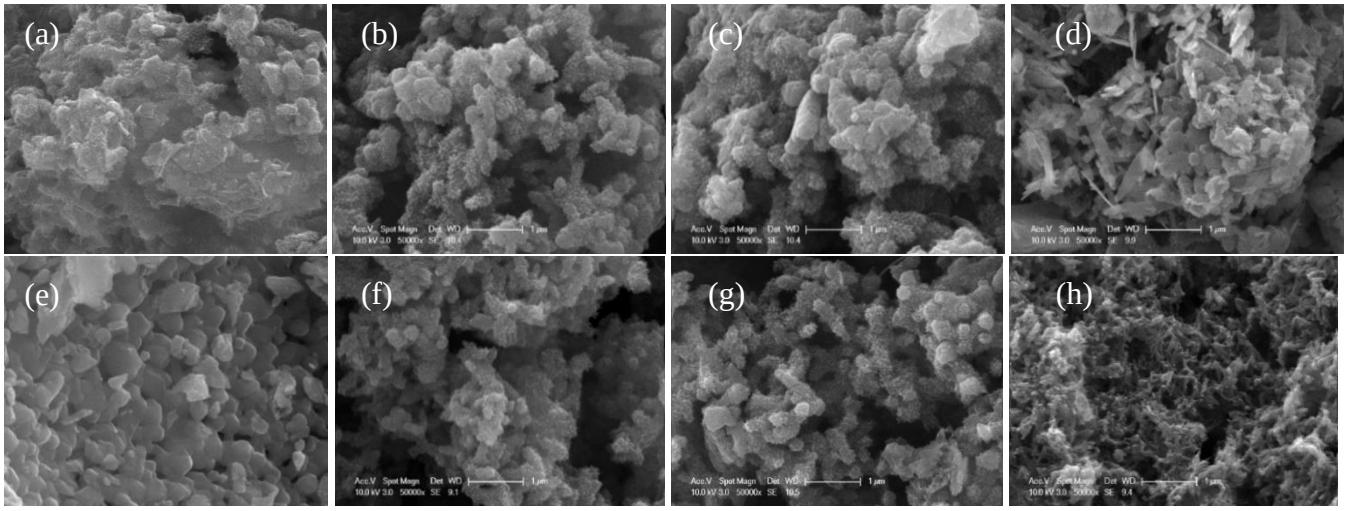


Figure 3. SEM x50000 of (a) PANI, (b) PCS-81, (c) PCS-11, (d) PCS-18, (e) CuO, (f) PCI-81, (g) PCI-11, and (h) PCI-18.

Photocatalytic Activity

MB was chosen as a model dye component to evaluate the photocatalytic performance of CuO nanoparticles, PCS, and PCI composites. The time-dependent UV-vis spectral features of MB (10 mg/L, referred to initial) during 0-300 min exposure are presented in Figures 4 and 5.

The aqueous solution of MB without the catalyst revealed a maximum absorption band at λ_{max}=664 nm, related to the conjugation system involving two dimethylamine-substituted aromatic rings through sulfur and nitrogen atoms. The observed shoulder at λ=613 nm corresponded to the dimmer of MB dye. The bands observed at λ=246 nm and λ=292 nm in the UV region were assigned to the substituted benzenes rings (Rauf et al. 2010). In all cases, the characteristic absorption bands of MB at λ_{max}=664 nm and λ=613 nm decreased with the progress of MB degradation reaction and irradiation time.

A comparison was made between the degree of MB decolorization in the presence of CuO nanoparticles, PCS, and PCI composites (Figure 6) and the corresponding data reported in Table 1.

The degree of MB decolorization in the presence of CuO was 56% after 300 min UV irradiation, which was in accordance with the literature (Shanmugam et al. 2023). The point of zero charge(pH_{pzc}) is an important parameter for predicting the surface charge of the photocatalyst based on the electrostatic interactions between MB and CuO surfaces related to photocatalytic efficiency. The pH_{pzc} value of CuO was reported as ~8.5 (Khan et al. 2019), whereas the pKa value of the cationic dye MB was 3.8 (Poorsajadi et al. 2022). Since the working solution was at around pH=5.5, pH_{pzc}>pH, the surface of CuO was positively charged, and the cationic MB dye with $C–S^{+}=C$ functional group was expected to be repelled away from the positively charged surface of CuO. This was also the case for similar catalyst-dye systems reported (Trandafilović et al. 2017). Interestingly, the PCI-18 composite revealed effective photodegradation compared to CuO and the other composites.

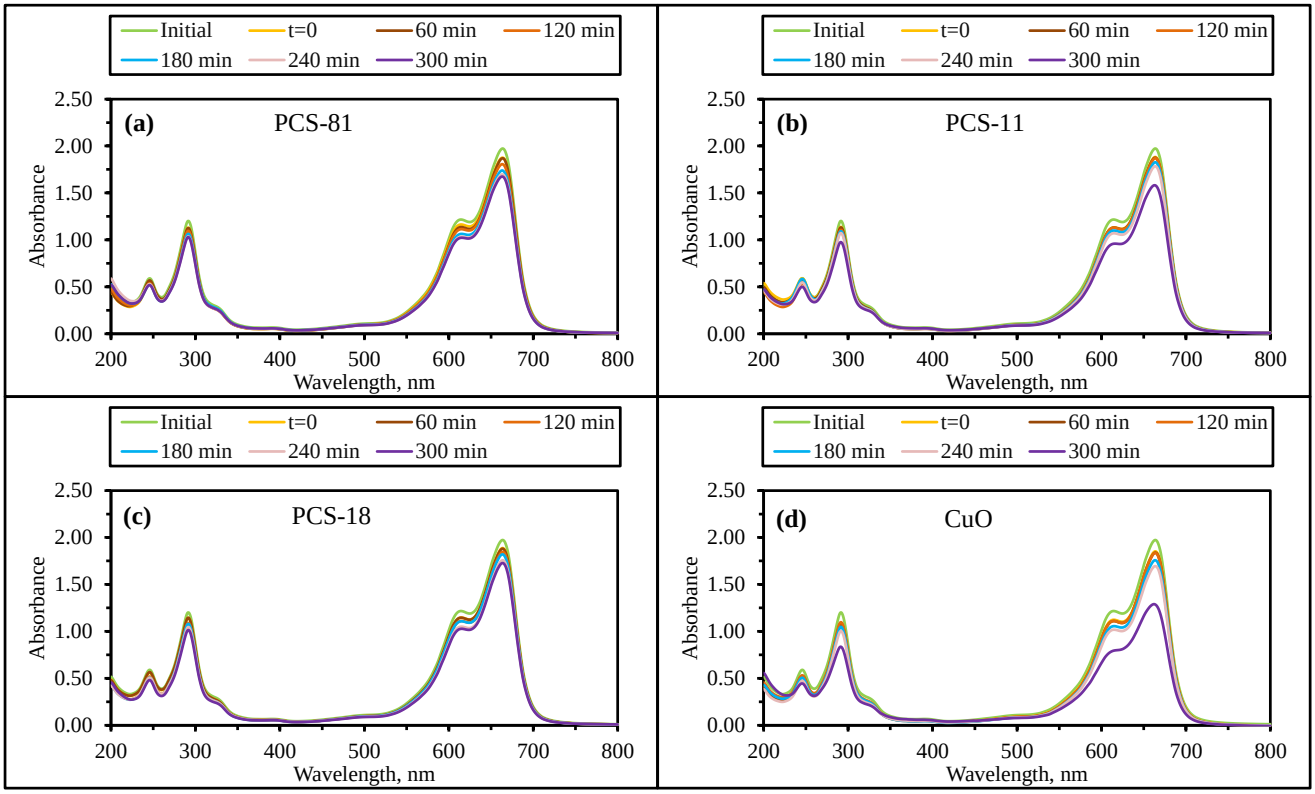


Figure 4. UV-vis spectral features of MB using (a) PCS-81, (b) PCS-11, (c) PCS-18, and (d) CuO.

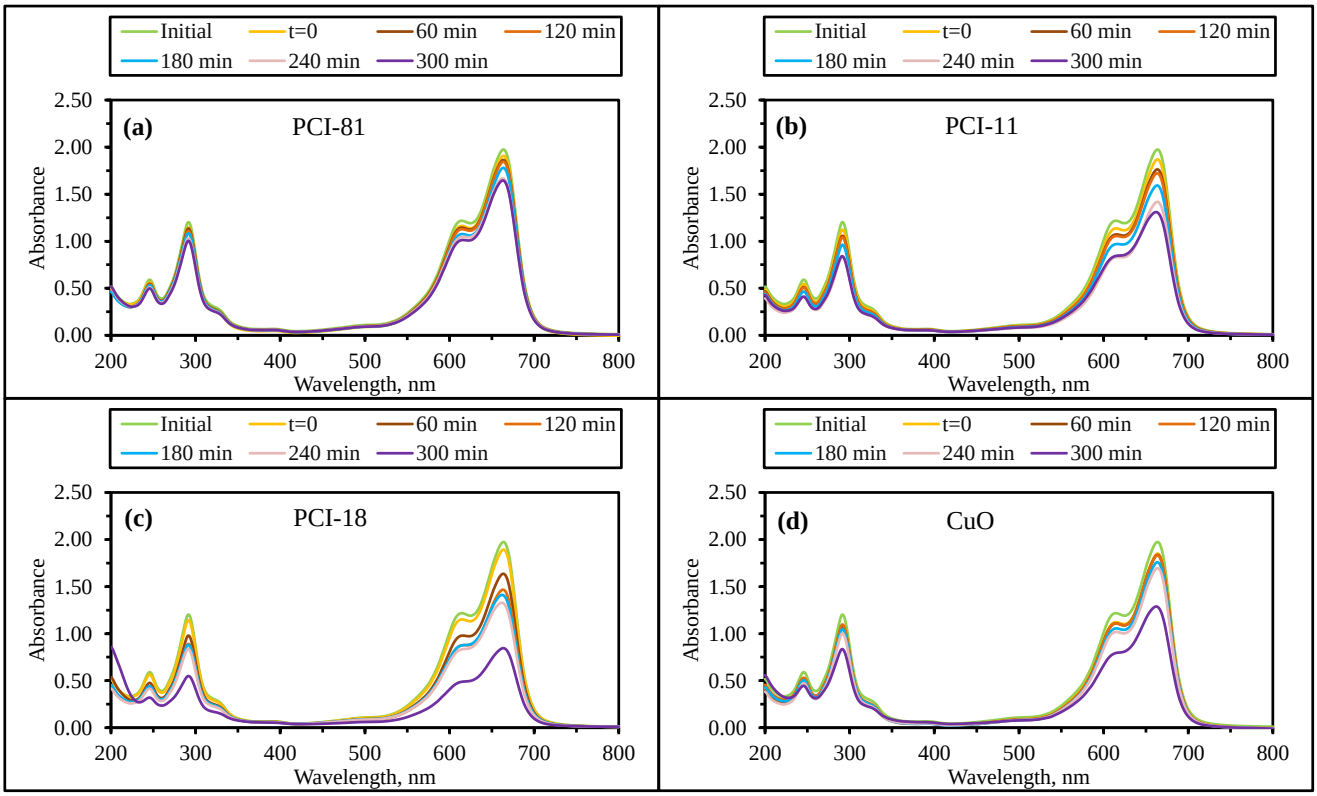


Figure 5. UV-vis spectral features of MB using (a) PCI-81, (b) PCI-11, (c) PCI-18, and (d) CuO.

Indeed, in the presence of PCI-18, approximately 56% of MB was degraded after 300 min, with a lower photocatalytic efficiency (36%) in the case of CuO, and an even smaller value was obtained for the other composites. The morphology, crystalline structure, and dimensions of catalysts played a vital role in photocatalytic activity (Dulta et

al. 2022). The increase in the removal efficiency of MB could be explained by the surface fiber-like, i.e. loose morphology resulting in the considerably high surface area of PCI-18 presented in SEM (Figure 3 (h)).

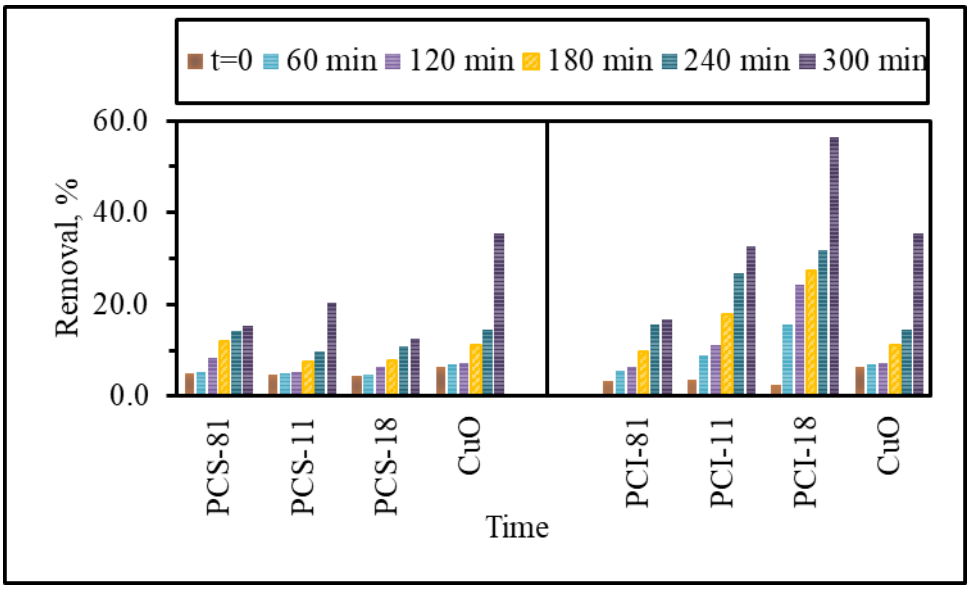


Figure 6. Photocatalytic degradation of MB in the presence of CuO particles, PCS, and PCI composites.

Table 1. Photocatalytic Degradation of MB in the Presence of CuO Particles, PCS, and PCI Composites

	Removal % at time t				
Specimens	**60 min**	**120 min**	**180 min**	**240 min**	**300 min**
CuO	6.99	7.24	11.2	14.4	35.6
PCS-81	5.33	8.51	12.0	14.1	15.3
PCS-11	5.09	5.39	7.56	9.82	20.4
PCS-18	4.80	6.53	7.84	11.0	12.5
PCI-81	5.66	6.54	9.83	15.7	16.8
PCI-11	9.06	11.1	17.9	26.8	32.8
PCI-18	15.6	24.4	27.5	31.9	56.4

As evidenced by spectral features (Figures 4 and 5), the photocatalytic degradation of MB using CuO nanoparticles and PANI-CuO composites following the pseudo-first-order kinetics model expressed by Equation 3.

$$\text{Rate } (R) = -dA/dt = kA \quad (3)$$

R: pseudo-first-order rate, $cm^{-1}min^{-1}$,
A_o: initial absorbance of MB,
A: absorbance of MB at time t,
t: irradiation time, min,
k: pseudo-first-order reaction rate constant, min^{-1}.

Half-life ($t_{1/2}$, min) could easily be calculated by the following equation, $t_{1/2}=0.692/k$.
The related kinetic parameters ($R^2>0.75$) are presented in Table 2.

Table 2. The Kinetic Parameters of CuO Particles, PCS, and PCI Composites

	First-order kinetic parameters		
Specimens	**kx10^{-4}, min^{-1}**	**$t_{1/2}$, min**	**Rate, cm^{-1} min^{-1}**
CuO	11.6	598	0.00229
PCS-18	5.50	1260	0.00109
PCS-11	6.10	1136	0.00120
PCS-81	4.20	1650	0.00083
PCI-81	6.10	1136	0.00120
PCI-11	13.4	517	0.00264
PCI-18	23.5	295	0.00464

On comparing the photocatalytic degradation results of all PCI and PCS specimens, the photocatalytic degradation rate constants could be described as:

PCI-18>PCI-11>CuO>PCI-81=PCS-11>PCS-18>PCS-81

The highest decolorization rate constant was observed when PCS-11 was used among PCS composites and PCI-18 was used among PCI composites. The rate constants obtained for PCI-18 and CuO specimens were k=23.5x10$^{-4.}$ min^{-1} and k=11.6x10$^{-4.}$ min^{-1}, respectively. This finding indicated that the photocatalytic activity of PCI-18 was about two times higher than that of CuO. The reason could be related to the loose cotton-like structure of the PCI-18 composite as seen in the SEM image.

CONCLUSION

The photocatalytic properties of PANI-CuO composites, affected by the synthesis method in terms of structural and morphological differences, were investigated by a comparative kinetic study. FTIR spectra of PCS composites presented the characteristic vibrations, belonging to PANI and CuO that differed or changed in peak locations and intensities, while the peaks of CuO were missing in PCI composites. Additionally, XRD analysis revealed that only characteristic planes corresponding to PANI were observed in PCI composites. The photocatalytic performances of CuO and PANI-CuO composites were studied in the degradation of a cationic MB dye. UV-vis intensities of characteristic bands belonging to MB gradually decreased in the presence of photocatalysts. It is well-known that morphology, crystalline structure, and dimensions play a crucial role in photocatalytic activity. PCI-18 composite achieved a satisfactory degradation efficiency of MB (56%), revealing a loose cotton-like structure derived from the dissolution of CuO.

REFERENCES

Borgohain, K., Singh, J. B., Rama Rao, M. V., Shripathi, T., & Mahamuni, S. (2000). Quantum size effects in CuO nanoparticles. *Physical Review B, 61*(16), 11093-11096. doi:10.1103/PhysRevB.61.11093

Boucherdoud, A., Kherroub, D. E., Dahmani, K., Douinat, O., Seghier, A., Bestani, B., & Benderdouche, N. (2024). Polyaniline/cupric oxide organometallic nanocomposites as a sonocatalyst for the degradation of methylene blue: Experimental study, RSM optimization, and DFT analysis. *Journal of Organometallic Chemistry, 1022*, 123386. doi:https://doi.org/10.1016/j.jorganchem.2024.123386

Cui, Z., Yuan, R., Chen, H., Zhou, B., Zhu, B., & Zhang, C. (2024). Application of polyaniline-based photocatalyst in photocatalytic degradation of micropollutants in water: A review. *Journal of Water Process Engineering, 59*, 104900. doi:https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2024.104900

Deng, Y., Tang, L., Zeng, G., Dong, H., Yan, M., Wang, J., Hu, W., Wang, J., Zhou, Y., & Tang, J. (2016). Enhanced visible light photocatalytic performance of polyaniline modified mesoporous single crystal TiO_2 microsphere. *Applied Surface Science, 387*, 882-893. doi:https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2016.07.026

Devi, L. V., Selvalakshmi, T., Sellaiyan, S., Uedono, A., Sivaji, K., & Sankar, S. (2017). Effect of La doping on the lattice defects and photoluminescence properties of CuO. *Journal of Alloys and Compounds, 709*, 496-504. doi:https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.03.148

Eskizeybek, V., Sarı, F., Gülce, H., Gülce, A., & Avcı, A. (2012). Preparation of the new polyaniline/ZnO nanocomposite and its photocatalytic activity for degradation of methylene blue and malachite green dyes under UV and natural sun lights irradiations. *Applied Catalysis B: Environmental, 119-120*, 197-206. doi:10.1016/j.apcatb.2012.02.034

Fu, H., Shewfelt, S., Sylvan, L. D., Gaillard, J.-F., & Gray, K. A. (2024). Polyaniline-metal oxide coatings for biocidal applications: Mechanisms of activation and deactivation. *Chemosphere, 346*, 140543. doi:https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.140543

Gelaw, T. B., Sarojini, B. K., & Kodoth, A. K. (2022). Chitosan/Hydroxyethyl Cellulose Gel Immobilized Polyaniline/CuO/ZnO Adsorptive-Photocatalytic Hybrid Nanocomposite for Congo Red Removal. *Journal of Polymers and the Environment, 30*(10), 4086-4101. doi:10.1007/s10924-022-02492-4

Hoffmann, M. R., Martin, S. T., Choi, W., & Bahnemann, D. W. (1995). Environmental Applications of Semiconductor Photocatalysis. *Chemical Reviews, 95*(1), 69-96. doi:10.1021/cr00033a004

Jangid, N. K., Jadoun, S., Yadav, A., Srivastava, M., & Kaur, N. (2021). Polyaniline-TiO_2-based photocatalysts for dyes degradation. *Polymer Bulletin, 78*(8), 4743-4777. doi:10.1007/s00289-020-03318-w

Kallawar, G. A., & Bhanvase, B. A. (2024). A review on existing and emerging approaches for textile wastewater treatments: challenges and future perspectives. *Environmental Science and Pollution Research, 31*(2), 1748-1789. doi:10.1007/s11356-023-31175-3

Khader, E. H., Muslim, S. A., Saady, N. M. C., Ali, N. S., Salih, I. K., Mohammed, T. J., Albayati, T.M., & Zendehboudi, S. (2024). Recent advances in photocatalytic advanced oxidation processes for organic compound degradation: A review. *Desalination and Water Treatment, 318*, 100384. doi:https://doi.org/10.1016/j.dwt.2024.100384

Khan, S., Noor, T., Iqbal, N., & Yaqoob, L. (2024). Photocatalytic Dye Degradation from Textile Wastewater: A Review. *ACS Omega, 9*(20), 21751-21767. doi:10.1021/acsomega.4c00887

Koysuren, H. N., & Koysuren, O. (2023a). Photocatalytic Activity of Boron Doped CuO and Its Composite with Polyaniline. *Polymer-Plastics Technology and Materials, 62*(3), 281-293. doi:10.1080/25740881.2022.2113894

Koysuren, O., & Koysuren, H. N. (2023b). Application of CuO and its composite with polyaniline on the photocatalytic degradation of methylene blue and the Cr(VI) photoreduction under visible light. *Journal of Sol-Gel Science and Technology, 106*(1), 131-148. doi:10.1007/s10971-023-06049-2

Lanjwani, M. F., Tuzen, M., Khuhawar, M. Y., & Saleh, T. A. (2024). Trends in photocatalytic degradation of organic dye pollutants using nanoparticles: A review. *Inorganic Chemistry Communications, 159*, 111613. doi:https://doi.org/10.1016/j.inoche.2023.111613

Muzammal, S., Ahmad, A., Sheraz, M., Kim, J., Ali, S., Hanif, M. B., Hussain, I., Pandiaraj S., Alodhayb, A., Javed, M.S., Al-bonsrulah, H.A.Z., & Motola, M. (2024). Polymer-supported nanomaterials for photodegradation: Unraveling the methylene blue menace. *Energy Conversion and Management: X, 22*, 100547. doi:https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2024.100547

Nekooie, R., Shamspur, T., & Mostafavi, A. (2021). Novel CuO/TiO_2/PANI nanocomposite: Preparation and photocatalytic investigation for chlorpyrifos degradation in water under visible light irradiation. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry, 407*, 113038. doi:https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2020.113038

Pandey, K., Yadav, P., & Mukhopadhyay, I. (2015). Elucidating the effect of copper as a redox additive and dopant on the performance of a PANI based supercapacitor. *Physical Chemistry Chemical Physics, 17*(2), 878-887. doi:10.1039/C4CP04321A

Ping, Z. (1996). In situ FTIR–attenuated total reflection spectroscopic investigations on the base–acid transitions of polyaniline. Base–acid transition in the emeraldine form of polyaniline. *Journal of the Chemical Society, Faraday Transactions, 92*(17), 3063-3067. doi:10.1039/FT9969203063

Rahman, K. H., & Kar, A. K. (2020a). Effect of band gap variation and sensitization process of polyaniline (PANI)-TiO_2 p-n heterojunction photocatalysts on the enhancement of photocatalytic degradation of toxic methylene blue with UV irradiation. *Journal of Environmental Chemical Engineering, 8*(5), 104181. doi:https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104181

Rahman, K. H., & Kar, A. K. (2020b). Titanium-di-oxide (TiO_2) concentration-dependent optical and morphological properties of PAni-TiO_2 nanocomposite. *Materials Science in Semiconductor Processing, 105*, 104745. doi:https://doi.org/10.1016/j.mssp.2019.104745

Rathore, B. S., Chauhan, N. P. S., Rawal, M. K., Ameta, S. C., & Ameta, R. (2020). Chitosan–polyaniline–copper(II) oxide hybrid composite for the removal of methyl orange dye. *Polymer Bulletin, 77*(9), 4833-4850. doi:10.1007/s00289-019-02994-7

Sajith, M., S, H., & Sambhudevan, S. (2024). A Comprehensive Review on Photocatalytic Degradation of Textile Dyes Using PANI-Semiconductor Composites. *Water, Air, & Soil Pollution, 235*(9), 594. doi:10.1007/s11270-024-07399-5

Saravanan, R., Sacari, E., Gracia, F., Khan, M. M., Mosquera, E., & Gupta, V. K. (2016). Conducting PANI stimulated ZnO system for visible light photocatalytic degradation of coloured dyes. *Journal of Molecular Liquids, 221*, 1029-1033. doi:https://doi.org/10.1016/j.molliq.2016.06.074

Scherrer, P. (1918). Estimation of the size and internal structure of colloidal particles by means of röntgen. *Nachrichten von der Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen, 2*, 96–100.

Singh, P., & Shukla, S. K. (2020). Structurally optimized cupric oxide/polyaniline nanocomposites for efficient humidity sensing. *Surfaces and Interfaces, 18*, 100410. doi:https://doi.org/10.1016/j.surfin.2019.100410

Stejskal, J., Riede, A., Hlavatá, D., Prokeš, J., Helmstedt, M., & Holler, P. (1998). The effect of polymerization temperature on molecular weight, crystallinity, and electrical conductivity of polyaniline. *Synthetic Metals, 96*(1), 55-61. doi:10.1016/s0379-6779(98)00064-2

Stejskal, J., & Sapurina, I. (2008). Polyaniline — A Conducting Polymer. In U. Schubert, N. Hüsing, & R. M. Laine (Eds.), *Materials Syntheses: A Practical Guide* (pp. 199-207). Vienna: Springer Vienna.

Trchová, M., & Stejskal, J. (2011). Polyaniline: The infrared spectroscopy of conducting polymer nanotubes (IUPAC Technical Report). *Pure and Applied Chemistry, 83*(10), 1803-1817. doi:doi:10.1351/PAC-REP-10-02-01

Turkten, N., Karatas, Y., & Bekbolet, M. (2021a). Conducting Polymers and Photocatalysis: A Mini Review on Selected Conducting

Polymers and Photocatalysts as TiO_2 and ZnO. *Journal of Photocatalysis, 2*(4), 252-270. doi:10.2174/2665976x02666211201121530

Turkten, N., Karatas, Y., & Bekbolet, M. (2021b). Preparation of PANI Modified ZnO Composites via Different Methods: Structural, Morphological and Photocatalytic Properties. *Water, 13*(8). doi:10.3390/w13081025

Turkten, N., Karatas, Y., Uyguner-Demirel, C. S., & Bekbolet, M. (2023). Preparation of PANI modified TiO_2 and characterization under pre- and post- photocatalytic conditions. *Environmental Science and Pollution Research, 30*(51), 111182-111207. doi:10.1007/s11356-023-30090-x

Turkten, N., Karatas, Y., & Yalcin Gurkan, Y. (2025). New Insights into the Application of Copper-Based Polymer Composites: A Depth Experimental and Computational *Inorganic Chemistry Communications*.

Ullah, R., Bilal, S., Ali, K., & Shah, A.-u.-H. A. (2014). Synthesis and characterization of polyaniline doped with Cu II chloride by inverse emulsion polymerization. *Synthetic Metals, 198*, 113-117. doi:https://doi.org/10.1016/j.synthmet.2014.09.024

Vijayalakshmi, S., Kumar, E., Ganeshbabu, M., Venkatesh, P. S., & Rathnakumar, K. (2021). Structural, electrical, and photocatalytic investigations of PANI/ZnO nanocomposites. *Ionics, 27*(7), 2967-2977. doi:10.1007/s11581-021-04041-w

Wang, F., Min, S., Han, Y., & Feng, L. (2010). Visible-light-induced photocatalytic degradation of methylene blue with polyaniline-sensitized TiO_2 composite photocatalysts. *Superlattices and Microstructures, 48*(2), 170-180. doi:https://doi.org/10.1016/j.spmi.2010.06.009

Wang, F., & Min, S. X. (2007). TiO_2/polyaniline composites: An efficient photocatalyst for the degradation of methylene blue under natural light. *Chinese Chemical Letters, 18*(10), 1273-1277. doi:https://doi.org/10.1016/j.cclet.2007.08.010

Yang, C., Dong, W., Cui, G., Zhao, Y., Shi, X., Xia, X., Tang, B., & Wang, W. (2017). Enhanced photocatalytic activity of PANI/TiO_2 due to their photosensitization-synergetic effect. *Electrochimica Acta, 247*, 486-495. doi:https://doi.org/10.1016/j.electacta.2017.07.037

KSÜ Mühendislik Bilimleri Dergisi, 28(2), 2025
Araştırma Makalesi

KSU J Eng Sci, 28(2), 2025
Research Article

Kahramanmaras Sutcu Imam University
Journal of Engineering Sciences

Geliş Tarihi : 18.01.2025
Kabul Tarihi :16.04.2025

Received Date : 18.01.2025
Accepted Date : 16.04.2025

YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜNÜN VE KAZIK GEOMETRİSİNİN KAZIK DAVRANIŞI ÜZERİNDEKİ ETKİSİNİN ARAZİ DENEYLERİ VE SAYISAL ANALİZLERLE ARAŞTIRILMASI

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF SURFACE ROUGHNESS AND PILE GEOMETRY ON PILE BEHAVIOR WITH FIELD TESTS AND NUMERICAL ANALYSES

Ömer YEŞİLTEPE[*] (ORCID :0000-0002-9337-9157)

Kilis 7 Aralık Üniversitesi Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, İnşaat Bölümü, Kilis, Türkiye

*****Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Ömer YEŞİLTEPE, omeryesiltepe@kilis.edu.tr

ÖZET

Yüzeysel temellerin yetersiz kaldığı durumlarda kullanılan kazık sistemleri, üst yapıdan gelen yükü sağlam tabakalara aktararak ya da yüzey sürtünmesi ile içerisinde bulunduğu zemine aktarmak sureti ile karşılayan derin temel sistemleridir. Kum zeminlerde imal edilen kazıklar genellikle üzerlerine aldıkları yükü yüzey sürtünme direnci ile zemine aktarmaktadırlar. Bu sebeple kum zeminlerde imal edilen kazıkların yüzey pürüzlülüğü taşıma gücü bakımından önem arz etmektedir. Bu çalışma kapsamında yüzeyi pürüzsüz olarak imal edilen baret ve fore kazık olarak iki beton kazık ile eksenel basınç kuvveti altında arazi deneyleri gerçekleştirilmiştir. Daha sonrasında bu kazıklar içerisine yerleştirildikleri kum zeminin kimyasal yapıştırıcılar kullanılarak kazığa yapıştırılması ile pürüzlendirilip aynı koşullar altında yüklemeye maruz bırakılarak elde edilen sonuçlar pürüzsüz kazık sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Deney sonuçları karşılaştırıldığında pürüzlü kazıkların pürüzsüz kazıklara göre daha iyi performans gösterdikleri ortaya konmuştur. Baret kazıklarda ki yüzey pürüzlülüğü etkisinin fore kazıklardan daha fazla katkı sağladıkları görülmüştür. Ayrıca yapılan arazi deneyleri pürüzsüz kazıklar için üç boyutlu olarak sonlu elemanlar metoduyla çalışan Plaxis 3D programında modellenmiş ve analiz sonuçları ile deney sonuçlarının uyumlu oldukları görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Yüzey pürüzlülüğü, baret kazık, fore kazık, arazi deneyi, sayısal analiz

ABSTRACT

Deep foundation systems are pile systems that transfer the load from the superstructure to the solid soil layers or to the soil it is in by surface friction, and are used in cases where superficial foundations are insufficient. Piles manufactured in sandy soils generally transfer the load they receive to the soil through surface friction resistance. For this reason, the surface roughness of piles manufactured in sandy soils is important in terms of bearing capacity. Within the scope of this study, firstly field tests have conducted under axial compression force with two concrete piles, namely barrettes and bored piles, manufactured with smooth surfaces. Afterwards, these piles were roughened by bonding the sand used in the field tests to the pile using chemical adhesives, and the results obtained by applying compressive load under the same conditions were compared with the results of smooth surface piles. When the test results were compared, it was revealed that rough surface piles performed better than smooth surface piles. It has been observed that the surface roughness effect on barrette piles contributes more than that of bored piles. In addition, for smooth surface piles the field tests were modeled in three dimensions using the Plaxis 3D program, which works with the finite element method, and it was observed that the analysis results and the test results were compatible.

ToCite: YEŞİLTEPE, Ö., (2025). YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜNÜN VE KAZIK GEOMETRİSİNİN KAZIK DAVRANIŞI ÜZERİNDEKİ ETKİSİNİN ARAZİ DENEYLERİ VE SAYISAL ANALİZLERLE ARAŞTIRILMASI. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 28(2), 863-871.

Keywords: Surface roughness, barrette pile, bored pile, field test, numerical analysis

GİRİŞ

Dünyada nüfusun artması ve bunun getirdiği yeni ihtiyaçlar neticesinde yüksek katlı yapıların sayısında artışlar olmuştur. Bu tip yapıların yüklerinin sağlam zeminlere aktarılabilmesi açısından kazıklar önemli bir yere sahiptir. Bu sebeple kazıklı derin temel sistemleri oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır.

Derin temeller, yüzeysel temellerin yetersiz kaldığı durumlarda üst yapı yüklerini sağlam tabakalara aktarılması ve oturma miktarının müsaade edilebilir seviyelerde kalması için inşa edilirler. Bu amaçla genellikle dairesel kesitli kazıklar kullanılsa da bu kazıklara alternatif olarak baret kazık uygulamalarının giderek arttığı görülmektedir. Dairesel kesitli kazıklara göre daha fazla sürtünme yüzeyi olması, aynı miktarda malzeme kullanılmasıyla daha fazla taşıma kapasitesi ve dolayısıyla ekonomi sağlaması baret kazıkların kullanımının artma nedenlerindendir (Yıldız, 2011; Köpüklü, 2015; Okar, 2018).

Kazıklar üzerine gelen yükü kazığın çevre sürtünmesi ve kazık uç direnci ile karşılarlar. Bu durumda kazığın geometrisinin ve yüzey pürüzlülüğünün kazığın taşıma gücü üzerinde önemli etkisinin olacağı söylenebilir. Kazık geometrisinin ve yüzey pürüzlülüğünün kazığın taşıma gücü üzerindeki etkisinin araştırıldığı literatür verileri aşağıda sunulmuştur.

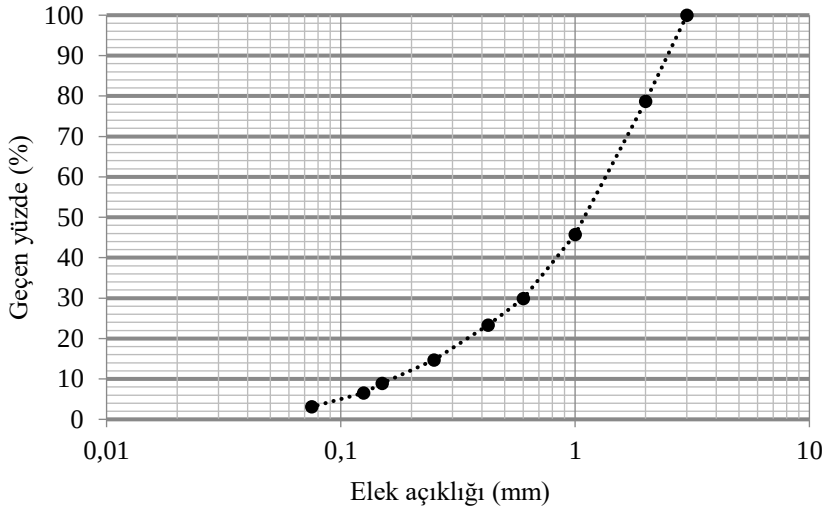
Toğrol ve Tan (2003) tarafından yapılan çalışmada, kazığın çeperi ile kazığı çevreleyen zemin arasındaki sürtünmeden ileri gelen taşıma gücü değerinin, kazığın yer aldığı her zemin tabakasının çevre sürtünmesi ayrı ayrı tespit edilip toplanması sonucunda elde edildiği belirtilmiştir. Horikoshi vd. (2003) yaptıkları çalışmalarında, kazık ile kazığı çevreleyen zemin arasındaki yük-oturma davranışlarının analizi için düşey ve yatay yüklemeler altında deneyler yapmışlardır. Bajad ve Sahu (2008) yaptıkları çalışmada, yumuşak kil zemine yerleştirilmiş kazıklı radye temellerin yük–deplasman davranışlarını incelemek adına deneyler gerçekleştirmişlerdir.
Al-Mosawi vd.(2011) yaptıkları çalışmada farklı kazık ebatları ve konfigürasyonlarında kazıklar ile yük–deplasman davranışlarını incelemek amacıyla laboratuvar deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Vu vd. (2014) tarafından yapılan çalışmada Kazık çapı, kazık yerleşim konfigürasyonu, kazık uzunluğu ve kazık sayısının kazıklı temellerin davranışı üzerindeki etkilerini incelemek amacıyla Plaxis 3D programıyla analizler gerçekleştirmiştir. Bağrıaçık (2015) tarafından yapılan çalışmada kum zemine yerleştirilmiş olan kazıklarına tasarımında dikkat edilmesi gereken parametreleri incelemek amacıyla laboratuvar deneyleri gerçekleştirmiştir. Ayrıca sonuçları Plaxis 3D sonlu elemanlar programı ile yapılan sayısal analiz sonuçlarıyla karşılaştırmıştır. Deshpande ve Thakare (2017) tarafından yapılan çalışmada farklı kazık parametrelerinin kazıklı temellerin optimum olarak tasarlanmasındaki etkilerini incelemek amacıyla Midas GTS 3D programında birtakım analizler gerçekleştirmiştir. Hsu vd. (2017) yaptıkları çalışmada daha önce inşa edilmiş olan baret kazıklar üzerinde yapılmış basınç testlerinden elde edilen grafiklerden yararlanarak kazıkların sürtünme dirençleri ve taşıma gücü kapasiteleri üzerinde araştırmalar yapmışlardır. Mangushev ve Nikitina (2018) yaptıkları çalışmada, daha önce inşa edilmiş olan bir yapının altında bulunan baret ve fore kazıklara ait statik test sonuçları ile Plaxis 3D programında gerçekleştirdikleri sayısal analiz sonuçlarını kıyaslamışlardır. Chang ve Lin (2019) tarafından yapılan çalışmada, arazide uygulaması yapılmış olan baret kazıkların yükleme deney verileri ile iki ve üç boyutlu sonlu elemanlar analiz sonuçları ve iki boyutlu sonlu farklar analiz sonuçlarını karşılaştırmışlardır. Baca vd. (2020) yaptıkları çalışmada, kum zemine yerleştirilmiş çelik kazıklar üzerinde laboratuvar deneyleri gerçekleştirmişlerdir. Çalışma sonucunda kazıklarda kullanılan statik yük testleri için yeni bir yöntemden bahsetmişlerdir. Fındık vd. (2021) tarafından yapılan çalışmada, kazıklı temellerin tasarımında zemin sıkılığı üst yapı kat sayısı, kazık boyu gibi parametreleri değiştirmek suretiyle Sap2000 programında sayısal analizler gerçekleştirmişlerdir. Rivera ve Estores (2022) tarafından yapılan çalışmada, siltli kum zeminde inşa edilmiş kazıklar üzerinde yapılan dinamik deney sonuçlarıyla sonlu elemanlar analiz sonuçlarını karşılaştırmışlardır.

Yapılan çalışmalar incelendiğinde kazıkların yüzey pürüzlülüğünün ve kazık geometrisinin kazıkların yük-deplasman davranışları üzerindeki etkileri ile ilgili olarak çokça laboratuvar deneyi ve sayısal analiz çalışmaları ve vaka analizi incelemeleri gerçekleştirilmiştir. Ancak arazi deneyleri üzerine yapılan çalışmalara rastlanılmamıştır. Hem kazık geometrisinin hem de yüzey pürüzlülüğünün kazık davranışı üzerindeki etkilerini büyük ölçekli arazi deneyleri ve sayısal analizlerle inceleyerek gerçek boyutlarda üretilen kazıkların tasarımına ışık tutmak amacıyla, bu çalışmada ilk olarak arazi ortamında, pürüzsüz olarak betondan üretilen 8cm x 28cm kesitinde 80 cm uzunluğunda

baret kazık ile aynı kesit alana sahip 16,9 cm çapında ve 80 cm uzunluğunda fore kazık kum zemine yerleştirilip, basınç testleri gerçekleştirilerek yük – deplasman davranışları incelenmiş ve taşıma gücü değerleri tespit edilmiştir. Daha sonra aynı kazıkların dış yüzeyleri içerisine yerleştirilen kum zeminin yapıştırılması suretiyle pürüzlendirilerek aynı deneyler tekrar edilmiştir. Son olarak deneyler Plaxis 3D programında modellenerek arazi deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Yapılan bu çalışma ile kazık geometrisinin ve yüzey pürüzlülüğünün kazık davranışı üzerindeki etkilerinin arazi deneyleri ile incelenmesi gerçekleştirilmiş ve sonuçları sunulmuştur.

MATERYAL VE YÖNTEM

Arazi ortamında yapılan deneylerde kum zemin kullanılmıştır. Kum zemin deney sahasına yağmurlama yöntemiyle yerleştirilerek gevşek zemin durumu oluşturulmuştur. Kullanılan kum zeminin endeks özelliklerini belirleyebilmek için elek analizi gerçekleştirilmiştir. Kullanılan zeminin sınıfı dane çapı dağılım eğrisi kullanılarak, Birleştirilmiş Zemin Sınıflandırma Sistemine (USCS) göre kötü derecelendirilmiş kum (SP) olarak tespit edilmiştir. Kullanılan zemine ait dane dağılım eğrisi Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Kullanılan Kum Zeminin Granülometre Eğrisi

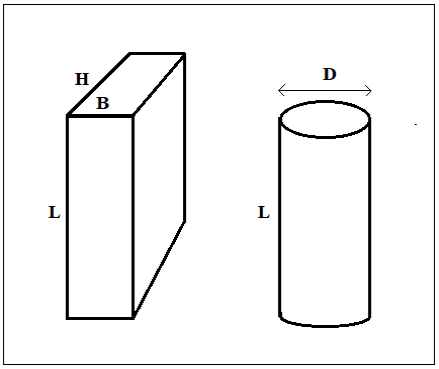
Deneylerde Kullanılan Kazıklar

Deneylerde kullanılan kazıklar, 2mm sac malzemeden oluşturulan daire ve dikdörtgen kalıplara içi yağlandıktan sonra C25 beton dökülüp 28 gün kürde bekletilerek elde edilmiştir. Kalıplar ve kazıklara ait görseller Şekil 2'de kazıkların kesitleri ise Şekil 3'de verilmiştir.



a b c

Şekil 2. a. Kazık Kalıpları **b.** Pürüzsüz Kazıklar **c.** Pürüzlü Kazıklar



Şekil 3. Baret ve Fore Kazıkların Kesit Görünüşleri

Deney Düzeneği

Deney sisteminin iskeleti önceden tasarlanmış ve imal edilmiş olan 60 cm çapında 12m uzunluğunda 4 adet reaksiyon kazığına bağlanmış olan karşılıklı iki ana kiriş ve bu ana kirişlere bağlanmış olan bir ara kirişten oluşmaktadır. Bu ara kiriş deney sahası boyunca istenilen konuma calaskal yardımıyla hareket ettirilebilmekte ve montaj vidaları ile sabitlenebilmektedir. Deney kazığı ve ara kiriş hizalandıktan sonra kazığın üzerine yerleştirilen piston kirişten kuvvet alarak yükü deney kazığına aktarmaktadır. Deney anında iki farklı deplasman ölçer ve yük değerleri elektronik ortama anında kaydedilebilmektedir. Deneylerde kullanılan kumun maksimum ve minimum kuru birim hacim ağırlıkları ASTM D4254-16 (2016) ve ASTM D4253-16 (2016) standartlarına göre bulunmuştur. γ_{kmaks} değeri tespit edilirken zemin numunesi tokmak ile sıkıştırılma işlemi yapılarak yerleştirilirken, γ_{kmin} değeri tespit edilirken kum zemin numunesi kap içerisinde herhangi bir sıkıştırma işlemi yapılmadan yerleştirilmiştir. Deneyler üç defa tekrar edilmiştir. Arazi deneylerinin yapıldığı alanın genişliği 2,3m, uzunluğu 2,8m, yüksekliği 2,5m boyutlarındadır. Arazi deneylerinde kullanılan kum zemin gevşek bir biçimde D_r=%30-35 (γ_k=16,4 kN/m^3) 20cm'lik tabakalar halinde 50 cm sabit yükseklikten dökülerek yerleştirilmiştir. Deneyler İskenderun Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Laboratuvarının yanında yer alan arazi deney sahasında gerçekleştirilmiştir. Deney düzeneği Şekil 4'de verilmiştir.



Şekil 4. Arazi Deney Düzeneği

Deneylerin Yapılışı

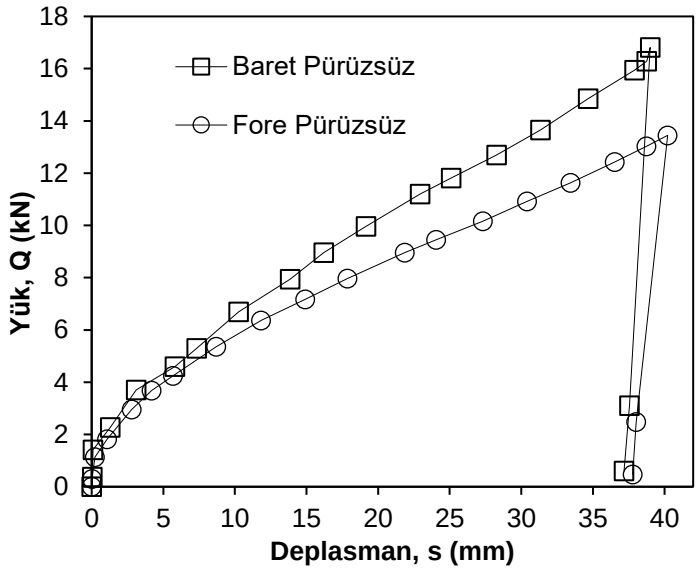
İlk olarak kesit geometrisinin kazık davranışı üzerindeki etkilerini incelemek amacıyla bir adet pürüzsüz fore kazık arazi deney alanının ortasına yerleştirilip etrafı kum zeminle gevşek bir biçimde doldurularak 3mm/dak yükleme hızıyla eksenel basınç kuvveti uygulanarak deney gerçekleştirilmiştir. Aynı anda iki farklı deplasman ölçer yardımıyla kazığın yaptığı deplasmanlar kaydedilmiştir. Deneyler fore kazık çapının iki katı kadar deplasman oluşuncaya kadar devam ettirilmiştir. Deneyler iki kez tekrar edilmiştir. Fore kazık üzerinde gerçekleştirilen deneyler tamamlandıktan sonra aynı uygulamalar pürüzsüz baret kazık ile iki kez gerçekleştirilmiştir.

Pürüzsüz kazıklar için deneyler bitirildikten sonra kullanılan kazıkların çevresi güçlü yapışkanlar ile kaplanarak kullanılan kum zeminin kazıkların çevresine tamamen yapışması sağlanmıştır. Daha sonra kazık pürüzlülüğünün kazık davranışı üzerindeki etkilerini incelemek amacıyla pürüzlü kazıklar kullanılarak aynı deneyler tekrar yapılmıştır.

BULGULAR

Pürüzsüz Kazıklar İle Yapılan Arazi Deney Sonuçları

Yapılan arazi deneylerinin sonucunda baret kazığın aynı kesit alana sahip olan fore kazıktan daha fazla basınç kuvveti taşıyıp, aynı kuvvet değerlerinde daha az düşey deplasman yaptığı tespit edilmiştir. Yapılan deneylerin sonuçları Şekil 5'de verilmiştir.

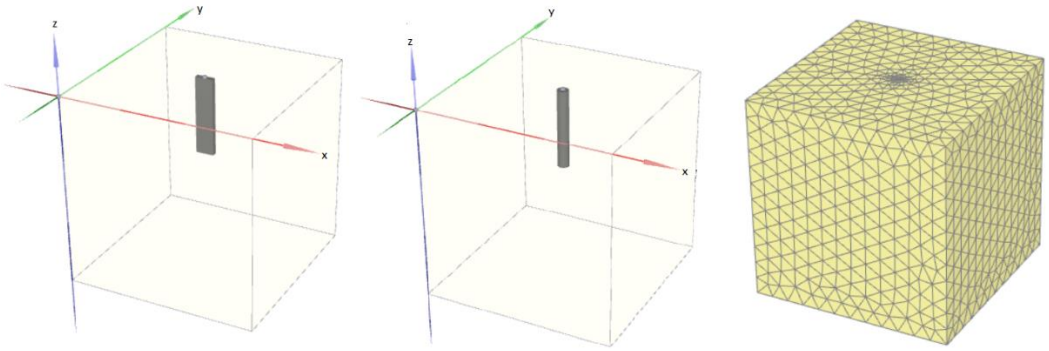


Şekil 5. Pürüzsüz Kazıkların Deney Sonuçları

Sonuçlar incelendiğinde fore kazık çapının %10'una karşılık gelen kuvvetler nihai taşıma gücü olarak kabul edilirse pürüzsüz baret kazığın taşıma gücü 9,2 kN olurken pürüzsüz fore kazık için bu değer 7,7 kN olmaktadır. Bu sonuçlara göre baret kazığın %20 daha fazla yük taşıdığı görülmektedir.

Pürüzsüz Kazıklar İle Sayısal Analiz Sonuçlarının Karşılaştırılması

Pürüzsüz kazıkların arazi deneyleri tamamlandıktan sonra deneyler Plaxis 3D programında modellenmiştir. Sayısal analizler için öncelikle deney ortamı aynı ölçülerle bir hacim olarak oluşturulmuştur. Tablo 2'de verilen özellikler bu oluşturulan hacime atanmıştır. Sonrasında kazıklar için aynı boyutlarda hacim oluşturularak Tablo 1'de verilen kazık özellikleri bu hacimlere atanmıştır. Kullanılan kazığa ve zemin ortamına ait parametreler Tablo 1'de verilmiştir. Zemin bünye modeli olarak Hardening Soil bünye modeli kullanılmıştır. Ağ sıkılığı için denemeler yapılmış ve medium ağ sıkılığı seçilmiştir. Ayrıca kazık çevresinde sıklaştırma yapılmıştır. Yapılan modellere ait görseller Şekil 6'da verilmiştir.



a b c

Şekil 6. a. Baret Kazık Model Görünümü **b.** Fore Kazık Model Görünümü **c.** Ağ Yapısının Görünümü

Tablo 1. Kazık Parametreleri

Parametreler	Değerler
E (MPa)	27×10^{3}
γ (kN/m³)	24
v	0,2

Tablo 2. Kum Zemin Parametreleri

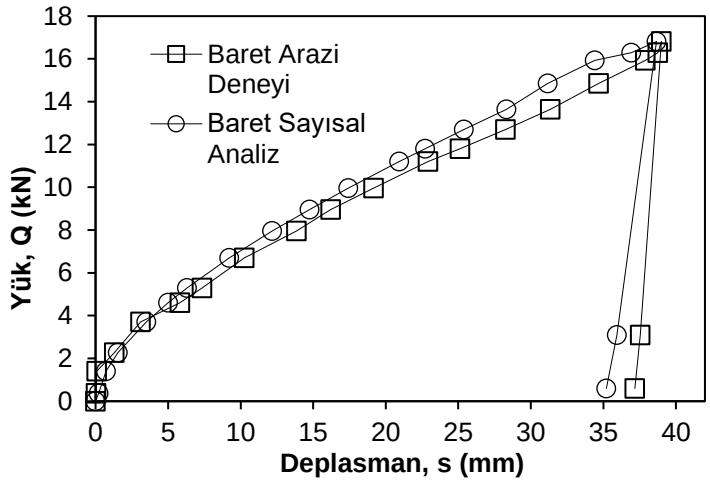
Parametreler		Değerler
γ_{unsat}	(kN/m³)	16,4
E_{50}	(MPa)	11,5
E_{oed}	(MPa)	34,5
E_{ur}	(MPa)	34,5
v	-	0,3
c	(MPa)	$0,3\times10^{-3}$
φ	(°)	35,6
Ψ	(°)	0
R_f	-	0,99
R_{inter}	-	0,4
Dr	%	30-35

Yapılan sayısal analiz sonuçları incelendiğinde arazi deneyleri ile uyumlu oldukları görülmüştür. Baret kazık için arazi deney sonuçlarıyla sayısal analiz sonuçlarına ait grafik Şekil 7'de, fore kazık için Şekil 8'de verilmiştir.

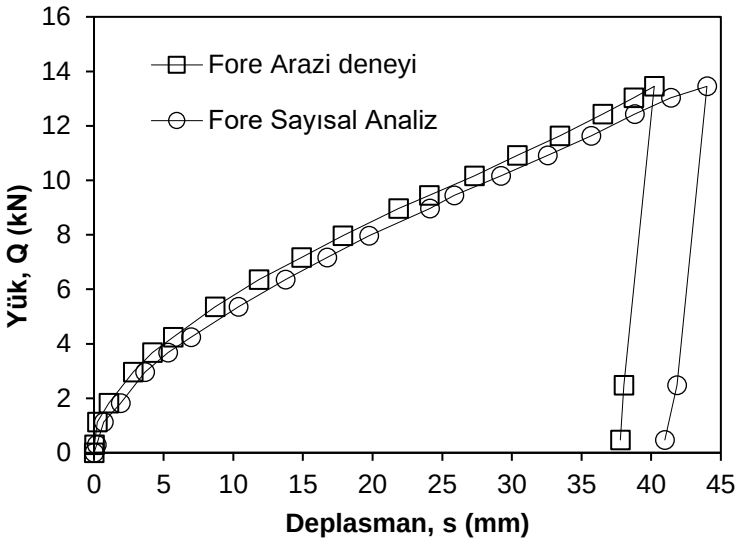
Arazi deney sonuçları ile sayısal analiz sonuçlarının hem baret kazıkta hem de fore kazıkta uyumlu oldukları görülmüştür. Baret kazık için sayısal analiz sonuçları arazi deney sonuçlarına göre deplasman bakımından biraz fazla olduğu tespit edilirken fore kazıkta bu durumun tersine olduğu görülmüştür. Ancak bu farkların önemsenmeyecek kadar az olduğu değerlendirilmiştir.

Pürüzlü Kazıklar İle Yapılan Arazi Deney Sonuçlarının Pürüzsüz Deney Sonuçları İle Karşılaştırılması

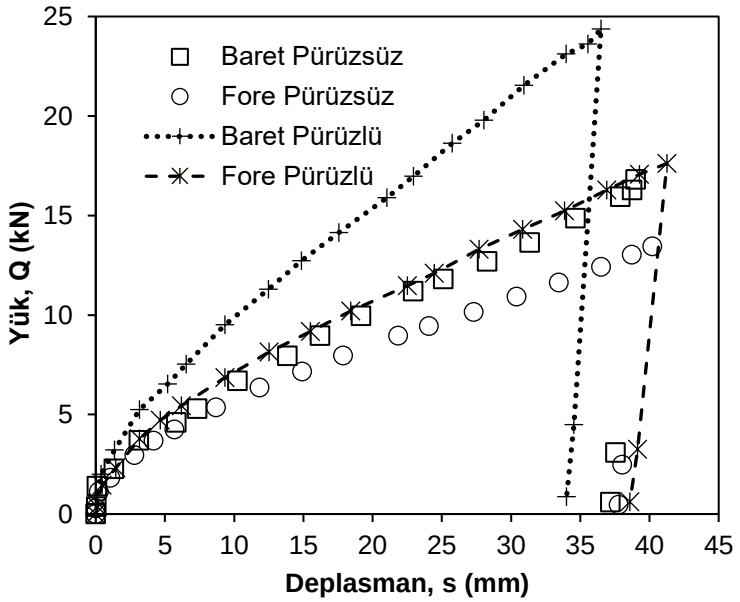
Pürüzsüz kazık deney sonuçları ile pürüzlü kazık deney sonuçlarını hep birlikte değerlendirmek amacıyla bir grafikte birlikte olacak şekilde Şekil 9'da sunulmuştur.



Şekil 7. Baret Kazık İçin Arazi Deneyi ve Sayısal Analiz Sonuçları



Şekil 8. Fore Kazık İçin Arazi Deneyi ve Sayısal Analiz Sonuçları



Şekil 9. Pürüzlü ve Pürüzsüz Kazıklara Ait Arazi Deney Sonuçları

Pürüzlü deney sonuçları ile pürüzsüz deney sonuçları karşılaştırıldığında, fore kazık çapının %10'una karşılık gelen taşıma gücü değerlerine göre baret kazığın pürüzlü durumda pürüzsüz duruma göre taşıma gücü kapasitesinin %50 civarında artış gözlenirken, fore kazık için taşıma gücündeki artış oranının %30 civarında olduğu görülmüştür. Bu durumun aynı kesit alana sahip baret kazığın fore kazığa göre daha fazla çevre sürtünme alanına sahip olmasından ve kazık geometrisinin çeper sürtünme kuvvetleri üzerinde oldukça fazla etkiye sahip olmasından kaynaklandığı şeklinde değerlendirilmiştir.

TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu çalışma kapsamında baret ve fore kazık kullanılarak kazık geometrisinin kazık davranışı üzerindeki etkileri ve kazık yüzey pürüzlülüğünün bu etkiyi ne oranda değiştirdiğini tespit etmek amacıyla arazi deneyleri yapılmış ve bu deneylerden elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

Baret ve fore kazıklar pürüzsüz olarak arazi deneylerine tabi tutulduğunda baret kazığın fore kazığa göre sürtünme yüzeyinin daha fazla olmasından dolayı daha fazla taşıma gücü değerleri elde edilmiştir. Teorik olarak pürüzsüz baret kazığın fore kazığa göre sürtünme yüzeyi alanı %35 daha fazla olmasına karşı arazi deneylerinde baret kazığın fore kazıktan %20 daha fazla taşıma gücü değerine sahip olduğu görülmüştür. Bu farkın kum zeminin gevşek olarak yerleştirilmesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Arazi deney sonuçları ile sayısal analiz sonuçlarının oldukça uyumlu olduğu görülmüştür. Pürüzlü kazıklar ile yapılan arazi deneyleride ise baret kazığın fore kazığa göre taşıma gücü değerinin %40 daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Bu sonuç teorik olarak elde edilen değere yakın olduğu söylenebilir.

Bu sonuçlara göre deplasman bazlı problemlerdeki üstünlüğü ve taşıma gücü kapasitesinin fazlalığı sebebiyle baret kazıkların kullanımının daha avantajlı olacağı söylenebilir. Ayrıca sayısal analiz sonuçlarının arazi deneyleri sonuçları ile uyumlu olması nedeniyle daha büyük boyutlara sahip kazıklar için sayısal analizler ile kazık davranışları hakkında fikir sahibi olunabileceği düşünülmektedir.

Pürüzlü kazıklar ile yapılan arazi deney sonuçları pürüzsüz kazıkların sonuçları ile karşılaştırıldığında kazık çevresinin pürüzlü olmasının kazık taşıma gücünü oldukça arttırdığı görülmüştür. Baret kazığın fore kazığa göre taşıma gücü artış oranı olarak daha yüksek değerler vermesinden dolayı yüzey pürüzlülüğünün baret kazığın davranışın fore kazığa göre daha fazla etkilediği söylenebilir. Tüm bu sonuçlar birlikte değerlendirildiğinde kazık imalatı esnasında kazıkların yüzey pürüzlülüğünün arttırılmasına yönelik çalışmalara yönelinmesi gerektiği düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

Al-Mosawi, M.J., Fattah, M.Y. and Al-Zayadi, A. A. O., 2011. Experimental Observations on the Behavior of a Piled Raft Foundation, Journal of Engineering, 17(4), 1–11.
https://10.31026/j.eng.2011.04.13

ASTM D4254-16 (2016). Standard test methods for minimum index density and unit weight of soils and calculation of relative density. *ASTM International.*
https://www.astm.org

ASTM D4253-16 (2016). Standard test methods for maximum index density and unit weight of soils using a vibratory table. *ASTM International.*
https://www.astm.org

Baca, M., Brzakala, W. ve Rybak, J. (2020). Bi-directional static load tests of pile models. Applied Sciences, 10 (5492).
https://doi.org/10.3390/app10165492

Bağrıaçık, B. (2015) Kohezyonsuz zeminlerde düşey yüklü kazıklı radye temellerin analizi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi.

Bajad, S.P. and Sahu, R. B., 2008. An experimental study on the behavior of vertically loaded piled raft on soft clay, The 12th Intl. Conf. Of International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics (IACMAG), 84–90.
https://www.researchgate.net/publication/242419852_An_Experimental_Study_on_the_Behaviour_of_Vertically_Loaded_Piled_Raft_on_Soft_Clay

Chang, D.-W. ve Lin, Y. K. (2019). Three-dimensional finite element analyses of barrette piles under compression and uplift loads with field data assessments. *Geotechnical Engineering*. 50(3), 58-73.
https://www.researchgate.net/publication/340527834

Deshpande, S.S. Ve Thakare, S.W. (2017) Performance of piled raft foundation subjected to non-uniform load, International Journal Of Civil Engineering And Technology, 8 (4), 16031613. ISSN Print: 0976-6308 and ISSN Online: 0976-6316
https://iaeme.com/Home/issue/IJCIET?Volume=8&Issue=4

Fındık M., Çelik İ. D., Uzundurukan S., Başar E. E., Barlas E.(2021) Kazıklı Radye Temel Sisteminde Temel-Zemin Etkileşiminin Yapısal Davranış Üzerine Etkisi. Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, Cilt 26, Sayı 2, 573-588
https://10.17482/uumfd.850730

Hsu, M. C., Yu, C. H. ve Chen, C. H. (2017). Case studies forside resistance of barrette piles using results of ultimate load tests. *Journal of GeoEngineering, 12*(2), 65–79.
https://10.6310/jog.2017.12(2).3

Horikoshi, K., Matsumoto, T., Hashizume, Y., Watanabe, T. and Fukuyama, H., 2003. Performance of piled raft foundations subjected to static horizontal loads," International Journal of Physical Modeling in Geotechnics,3, 37–50.
https://10.1680/ijpmg.2003.030204

Köpüklü, H. (2015). Baret kazıklı temeller ile ilgili hesap yöntemleri, imalat ve kalite kontrol esasları. (Yüksek Lisans Tezi), İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü. İstanbul

Mangushev, R. A. ve Nikitina, N. S. (2018). Evaluation and analysis of bearing capacity of bored piles and deep-laid pile-barrette for a high-rise building on loose grounds based on calculations and field tests. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*, *14*(2), 109–116.
https://doi.org/10.22337/2587-9618-2018-14-2-109-116

Okar, M. (2018). Kum zeminlerde yatay yüklü baret kazıkların davranışının belirlenmesi. (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü. İstanbul

Rivera, N. E. ve Estores, G. B. (2022). Single pile fem modeling: ultimate capacity determination of bored piles embedded in silty-sands using modified drucker-prager cap model. *Civil Engineering and Architecture, 10*(1), 175–193.
https://doi.org/10.13189/cea.2022.100116

Toğrol, E. ve Tan, A. O., 2003. Kazıklı Temeller, Birsen Yayınevi.

Vu, A., Pam, D. C., Nyugen T., He, Y. (2014) 3d Finite element analysis on behaviour of piled raft foundations, 4th International Conference On Civil Engineering, Architecture And Building Materials, China, 580-583.
https://10.4028/www.scientific.net/AMM.580-583.3

Yıldız, K. (2011). Baret kazıklı temellerde düşey taşıma kapasitesi, (Yüksek Lisans Tezi) İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü,İstanbul

KSÜ Mühendislik Bilimleri Dergisi, 28(2), 2025
Araştırma Makalesi

KSU J Eng Sci, 28(2), 2025
Research Article

Kahramanmaras Sutcu Imam University
Journal of Engineering Sciences

Geliş Tarihi : 21.01.2025
Kabul Tarihi :18.03.2025

Received Date : 21.01.2025
Accepted Date : 18.03.2025

MACHINE LEARNING-BASED MODEL DEVELOPMENT IN MOBILE HEALTH APPLICATIONS AND DEVICE-CLOUD INTEGRATION

MOBİL SAĞLIK UYGULAMALARINDA MAKİNE ÖĞRENMESİ TEMELLİ MODEL GELİŞTİRME VE MODELİN CİHAZ-BULUT ENTEGRASYONU

Özge ÇİÇEK[1] (ORCID: 0009-0004-8982-3341)
Sema CANDEMİR[1*] (ORCID: 0000-0001-8619-5619)

[1] Eskisehir Technical University, Artificial Intelligence in Healthcare Laboratory, Computer Engineering Department, Eskisehir, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Sema CANDEMIR, semacandemir@eskisehir.edu.tr

ABSTRACT

Mobile Health (mHealth) uses mobile devices and wireless technology to support healthcare practices, enabling widespread access to health services. Recent advancements in machine learning (ML) have enhanced healthcare by improving disease diagnosis and monitoring. However, integrating and executing machine learning models, especially those based on image processing and deep learning, on mobile devices can be challenging due to limited processing power and storage capacity. This study describes the steps of developing an ML-based model and its integration into mobile devices and cloud environments. A skin disease predictor using the MobileNet architecture was developed as a use-case mHealth application. Techniques such as transfer learning, data augmentation, and focal loss were employed to enhance model performance. The mHealth model was then integrated into a mobile device and the cloud environment. The on-device model exhibited faster prediction times (average 108.3 ms) compared to the cloud-based model (average 1281.2 ms). While on-device deployment ensured data privacy and offline functionality, the cloud approach provided scalability and easier updates, but at the expense of latency and data security. By providing a comparative analysis, this work demonstrates the feasibility of integrating ML models into mHealth applications, emphasizing the importance of balancing performance, cost, and usability.

Keywords: Mobile health, machine learning, MobileNet, device-cloud integration

ÖZET

Mobil Sağlık (mHealth), mobil cihazlar ve kablosuz teknolojiyi kullanarak sağlık hizmetlerini destekleyen uygulamaları içerir ve sağlık hizmetlerine yaygın erişim sağlar. Makine öğrenimi (ML) alanındaki son gelişmeler, hastalık teşhisi ve takibini iyileştirerek sağlık hizmetlerini geliştirmiştir. Ancak, özellikle görüntü işleme ve derin öğrenmeye dayalı makine öğrenimi modellerini mobil cihazlara entegre etmek ve çalıştırmak, sınırlı işlem gücü ve depolama kapasitesi nedeniyle zor olabilir. Bu çalışma, bir ML tabanlı modelin geliştirilmesi ve mobil cihazlar ile bulut ortamlarına entegrasyonu adımlarını açıklamaktadır. Örnek mHealth uygulaması olarak MobileNet mimarisi kullanılarak bir cilt hastalığı tahmin modeli geliştirilmiştir. Model performansını artırmak için transfer öğrenimi, veri artırma ve focal loss gibi teknikler kullanılmıştır. Eğitilmiş mHealth modeli daha sonra bir mobil cihaza ve bulut ortamına entegre edilmiştir. Cihaz üzerindeki model, bulut tabanlı modele kıyasla daha hızlı tahmin süreleri (cihaz üzerindeki model ortalama 108,3 ms) sergilemiştir (bulut tabanlı model ortalama 1281,2 ms). Cihaz üzerindeki dağıtım, veri gizliliği ve çevrimdışı işlevsellik sağlarken, bulut yaklaşımı ölçeklenebilirlik ve daha kolay güncellemeler sunmuş, ancak gecikme süresi ve veri güvenliği açısından dezavantajlar yaratmıştır. Bu çalışma ML modellerinin mHealth uygulamalarına entegrasyonunun uygulanabilirliğini göstermekte, karşılaştırmalı bir analiz sunmakta ve performans, maliyet ve kullanılabilirlik arasında bir denge kurmanın önemini vurgulamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Mobil sağlık, makine öğrenmesi, MobileNet, cihaz-bulut entegrasyonu

ToCite: ÇİÇEK, Ö., & CANDEMİR, S., (2025). MACHINE LEARNING-BASED MODEL DEVELOPMENT IN MOBILE HEALTH APPLICATIONS AND DEVICE-CLOUD INTEGRATION. *Kahramanmaras Sutcu Imam University Journal of Engineering Sciences*, 28(2), 872-882.

INTRODUCTION

With rapid technological advancements and increasing mobile phone usage, the number of health sector mobile applications has grown. These applications enable effective participation of patients and healthcare providers, ultimately improving patient outcomes (Sama et al.,2014). Mobile Health (mHealth) refers to using mobile devices and wireless technology to support medical and public health practices, enabling instant access to health solutions and services, regardless of location. mHealth allows patients and their families to track their own care and customize healthcare services according to their needs, making healthcare applications portable, easily accessible, and personalized (Silva et al.,2015). The widespread usage of mobile devices, low cost of developing mobile applications, and their flexibility have driven rapid growth in healthcare mobile applications. According to the World Health Organization (https://www.who.int/), ~90% of the world's population can benefit from mobile technologies at a relatively low cost. A study by the Health Services Informatics Institute (Molina-Recio et al.,2015) found over 40,000 health and medical applications in Apple stores, increasing to 97,000 when including applications from the Play Store and other platforms. mHealth applications have become the third fastest-growing sector after games and utility programs.

Machine Learning (ML) models analyze medical data, learn distinctive disease patterns, and make predictions for new data. Recently, these models, especially deep learning approaches, have shown great potential in improving healthcare. However, running ML-based models, particularly deep learning models for health applications, on mobile devices is challenging due to limited processing power and storage capacity. Therefore, developing efficient ML models tailored for mobile environments and exploring cloud integration to mitigate device limitations is necessary.

This study outlines the development stages of an ML-based model for mHealth solutions, its integration into both mobile devices and the cloud, and provides a comparison of these environments. The study's contributions are as follows: (i) Given its potential as an mHealth application, the focus is on creating an ML based model to predict skin diseases. The entire process is detailed. The model is trained with a comprehensive dataset to learn distinctive features specific to various skin conditions. (ii) Critical factors in developing a mobile application include the model's high performance, fast feedback, and efficient use of storage. Considering these factors, we chose the MobileNet architecture (Howard et al.,2014) as the base of our model due to its space efficiency, fewer parameters, and sufficient layers for positive classification performance. (iii) Data sensitivity is a key concern in healthcare applications. For this reason, deploying the model directly on a device may be a better option. This study explains how to integrate a trained model into a device. (iv) Deep learning models often require many layers and large datasets for good performance. However, these models can take up a lot of space and may not run efficiently on mobile devices with limited hardware. To address this, integrating the model into the cloud for processing can be a practical alternative. This study also details the process of cloud integration. (v) Finally, the study compares the advantages and disadvantages of on-device versus cloud integration, including a comparison of their response times using the same test data.

The rest of the study is structured as follows: Related Work section provides a brief overview of related studies and highlights the differences between our work and existing literature. Materials and Methods section describes the model development and its integration into both device and cloud environments. Experimental Results and Analysis section presents the experimental results. Conclusion section concludes the study by summarizing our findings and provides comparative insights into the integration approaches of on-device and cloud environments.

RELATED WORK

Many studies have examined mHealth applications. For example, Jung et al. developed an Android-based app to help diabetes patients track their condition (Jung et al.,2014). Similarly, Susanto et al. (Susanto et al.,2022) reviewed smartphone-integrated image recognition systems used in medical areas like dermatology, ophthalmology, nutrition, neurology, respiratory medicine, blood disorders, gynecology, and dentistry. Khan et al. (Khan and Alotaibi, 2020) conducted another review focusing on AI-based big data analysis tools in mHealth applications. They highlighted the use of mobile sensors like cameras, wearable devices, GPS, microphones, and accelerometers to monitor physical activities, track locations, and assess sleep patterns. These technologies significantly improve the effectiveness of mHealth applications.

Several studies have used machine learning to predict skin diseases. Esteva et al. applied Convolutional Neural Networks (CNN) to identify skin cancer from clinical images, achieving over 90% sensitivity and specificity in

distinguishing between malignant and benign lesions (Esteiva et al., 2017). Goceri conducted a comprehensive review (Goceri, 2021) and trained a MobileNet model with a hybrid loss function to classify skin diseases, achieving 94% accuracy. The study also designed a user interface for the model, but did not address how the model could be integrated into devices or the cloud. In a related study, Dai et al. (Dai et al., 2019) integrated a skin disease classification model into a mobile application, testing the model directly on the device. This study emphasized the benefits of running predictions on the device, such as keeping sensitive patient images secure and providing faster feedback. However, they did not optimize the model for storage space, which is crucial for mobile applications. They chose AlexNet model with 8 convolution layers, 61 million parameters, and 250 MB of storage (Han et al.,2015), making it inefficient for mHealth applications.

This study outlines the development of an ML model for mHealth solutions, focusing on its integration into mobile devices and the cloud, and comparing these two environments. Our study differs from similar research in the following ways: (i) We focused on developing a model capable of predicting skin diseases, providing an in-depth development outline. While Dai et al. (Dai et al.,2019) briefly touch on model development and device integration for predicting skin disease, our study explores these aspects more thoroughly. (ii) Critical factors for a mobile application include the model's high performance, fast feedback, and efficient use of storage space. Our study addresses these factors by training a MobileNet model, known for its compact size, fewer parameters, and adequate depth for robust performance. In contrast, Dai et al. (Dai et al.,2019) used an AlexNet model, which is less efficient in terms of storage space. Therefore, our study offers a better-planned solution for mobile implementation compared to Dai et al.'s work. (iii) Our study outlines the integration of the model into both device and cloud environments and compares the performance of integrated models using the same test data. In this regard, the study differs from both Goceri`s (Goceri, 2021) and Dai et al.'s (Dai et al., 2019) works.

MATERIALS AND METHODS

Dataset

This study uses the HAM10000 dataset (Tschandl et al.,2018) compiled by a dermatology professor from the Medical University of Vienna and Queensland University. The dataset contains 10,000 dermatoscopic images collected from patients over 20 years, along with metadata including age, gender, and cell type. It includes seven types of skin diseases: Melanocytic Nevi (nv), Benign Keratosis-like Lesions (bkl), Dermatofibroma (df), Vascular Lesions (vasc), Actinic Keratoses and Intraepithelial Carcinoma (akiec), Basal Cell Carcinoma (bcc), and Melanoma (mel). Table 1 lists the class labels and the number of samples in each class. Figure 1 shows example images from the dataset.

Table 1. Summary of Skin Disease Classes In The HAM10000 Dataset (Tschandl et al.,2018)

Class Label	Abbreviation	# of Samples	# of Training Samples after Augmentation
Actinic Keratoses and Intraepithelial Carcinoma	akiec	327	5684
Basal Cell Carcinoma	bcc	514	5668
Benign Keratosis-like Lesions	bkl	1,099	5896
Dermatofibroma	df	115	4747
Melanoma	mel	1,113	5886
Melanocytic Nevi	nv	6705	5979
Vascular Lesions	vasc	142	5570



Figure 1. Sample Images From The HAM10000 Dataset (Tschandl et al.,2018)

Model Architecture

The MobileNet architecture (Howard et al.,2014) was selected for model development due to its design for devices with limited computational power and storage capacity. MobileNet uses small kernel layers to minimize the number of parameters and computational costs. Table 2 compares MobileNet with other well-known models, showing its smaller size and fewer parameters, which make it a suitable choice for resource-constrained devices.

Table 2. Comparison Of Well-known Machine Learning Models By Size, Number Of Parameters, And Layers, Emphasizing MobileNet's Suitability For Resource-constrained Devices

Model	Size (MB)	# of Parameters	# of Layers
AlexNet	250	61 M	8
MobileNet	16	4.3 M	55
Vgg-16	528	138.4 M	16
ResNet50	98	25 M	107
Inception V3	92	23.9 M	189
DenseNet201	80	20.2 M	402

Model Training

Developing machine learning algorithms requires comprehensive training data. However, curating datasets for medical problems is particularly challenging due to the difficulty in obtaining expert annotations (Candemir et al.,2021). One way to overcome this challenge is to use pre-trained models on larger datasets from other domains (Weiss et al.,2016). In this study, we used a pre-trained MobileNet model with weights trained on ImageNet (Krizhevsky et al.,2017). Our development dataset includes samples from seven types of skin diseases, with varying numbers of instances for each class, as shown in Table 1. To address this class imbalance, we applied data augmentation to increase the training samples in underrepresented classes. The augmentation methods and their parameter settings are listed in Table 3. The number of training samples for each class after augmentation is listed in Table 1.

Table 3. Data Augmentation Techniques And Their Parameters Used To Address Class Imbalance During Training

Data Augmentation Method	Ratio
Rotation	180 degrees
Zoom	0.1
Height Shift Range	0.1
Width Shift Range	0.1

During model training, we used two types of loss functions: cross-entropy loss and focal loss. Cross entropy loss is commonly used metric for multi-class classification tasks, evaluating the model's predicted probabilities for each class. This loss function increases as the predicted probability deviates from the true label and treats each data point equally within each class. The formula for cross-entropy loss is:

$$L_{CE}(y_i, \hat{y}_i) = -\sum_{i=1}^{N} y_i \, log \; (\hat{y}_i) \tag{1}$$

where N denotes the number of classes to be predicted, y_i is the true value for class i, and $\hat{y}_i$ is the predicted value for class i.

The cross-entropy loss function does not account for the varying difficulty of classifying different classes or individual cases within each class. To address the inter-class and intra-class variability in the dataset, we used Focal Loss (Lin et al.,2017), which is designed to handle challenging cases by giving more weight to samples where the model struggles. This loss function adjusts the model's focus toward harder-to-classify samples, helping it learn from these cases, leading to improved performance across all classes. The formula for focal-loss is:

$$L_{Focal}(y_i, \hat{y}_i) = -\sum_{i=0}^{N} \alpha_i y_i (1-\hat{y}_i)^{\gamma} \, log \; (\hat{y}_i) \tag{2}$$

Where N represents the number of classes to be predicted, y_i represents the true value for class i, . d $\hat{y}_i$ represents the predicted value for class i. The parameters α and γ help balance the importance of classes and control the focus on

hard-to-classify examples, respectively. The implementation details of model development are summarized in Section 4.1.

Integrating Machine Learning Model to Mobile Device

Integrating ML-based mHealth models into mobile devices presents several challenges: (i) The limited computational resources of mobile devices make it difficult to run complex ML models, especially deep learning architectures with many parameters. (ii) The limited storage capacity of mobile devices complicates the deployment of these models, as deep learning models require large storage capacity to store the model's architecture and weights. (iii) Processing and transmitting health data requires data protection to comply with personal data protection laws. Given the sensitivity of health data, ensuring patient privacy is crucial. There are two main approaches to integrating ML models into mobile devices: On-Device Deployment and Cloud Deployment.

On-Device Deployment

In on-device deployment, the model is trained on a high-performance computer. Once trained, the model's architecture and weights are stored on a mobile device, allowing predictions to be performed directly on the device. The approach is illustrated in Figure 2. On-device deployment has several advantages. It ensures the privacy and security of patient data since the data remains on the device, reducing the risk of data breaches. It provides faster prediction feedback as the model runs locally. It also eliminates the need for an internet connection with offline functionality. This approach is also cost-effective compared to cloud deployment, as it avoids recurring cloud service fees. On-device deployment has limitations as well. There is a risk of data loss if the mobile device malfunctions without a backup. Furthermore, if the model requires retraining due to data changes (e.g., data shift) or performance improvements, the application needs to be reloaded on the device, which can be inconvenient for users.

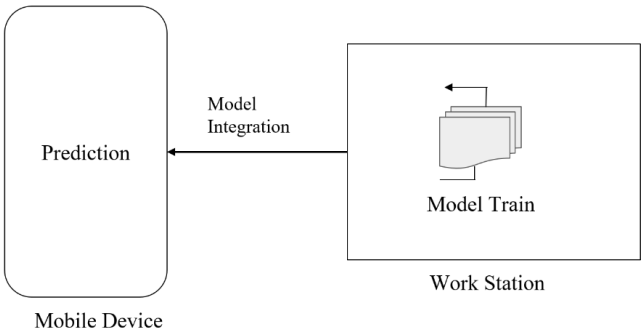


Figure 2. Illustration Of On-device Deployment Where The Model Is Trained On A High-performance Computer And Integrated Into A Mobile Device For Predictions

Cloud Deployment

Cloud deployment operates on a client-server model, where the trained model's architecture and weights are stored on a remote server. The mobile device communicates with the server to perform predictions. The mobile device sends query data to the cloud, the trained model generates predictions for the query data, and then sends the results back to the mobile device. Figure 3 illustrates the cloud deployment.

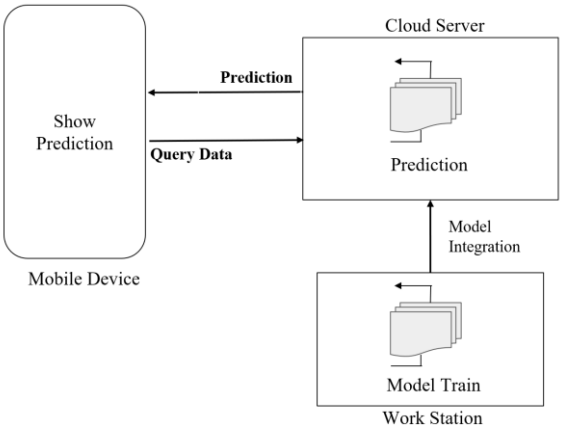


Figure 3. Illustration Of Cloud Deployment. The Prediction Is Carried Out On The Cloud Side, Displaying The Results On The Mobile Device

In cloud deployment, the prediction process is carried out on the cloud side. This eliminates the need for mobile devices to have high-end hardware. This approach also makes data more accessible and easier to manage. With patient consent, mHealth solution providers can access larger datasets, potentially developing advanced AI algorithms for more efficient patient care. Cloud deployment has drawbacks as well. It requires a high-speed network connection for smooth data transfer. Poor connectivity or interruptions can lead to delays, negatively impacting user experience. Additionally, storing data in the cloud incurs ongoing costs, increasing expenses for mHealth solution providers. Privacy and security of patient data are also concerns, as sharing data on the cloud raises the risk of sensitive information leaks. Developers must ensure that data is always encrypted and protected to prevent hacking and unauthorized access.

The advantages and disadvantages of integrating the model into both the device and cloud environments are summarized in Table 4.

Table 4. Comparative Advantages And Disadvantages Of On-device And Cloud-based Machine Learning Model Integration

Method	Advantages	Disadvantages
Device Integration	Ensures privacy and security of sensitive data Offline access Low cost of system requirements Fast access to prediction results	Difficulty in model updates Data loss in case of device failure Limited data storage and data processing hardware
Cloud Integration	Data accessibility and manageability To be independent of the device's data processing and data storage capacity	Network connection requirement Possible delays due to network connection Possibility of privacy breach for sensitive data Cloud system cost Relatively slow access to prediction results

EXPERIMENTAL RESULTS AND ANALYSIS

Implementation Details of the Prediction Model Development

The skin disease prediction model was developed using Python, TensorFlow version 2.0 with the Keras framework, and the scikit-learn library. The dataset was randomly divided into training (60%), validation (20%), and test subsets (20%). To maintain proportional representation of each lesion type due to dataset imbalance (see Table 1), stratification technique was applied during the splitting process. Data augmentation was used on the training data to further address class imbalance (see Table 3). The MobileNet architecture was chosen for its high performance and compact size, making it well-suited for mobile applications. A pre-trained MobileNet was fine-tuned using the training dataset, with optimal hyperparameters determined empirically through the validation data. The training parameters are listed in Table 5. For an efficient training process, we used early stopping and model checkpoints, which regularly save the model weights to capture the best performance at the end of the training process.

Table 5. Training Parameters Used To Develop The MobileNet-based Skin Disease Prediction Model

Parameter	Value
Model Network	MobileNet
Learning Rate	0.001
Batch Size	32
Epochs	15
Loss Functions	Cross Entropy and Focal Loss
Optimizer	Adam [17] $\beta1$ =0.9 and $\beta2$ =0.999
Processing Size	224 x 224

During training process, loss and accuracy were monitored to ensure effective learning and to avoid overfitting. The learning curves for both the training and validation datasets are shown in Figures 4 and 5. Figure 4 presents the learning curves using the cross-entropy loss function, and Figure 5 presents the learning curves using the focal loss function. These graphs show similar trends for both the training and validation subsets, indicating a successful optimization process. During the training process, loss and accuracy were monitored to ensure effective learning and to avoid overfitting. These graphs show similar trends for both datasets, indicating a successful optimization process. However, during the final stage of training, validation accuracy decreases while validation loss increases, which is indicative of onset of overfitting stage. If the training were continued beyond this stage, the model might start

memorizing patterns specific to the training dataset rather than learning generalizable features. To prevent this, we used early stopping technique, which stops the training process when an increase in validation loss is detected. As seen in the graphs, the training process does not continue beyond this point.

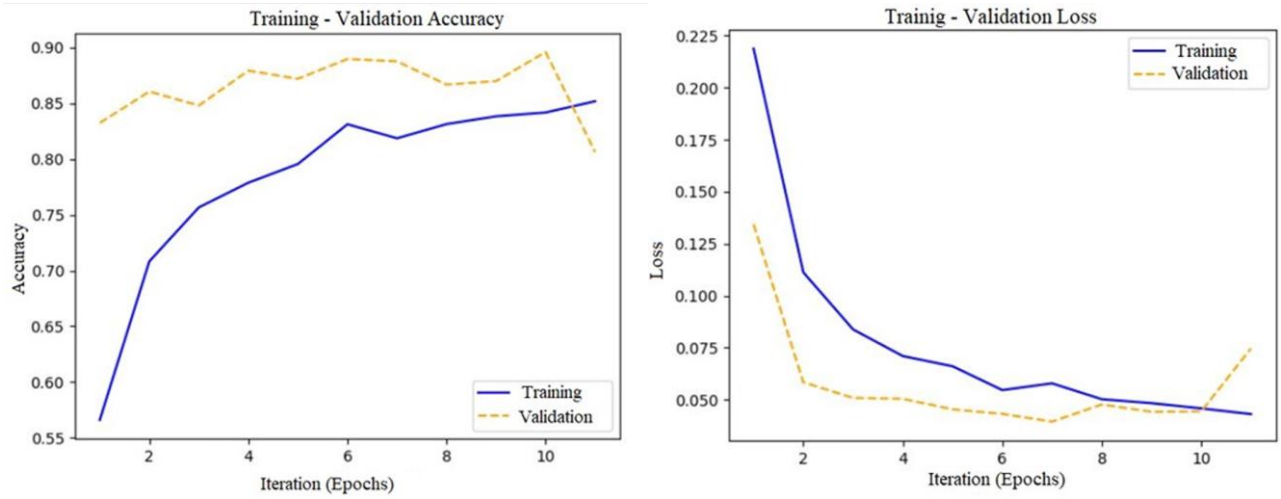


Figure 4. Learning Curves During The Training Process using Cross Entropy Loss Function. The Left Plot Shows The Accuracy Over Epochs For Both The Training And Validation Dataset. The Right Plot Illustrates The Corresponding Loss Curves

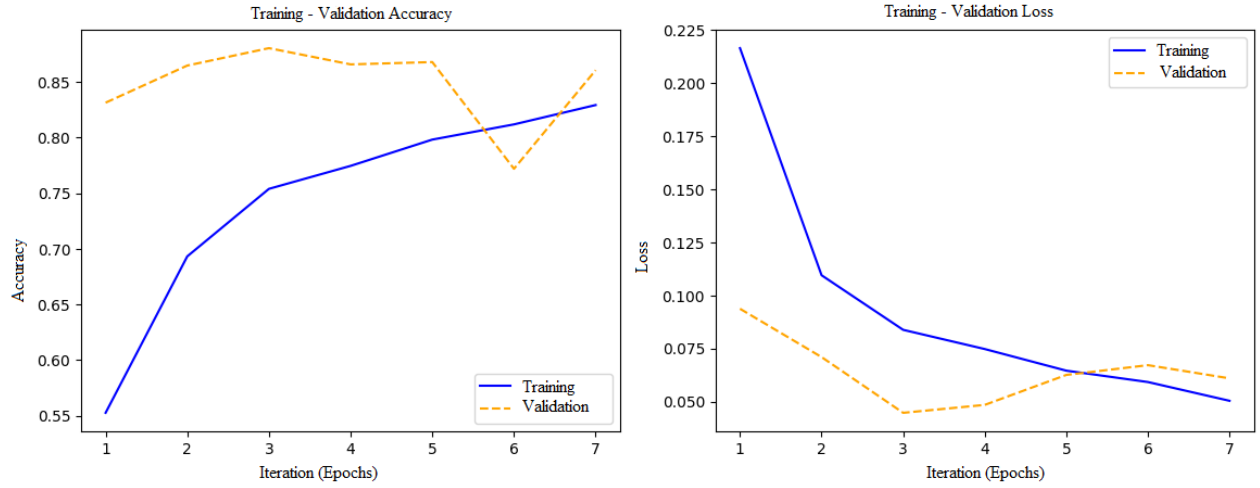


Figure 5. Learning Curves During The Training Process using Focal Loss Function. The Left Plot Shows The Accuracy Over Epochs For Both The Training And Validation Dataset. The Right Plot Illustrates The Corresponding Loss Curves

The performance of the skin disease prediction model was evaluated on the test data. The results are reported for each class with accuracy, F1 score, recall, and precision in Table 6 for the cross-entropy loss function and in Table 7 for the focal loss function.

Table 6. Evaluation Results Of The Skin Disease Prediction Model Trained With Cross-entropy Loss Function, Evaluated On The Test Dataset

Class	Accuracy	F1 Score	Recall	Precision
akiec	0.5926	0.5926	0.5926	0.5926
bcc	0.6562	0.7241	0.6562	0.8077
bkl	0.6076	0.6038	0.6076	0.6000
df	0.4286	0.5000	0.4286	0.6000
mel	0.2439	0.3509	0.2439	0.625
vasc	0.5833	0.7368	0.5833	1.000
Average	**0.5847**	**0.6381**	**0.5847**	**0.7375**

Table 7. Evaluation Results Of The Skin Disease Prediction Model Trained With Focal Loss Function, Evaluated On The Test Dataset

Class	Accuracy	F1 Score	Recall	Precision
akiec	0.6296	0.3846	0.3704	0.4000
bcc	0.625	0.6102	0.5806	0.6429
bkl	0.5570	0.6713	0.6000	0.7619
df	0.5714	0.6667	0.5714	0.8000
mel	0.4146	0.4675	0.4286	0.5143
vasc	0.5833	0.8421	0.7273	1.000
Average	**0.6222**	**0.6570**	**0.6082**	**0.7223**

When analyzing the overall performance, we observe that the choice of loss function impacts the model`s ability to classify different skin disease types. Compared to the performance of cross-entropy, the focal loss function enhances the prediction of less frequent and harder-to-classify classes, leading to an increase in overall accuracy from 0.5847 to 0.6222 (+3.75%) and an improvement in the overall F1-score from 0.6381 to 0.6570. Recall also improved from 0.5847 to 0.6082 (+2.35%), while precision decreased slightly from 0.7375 to 0.7223 (-1.53%). The overall results suggest that focal loss prioritizes harder-to-classify cases and less frequent classes.

There is a noticeable difference in performance for underrepresented disease classes. For instance, Dermatofibroma, one of the least frequent classes in the dataset, had 14.29% increase in accuracy (0.4286 to 0.5714). The F1- score increased from 0.5000 to 0.6667, indicating a better balance between precision and recall. Recall improved from 0.4286 to 0.5714, suggesting that the model identified more true positives. Melanoma, a critical yet challenging class due to high intra-class variability and its visual similarity to benign lesions, had a notable performance increase with focal loss. Accuracy improved by 17.08% (0.2439 to 0.4146), the F1-score increased from 0.3509 to 0.4675, and recall increased from 0.2439 to 0.4286, indicating that focal loss helped the model identify more melanoma cases. The improved performance suggests that focal loss effectively addresses class imbalance by giving additional weight to harder examples, helping the model recognize subtle distinctions in melanoma lesions. Vascular lesions also benefited from focal loss, with F1-score increasing from 0.7368 to 0.8421 and recall improving from 0.5833 to 0.7273 (+14.39%). These improvements suggest that focal loss was beneficial for handling less frequent and harder-to-classify skin diseases. While focal loss generally improves classification for less frequent classes, some performance trade-offs were observed. Performance losses were observed for Basal Cell Carcinoma and Actinic Keratoses. Melanoma also had very low accuracy with both loss functions. This could be due to melanoma's high intra-class variation and visual similarity to other skin lesions, making it difficult for the model to learn distinguishing features.

Overall, focal loss demonstrates a better ability to handle imbalanced classes by improving recall and F1-score, particularly for underrepresented skin disease types.

Implementation Details of the On-Device Deployment

In this part of the study, the developed model is integrated into a mobile device. The device used in this study is Samsung Galaxy S23, containing Qualcomm Snapdragon 8 Gen 2 processor with 8GB of RAM and 128 GB of internal storage. The operating system in the mobile device is Android 13, which is compatible with machine learning libraries. The mobile device also includes high-resolution Dynamic AMOLED 2X display and supports 5G connectivity for an optimal environment for both processing and user interaction. The integration of this model into such a powerful smartphone enables real-time, on-device inference, contributing to both speed and privacy.

The weights and architecture of the trained model were saved in a .h5 file format specific to Tensorflow-Keras, which is approximately 40 MB in size. For app development, two cross-platform frameworks were used: Flutter and React Native.

Flutter, supported by Google, is an open-source platform that offers a versatile interface for rapid development using the Dart language. Dart, also developed by Google, is designed for mobile app development and operates on both iOS and Android devices. The trained model was converted to a TensorFlow Lite model using TFLiteConverter. TensorFlow Lite is a framework within TensorFlow designed for developing lightweight and high-performance ML models for mobile and embedded devices. This conversion reduced the model size from 40 MB to 12 MB. To integrate the model into a Flutter application, the TensorFlow Lite Flutter plugin was utilized. The TensorFlow Lite model, along with the labels corresponding to skin disease classes, was added to the mobile application project. Once

the model integration was completed, it allows users to upload images and generate predictions using the trained model's architecture and weights stored on the device (See Figure 6).

We also used React Native with the TensorFlow.js React Native adapter. These platforms enable the model to run on both iOS and Android devices. The .h file, which contains the model architecture and weights, was converted to the TensorFlow.js format. This conversion divided the large weight file into smaller 5 MB parts. To further reduce the model size, quantization techniques were applied by decreasing the precision from 32-bit to 16-bit. The reduced model was then divided into two files: the model.json file, which contains the model's architecture, and the *.bin file, which stores the model's weights as binary format. These files were then added to the mobile application project using TensorFlow's React Native adapter. Once the model is uploaded, the users can upload a query image, and the model predicts the skin disease.

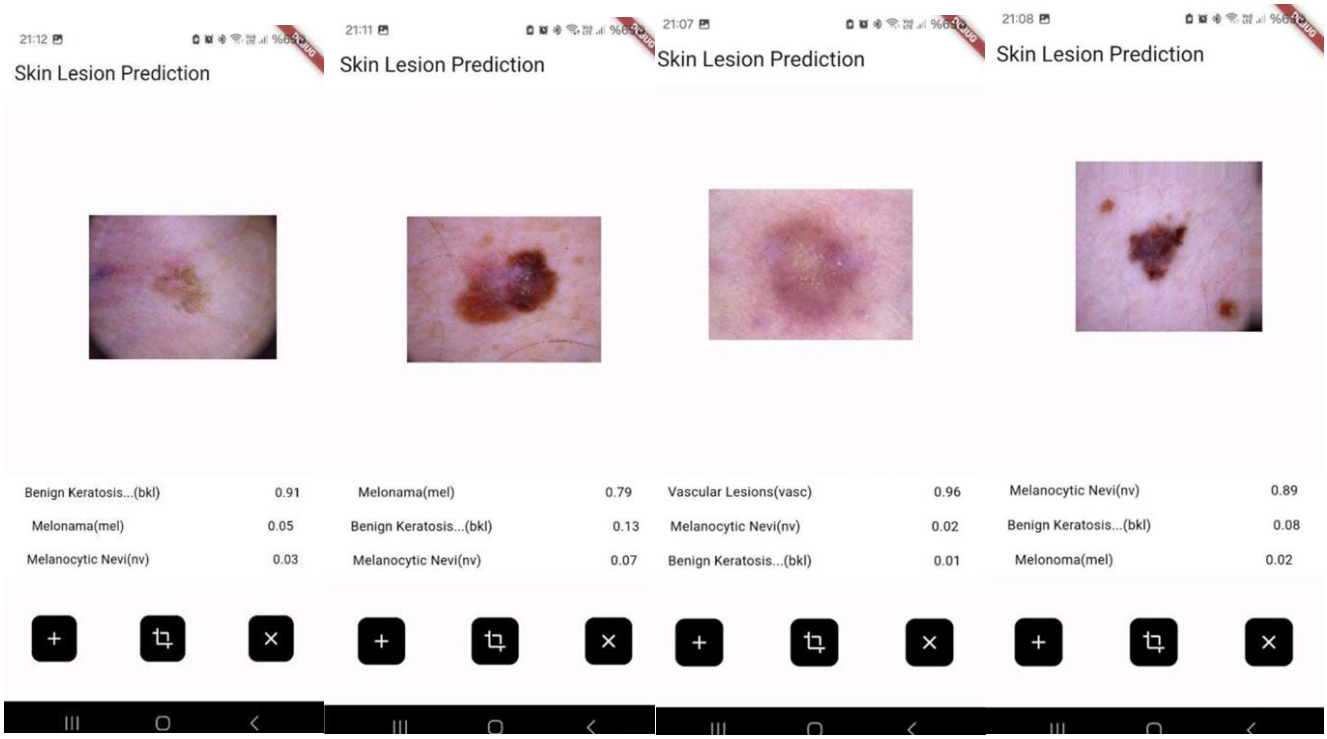


Figure 6. User Interface Of The Mobile Application Showing The Prediction Results For Different Skin Disease Images. The Integrated Model Runs Directly On The Device Using TensorFlow Lite For The Flutter Application

Implementation Details of the Cloud Deployment

In this part of the study, the developed model is integrated into a cloud environment. The cloud infrastructure used in the study is based on Google Cloud Platform, which contains GPU-enabled virtual machines equipped with NVIDIA A100 Tensor Core GPUs. Deployment is managed through a Docker container which simplifies packaging, deployment, and execution of the model in a consistent and efficient manner.

To integrate the model into the cloud, it was saved in the SavedModel format, which is compatible with TensorFlow Serving. TensorFlow Serving is an open-source tool designed for deploying TensorFlow models in production environments. It supports RESTful APIs to allow mobile apps to interact with the model. With a RESTAPI, users can upload photos through the app interface. They can either select photos from the gallery or take new ones using the camera. These photos are then converted into JSON data and sent to the model's REST API, which processes the query and returns predictions as an API response. The SavedModel format stores the model's architecture, weights, variables, and training parameters. The model is then placed in a directory accessible to TensorFlow Serving to start the deployment process. The deployment uses Docker, a containerization platform that simplifies application development and deployment. TensorFlow Serving is pulled from the Docker cloud environment using the command docker pull tensorflow/serving, making it ready for use. TensorFlow Serving is then initialized with the code shown in Figure 7. To confirm the model is running, a request is sent to port 8501. If the model responds with the status 'AVAILABLE' it is ready for deployment. The model accepts input in JSON format and processes lesion photos as image matrices. The pre-trained model classifies and predicts skin lesions using these image matrices.

```
docker run -t --rm -p 8501:8501
-v "path/to/saved_model:/models/saved_model"
-e MODEL_NAME=saved_model tensorflow/serving
```

Figure 7. TensorFlow Serving Initialization Command Used For Deploying The Model In A Cloud Environment

Comparison of On-device and Cloud Integration

The trained model has been integrated into both the device and the cloud environments. The feedback speeds were compared using the same test data. Prediction results were obtained from 100 test images. The average prediction times are as shown in Table 8.

Table 8. Comparison of Prediction Feedback Speeds

Method	Prediction Feedback Time
Device-Integrated Model	108.3 ms
Cloud-Integrated Model	1281.2 ms

The results show that the prediction response speed of the device-integrated model is approximately ten times faster than that of the cloud-integrated model. This indicates that for mHealth applications requiring frequent prediction queries, cloud services may be less efficient. Factors such as network speed and server traffic load could further slow cloud-based predictions, potentially leading to data loss and reduced application efficiency. Although the fast feedback of the device-integrated model is advantageous, certain steps are needed before integration, such as reducing the model size to fit on the device. In this study, a relatively compact architecture like MobileNet was used. However, some applications may require larger and more complex models. As model depth increases, resulting in more parameters and larger sizes, integration into the device could burden its hardware and processing capacity.

CONCLUSIONS

This study presents the development of a deep learning-based model for mHealth applications, focusing on its integration into both mobile devices and the cloud environment, and comparing these deployment methods. The focus was on predicting skin diseases, given the model's practical application and usability. The MobileNet architecture was selected for model development due to its compatibility with devices that have limited computational power and storage capacity. The model was trained on a large, publicly available dataset. To improve performance during training, transfer learning, data augmentation, and focal loss techniques were applied.

We integrated the trained model into both a mobile device and a cloud environment. Our comparison showed that on-device integration for mHealth applications provides offline functionality, faster prediction feedback, and lower costs. However, it has challenges such as limited processing power and storage capacity, which make it difficult to run and maintain complex machine learning models. Additionally, issues such as potential data loss due to device failure and the difficulty of updating the model can reduce the application's usability. The cloud integration mitigates hardware limitations and allows for easier model updates. However, it requires a constant internet connection, potentially cause delays in prediction feedback. Additionally, sending sensitive patient data to the cloud increases the risk of data leakage. Regular payments for storing data in the cloud also add extra costs, especially for widely used mHealth applications.

In conclusion, developing ML-based mHealth solutions requires careful consideration of the benefits and drawbacks of on-device and cloud deployment. Balancing these factors is crucial for designing an effective mHealth application.

ACKNOWLEDGEMENTS

This research is partially supported by the TUBITAK-BIDEB 2232 International Fellowship program under the grant number 121C085.

This research is largely based on the work conducted by Özge Çiçek in her master's thesis titled *"Mobil Sağlık Uygulamalarında Makine Öğrenmesi Temelli Model Geliştirme ve Modelin Cihaz-Bulut Dağıtımı"* (Cicek, 2024)

REFERENCES

Candemir, S., Nguyen, X. V., Folio, L. R., & Prevedello, L. M. (2021). Training strategies for radiology deep learning models in data-limited scenarios. *Radiology: Artificial Intelligence*, *3*(6), e210014.

Çiçek, Ö. (2024). Mobil sağlık uygulamalarında makine öğrenmesi temelli model geliştirme ve modelin cihaz-bulut Dağıtımı, *Master's Thesis,* Eskisehir Technical University, Türkiye.

Dai, X., Spasić, I., Meyer, B., Chapman, S., & Andres, F. (2019). Machine learning on mobile: An on-device inference app for skin cancer detection. *In IEEE 4th Int. Conf. on Fog and Mobile Edge Computing*, pp. 301 305.

Esteva, A., Kuprel, B., Novoa, R. A., Ko, J., Swetter, S. M., Blau, H. M., & Thrun, S. (2017). Dermatologist-level classification of skin cancer with deep neural networks. *Nature*, 542(7639), 115-118.

Goceri, E. (2021). Diagnosis of skin diseases in the era of deep learning and mobile technology., 134, 104458. *Computers in Biology and Medicine*,134, 104458.

Han, S., Mao, H., Dally, W.J. (2015). Deep compression: Compressing Deep Neural Networks with Pruning, Trained Quantization and Huffman Coding . *arXiv preprint* arXiv:1510.00149.

Howard, A. G., Zhu, M., Chen, B., Kalenichenko, D., Wang, W., Weyand, T., ... & Adam, H. (2017). Mobilenets: Efficient convolutional neural networks for mobile vision applications. *arXiv preprint* arXiv:1704.04861.

Jung EY, Kim J, Chung KY, Park DK. (2014). Mobile healthcare application with EMR interoperability for diabetes patients. *Cluster Comput* 17(3):871–880.

Khan, Z., Alotaibi, S. (2020). Applications of artificial intelligence and big data analytics in m-health: A healthcare system perspective. *Journal Of Healthcare Engineering*, 8894694. https://doi.org/10.1155/2020/8894694.

Krizhevsky, A., Sutskever, I., & Hinton, G. E. (2017). ImageNet classification with deep convolutional neural networks. *Communications of the ACM*, *60*(6), 84-90.

Lin, T. Y., Goyal, P., Girshick, R., He, K., Dollar, P. (2017). Focal Loss for Dense Object Detection. *In Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision* (pp. 2980-2988)

Molina-Recio, G., García-Hernández, L., Castilla-Melero, A., Palomo-Romero, J. M., Molina-Luque, R., Sánchez-Muñoz, A. A., & Salas-Morera, L. (2015). Impact of health apps in health and computer science publications. A systematic review from 2010 to 2014. *In Bioinformatics and Biomedical Engineering*, Granada, Spain, April 15-17, 2015. Proceedings, Part II 3 (pp. 24-34).

Sama, P. R., Eapen, Z. J., Weinfurt, K. P., Shah, B. R., & Schulman, K. A. (2014). An evaluation of mobile health application tools. *JMIR mHealth and uHealth*, 2(2), e3088.

Silva, B. M., Rodrigues, J. J., de la Torre Díez, I., López-Coronado, M., & Saleem, K. (2015). Mobile-health: A review of current state in 2015. *Journal of biomedical informatics*, 56, 265-272.

Susanto, A., Winarto, H., Fahira, A., Abdurrohman, H., Muharram, A., Widitha, U., Efirianti, G., George, Y. Tjoa, K. (2022). Building an artificial intelligence-powered medical image recognition smartphone application: What medical practitioners need to know. *Informatics In Medicine Unlocked*, 32:101017.

Tschandl, P., Rosendahl, C. & Kittler, H. (2018). The HAM10000 dataset, a large collection of multi-source dermatoscopic images of common pigmented skin lesions. *Sci. Data*, 5, 180161 doi:10.1038/sdata.2018.161.

Weiss, K., Khoshgoftaar, T. M., & Wang, D. (2016). A survey of transfer learning. *Journal of Big data*, 3, 1-40.

KSÜ Mühendislik Bilimleri Dergisi, 28(2), 2025
Araştırma Makalesi

KSU J Eng Sci, 28(2), 2025
Research Article

Kahramanmaras Sutcu Imam University
Journal of Engineering Sciences

Geliş Tarihi : 25.01.2025
Kabul Tarihi : 22.03.2025

Received Date : 25.01.2025
Accepted Date : 22.03.2025

LUMINANCE ESTIMATION FROM SURFACES WITH DIFFERENT COLOR TEMPERATURE AND LAMP ILLUMINATION ANGLE: A DEEP LEARNING-BASED APPROACH

FARKLI RENK SICAKLIĞI VE AYDINLATMA AÇISI İLE YÜZEYLERDEN PARILTI TAHMİNİ: DERİN ÖĞRENME TABANLI BİR YAKLAŞIM

Birkan BÜYÜKARIKAN[1*] (ORCID: 0000-0002-9703-9678)
Erkan ÜLKER[2] (ORCID: 0000-0003-4393-9870)

[1] Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Uluborlu Selahattin Karasoy Meslek Yüksekokulu, Bilgisayar Teknolojileri, Isparta, Türkiye
[2] Konya Teknik Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği, Konya, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Birkan BÜYÜKARIKAN, birkanbuyukarikan@isparta.edu.tr

ABSTRACT

Traditional methods of luminance estimation are performed with the help of electronic systems. However, the changes in lighting properties, such as color temperature and the lamp illumination angle, affect the luminance on the object, making luminance estimation difficult compared to traditional methods. Therefore, this study proposes an image-based approach using convolutional neural networks (CNNs) models to provide an alternative solution for luminance estimation. In this study, luminance estimation is performed on defective and healthy apple images by considering the effects of color temperature and lamp illumination angle. According to the results, the GoogLeNet model exhibited the best performance at values where the learning rate was 0.001 and the batch size was eight. It also performed the best luminance estimation with a lower Root Mean Square Error (RMSE) value. According to color temperatures, defective apples showed the lowest RMSE value at warm white light, and healthy apples showed the lowest RMSE value at cold white light. According to color temperatures, the best luminance estimation is a 5.023 cd/m² RMSE value at a cold white light. According to lamp angle, defective apples obtained the lowest RMSE value at 5.106 cd/m² at a 60-degree angle, and healthy apples obtained the lowest RMSE value at 6.411 cd/m² at a 45-degree angle.

Keywords: Luminance estimation, color temperature, lamp illumination angle, deep learning

ÖZET

Geleneksel yöntemlerle parıltı tahmini, elektronik sistemler yardımıyla gerçekleştirilmektedir. Ancak, nesne üzerindeki parıltıyı etkileyen renk sıcaklığı ve lambanın nesneyi aydınlatma açısı gibi aydınlatma özelliklerinin değişimi geleneksel yöntemlerle parıltı tahminini zorlaştırmaktadır. Dolayısıyla bu çalışmada, parıltı tahminine alternatif bir çözüm sunmak amacıyla evrişimsel sinir ağları (CNN) modellerinden yararlanılarak görüntü tabanlı bir yaklaşım önerilmiştir. Çalışmada, renk sıcaklığı ve lambanın konum açısının etkileri göz önünde bulundurularak, kusurlu ve kusursuz elma görüntüleri üzerinde parıltı tahmini yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, GoogLeNet modeli, öğrenme oranının 0.001 ve yığın boyutunun 8 olduğu değerlerde en iyi performansı sergileyerek, daha düşük Karekök Ortalama Kare Hata (RMSE) değeri ile en iyi parıltı tahminini gerçekleştirmiştir. Renk sıcaklıklarına göre, kusurlu elmalar en düşük RMSE değerini 2700 K renk sıcaklığında ve kusursuz elmalar ise en düşük RMSE değerini 6500 K renk sıcaklığında göstermiştir. Renk sıcaklıklarına göre; en iyi parıltı tahmini, 6500 K renk sıcaklığında 5.023 cd/m² RMSE değerindedir. Lamba açısına göre; kusurlu elmalar en düşük RMSE değerini 60 derecelik açıda 5.106 cd/m² ve kusursuz elmalar en düşük RMSE değeri ise 45 derecelik açıda 6.411 cd/m² olarak elde etmiştir.

Anahtar Kelimeler: Parıltı tahmini, renk sıcaklığı, lambanın aydınlatma açısı, derin öğrenme

ToCite: BÜYÜKARIKAN, B., & ÜLKER, E., (2025). LUMINANCE ESTIMATION FROM SURFACES WITH DIFFERENT COLOR TEMPERATURE AND LAMP ILLUMINATION ANGLE: A DEEP LEARNING-BASED APPROACH. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 28(2), 883-896.

INTRODUCTION

Color temperature, as one of the important properties of light, is widely used in image analysis and visual comfort-related applications (Luo, 2011; Holtzschue, 2012). In image analysis, the color temperature feature significantly impacts color accuracy and overall image quality. Light from a white light source with different color temperatures changes the brightness, color tones, and contrast, thereby changing the details and clarity of the perceived image (Wu et al., 2010; Luo, 2011; Holtzschue, 2012; Hong et al., 2017).

The color temperature (CCT) of the light source, measured in Kelvin (K) value, defines the whiteness of a light (Sims et al., 2021). This value helps us to understand the temperature of the color of the light. Lower color temperatures represent warmer colors (reddish), and higher color temperatures represent cooler colors (bluish). So, in the real world, white light sources do not always provide the same white light characteristics (Holtzschue, 2012; Sharma and Bala, 2017). Therefore, the color temperatures of light sources used in machine vision applications are important for the accurate and consistent perception of colors in images. Also, color temperature is critically important in evaluating the performance of light sources (Huang et al., 2017; Huang and Wei, 2021).

In machine vision applications, the angle at which the lamp illuminates the object is another important parameter related to image analysis and visual comfort. This angle has a significant effect on the perception of the surface texture of an object and the clarity of the detail captured by vision systems. Light from low angles creates more shadows on the object's surface, allowing texture information to be displayed more clearly. In contrast, light from high angles provides a more even illumination, helping to accurately perceive colors and tones on the surface (Manav, 2005; Benweilight, 2021).

As a result, the effects of color temperature and lamp angles on images are important research topics in image processing. In particular, the relationship between color temperature and lamp illumination angle and luminance can not only help analyze images more accurately (Luo, 2011; Holtzschue, 2012; Catalbas and Kobav, 2022; Kamath et al., 2022) but also provide benefits in areas such as object recognition (Nie and Lv, 2023), industrial process control (Odabas et al., 2023), and medical imaging (Wang et al., 2024). These approaches will also open new horizons in extracting more information from visual data and transforming this information into applications.

In recent studies, deep learning-based models such as convolutional neural networks (CNNs) have been effectively used for luminance estimation. The interaction between luminance, color temperature, and lamp illumination angle significantly affects surfaces' perceived brightness and color accuracy. CNNs can make more precise estimations by learning the relationships between these complex visual features (Kim et al., 2018; Liu et al., 2020b). The ability of CNNs to accurately predict their transmissions offers inferences applicable in various environments, from outdoors to indoors. For example, Kayakuş and Çevik (2019) estimated the luminance in road lighting with a deep neural network (DNN) model they developed using the R, G, and B pixel values of road images. Similarly, Simon and Uma (2022) used features extracted from deep architectures and luminance values of images to effectively classify texture images and classified these features with SVM. Yang et al. (2021) obtained images of different scenes under different azimuthal angles and color temperatures (e.g., 2500 K and 4500 K) and calibrated the illumination settings of these images according to the input image and corresponding depth maps using the Multi-Mode Forked Network (MB-Net) model they proposed. On the other hand, Songwa et al. (2021) used images to estimate the luminance on office desks and created a CNN model based on the Y parameter. This study highlights the effectiveness of image-based luminance estimation. The above studies demonstrate the importance of luminance estimation in direct applications and in the development of more robust and versatile CNN models. As researchers continue to innovate and improve their approaches, more robust solutions for luminance estimation can be produced by integrating versatile techniques. Furthermore, developing these approaches will better understand the complex interactions between light conditions and visual perception, providing more effective solutions for real-world applications. This is the primary motivation for this study.

This study aims to develop a CNN-based approach for luminance estimation from images. In this study, an original dataset containing different color temperatures (2700, 4000, and 6500 K), lamp illumination angles (30, 45, and 60 degrees), object position angles (0, 90, 180, and 270 degrees) and object-to-camera distance (30, 35, and 40 cm) was created. Apples with and without defects were used as objects, and images of apples were obtained through a closed system. GoogLeNet and Xception models were used for luminance estimation and evaluated according to the Y parameter received from the images. In addition, models were run with different hyperparameters. Models were

evaluated according to different color temperatures and lamp angles with a 3-fold cross-validation method. This study was examined using mean square error (MSE), mean absolute error (MAE), root mean square error (RMSE), and mean absolute percentage error (MAPE) criteria. The contributions of this study to the literature are summarized below:

- In this study, an original dataset includes different color temperatures, lamp illumination angles, object position angles, and image acquisition distances. This dataset will provide an important resource for research on luminance estimation.
- The images used for luminance estimation were obtained in a controlled, closed system. This ensures that the images are taken correctly and provides reliable data for luminance estimation by providing results verified by electrical and photometric measurements.
- In this study, luminance estimation was performed using deep learning-based GoogLeNet and Xception models, and the best performance of the models was achieved with different hyperparameters. These analyses were evaluated according to both color temperature and lamp illumination angle. The limited number of studies on this subject in literature increases the importance of research in guiding future studies.

MATERIAL AND METHODS

Experimental System and Lighting Sources

In machine vision applications, eliminating the effects of natural lighting conditions on the image is critical (Brosnan and Sun, 2004). Because color images are sensitive to ambient light conditions, they can affect the consistency in analytical processes and increase the margin of error in photometric measurements (Li et al., 2016; Ireri et al., 2019). To minimize this effect in studies, it is recommended to create a controlled imaging environment, in other words, to obtain images from a closed imaging cabin system (Girolami et al., 2013; Ma et al., 2017; Kandpal et al., 2019). Therefore, a closed cabin system was built to capture images in this study. Designed with dimensions of 60x60x80 cm^3 (width, depth, and height), the cabin contains a camera, lens, elevator system, and lighting sources. The lighting sources in the system provide the opportunity to illuminate the object from different angles while also making it possible to move the object closer to the camera and further away. In addition, LED lamps providing white light were used to illuminate the objects in this study (Büyükarıkan, 2022).

During image acquisition, some areas of the cabin system may receive more light than others. This may affect the total amount of light reflected from the object, causing differences in the image's brightness level (Saldaña et al., 2013). To avoid this problem, two illumination sources were used in the cabin (Xu et al., 2022).

The light captured by a camera is affected by components such as spectral properties and the shape of the illumination (Smith, 2000; Aleixos et al., 2002; Unay and Gosselin, 2005). These components play an essential role in various parameters, such as the illumination quality and the image's appearance (Liu et al., 2020a). This study considered color temperature and illumination shape (the angle at which the lamp illuminates the object).

As seen in Table 1, white light sources are divided into three main groups according to their color temperatures. The first group is warm white light sources below 3300 K. These lights are perceived as having a reddish or yellowish tone. The second group, cool warm white lights in the 3300-5300 K range, offer a more natural white tone. The third group is cold white light sources above 5300 K. These lights have a bluish tone (Büyükarıkan, 2022). In this study, low CCT warm white (2700 K), medium CCT cool white (4000 K), and high CCT cold white (6500 K) LED lighting sources were used to provide white light.

Table 1. Relationship Between Color Temperature and Light Color (Kocabey, 2008; Özkaya and Tüfekçi, 2011).

CCT (K)	Light color temperature
<3300	Warm white light
3300-5300	Cool white light
>5300	Cold white light

Another lighting component used in this study, the lighting type, is an essential factor that changes the image quality by affecting the luminance in the image (Iacomussi et al., 2015; Shi and Chen, 2021). In machine vision applications, in frontal lighting, which is based on the forward transmission of light to obtain surface features, the lighting sources are placed in the same direction as the camera (Yang, 1994). In addition, in frontal lighting, the lamp's angle significantly affects the light distribution on the object. To observe these effects, the lighting sources were placed to

illuminate the object at 30°, 45°, and 60° angles (Büyükarıkan, 2022; Sumon, 2022). In this arrangement, all lighting sources were operated at a 100% brightness level (Büyükarıkan, 2022). Figure 1 shows the system structure from which the images were taken.

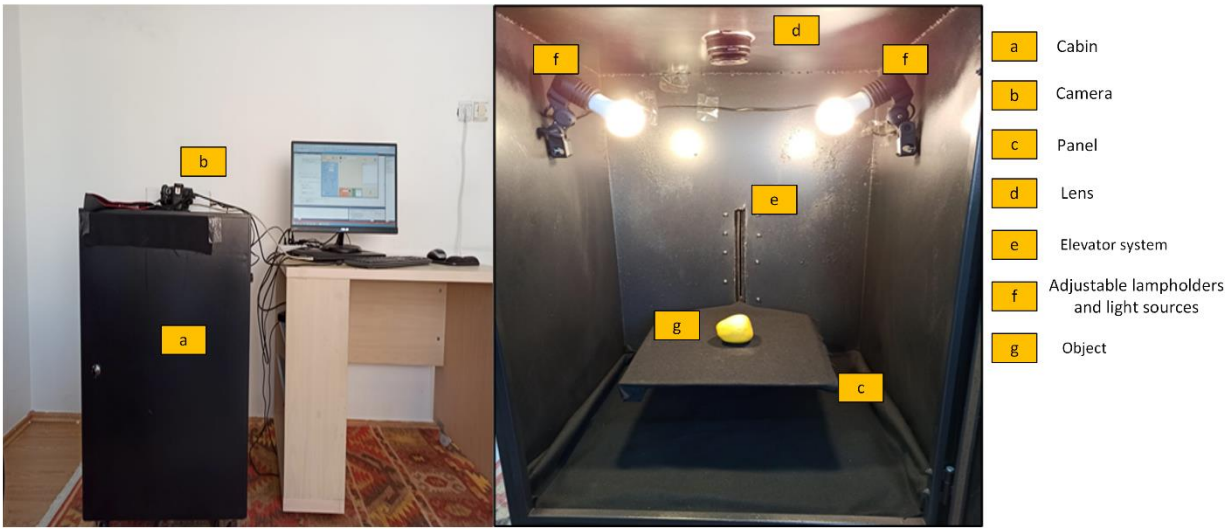


Figure 1. The Cabin Used for Image Acquisition (Büyükarıkan, 2022).

Dataset Details

In the literature, 2700 K white light, 6500 K white light (at different dimming levels), and green light have been used in studies on the classification of physiological disorders (bitter pit, shriveling, and superficial scald) in Golden Delicious and Granny Smith apple varieties (Buyukarikan and Ulker, 2022; 2023) and illumination estimation from images (Büyükarıkan and Ülker, 2022). In these studies, images were taken at 4 different position angles (0, 90, 180, and 270 degrees), at 2 object-to-camera distances (35 and 45 cm), and with a light intensity of 45 degrees on the apple. A total of 1080 images were taken. This study uses a lighting scenario based on the color temperature of different white lights and the angle of the lamp. The Golden Delicious apple variety was chosen as the object, and an original data set was created using defective (shriveling) and healthy apples. Images of each defective and healthy apple were taken under three different lighting conditions (warm white, cool white, and cold white), four different object positions (0, 90, 180, and 270 degrees), three object-to-camera distance (30, 35, and 40 cm) and three different lamp illumination angels (30, 45, and 60 degrees) and a total of 216 images were obtained. Then, the images were enriched with enhancement methods such as cropping, flipping, rotating, and shifting. A total of 1296 images were obtained with these methods, and these images were evaluated in terms of the defective conditions of the apples and recorded according to their color temperatures and lamp illumination angles. This dataset was produced in the author's previous study (Büyükarıkan, 2022).

In this study, images were recorded by varying two basic parameters, color temperature and lamp illumination angle. To isolate the effects of these parameters, all lamp illumination angles were used in the color temperature analysis, and all color temperatures were used in the lamp illumination angle analysis. Thus, the effects on luminance estimation were more clearly demonstrated. Also, there are equal numbers of images in both datasets created according to color temperatures and lamp angles. Thus, balanced classes were made in the dataset. Table 2 lists these details of the dataset.

Table 2. Details of the Datasets Used for Luminance Estimation.

Lamp sources		**Defective apple (original)**	**Healthy apple (original)**	**Defective apple (enhancement)**	**Healthy apple (enhancement)**	**Total**
Color temperature	**Lamp angel**					
Warm white	**30**	36	36	216	216	432
Cool white	**45**	36	36	216	216	432
Cold white	**60**	36	36	216	216	432
Total		108	108	648	648	1296

Some images obtained with different color temperatures, object positions, lamp illumination angles, and defect types are presented in Figure 2. The first row shows defective apples, and the second shows healthy apples. Also, the images in the first column were obtained at 2700 K (Fig. 2a and Fig. 2d), the second column at 4000 K (Figure 2b and Figure 2e), and the last column at 6500 K (Figure 2c and Figure 2f).



Figure 2. The Dataset (Büyükarıkan, 2022) **a.** Defective Apple in 30-Degree Lamp Angle and Warm White Light Type **b.** Defective Apple in 45-Degree Lamp Angle and Cool White Light Type **c.** Defective Apple in 60-Degree Lamp Angle and Cold White Light Type **d.** Healthy Apple in 45-Degree Lamp Angle and Warm White Light Type **e.** Healthy Apple in 30-Degree Lamp Angle and Cool White Light Type **f.** Healthy Apple in 60-Degree Lamp Angle and Cold White Light Type.

Deep Learning Models: GoogLeNet and Xception

Two well-known CNN models that are commonly favored in the deep learning space are GoogLeNet and Xception. In studies analyzing different lighting scenarios (Büyükarıkan and Ülker, 2022; Buyukarikan and Ulker, 2023), GoogLeNet and Xception models were reported to perform well in tasks such as image classification and illumination estimation from images. Based on these findings, these two models were considered for luminance estimation from apple surfaces (Büyükarıkan, 2022).

Chollet (2017) suggested Xception (Extreme Inception) as a more sophisticated iteration of the Inception architecture. The depthwise separable convolution notion, which is popular in deep learning, was first shown by this model. The Xception model's default input size is 299x299x3. GoogLeNet, on the other hand, is renowned for its Inception architecture and was created by Szegedy et al. (2014). This architecture provides a deep and computationally efficient structure. GoogLeNet's default input size is 224x224x3. GoogLeNet can perform well even on devices with fewer resources, however, Xception provides higher accuracy rates on systems with more processing power.

Proposed Approach

The change of white color depending on color temperatures and the lighting type's effect on the image's luminance causes the cameras to perceive images differently. In this study, an image-based approach for luminance estimation using CNN models is proposed from images obtained depending on the object's color temperature and the lamp illumination angles (Büyükarıkan, 2022). The details of the proposed approach are shown in Figure. 3.

A general equation is used for the luminance level. In this study, the luminance values of the images were first calculated by applying the inequality in Equation 1 (Songwa et al., 2021). These values constitute the output values of the CNN models. Then, the luminance was estimated from the images using CNN models. The estimation was performed on the images obtained according to the color temperature and the lamp's illumination angle on the object.

$$Y = R*0.2125+G*0.7125+B*0.0721 \quad (1)$$

This equation calculates the Y value of a pixel using the red (R), green (G), and blue (B) pixel values in the RGB color model. The Y value represents the luminance level of a colored pixel.

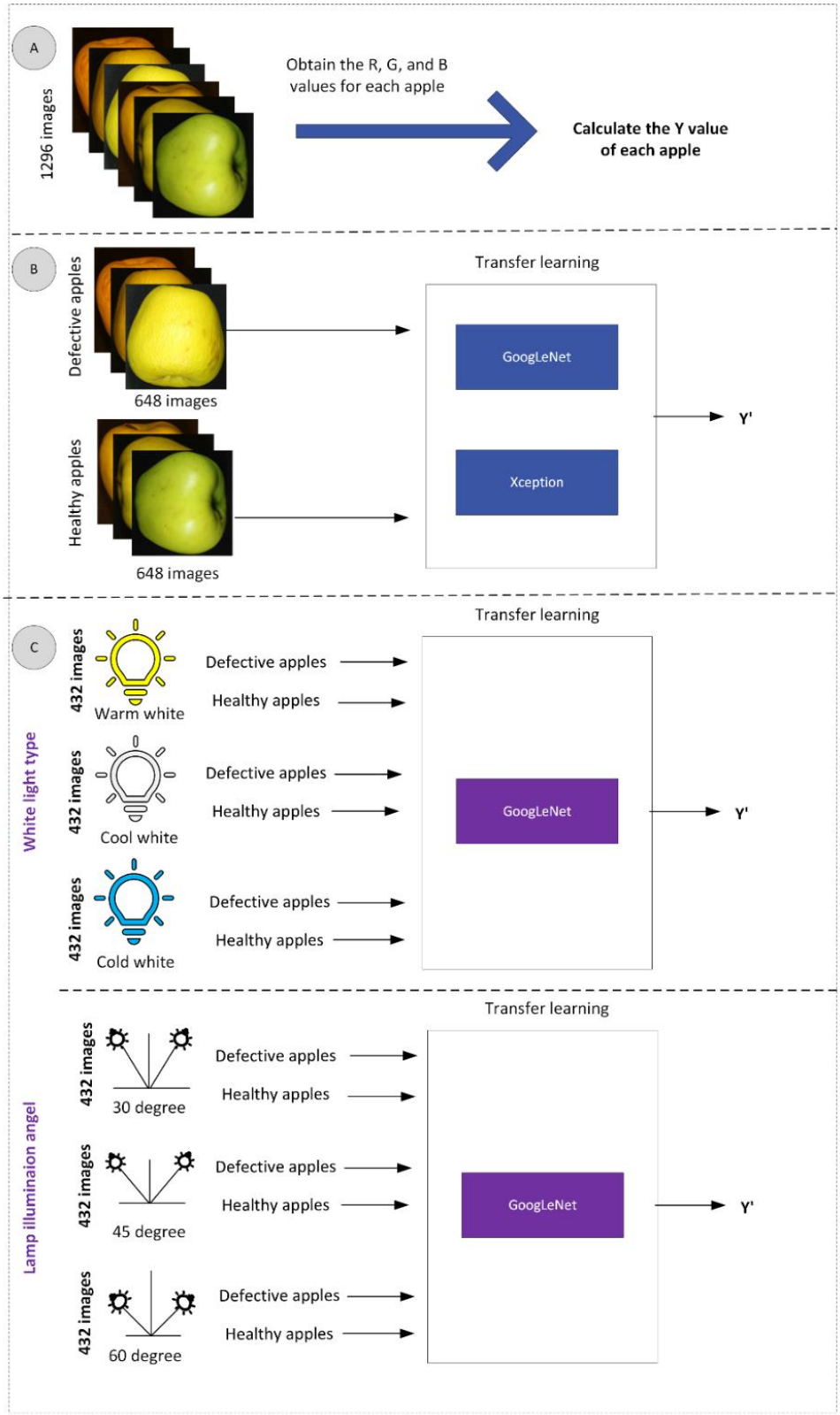


Figure 3. The Proposed Approach, **a.** Calculation of the Y Parameter of All Images **b.** Determination of the Best Parameters of the Models in Estimating the Luminance According to the Defect Types **c.** Estimation of the Luminance According to the Color Temperature and the Lamp Illumination Angle.

The hyperparameters used in the training of the models tested for luminance estimation are listed in Table 3. This study used Stochastic Gradient Descent (SGD) as the optimization method. The momentum value was selected as 0.9, and the learning rates were chosen as 0.001 and 0.0001. The decay value (decrease rate) was determined as 0.00005. Euclidean distance loss was used as the loss function of the models. Batch sizes were tested as 2, 4, 8, 16,

32, 64, and 128. The training period was applied as 50 epochs, and the activation function was determined as ReLU. In this study, GoogLeNet and Xception models were trained using the transfer learning method, and the models' performances were compared. The input dimensions of these models are 224x224x3 and 299x299x3. The images in the dataset were resized to fit the models' input dimensions. One thousand neurons were used in the final layer, and 1 in the last layer of the models, and the prediction performance of both models was evaluated. In addition, the performance of the models was assessed with the 3-fold cross-validation method, and the average values of the criteria for the performance of the models were shared.

To solve the luminance estimation problem, the performance of the models was analyzed using statistical performance measures such as MSE, MAE, RMSE, and MAPE. In addition, luminance estimations were made according to color temperatures and lamp illumination angles using the models and parameters that provided the best estimation results. Since the studies on luminance estimation in literature are limited, a comprehensive analysis was performed in this study by testing different learning rates and batch sizes.

Table 3. Parameters and Values of the Models.

Parameter	Value/Values
Input size	224x224x3 and 299x299x3
Model	GoogLeNet and Xception
Loss function	Euclidean distance loss
Optimizer	SGD
Momentum	0.9
Learning rate	0.001 and 0.0001
Decay	0.00005
Batch size	2, 4, 8, 16, 32, 64, and 128
Epoch	50
Activation function	ReLU

Evaluation Criteria

Electrical criteria

Using the luminous flux and lamp power values of LED lighting sources, electromagnetic radiation amounts and related values such as light efficiency (e), light intensity (I), and average power consumption per illuminance level (APVI) can be calculated (Büyükarıkan, 2022). The formulas for the electrical criteria in this study, which are illuminance level (E), e, I, illuminance level at a point, , and APVI, are given in Equations 2-6.

$$E = \frac{\Phi}{A} \tag{2}$$

$$e = \frac{\Phi}{P} \tag{3}$$

$$I = \frac{\Phi}{2\pi\left(1-\cos\left(\frac{\theta}{2}\right)\right)} \tag{4}$$

$$E_p = \frac{\mathrm{I}*\cos(\theta)}{d^2} \tag{5}$$

$$APVI = \frac{P}{E} \tag{6}$$

Here, Φ is the luminous flux, A is the area of the target scene in square meters, P is the lamp power, I is the light intensity, θ is the lamp position angle value, E_p is the illuminance level of a point p, and d is the hypotenuse distance in meters.

Luminance Criteria

In this study, statistical measures such as MSE (Equation 7), RMSE (Equation 8), MAE (Equation 9), and MAPE (Equation 10) were used to evaluate the luminance estimate. In measures such as MSE, RMSE, and MAE, which measure the differences between the model's estimates and the actual values, the smaller the differences obtained, the more accurate the model's estimates will be. Therefore, the smaller these values indicate that the model performs better. In addition, a MAPE value below 10% indicates that the model's forecasting performance is excellent, and a MAPE value between 10% and 20% indicates that the model's forecasting is successful and reliable (Büyükarıkan, 2022).

$$MSE = \frac{\sum(y_i - \hat{y}_i)^2}{n} \quad (7)$$

$$RMSE = \sqrt{MSE} \quad (8)$$

$$MAE = \frac{\sum|y_i - \hat{y}_i|}{n} \quad (9)$$

$$MAPE = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\frac{|y_i - \hat{y}_i|}{y_i} * 100 \quad (10)$$

Here, y_i represents the true value, $\hat{y}_i$ represents the predicted value, and n represents the number of samples.

EXPERIMENTAL RESULTS

Lighting Characteristics and Photometric Evaluation

Table 4 lists lamps' photometric and electrical properties with different color temperatures. This study calculated the maximum illuminance level of the surface, APVI, I, and E_p values by considering the angles at which the lamp illuminates the object. In addition, E_p was evaluated at different height values (h value was determined as 30, 35, and 40 cm), and the calculated and measured values are presented in Table 4. The measured E_p values were obtained using a light meter.

Table 4. Evaluation of the Photometric and Electrical Properties of the Lamps.*

Quantity (unit)	Angle (°)	Warm white	Cool white	Cold white
Total luminous flux (lumen)		**1612**	**3000**	**1300**
Total real lamp power (Watt)		**17**	**28**	**18**
e (lumen/Watt)		94.82	107.14	72.22
Maximum illuminance level of the surface (lux)	30	8725.21	16237.98	7036.46
Maximum illuminance level of the surface (lux)	45	7124.10	13258.25	5745.24
Maximum illuminance level of the surface (lux)	60	5037.50	9375.00	4062.50
APVI (Watt/lux)	30	0.0019	0.0017	0.0026
APVI (Watt/lux)	45	0.0024	0.0021	0.0031
APVI (Watt/lux)	60	0.0034	0.0030	0.0044
Calculated I (candela)	30	452.49	842.11	364.91
Calculated I (candela)	45	396.87	738.60	320.06
Calculated I (candela)	60	342.08	636.62	275.87
Average E_p calculated for 30 cm (lux)	30	3978.84	7404.79	3208.74
Average E_p calculated for 30 cm (lux)	45	2849.39	5302.83	2297.89
Average E_p calculated for 30 cm (lux)	60	1736.63	3231.95	1400.51
Average E_p calculated for 35 cm (lux)	30	3040.93	5659.30	2452.36
Average E_p calculated for 35 cm (lux)	45	2177.72	4052.83	1756.22
Average E_p calculated for 35 cm (lux)	60	1327.27	2470.10	1070.38
Average E_p calculated for 40 cm (lux)	30	2376.06	4421.95	1916.18
Average E_p calculated for 40 cm (lux)	45	1701.58	2239.21	1372.24
Average E_p calculated for 40 cm (lux)	60	1037.07	1930.04	836.35
E_p measured for 30 cm (lux)	30	2240	5820	1554
E_p measured for 30 cm (lux)	45	1912	5700	1524
E_p measured for 30 cm (lux)	60	1781	4190	908
E_p measured for 35 cm (lux)	30	1771	4220	1390
E_p measured for 35 cm (lux)	45	1697	3310	960
E_p measured for 35 cm (lux)	60	1189	2710	690
E_p measured for 40 cm (lux)	30	1225	3170	757
E_p measured for 40 cm (lux)	45	951	2510	710
E_p measured for 40 cm (lux)	60	854	2160	475

*The values provided by the manufacturer of the lamps are indicated in bold

The brightness values of the lamps are compared according to their luminous flux or power units; however, since different lamps produce different amounts of light, they are compared with their power units. For this reason, other photometric measures, such as luminous flux, can be used to compare the brightness of different lamps. In addition, when a lamp with a luminous flux of 1000 lumens illuminates an area of 1 square meter, the illuminance level of this

area is calculated as 1000 lux (Auersignal, 2022). Table 5 shows the photometric measurement results of the lamps according to the reference values. In the cabin system, it is assumed that the total luminous flux of the lamps is 1000 lm and that these lamps illuminate a 40x40 cm (0.16 m²) scene.

Table 5. Comparison of the Brightness Values of The Lamps With Reference Values.*

Quantity (unit)	Angle (˚)	Warm white	Cool white	Cold white
Total luminous flux (lumen)		**1612**	**3000**	**1300**
Total real lamp power (Watt)		**17**	**28**	**18**
Panel area (m^2)			0.16	
Reference luminous flux (lumen)			1000	
Total lamp power (Watt)		10.55	9.33	13.85
Maximum illuminance level (lux)	30˚		5412.66	
Maximum illuminance level (lux)	45˚		4419.42	
Maximum illuminance level (lux)	60˚		3125.00	

*The values provided by the manufacturer of the lamps are indicated in bold

Luminance Estimation With CNN Models

This study evaluated the GoogLeNet and Xception models used for luminance estimation according to the RMSE criterion (Songwa et al., 2021). These models were compared to the RMSE values obtained from different learning rates and batch sizes. As shown in Table 6, the GoogLeNet model exhibited the best performance, especially at the learning rate of 0.001 and batch size of 8. Under these parameters, RMSE values of 4.139 cd/m² were obtained for defective apples and 3.625 cd/m² for healthy apples. The Xception model generally produced higher RMSE values. This reveals that Xception is not as successful as GoogLeNet in solving this problem. In addition, it is seen that the prediction errors of healthy apples are lower than those of defective apples. This shows that irregularities and faulty structures on the surface negatively affect the prediction performance. Small values in batch size (2, 4, and 8) have achieved better results than large batch sizes (64 and 128). Finally, the GoogLeNet model has shown better performance with small batch sizes and more significant learning rates. These results reveal the elements that show that model selection and hyperparameter optimization should be considered in luminance estimation. In the continuation of this study, the GoogLeNet model was used, and luminance estimation was performed according to color temperatures and lamp illumination angles with a learning rate of 0.001 and a batch size of 8.

Table 6. RMSE Results of Luminance Estimation According to Models (cd/m^2).*

Learning rate	Batch size	Xception		GoogLeNet	
		Defective	Healthy	Defective	Healthy
0.001	2	34.363	39.766	6.862	7.113
	4	29.046	29.603	4.580	4.143
	8	31.546	28.425	**4.139**	**3.625**
	16	29.441	30.647	8.610	5.343
	32	36.868	30.304	5.471	5.592
	64	40.383	35.295	21.993	58.351
	128	42.447	37.207	98.145	81.800
0.0001	2	44.663	32.322	4.953	6.754
	4	39.849	34.358	**4.286**	**4.428**
	8	41.251	35.231	9.323	7.720
	16	42.509	39.191	8.398	5.296
	32	43.932	44.244	9.289	5.871
	64	45.535	48.130	96.937	52.573
	128	85.302	101.339	42.566	70.251

* Best results are shown in bold font

The luminance estimation results performed under different white light types are shown in Table 7. According to the results, RMSE, MSE, MAE, and MAPE values of healthy apples were generally lower than those of defective apples. The lowest RMSE value of 5.023 cd/m² was obtained in cold white light type and healthy apples. In addition, the cold white light type exhibited the best performance with the lowest MSE (3.783), MAE (26.361), and MAPE (11.843%) values compared to other light types. These results show that cold white light provides a more suitable environment for luminance estimation in object illumination. Table 7 shows that station errors are higher in warm and cool white color temperatures.

Table 7. White Light Luminance Estimation (cd/m^2) According to Defect Status.*

Color temperature	Defect type	RMSE	MSE	MAE	MAPE (%)
Warm white	Defective	**5.150**	4.033	**27.633**	**4.549**
	Healthy	6.247	5.207	39.103	14.265
Cool white	Defective	6.567	5.958	46.057	15.254
	Healthy	6.027	5.038	38.024	14.729
Cold white	Defective	5.311	**3.973**	29.668	11.550
	Healthy	**5.023**	**3.783**	**26.361**	11.843

* Best results are shown in bold font

Table 8 shows the effect of the position angle of the illumination source on the luminance estimation. The lowest RMSE value for defective apples was obtained as 5.106 cd/m² at the 60-degree lamp angle, and this angle also provided the lowest MAPE value of 3.909, outperforming other angles. The lowest RMSE value for healthy apples was 6.411 cd/m² at the 45-degree lamp angle. However, defective apples generally obtained lower error values compared to healthy apples. This shows that defective surfaces can increase the prediction accuracy of the models by making the light distribution more apparent. These findings emphasize that the lamp illumination angle is critical in luminance estimation and that the correct angle selection can significantly improve the prediction performance.

Table 8. Lamp Angle Luminance Estimation (cd/m^2) According to Defect Conditions.*

Lamp angle (˚)	Defect type	RMSE	MSE	MAE	MAPE (%)
30	Defective	7.481	6.329	60.243	15.159
	Healthy	7.546	6.290	65.186	6.876
45	Defective	7.689	6.755	60.599	14.512
	Healthy	**6.411**	**5.500**	**44.490**	6.555
60	Defective	**5.106**	**3.623**	**26.703**	**3.909**
	Healthy	7.130	5.871	53.278	6.067

* Best results are shown in bold font

Discussion

Color temperature is one factor that changes images' color and luminance properties. Another factor that changes these properties of the image is the angle at which the lamp illuminates the object (Büyükarıkan, 2022). Although different light colors (warm white, cold white, and green light) have been preferred in studies of illumination differences (Buyukarikan and Ulker, 2022; Büyükarıkan and Ülker, 2022; Buyukarikan and Ulker, 2023), the fact that lamp illumination angle on apple is fixed at a 45-degree angle may prevent some surface features from being visible. To best analyze this situation, understanding the effects of different white light color temperatures and lamp illumination angles on image processing and analysis is a critical step in making accurate luminance estimates. This study proposes an application with CNN architecture to estimate the luminance values in the images obtained depending on the color temperature and lamp angle. The study optimizes CNN models with various training parameters and transfer learning. The model that shows the best results with the most appropriate parameters is run, and luminance estimates are made according to the color temperature and lamp illumination angles.

In the literature, studies on image-based luminance estimation are limited. Table 9 shows a comparison of similar studies in the literature. Kayakuş and Çevik (2019) performed luminance estimation with a DNN using R, G, and B pixel values of road images. Yang et al. (2021) recalibrated the illumination settings with the CNN model they proposed in images with different azimuthal angles and color temperatures. Similarly, in this proposed approach, images were obtained using different lamp illumination angles and color temperatures. On the other hand, Songwa et al. (2021) used the Y parameter in their proposed CNN model to estimate luminance from desk images in the office environment. Simon and Uma (2022) used the CNN model to classify texture images using features obtained from different color spaces and the Y parameter. Similarly, this proposed approach's luminance estimation was performed based on the Y parameter using known CNN models. The GoogLeNet model yielded lower RMSE values for the imperfect and perfect apple luminance estimation, with the lowest RMSE of 5.023 cd/m² for color temperature and 5.106 cd/m² for lamp illumination angle. These results show that the GoogLeNet model provides high accuracy in luminance estimation and discriminates defect conditions more effectively.

Table 9. Comparison of Studies in Literature.

Reference	Aim of the study	Dataset/Image count	Method	Best result
Kayakuş and Çevik (2019)	Luminance estimation from road lighting images	100	DNN	MSE: 0.0754
Yang et al. (2021)	Calibration of illumination settings from images	VIDIT: 390	MB-Net	PSNR: 19.3558 and SSIM: 0.7175
Songwa et al. (2021)	Luminance estimation from desk surface images in an office environment	KLED-2020: 1604 and KLED-2019: 4416	LumNet	RMSE: 6.24 cd/m^2
Simon and Uma (2022)	Classification of texture images	DMD: 5640 FMD: 1000	Deep Features (ResNet101) + luminance + SVM	Accuracy: 73.63
This study	Estimation of luminance from images based on color temperature and lamp illumination angle	1296	GoogLeNet	Color temperature RMSE: 5.023 cd/m^2 Lamp illumination angle RMSE: 5.106 cd/m^2

Advantages and Limitations of the Study

There are several advantages of this study. First, the luminance estimations made using CNN models show high accuracy, especially with low RMSE values obtained with the GoogLeNet model. Considering the effects of color temperature and lamp illumination angle allows the model to work effectively under different lighting conditions. Using the CNN-based approach in this study contributes to obtaining more accurate estimations by enabling the model to focus more on essential features in the visual data. In the luminance estimations made between defective and healthy cases, the fact that the model effectively distinguishes the differences provides an excellent advantage for real-world applications.

There are also some limitations to this study. The limited number of samples in the dataset may limit the model's generalization ability, and larger datasets may be required. The datasets used were limited to certain lighting conditions and camera types, which may limit the generalizability of the results under different conditions. Creating the datasets with a single camera may reveal the problem of device dependency. The results obtained using different camera types may be inconsistent with the existing findings. In addition, lighting conditions also have a significant effect. The model is not guaranteed to work with the same success in every lighting condition. Moreover, the impact of the lamp angle on the luminance estimation may become more complex and require more parameters for the model's accuracy, limiting its applicability in practice. In addition, images taken under controlled lighting conditions may not accurately reflect changing lighting conditions. Therefore, to increase the flexibility of the model, its evaluation under natural and different lighting scenarios will allow a better understanding of real-time applications.

CONCLUSION AND RECOMMENDATIONS

This study used a dataset containing color temperatures and lamp illumination angles to estimate image-based luminance. Well-known CNN models, GoogLeNet and Xception model were used to perform luminance estimation of defective and healthy apples with different training parameters. The best RMSE value was obtained with the GoogLeNet model with a learning rate of 0.001 and a batch size of 8. According to color temperatures, the lowest RMSE value for defective apples was found in warm white light, and healthy apples in cold white light. The best luminance estimation RMSE value obtained under cold white light was 5.023 cd/m². According to the illumination source position angle, the lowest RMSE value was observed at 60 degrees for defective and 45 degrees for healthy apples. The article demonstrates that deep learning architectures can be used in luminance estimation and the usefulness of one of these architectures, the GoogLeNet model.

In future studies, more extensive and more diverse datasets can be used to improve the performance of illumination and luminance estimation. Moreover, the prediction accuracy of CNN-based algorithms can be further enhanced by increasing the diversity of different camera types and datasets to reduce device dependency. In addition, testing CNN-based models under natural and various lighting conditions can provide a better understanding of different scenarios that may be encountered in real-time applications and optimize model performance. Therefore, a comprehensive analysis can be performed using sensors for real-time applications.

ACKNOWLEDGEMENT

This work was supported by the Scientific Research Project at Konya Technical University, Konya, Turkey (No. 201113006). This study is part of the doctoral thesis of Büyükarıkan (2022), which was conducted under the supervision of Prof. Dr. Erkan Ülker.

Artificial Intelligence Contribution Statement

This manuscript was entirely written, edited, analyzed, and prepared without the assistance of any artificial intelligence tools. All content, including text, data analysis, and figures, was solely generated by the authors.

REFERANCES

Aleixos, N., Blasco, J., Navarron, F., & Moltó, E. (2002). Multispectral inspection of citrus in real-time using machine vision and digital signal processors. Computers and electronics in agriculture, 33 (2), 121-137. https://doi.org/10.1016/S0168-1699(02)00002-9

Auersignal. All about luminous intensity, luminous flux & illuminance. (2022). https://www.auersignal.com/en/technical-information/visual-signallingequipment/luminous-intensity/#What%20is%20the%20solid%20angle? Accessed 23.7.2022

Benweilight. Aydınlatma ışını açılarının yorumlanması ve analizi. (2021). https://tr.benweilight.com/info/interpretation-and-analysis-of-illumination-be-61992668.html Accessed 21.12.2024.

Brosnan, T. & Sun, D.-W. (2004). Improving quality inspection of food products by computer vision—a review. Journal of food engineering, 61 (1), 3-16. https://doi.org/10.1016/S0260-8774(03)00183-3

Buyukarikan, B. & Ulker, E. (2022). Classification of physiological disorders in apples fruit using a hybrid model based on convolutional neural network and machine learning methods. Neural Computing and Applications, 34 (19), 16973-16988. https://doi.org/10.1007/s00521-022-07350-x

Buyukarikan, B. & Ulker, E. (2023). Classification of physiological disorders in apples using deep convolutional neural network under different lighting conditions. Multimedia Tools and Applications, 82 (21), 32463-32483. https://doi.org/10.1007/s11042-023-14766-7

Büyükarıkan, B. (2022). Aydınlatmanın görüntü işleme problemlerine etkisinin yapay zeka teknikleri kullanılarak analizi. Doktora Tezi. Konya Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı, Konya 147s.

Büyükarıkan, B. & Ülker, E. (2022). Using convolutional neural network models illumination estimation according to light colors. Optik, 271, 170058. https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2022.170058

Catalbas, M. C. & Kobav, M. B. (2022). Measurement of correlated color temperature from RGB images by deep regression model. Measurement, 195, 111053. https://doi.org/10.1016/j.measurement.2022.111053

Chollet, F. (2017). Xception: Deep learning with depthwise separable convolutions. Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition (CVPR) 2017 (pp. 1251-1258). IEEE.

Girolami, A., Napolitano, F., Faraone, D. & Braghieri, A. (2013). Measurement of meat color using a computer vision system. Meat science, 93 (1), 111-118. https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2012.08.010

Holtzschue, L. (2012). Understanding color: an introduction for designers. John Wiley & Sons.

Hong, S., Kim, I., Kim, H., Sohn, A., Choi, A. S., Sung, M. & Jeong, J. W. (2017). Evaluation of the visibility of colored objects under LED lighting with various correlated color temperatures. Color Research & Application, 42 (1), 78-88. https://doi.org/10.1002/col.22048

Huang, Y.-S., Luo, W.-C., Wang, H.-C., Feng, S.-W., Kuo, C.-T. & Lu, C.-M. (2017). How smart LEDs lighting benefit color temperature and luminosity transformation. Energies, 10 (4), 518. https://doi.org/10.3390/en10040518

Huang, Z. & Wei, M. (2021). Effects of adapting luminance and CCT on appearance of white and degree of chromatic adaptation, part II: extremely high adapting luminance. Optics Express, 29 (25), 42319-42330. https://doi.org/10.1364/OE.27.009276

Iacomussi, P., Radis, M., Rossi, G. & Rossi, L. (2015). Visual comfort with LED lighting. Energy Procedia, 78, 729-734. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.082

Ireri, D., Belal, E., Okinda, C., Makange, N. & Ji, C. (2019). A computer vision system for defect discrimination and grading in tomatoes using machine learning and image processing. Artificial Intelligence in Agriculture, 2, 28-37. https://doi.org/10.1016/j.aiia.2019.06.001

Kamath, V., Kurian, C. P. & Padiyar, U. S. (2022). Development of bayesian neural network model to predict the correlated color temperature using digital camera and Macbeth ColorChecker chart. IEEE Access, 10, 55499-55507. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3177195

Kandpal, L. M., Lee, J., Bae, J., Lohumi, S. & Cho, B.-K. (2019). Development of a low-cost multi-waveband LED illumination imaging technique for rapid evaluation of fresh meat quality. Applied Sciences, 9 (5), 912. https://doi.org/10.3390/app9050912

Kayakuş, M. & Çevik, K. K. (2019). Estimating luminance measurements in road lighting by deep learning method. Artificial Intelligence and Applied Mathematics in Engineering Problems: Proceedings of the International Conference on Artificial Intelligence and Applied Mathematics in Engineering (ICAIAME 2019) (pp. 940-948).

Kim, J. H., Jang, J. W. & Jang, K. J. (2018). A color adjustment convolutional neural network for image superresolution. 2018 International Conference on Electronics, Information, and Communication (ICEIC) (pp. 1-2).

Kocabey, S. (2008). İç hacimlerde aydınlık düzeyi dağılımının bulunması ve sonlu elemanlar yöntemi ile incelenmesi. Doktora Tezi. Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Eğitimi Anabilim Dalı, İstanbul 155s.

Li, J., Chen, L., Huang, W., Wang, Q., Zhang, B., Tian, X., Fan, S. & Li, B. (2016). Multispectral detection of skin defects of bi-colored peaches based on vis–NIR hyperspectral imaging. Postharvest Biology and Technology, 112, 121-133. https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2015.10.007

Liu, Q., Huang, Z., Li, Z., Pointer, M. R., Zhang, G., Liu, Z., Gong, H. & Hou, Z. (2020a). A field study of the impact of indoor lighting on visual perception and cognitive performance in classroom. Applied Sciences, 10 (21), 7436. https://doi.org/10.3390/app10217436

Liu, Y., Colburn, A. & Inanici, M. (2020b). Deep neural network approach for annual luminance simulations. Journal of Building Performance Simulation, 13 (5), 532-554. https://doi.org/10.1080/19401493.2020.1803404

Luo, M. R. (2011). The quality of light sources. Coloration Technology, 127 (2), 75-87. https://doi.org/10.1111/j.1478-4408.2011.00282.x

Ma, L., Sun, K., Tu, K., Pan, L. & Zhang, W. (2017). Identification of double-yolked duck egg using computer vision. PloS one, 12 (12), e0190054. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0190054

Manav, B. (2005). Ofislerde aydınlık düzeyi, parıltı farkı ve renk sıcaklığının görsel konfor koşullarına etkisi: Bir model çalışması. Doktora Tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Mimarlık Anabilim Dalı, İstanbul 147s.

Nie, T. & Lv, X. (2023). Deep Learning-Based Machine Color Emotion Generation. International Journal of Mobile Computing and Multimedia Communications (IJMCMC), 14 (1), 1-14.

Odabas, M. S., Şenyer, N. & Kurt, D. (2023). Determination of quality grade of tobacco leaf by image processing on correlated color temperature. Concurrency and Computation: Practice and Experience, 35 (2), e7506. https://doi.org/10.1002/cpe.7506

Özkaya, M. & Tüfekçi, T. (2011). Aydınlatma tekniği. Birsen Yayınevi.

Saldaña, E., Siche, R., Luján, M. & Quevedo, R. (2013). Computer vision applied to the inspection and quality control of fruits and vegetables. Brazilian journal of food technology, 16, 254-272. https://doi.org/10.1590/S1981-67232013005000031

Sharma, G. & Bala, R. (2017). Digital color imaging handbook. CRC press.

Shi, B. & Chen, Z. (2021). A layer-wise multi-defect detection system for powder bed monitoring: Lighting strategy for imaging, adaptive segmentation and classification. Materials & Design, 210, 110035. https://doi.org/10.1016/j.matdes.2021.110035

Simon, A. P. & Uma, B. (2022). DeepLumina: A method based on deep features and luminance information for color texture classification. Computational Intelligence and Neuroscience, 2022 (1), 9510987. https://doi.org/10.1155/2022/9510987

Sims, P., Lai, Y.-Y. & Jory, T. (2021). A Review of Various Models for Classifying Light Source Color Rendition and Guide to Using LEDs to Achieve Fidelity Color Rendering for Retail and Other Indoor Environments, https://www.luminus.com/datasheets/WhitePaper_Rev1_Color_Rendering_211130.pdf Accessed 21.06.2022.

Smith, N. (2000). Lighting for Health and Safety (Vol. 1). Butterworth Heinemann Oxford.

Songwa, P. U., Saeed, A., Bhardwaj, S., Kruisselbrink, T. W. & Ozcelebi, T. (2021). LumNet: Learning to Estimate Vertical Visual Field Luminance for Adaptive Lighting Control. Proceedings of the ACM on Interactive, Mobile, Wearable and Ubiquitous Technologies, 5 (2), 1-20. https://doi.org/10.1145/3463500

Sumon, M. B. U. (2022), Deep Learning Methods for Classification of Photometric Images of Materials. Master Thesis. Norwegian University of Science and Technology 77p.

Szegedy, C., Liu, W., Jia, Y., Sermanet, P., Reed, S., Anguelov, D., Erhan, D., Vanhoucke, V. & Rabinovich, A. (2014). Going deeper with convolutions. Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition (pp. 1-9).

Unay, D. & Gosselin, B. (2005). Artificial neural network-based segmentation and apple grading by machine vision. IEEE International Conference on Image Processing 2005 (pp. II-630).

Wang, Z., Dong, Y., Sui, X., Shao, X., Li, K., Zhang, H., Xu, Z. & Zhang, D. (2024). An artificial intelligence-assisted microfluidic colorimetric wearable sensor system for monitoring of key tear biomarkers. npj Flexible Electronics, 8 (1), 35. https://doi.org/10.1038/s41528-024-00321-3

Wu, Y.-h., Hu, Y.-h., Jiang, F. & Zhang, L.-h. (2010). Design of temperature measurement system based on two-color imaging in adaptive optics of CCD. 5th International Symposium on Advanced Optical Manufacturing and Testing Technologies: Optical Test and Measurement Technology and Equipment, 1062-1067. https://doi.org/10.1117/12.865571

Xu, P., Tan, Q., Zhang, Y., Zha, X., Yang, S. & Yang, R. (2022). Research on maize seed classification and recognition based on machine vision and deep learning. Agriculture, 12 (2), 232. https://doi.org/10.3390/agriculture12020232

Yang, H.-H., Chen, W.-T., Luo, H.-L. & Kuo, S.-Y. (2021). Multi-modal bifurcated network for depth guided image relighting. Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (pp. 260-267).

Yang, Q. (1994). An approach to apple surface feature detection by machine vision. Computers and electronics in agriculture, 11 (2-3), 249-264. https://doi.org/10.1016/0168-1699(94)90012-4

KSÜ Mühendislik Bilimleri Dergisi, 28(2), 2025
Araştırma Makalesi

KSU J Eng Sci, 28(2), 2025
Research Article

Kahramanmaras Sutcu Imam University
Journal of Engineering Sciences

Geliş Tarihi : 27.01.2025
Kabul Tarihi :27.03.2025

Received Date : 27.01.2025
Accepted Date : 27.03.2025

TURBA ÇÖZELTİSİNİN TİTANYUMUN ÇUKURLAŞMA KOROZYONU ÜZERİNDEKİ ROLÜNÜN ORTAYA ÇIKARILMASI

REVEALING THE ROLE OF PEAT SOLUTION OVER THE PITTING CORROSION OF TITANIUM

Ayhan ORHAN[1] (ORCID: 0000-0002-7648-2566)
Nurettin ÇEK[2,3*] (ORCID: 0000-0001-6120-9228)

[1] Fırat Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Elazığ, Türkiye
[2] Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Teknolojileri Programı, Elazığ, Türkiye
[3] OSTİM Teknik Üniversitesi, Meslek Yüksekokulu, Makine ve Metal Teknolojileri Bölümü, Ankara, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Nurettin ÇEK, nurettincek001@gmail.com (nurettin.cek@ostimteknik.edu.tr)

ÖZET

Ucuz olması ve lokal korozyona karşı daha az duyarlı olduğu gerekçesiyle karbon çeliğinden üretilen yeraltı boru hatları, korozyon saldırısına karşı yetersiz kalmaktadırlar. Bu sorun nedeniyle yeraltı boru hatlarının ömrü kısalır, ekonomik ve can kayıpları ortaya çıkar. Bu nedenle, yeraltı boru hattı uygulamalarında kullanılan çelik malzemelere yeni bir seçenek olabilecek malzemelere ihtiyaç duyulduğu gerçeği halen güncelliğini korumaktadır. Ayrıca, dünyada önemli bir alan kaplayan ve yeraltı boru hatlarının geçtiği turba ortamlarının korozif etkisi hakkında çalışmalar oldukça fakirdir. Bu nedenle, bu çalışmada, turba çözeltisindeki titanyum malzemenin çukurlaşma korozyonu özellikleri, üç elektrotlu elektrokimyasal hücrede potansiyostat/galvanostat cihazı kullanılarak araştırılmıştır. Araştırmalar kapsamında açık devre potansiyeli ve döngüsel potansiyodinamik kutuplaşma testleri gerçekleştirilmiştir. Bahse konu testler birbirleriyle tutarlı olarak gerçekleşmiş ve bu testler turba çözeltisinde titanyum malzemenin çukurlaşma korozyonuna karşı direnç gösterdiğini ortaya koymuştur. Bu nedenle, çukurcuk korozyonuna karşı direnç göstermesi nedeniyle turba ortamlarından geçen yeraltı boru hatlarında kullanılan çelik esaslı malzemeler yerine titanyum esaslı boruların kullanılması tavsiye edilmektedir.

Anahtar Kelimeler: Çukurlaşma korozyonu, korozyon, titanyum, turba çözeltisi.

ABSTRACT

Underground pipelines made of carbon steel, due to their low cost and lower sensitivity to local corrosion, are inadequate against corrosion attack. Due to this problem, the life of underground pipelines is shortened, and economic and life losses occur. Therefore, the fact that materials that can be a new alternative to steel materials used in underground pipeline applications are needed is still up to date. Also, studies on the corrosive effects of peat environments, which cover a significant area in the world and through which underground pipelines pass, are quite poor. Therefore, in this study, the pitting corrosion properties of titanium material in peat solution were investigated using a potentiostat/galvanostat device in a three-electrode electrochemical cell. Open circuit potential and cyclic potentiodynamic polarization tests were carried out within the scope of the research. The tests in question were carried out consistently with each other and these tests revealed that titanium material in peat solution showed resistance to pitting corrosion. Therefore, due to its resistance to pitting corrosion, it is recommended to use titanium-based pipes instead of steel-based materials used in underground pipelines passing through peat environments.

Keywords: Pitting corrosion, corrosion, titanium, peat solution.

ToCite: ORHAN, A., & ÇEK, N. (2025). TURBA ÇÖZELTİSİNİN TİTANYUMUN ÇUKURLAŞMA KOROZYONU ÜZERİNDEKİ ROLÜNÜN ORTAYA ÇIKARILMASI. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 28(2), 897-906.

GİRİŞ

Korozyon, genellikle metallerde ve metal içeren malzemelerde bulundukları ortamın etkisi altında meydana gelen fiziksel ve kimyasal değişimler olarak tanımlanır. Korozyon, doğal bir süreç ve disiplinler arası bir konu olduğu için mühendislik ve bilimin önemli ve zorlu yönlerinden biridir (Sarwar et al., 2024; Çek and Orhan, 2025). Korozyonun en fazla hasara yol açtığı alanlardan biri de yer altı boru hatlarıdır. Çelik malzemeler çoğunlukla yer altı boru hatlarında kullanılır ve burada çelik malzemelerin korozyona dayanıklı olduğu düşünülse de gerçek farklıdır. Bunun en önemli göstergelerinden biri de yer altı boru hattı arızalarının %30'unun korozyondan kaynaklanmasıdır (Soomro et al., 2022). Korozyonun yer altı boru hatları için ne kadar ciddi bir sorun olduğunun bir başka örneği de Kanada'dır. Burada 2014 ile 2018 yılları arasında yer altı (petrol/gaz) boru hattı arızalarının %41'inin korozyondan kaynaklandığı bildirilmiştir. Daha da endişe verici olanı, 2010 ile 2019 yılları arasında Amerika Birleşik Devletleri (ABD)'nde meydana gelen tehlikeli sıvı boru hattı kazalarının %20'sinin korozyondan kaynaklanmasıdır (Qin and Cheng, 2021). Dünyanın enerji ihtiyacının %50'sinden fazlası petrol ve gaz kaynaklarından sağlanmaktadır. Bu enerji ihtiyacını karşılayan petrol ve gazın taşınması boru hatları aracılığıyla yapılmaktadır. Bu nedenle boru hatları en önemli enerji iletim arterlerinden biridir. Dünya çapındaki petrol ve gaz ana boru hatlarının toplam uzunluğunun 2023 yılında 2,15 milyon km olması tahmin edilmektedir. Bu oranın 2027 yılına kadar %5'ten fazla artması öngörülmektedir. Boru hattı tipleri arasında gaz boru hatları en hayati olarak gösterilmektedir. Ancak bu boru hatları da korozyondan mustariptir ve korozyon nedeniyle hizmet ömürleri önemli ölçüde azalabilir (Hussain et al., 2024). Gaz boru hatlarının en büyük sorunu olan korozyon nedeniyle, ABD'deki gaz boru hattı operatörleri 2010-2013 yılları arasında 466 milyon ABD doları tutarında mali kayba uğradı (Hosseinzadeh et al., 2024). Sağlanan bilgilere göre, 2023 yılında ABD'nin Arizona eyaletinde bir doğal gaz boru hattının korozyon nedeniyle patlaması sonucu iki kişi hayatını kaybetti ve 5,5 milyon ABD doları tutarında ekonomik kayıp yaşandı. Dahası, boru hatlarının tasarımı ve bakımındaki önemli zorluklardan biri de korozyondur, çünkü korozyon nedeniyle boru hatlarında çatlaklar ve çeşitli kusurlar oluşur (Sarwar et al., 2024). Bu bilgi tek başına boru hattı korozyonunun neden olduğu potansiyel hasarı ve bu tür hasarı en aza indirmek için malzeme araştırmanın önemini vurgulamaktadır.

Su, petrol ürünleri ve çeşitli kimyasallar taşıyan yer altı boru hatları, daha ucuz ve lokal korozyona daha az duyarlı olduğu için karbon çeliğinden üretilir. Dahası, karbon çeliği bu konuda endüstriyel uygulamalar için en popüler malzemedir. Ancak yeraltı boru hatlarında kullanılan karbon çeliğinin hem iç hem de dış boru yüzeylerinde korozyon saldırısına maruz kaldığı bildirilmiştir (Bairi et al., 2024). Karbon çeliğinin bir türü olan C20 çeliği, boru hatlarında kullanılan boru malzemelerinden biridir. Bu malzemenin petrol sahasında üretilen suda korozyon davranışı elektrokimyasal teknikler (açık devre potansiyeli, elektrokimyasal empedans spektroskopisi ve galvanik kuplaj) ve yüzey analizi ile incelenmiştir. Araştırma sonuçları C20 çeliğinde ciddi yerel korozyon meydana geldiğini ortaya koymuştur (Udowo et al., 2024).

Yeraltı boru hatlarında kullanılan malzemelerden biri olan X60 çeliğinden yapılmış boruların korozyon davranışını inceleyen çalışmalarda, bu malzemenin iç duvarının ciddi şekilde aşındığı, korozyonun çelik borunun alt kısmında, özellikle sızıntı noktasının etrafında belirgin olduğu ve sonunda sızıntı noktasında çukurlaşma korozyonunun meydana geldiği bildirilmiştir (Ma et al., 2022).

Düşük maliyet ve kolay üretim gibi avantajları nedeniyle X70 çelik malzemesi, yeraltı boru hatları için dünya çapında yaygın kullanılan malzemelerden biridir. X70 çelik malzemeden üretilen boru hatlarında elektrokimyasal ve mikrobiyal faktörler nedeniyle korozyon meydana geldiği vurgulanmıştır. Ayrıca, X70 çeliğinden yapılmış boru hatları için ana tehlikenin bakteriyel korozyon tehlikesi olduğu belirtilmiştir. Ayrıca, bakteriyel korozyonun elektrokimyasal ve stres gibi olumsuz faktörlerle birlikte hareket ederek boru hattını tahrip ettiği vurgulanmıştır (Yang et al., 2022).

X70 çeliğinden daha yüksek mukavemete sahip bir boru hattı malzemesi olarak öne çıkan X80 çeliği, X70 çeliğine kıyasla inşaat maliyetlerinde %7 tasarruf sağlamıştır. Bu nedenle kullanımı her geçen gün artan X80 çeliği, 2018 yılına kadar küresel boru hatlarının 300.000 km'ye kadarını kaplamıştır (Shuai et al., 2020). Yeraltındaki X80 boru hattı çeliğinin yüzeyinde korozyon ürünlerinin birikmesi nedeniyle anodik ve katodik reaksiyon süreçlerinin etkilendiği ve bunun korozyon hasarının derecesinde değişikliklere yol açabileceği bildirilmiştir (Wang et al., 2025). Karbon çelik boru hatlarında oluşan korozyon tipleri genellikle homojen korozyon, çukurlaşma korozyonu ve yarık korozyonu olarak kabul edilir. Bu korozyon tiplerinin ortaya çıkma nedenleri galvanik korozyon, kavitasyon-erosif korozyon, kaçak akım korozyonu, gerilim korozyon çatlaması ve mikrobiyolojik olarak etkilenen korozyon olarak rapor edilmektedir (May et al., 2022).

Korozyon sorunu nedeniyle yeraltı boru hattı uygulamalarında kullanılan çelik malzemelere yeni bir alternatif olabilecek malzemelere ihtiyaç duyulduğu gerçeği hala güncelliğini korumaktadır (Sarwar et al., 2024; Soomro et al., 2022). Bu soruna bir çözüm bulmak amacıyla, son yıllarda boru hatlarının kullanıldığı alanlardan biri olan petrol endüstrisinde titanyum ve alaşımlarının korozyonu ve diğer özellikleri araştırılmıştır. Titanyum ve titanyum alaşımlarının sulu çözeltilerdeki çözünmüş oksijenle reaksiyona girerek yüzeylerinde onlarca ila yüzlerce nanometrelik bir oksit filmi oluşturabildiği belirlenmiştir. Titanyum bazlı malzemelerin, nispeten yoğun yapıları ve kararlı kimyasal özellikleri nedeniyle aşındırıcı iyonlar tarafından daha fazla aşınmayı etkili bir şekilde önleyebildiği anlaşılmıştır. Titanyum bazlı malzemeler hakkında birçok araştırma sonucu olmasına rağmen, hala çözülmesi gereken bazı sorunlar vardır (Wang et al., 2024). Yeraltı boru hatlarında titanyum bazlı malzemelerin uygulanmasından bahseden çalışmalar genellikle bir alaşımlama sürecini tanımlar. Örneğin, Gu et al. (2023) tarafından yürütülen çalışmada, geleneksel X80 çeliği bir vakum eritme ünitesinde eritilmiş ve eritilmiş numunelere farklı ağırlık oranlarında titanyum eklenerek yeni boru hattı çelik malzeme numuneleri üretilmiştir. Çalışmanın sonuçları, titanyum ilavesinin X80 boru hattı çeliğinin çekme mukavemetini, akma mukavemetini, darbe tokluğunu ve korozyon direncini artırabileceğini göstermiştir (Gu et al., 2023).

Dökme demir, çelik, bakır alaşımları, nikel alaşımları gibi malzemelerin kil, tın, turba, çamur, cüruf gibi farklı toprak tipleri içerisindeki korozyon davranışları incelenmiş olmasına rağmen (Kotni et al., 2024), özellikle turba ortamlarında titanyumun korozyon davranışlarına ilişkin literatür oldukça zayıftır. Turba ortamında titanyumun korozyon davranışını inceleyen nadir çalışmalardan birinde, açık devre potansiyeli ve elektrokimyasal empedans spektroskopisi testleri yapılmış ve titanyumun turba korozyonuna karşı direnç gösterdiği belirtilmiş olmasına rağmen, ne yazık ki korozyon mekanizması ve korozyon türü hakkında ayrıntılı bilgi eksiktir (Orhan and Çek, 2024). Turba, dünya kara alanının yaklaşık %3'ünü kaplayan organik madde açısından zengin asidik bir toprak türüdür (Girkin et al., 2023). Turba ayrıca *Clostridium* bakterileri gibi çeşitli mikroorganizmalara da ev sahipliği yapar (Erensoy et al., 2022). Yeraltı (petrol, gaz vb.) boru hatlarının kaçınılmaz olarak turba topraklarının bulunduğu alanlardan geçtiği yadsınamaz bir gerçektir (Thurairajah et al., 2022).

Bu bağlamda, bu çalışma, asitli özellik göstermesi nedeniyle aşındırıcı çevre koşulları sergileyen ve mikrobiyal çeşitlilikleri nedeniyle mikrobiyal kaynaklı korozyon yaratma potansiyeline sahip turba ortamlarından geçen yer altı boru hatları için titanyumun uygun bir malzeme olup olamayacağı sorusunun cevabını bulmayı amaçlamaktadır. Bunun için, bu çalışma titanyumun yer altı boru hatları için uygun bir malzeme olarak tanıtımına katkıda bulunmayı ve gerçek servis koşulları altında titanyum malzemenin çukurlaşma korozyon davranışının kapsamlı bir şekilde anlaşılmasını sağlamayı hedeflemektedir.

MATERYAL VE YÖNTEM

Materyal

Saf titanyum tel Shanghaimetal (Çin) firmasından satın alındı. Malzemenin katalog verileri, yüksek saflıkta (%99,9) titanyum olduğunu ifade etmektedir. Bu malzeme, 1,002 gram ağırlığında silindirik (68,26 x 2 mm) bir çubuk şeklindedir. Yüksek organik madde (%99) içeriğine sahip asidik (pH ~5,6) karakterli turba toprağı Fidanistanbul firmasından satın alındı. Turba çözeltisi hazırlama işlemi, distile su (Onur Kimya, Ankara) kullanılarak cam kap (50 x 50 x 50 mm) içerisinde gerçekleştirildi. Ağılık ölçümleri için hassas terazi (Weightlab WL-603), korozyon testleri için potansiyostat/galvanostat (İvium Vertex.1A, Hollanda) cihazı kullanıldı. Gümüş/gümüş klorür (Ag/AgCl) referans elektrot ve platin yardımcı elektrot BASi (Amerika Birleşik Devletleri) firmasından satın alındı.

Yöntem

Tüm çalışmalar, deneyler ve testler oda sıcaklığında gerçekleştirildi. Korozyon deneylerine başlamadan önce turba çözeltisi hazırlandı. Bunun için deneylerin gerçekleştirileceği cam kap boyutu dikkate alınarak 50 gram kuru turba hassas terazide tartıldı. Homojen bir karışım elde etmek amacıyla turba su oranı eşit tutuldu ve cam kap içerisine 50 mL distile su ilave edilip karıştırıldı. Elde edilen turba malzemesinin iyice çözünmesi amacıyla 24 boyunca cam kapta bekletildi. Bu süre zarfında titanyum silindir çubuk, saf su ile yıkandı ve oda koşullarında kurutuldu. 24 saat dolduktan sonra turba çözeltisinin bir çamur görümünde olduğu görülmesi ile birlikte korozyon deneyleri aşamasına geçildi.

Korozyon deneyleri için cam kap içerisindeki turba çözeltisi içerisine titanyum silindir çubuk, Ag/AgCl referans elektrot ve platin tel yardımcı elektrot yerleştirildi. Böylece korozyon deneylerinin önceki çalışmalarla tutarlı bir şekilde olmasını mümkün kılan üç elektrotlu elektrokimyasal hücre oluşturuldu. Burada, titanyum çalışma elektrotu

olarak görev yapmaktadır. Üç elektrotlu elektrokimyasal hücrede korozyon deneyleri potansiyostat/galvanostat cihazı kullanılarak gerçekleştirildi (Benitez, et al., 2025).

Turba çözeltisindeki titanyumun korozyonunu tahribatsız bir şekilde araştırmak ve izlemek için açık devre potansiyeli (ADP) gözlemi, zamana karşı potansiyel değerinin kaydedilmesiyle gerçekleştirildi (Hemkemeier et al. 2022). ADP gözlemi 24 saat boyunca gerçekleştirildi. İstikrarlı bir ADP elde edildikten sonra detaylı korozyon çalışmaları aşamasına geçildi ve bu aşamada yeraltı boru hatlarının en önemli sorunlarından birisi olan çukurlaşma korozyonu araştırıldı (Mollapour and Poursaeidi, 2021).

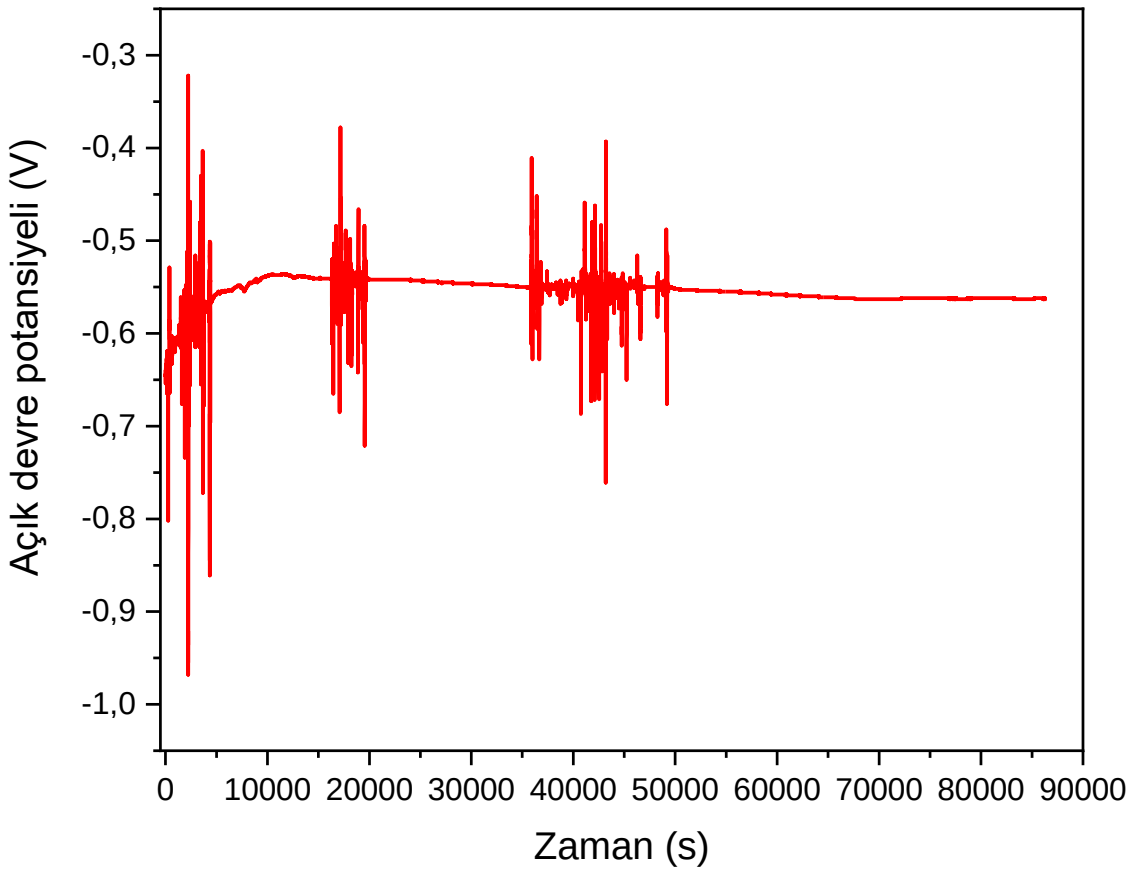
Çukurlaşma korozyonu, döngüsel potansiyodinamik kutuplaşma (DPK) testi ile gerçekleştirildi. DPK taraması süreci; titanyum malzeme, referans elektrot, yardımcı elektrot ve turba çözeltisi değiştirilmeden dört kez tekrarlanarak gerçekleştirilmiştir. Her bir DPK taraması, 0,167 mV/s tarama hızıyla ADP'ye karşı -50 mV yukarı değerden başlatılarak yapılmıştır. ADP'ye karşı +1000 mV değerinde veya akım yoğunluğu 1 mA/cm^2 değerinde ulaştığında tersine döndürülmüş ve son olarak ADP değerinde durdurulmuştur (Liu et al., 2024). Böylece DPK testi tamamlanmıştır.

BULGULAR VE TARTIŞMA

Çalışma, turba çözeltisi ortamında titanyumun yüzeyinde film oluşturma sürecinin, tüm oluşma ve titanyum yüzeyine yayılma süreci boyunca kimyasal tepkime, elektrokimyasal tepkime ve kimyasal adsorpsiyonun karışık bir tepkime süreci olduğunu göstermiştir. ADP ölçümü tamamen nitel yöntem bir yöntem olup temel amacı, herhangi bir nicel bilgi sağlamadan korozyon oluşma olasılığını değerlendirmektir (Hemkemeier et al., 2022).

Şekil 1, turba ortamındaki titanyumun zamana bağlı ADP grafiğini sunmaktadır. Burada görüleceği üzere yaklaşık olarak ilk 6000 saniyede oldukça değişken bir durum söz konusudur. Salınım olarak da tanımlanabilecek ADP'nin bu değişkenliği, metastabil çukurlaşma nedeniyle ortaya çıkmış olabilir. 6000 saniye ila yaklaşık 15000 saniye arasında ADP değerinin pozitif yönde kayarak artması turba çözeltisindeki titanyum yüzeyinde pasifleşmenin oluşumuna atfedildi (Kakinuma et al., 2021). Söz konusu pasifleşme, turba çözeltisinin etkisiyle titanyumun yüzeyinde oksit film oluşumu sayesinde ortaya çıkmış olabilir ve bu korozyon saldırısına karşı bir engel görevi görebilir (Heakal and Shehata, 2020). Yaklaşık 15000 saniye ile 22500 saniye arasında, ADP tekrar salınımlar sergiledi. Bu, titanyum yüzeyinde pasifleşmeyi sağlayan oksit film tabakasının hızlı bir şekilde bozulduğunu ve hızlı bir şekilde tekrar oluşumu nedeniyle meydana gelmiş olabilir (Qin et al., 2021). Yaklaşık 22500 saniyeden 36380 saniyeye kadarki süreçte ADP, -0.545 ± 0.006 V değerinde gayet kararlı bir durum sergilemiştir. Bu nedenle bu zaman aralığında titanyum yüzeyinde pasifleşmeyi sağlayan oksit film tabakasının korozyon saldırısına karşı direnç gösterdiği sonucuna varılabilir. 36380 saniyeden sonra yaklaşık 49359 saniyeye kadar ADP yine dikkat çekici seviyede salınımlı bir eğri sergileyerek titanyum yüzeyindeki oksit film tabakasının hızlı bir şekilde bozulup oluştuğunu düşündürmüştür. 49360 saniyeden 64116 saniyeye kadar ADP, -0.550 V değerinden -0.561 V değerine kadar düşmüştür. Bu zaman aralığında ADP değerinin negatif yönde kayması titanyumun turba çözeltisinde negatif yöne doğru kayması titanyum yüzeyinde korozyon ürünlerinin biriktiğini gösterir (Radovanović et al., 2019). Dahası bu, titanyum yüzeyine turba çözeltisinden agresif iyonların difüzyonunun bir sonucu olarak da ifade edilebilir (Palaniappan et al., 2020). 64117 saniyeden 86400 saniyeye kadar ADP -0.562 ± 0.001 V değeri ile oldukça kararlı bir durum sergilemiştir. ADP'deki dalgalanmaların azalması titanyum yüzeyinde daha yoğun ve daha kararlı bir yüzey filminin oluşmasına atfedilir. Üstelik, titanyum yüzeyinde oluşan oksit filminin deneylerin sonunda dahi oldukça kararlı olduğu görülmüştür. Bu nedenle, potansiyel daha kararlı bir hal sergilemiştir (Kaya et al., 2023).

DPK testi sayesinde turba çözeltisindeki titanyum malzemenin aktivasyon, pasifleşme ve trans-pasif özellikleri hakkında bilgiler sunan döngüsel polarizasyon davranışı ortaya çıkarıldı. Turba çözeltisinde titanyum genellikle pasifleşme özelliği göstermekte olup Şekil 2, turba çözeltisindeki titanyumun DPK ölçümlerinden elde edilen grafikleri sunmaktadır. Şekil 3, turba çözeltisindeki titanyumun DPK ölçümlerinin karşılaştırılmasını göstermektedir. Her iki şekilde görüleceği üzere tüm grafiklerde ters kutuplaşma eğrileri dikkat çekmektedir. Bu genellikle, sivri uçlar oluşturan çoklu anodik-katodik geçiş potansiyelleri (katodik halka) ve esasen tüm ters tarama boyunca pozitif histerezis göstermesine neden olmuş olabilir. Bu çoklu anodik-katodik geçiş potansiyelleri, anodik ve katodik potansiyel çizgilerinin kesişim noktalarına karşılık gelir. Bu, genellikle çukurlaşma korozyonu olmadığında ters kutuplaşma taramalarında gözlemlenen bir durumdur (Sfikas et al., 2020).

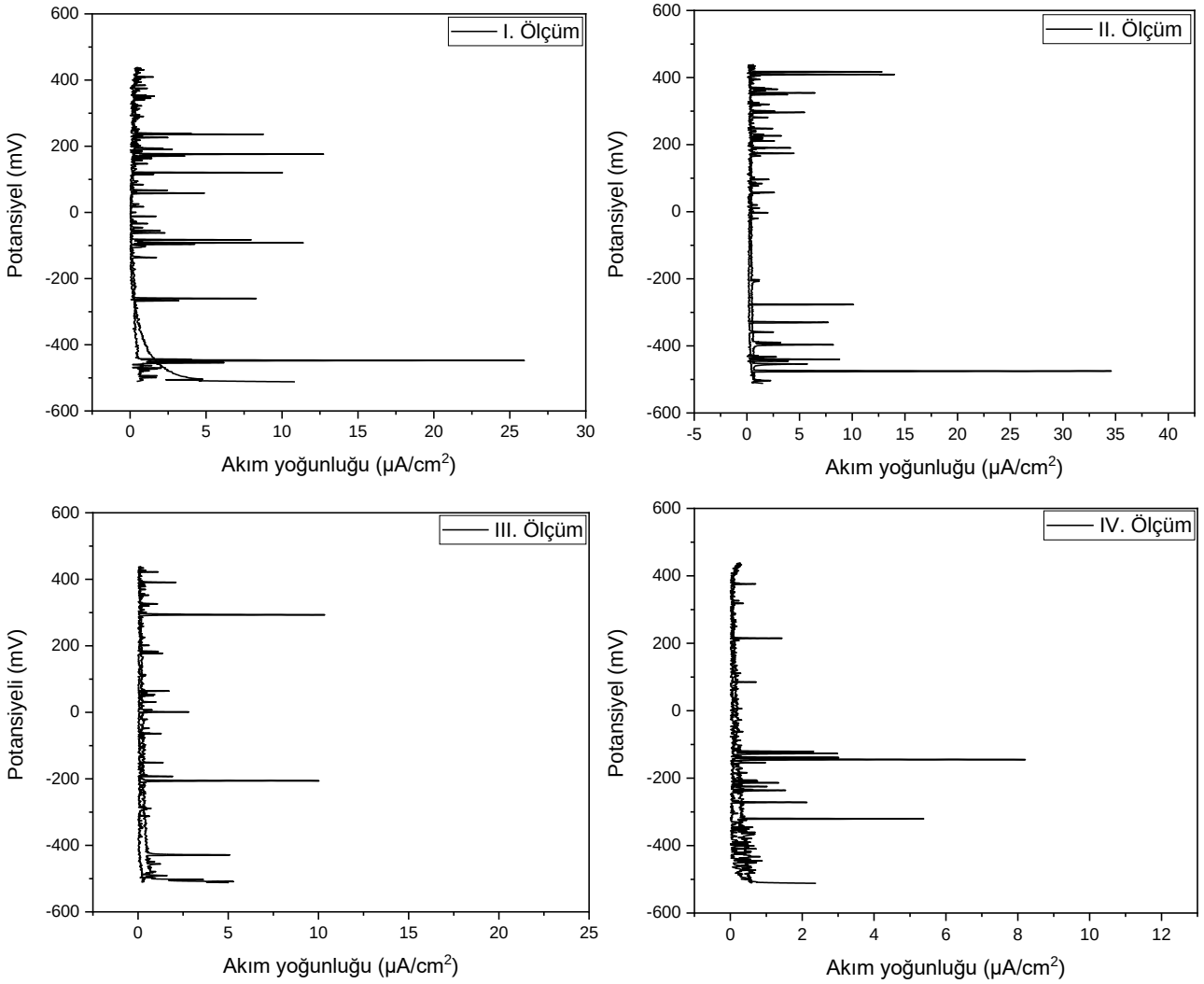


Şekil 1. Turba ortamındaki titanyumun zamana bağlı ADP eğrisi

DPK ölçümleri kapsamında; korozyon potansiyeli, çukurlaşma potansiyeli, koruma potansiyeli ve akım yoğunluğu değerleri tespit edildi. Korozyon potansiyeli değeri ile çukurlaşma potansiyeli arasındaki potansiyel fark malzemenin çukurlaşma korozyonuna karşı direncinin bir göstergesi olarak kabul edilir. Söz konusu potansiyel fark ne kadar büyükse malzeme çukurlaşma korozyonun karşı o denli iyi direnç göstereceği düşünülmektedir (Radojković et al., 2023). Çukurlaşma potansiyeli, pasifleşmenin artık baskın olmadığı ve pasif filmin bozulmaya uğradığı ve kararlı çukurlaşmanın meydana geldiği potansiyele karşılık gelir. Koruma potansiyeli, ters tarama eğrisinin ileri tarama eğrisiyle kesiştiği potansiyele karşılık gelir. Bu potansiyel, başlatılan korozyon çukurlarının büyümesinin durduğu veya başka bir deyişle pasifleşmenin meydana geldiği potansiyeldir. Akım yoğunluğundaki artış olması, pasif film bozulması ve çukur oluşumunun bir göstergesi olarak ifade edilebilir (Singh and Shahi, 2022). Bu çalışmada DPK testleri 4 kez tekrarlandığı için her bir ölçüm için çukurlaşma potansiyeli, koruma potansiyeli ve korozyon akım yoğunluğu değerleri tespit edilmiş olup bunlar Tablo 1'de verilmiştir. Burada görüleceği üzere, dört ölçümde de korozyon potansiyeli ve çukurlaşma potansiyelleri birbirlerine çok yakın değerlerde gerçekleşmiştir. Bu durum, çevrimlerin ileri taramasında çukurlaşma korozyonunun görülmediğini açıkça ortaya koymaktadır (Kiourtsidis et al., 1999). Bu sonuç, ölçümün kararlılığını yansıtan bir bulgu olarak düşünülmektedir. Ayrıca, en düşük çukurlaşma potansiyeli ilk ölçümde görülürken en yüksek çukurlaşma potansiyeli III. ölçümde görülmüştür. Burada, turba çözeltisindeki titanyum yüzeyinde oluşan oksit film tabakası nedeniyle çukurlaşma potansiyelinin arttığı düşünülmektedir. Dahası, titanyum yüzeyinde bulunan oksitli film tabakasındaki oksit içeriğinin artmış olmasına bağlı olarak çukurlaşma korozyon direncinin artması gerçekleşmiş olabilir (Xiao et al., 2024). IV. ölçümde söz konusu oksit tabasında çatlamalar olmuş olabileceği için korozyon potansiyeli, III. ölçüme göre 28 mV daha düşük olsa da I. ve II. ölçüme göre oldukça yüksektir. Bu nedenle, turba çözeltisindeki titanyum deneylerin başına göre deneylerin sonuna doğru çukurlaşma korozyonuna karşı daha yüksek direnç sergilemiştir. Bunun bir başka göstergesi de korozyon potansiyeli ile çukurlaşma potansiyeli arasındaki en yüksek farkın III. ölçümde en düşük farkın ise I. ölçümde olmasıdır. Koruma potansiyelinin dört ölçümde de korozyon potansiyeline yakın olması, titanyum malzemenin turba çözeltisine yerleştirildiğinde korozyon tepkimeleri başlar başlamaz korozyona karşı direnç gösterdiğini düşündürmüştür. En yüksek akım yoğunluğu ilk ölçümde en düşük akım yoğunluğu IV. ölçümde görülmüştür. Deneylerin sonunda, başlangıca göre daha düşük akım yoğunluğunun ölçülmesi korozyon hızının azaldığını, korozyon direncinin arttığını gösterir. Bu durum turba çözeltisinde titanyumun zamana göre korozyon

direncin geliştirdiği fikrini vermiştir. Bunun nedeni olarak da turba çözeltisindeki titanyum yüzeyinde zaman bağlı oksit film gelişimi olması düşünülmektedir. Ayrıca, akım yoğunluğu 10 µA/cm²'den az olduğunda pasif olarak kabul edildiği için turba çözeltisindeki titanyum malzeme dört ölçümün tamamında pasifleşme özelliği sunmuştur (Xiong et al. 2024). Tüm bunlar, titanyumun turba çözeltisinde korozyon saldırısına karşı oldukça iyi direnç sergilediğinin birer göstergeleridir.

Sonuç olarak, oluşan pasifleşme özelliğinin turba çözeltisinde titanyum malzemenin etkili korozyon direncini sağladığı düşünülmektedir.

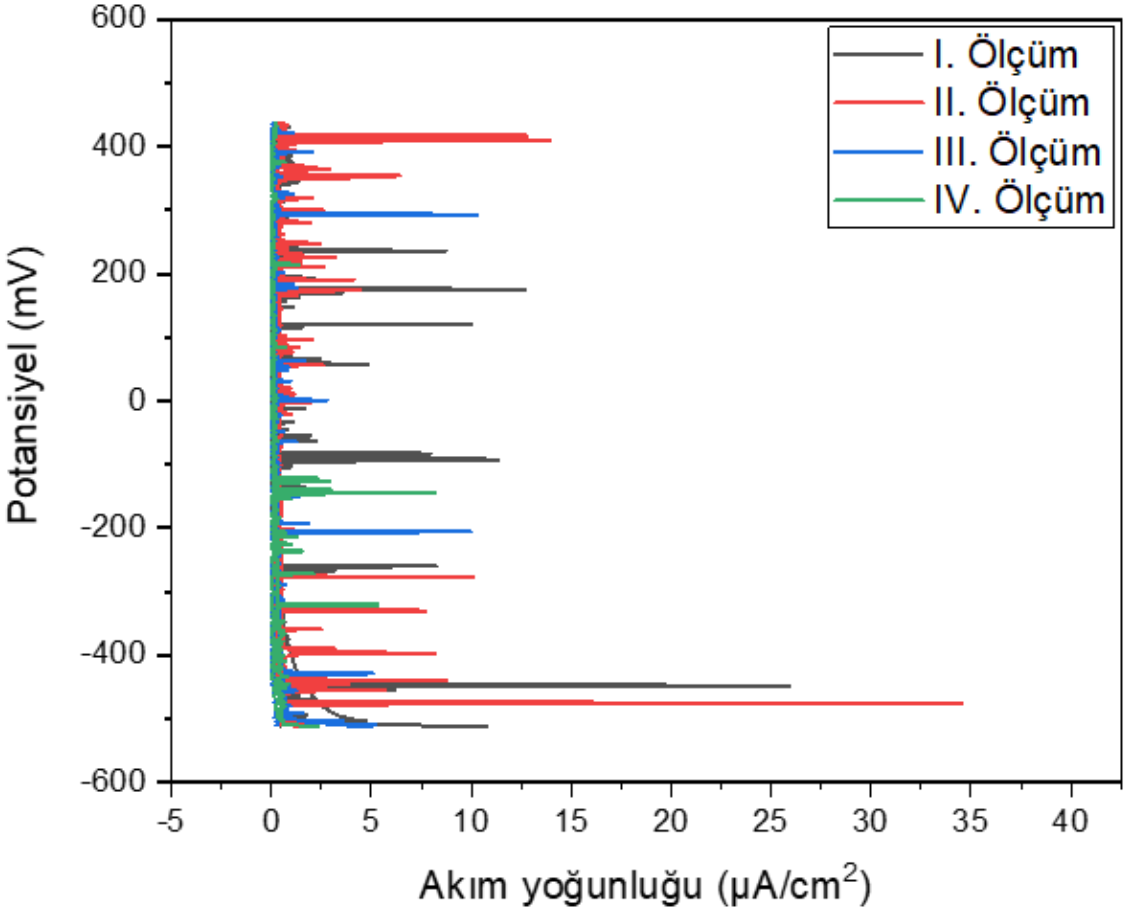


Şekil 2. Turba ortamındaki titanyumun DPK ölçümleri

SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, turba ve su oranı 1:1 olacak şekilde hazırlanan turba çözeltisinde titanyum malzemenin korozyon davranışı ADP ve DPK testleriyle araştırılmıştır. Her iki test turba çözeltisindeki titanyumun korozyon davranışını yansıtan çukurlaşma ve elektrokimyasal pasifleşme davranışı hakkında kapsamlı bilgiler sağlamıştır. ADP ölçümlerinin başlangıcına kıyasla sonunda daha pozitif bir ADP değeri elde edilmiştir. ADP değerinin pozitif potansiyel yönünde kayması turba çözeltisinde titanyum malzemenin yüzeyinde oksit film tabakası oluşumu ile ilişkilendirilmiştir. ADP ölçümlerinde belirli zamanlarda keskin salınımlar olduğu görülmüştür. Bu salınımların titanyum yüzeyinde hızlı bir şekilde oksit tabakası oluşumu, hızlı bir şekilde bozulması ve hızlı bir şekilde tekrar oluşumu nedeniyle ortaya çıktığı düşünülmüştür. Bununla birlikte, deneylerin sonuna doğru ADP değerlerindeki keskin salınımların azalması ve istikrarlı bir şekilde sonuçlanması, titanyum yüzeyinde kararlı bir oksit film tabasının varlığının göstergesi olarak düşünülmüştür. DPK ölçümlerinde pozitif histerezis görülmüş olup bu, genellikle

çukurlaşma korozyonu olmadığını göstermesi açısından önemli bir sonuçtur. Ayrıca, bu durum literatürdeki ters kutuplaşma taramalarında gözlemlenen bir durum olması bakımından çalışmanın literatür ile tutarlılığın bir göstergesi olarak önemli bir sonuçtur. DPK ölçümlerinden elde edilen çukurlaşma potansiyeli, koruma potansiyeli, korozyon akım yoğunluğu değerleri ve bunların birbirleriyle ilişkileri, turba çözeltisine titanyum malzemenin çukurlaşma korozyonuna karşı daha yüksek direnç sergilediğini göstermiştir. Üstelik, akım yoğunluğu değeri10 µA/cm² değerinden az olarak gerçekleştiği olduğu için çözeltisindeki titanyum malzeme dört DPK ölçümün tamamında pasifleşme özelliği sergilemiştir. ADP ve DPK testleri birbirleriyle tutarlı olup turba çözeltisinde titanyum malzemenin çukurlaşma korozyonuna karşı direnç gösterdiğini ortaya koymuştur.



Şekil 3. Turba ortamındaki titanyumun DPK ölçümlerinin karşılaştırılması

Tablo 1. DPK testlerinden elde edilen bulgular.

Parametre	**I. Ölçüm**	**II. Ölçüm**	**III. Ölçüm**	**IV. Ölçüm**
Korozyon potansiyeli (V)	-0,494	-0,502	-0,502	-0,498
Çukurlaşma potansiyeli (V)	-0,448	-0,330	-0,206	-0,234
Korozyon potansiyeli – Çukurlaşma potansiyeli (V)	-0,046	-0,172	-0,296	-0,264
Koruma potansiyeli (V)	-0,508	-0,504	-0,506	-0,510
Korozyon akım yoğunluğu (µA/cm^2)	3,21	1,30	0,389	0,676

Turba ortamlarından geçen yeraltı boru hatlarında kullanılan çelik esaslı malzemeler yerine çukurlaşma korozyonuna karşı direnç göstermesi nedeniyle titanyum esaslı boruların kullanılması tavsiye edilmektedir. Bir başka deyişle, çukurlaşma korozyonuna dirençli olan titanyumun yeraltı boru hattı malzemesi olarak kullanılması teşvik edilmelidir. Ayrıca, turba ortamında titanyumun diğer korozyon türlerine karşı davranışının araştırılması önerilmektedir.

Teşekkür

Korozyon testleri konusundaki destekleri için Karabük Demir ve Çelik Fabrikaları A.Ş. (KARDEMİR) İleri Teknolojiler Araştırma ve Mühendislik Merkezi'ne teşekkür etmek isteriz.

Bu çalışma, ikinci yazarın birinci yazar danışmanlığında yürütülen doktora tezinden esinlenerek üretilmiştir.

KAYNAKLAR

Bairi, L.R Bhuyan, P., Ghosh, A., Narang, M., Mandal, S. (2024). Microbially induced corrosion issues in the underground buried crude oil and natural gas bearing pipelines: A review. Materials and Corrosion, 75(2), 197-211. https://doi.org/10.1002/maco.202313950

Benitez, D.A.N., Galvez, A.K.L., Sesenes, R.L. et al. (2025) A Study of the Corrosion Inhibition of Aluminum in Ethanol-Gasoline Blend Using Annona muricata Leaves Extract. J Bio Tribo Corros 11, 3. https://doi.org/10.1007/s40735-024-00923-4

Çek N. and Orhan, O (2025). Understanding the Corrosion Behaviour of Graphite in Peat Environment for Environmental and Sustainability Applications. Journal of Polymer and Composites, 13(01), 728-737. https://journals.stmjournals.com/jopc/article=2024/view=188605

Erensoy, A., Mulayim, S., Orhan, A., Çek, N., Tuna, A., Ak, N. (2022). The system design of the peat-based microbial fuel cell as a new renewable energy source: The potential and limitations. Alexandria Engineering Journal, 61(11), 8743-8750. https://doi.org/10.1016/j.aej.2022.02.020

Girkin, N.T., Burgess, P.J., Cole, L., Cooper, H.V., Coronado, E.H., Davidson, S.J., Hannam, J., Harris, J., Holman, I., McCloskey, C.S., McKeown, M.M., Milner, A.M., Page, S., Smith, J., Young, D. (2023). The three-peat challenge: business as usual, responsible agriculture, and conservation and restoration as management trajectories in global peatlands. Carbon Management, 14(1), 2275578. https://doi.org/10.1080/17583004.2023.2275578

Gu, Y., Li, Z., Li, J., Wang, Q., Zhao, Y., Wu, C., Su, X., Peng, H. (2023). Effect of Ti addition on mechanical properties and corrosion resistance of X80 pipeline steel. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 206, 105003. https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2023.105003

Hemkemeier, T.A., Almeida, F.C.R., Sales, A., Klemm, A.J. (2022). Corrosion monitoring by open circuit potential in steel reinforcements embedded in cementitious composites with industrial wastes. Case Studies in Construction Materials, 16, e01042. https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01042

Heakal, F.ET., Shehata, O.S. (2020). Insight into the Electrochemical and Semiconducting Properties of Native Oxide Films on Ti Metal and Its Ti–6Al–4V Alloy in Borate Buffer Solutions. Prot Met Phys Chem Surf 56, 333-342. https://doi.org/10.1134/S2070205120020082

Hosseinzadeh, S., Bahaari, M.R., Abyani, M. (2024). Reliability assessment for pipelines corroded by longitudinally aligned defects. Ocean Engineering, 310(1), 118625. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2024.118625

Hussain, M., Zhang, T., Chaudhry, M., Jamil, I., Kausar, S., Hussain, I. (2024). Review of Prediction of Stress Corrosion Cracking in Gas Pipelines Using Machine Learning. Machines, 12(1), 42. https://doi.org/10.3390/machines12010042

Kakinuma, H., Muto, I., Oya, Y., Momii, T., Sugawara, Y., Hara, Y. (2021). Morphological Change and Open-circuit Potential of Single Metastable Pit on AA1050 Aluminum in NaCl Solution. J. Electrochem. Soc., 168, 021504. https://doi.org/10.1149/1945-7111/abdee9

Kaya, F., Solmaz, R., Geçibesler, İ.H. (2023). The use of methanol extract of Rheum Ribes (Işgın) flower as a natural and promising corrosion inhibitor for mild steel protection in 1 M HCl solution. Journal of Industrial and Engineering Chemistry, 122, 102-117. https://doi.org/10.1016/j.jiec.2023.02.013

Kiourtsidis, G.E., Skolianos, S.M., Pavlidou, E.G. (1999). A study on pitting behaviour of AA2024/SiC_p composites using the double cycle polarization technique. Corrosion Science, 41(6), 1185-1203. https://doi.org/10.1016/S0010-938X(98)00179-6

Kotni, T.R., Pandey, S., Shekhar, S., Ranjan, R., Srivastava, P.S. (2024). Corrosion of different metals/alloys in soil environment: A review. Materials Today: Proceedings, 102, 203-205. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.04.537

Liu, C., Liu, Y., Xia, Z., Wang, Z., Wu, B. (2024). Coconut coir dust extract as a novel green corrosion inhibitor for carbon steel in the chloride-contaminated concrete pore solution. Journal of Building Engineering, 82, 108194. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.108194

Ma, Y., Zhang, H., Gao, Y., Men, Z., He, L., Cao, J. (2022). Failure analysis of a natural gas transmission X60 steel pipeline. Anti-Corrosion Methods and Materials, 69(6), 620-628. https://doi.org/10.1108/ACMM-03-2022-2618

May, Z., Alam, M. K., Nayan, N. A. (2022). Recent Advances in Nondestructive Method and Assessment of Corrosion Undercoating in Carbon–Steel Pipelines. Sensors, 22(17), 6654. https://doi.org/10.3390/s22176654

Orhan, A. and Çek, N. (2024). Investigation of the Corrosion Behavior of Titanium Against Peat Corrosion. International Conference on Advanced Materials Science & Engineering and High Tech Devices Applications, id 71, Turkey.

Qin, F. and Cheng Y.F. (2021). A review on defect assessment of pipelines: Principles, numerical solutions, and applications. International Journal of Pressure Vessels and Piping, 191, 104329. https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2021.104329

Qin, P., Chen, L.Y., Zhao, C.H., Liu, Y.J., Cao, C.D., Sun, H., Zhang, L.C. (2021). Corrosion behavior and mechanism of selective laser melted Ti35Nb alloy produced using pre-alloyed and mixed powder in Hank's solution. Corrosion Science, 189, 109609. https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2021.104329

Palaniappan, N., Cole, I.S., Damodaran, K., Kuznetsov, A., Thomas, K.R.J., Balasubramanian K. (2020). Experimental and DFT studies of porous carbon covalently functionalized by polyaniline as a corrosion inhibition barrier on nickel-based alloys in acidic media. RSC Adv., 10, 12151-12165. https://doi.org/10.1039/D0RA00593B

Radojković, B., Pejić, J., Marunkić, D., Simović, A., Pantović, E.S., Jegdić, B., Bajat, J. (2023). Corrosion of metal parts in the power plant. Materials and Corrosion, 74(10), 1499-1513. https://doi.org/10.1002/maco.202313919

Radovanović, M.B., Tasić, Ž.Z., Mihajlović, M.B.P., Simonović, A.T., Antonijević, M.M. (2019). Electrochemical and DFT studies of brass corrosion inhibition in 3% NaCl in the presence of environmentally friendly compounds. Sci Rep, 9, 16081. https://doi.org/10.1038/s41598-019-52635-2

Sarwar, U., Mokhtar, A.A., Muhammad, M., Wassan R.K., Soomro, A.A., Wassan, M.A., Kaka, S. (2024). Enhancing pipeline integrity: a comprehensive review of deep learning-enabled finite element analysis for stress corrosion cracking prediction. Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics, 18(1), 2302906. https://doi.org/10.1080/19942060.2024.2302906

Sfikas, A.K. and Lekatou, A.G. (2020). Electrochemical Behavior of Al–Al_9Co_2 Alloys in Sulfuric Acid. Corrosion and Materials Degradation, 1(2), 249-272. https://doi.org/10.3390/cmd1020012

Shuai, Y., Wang, X.-H., Cheng, Y.F. (2020). Modeling of local buckling of corroded X80 gas pipeline under axial compression loading. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 81, 103472. https://doi.org/10.1016/j.jngse.2020.103472

Singh, J. and Shahi, A.S. (2022). Microstructure and corrosion behavior of duplex stainless steel electron beam welded joint. J Mater Sci, 57, 9454-9479. https://doi.org/10.1007/s10853-022-07241-5

Soomro, A.A., Mokhtar, A.A., Kurnia, J.C., Lashari, N., Lu, H., Sambo, C. (2022). Integrity assessment of corroded oil and gas pipelines using machine learning: A systematic review. Engineering Failure Analysis, 131, 105810. https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2021.105810

Thurairajah, A., Saad, B., Williams, R., Fernando, V., Seid-Karbasi, M. (2022). Integrity Management Considerations for Pipes in Peat Muskeg and Organic Rich Soils. In: 14th International Pipeline Conference, Alberta, IPC2022-86987. https://doi.org/10.1115/IPC2022-86987

Udowo, V.M., Yan, M., Liu, F., Ikeuba, A.I. (2024). Role of Fe oxide in the underdeposit corrosion of pipeline steel in oilfield produced water containing SRB. Materials and Corrosion, 75(1), 118-129. https://doi.org/10.1002/maco.202313869

Wang, Y., Zhang, S., Fang, X., Liu, Y., Song, Q., Gan, T., Dong, L. (2025). Effect of metro-induced pipe-to-soil potential fluctuations on corrosion behavior of X80 steel in a simulated soil solution. Engineering Failure Analysis, 169, 109209. https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2024.109209

Wang, L., Zhao, X., Wang, X., Shang, S., Xiu, Z., Xi, Y., Jia, H., Xu, S., Liu, H., Wen, L., Xiao, X., Liu, R., & Ji, J. (2024). Current Status Review of Corrosion Resistance Applications of Titanium Alloys in the Petroleum Industry. Coatings, 14(8), 941. https://doi.org/10.3390/coatings14080941

Xiao, Y., Lin, B., Tang, J., Zheng, H., Wang, Y., Zhang, H., Kuang, Y., Sun, X. (2024). Effect of elastic tensile stress on the pitting corrosion mechanism and passive film of 2205 duplex stainless steel. Electrochimica Acta, 477, 143765. https://doi.org/10.1016/j.electacta.2024.143765

Xiong, Y., Radhakrishnan, J., Huang, S., Chua, Y., Shi, W., Ramamurty, U. (2024). Corrosion and stress corrosion cracking resistances of the 17-4 precipitation hardened martensitic stainless steel additively manufactured using binder jet printing. Acta Materialia, 281, 120417. https://doi.org/10.1016/j.actamat.2024.120417

Yang, Y., Xiao, C., Yang, Y., Liang, B. (2022). Research on the reliability of X70 steel gas pipelines under SRB main control factors. Materials and Corrosion, 73(5), 687-702. https://doi.org/10.1002/maco.202112790

KSÜ Mühendislik Bilimleri Dergisi, 28(2), 2025
Araştırma Makalesi

KSU J Eng Sci, 28(2), 2025
Research Article

Kahramanmaras Sutcu Imam University
Journal of Engineering Sciences

Geliş Tarihi : 05.02.2025
Kabul Tarihi :20.02.2025

Received Date : 05.02.2025
Accepted Date : 20.02.2025

ELAZIĞ İLİNDE SEÇİLEN OKULLARDA GÜRÜLTÜ KİRLİLİĞİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ

EVALUATION OF NOISE POLLUTION IN SELECTED SCHOOLS IN ELAZIĞ PROVINCE

Nilüfer NACAR KOÇER[1] *(ORCID: 0000-0003-2563-1514)*
Gülşad USLU ŞENEL[1] *(ORCID: 0000-0002-5304-9436*

[1] Fırat Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Çevre Mühendisliği Bölümü, Elazığ, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Nilüfer NACAR KOÇER, nkocer@firat.edu.tr

ÖZET

Dünyada kentleşme arttıkça ulaşım ve karayolu trafiğine olan talebinde büyük bir artış gösterdiği, özellikle büyük şehirlerde ve yüksek oranda kentleşmiş bölgelerde gürültüye maruz kalmanın kaçınılmaz hale geldiği görülmektedir. Aynı zamanda bu durum insanların karayolu trafik gürültüsüne maruz kalmasının getirdiği riskleri de artırmaktadır. Bu araştırmanın amacı; Elazığ İlinde farklı lokasyonlarda seçilen ilköğretim ve ortaöğretim okullarında gürültü seviyesini değerlendirmektir. Gürültü ölçümleri bina içinde seçilen bölümlerde bina boş ve dolu iken yapılmıştır. Yapılan ölçümlerde elde edilen sonuçlar neticesinde okulların iç ortam gürültü seviyelerinin yönetmelikte belirtilen değerlerden yüksek olduğu saptanmıştır. Dış ortam gürültü seviyelerinin ise, sadece Çubukbey Anadolu Lisesi'nde belirtilen sınır değerlerin altında kaldığı saptanmıştır. Dış ve iç ortam gürültü ölçümlerinde; merkezde bulunan okulların gürültü düzeylerinin şehir merkezinden uzak okulların gürültü düzeylerine göre daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Yapılan ölçüm sonuçları dikkate alınarak, eğitim ve öğretime devam eden farklı düzeydeki okul türlerinin karşılaştırılmasında ilkokulların gürültü düzeyinin diğer okulların gürültü düzeyinden farklı olduğu tespit edilmiştir. Bu bulgular; tüm okul türlerinde gürültü düzeylerinin tespit edilerek, şehir merkezindeki okullarda yerleşkelerin seçimine yönelik çalışmaların yürütülmesine ihtiyaç olduğunu göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Elazığ ili, iç ortam, dış ortam, lokasyon, gürültü kirliliği

ABSTRACT

As urbanization increases in the world, it is seen that the demand for transportation and road traffic has increased greatly, and noise exposure has become inevitable, especially in large cities and highly urbanized regions. At the same time, this situation increases the risks of people being exposed to road traffic noise. The purpose of this research; to evaluate the noise level in primary and secondary schools selected in different locations in Elazığ Province. Noise measurements were made in selected sections of the building when the building was empty and occupied. As a result of the measurements, it was determined that the indoor noise levels of the schools were higher than the values specified in the regulation. It was determined outdoor noise levels were below the limit values specified only in Çubukbey Anatolian High School. In outdoor and indoor noise measurements, It has been determined that the noise levels of schools located in the center are higher than the noise levels of schools far from the city center. Considering the measurement results, when comparing school types at different levels of education and training, it was determined that the noise level of primary schools was different from the noise level of other schools. These findings; It shows that there is a need to determine noise levels in all school types and conduct studies on the selection of campuses in schools in the city center.

Keywords: Elazığ province, indoor environment, outdoor environment, location, noise pollution

ToCite: NACAR KOÇER, N., & USLU ŞENEL, G., (2025). ELAZIĞ İLİNDE SEÇİLEN OKULLARDA GÜRÜLTÜ KİRLİLİĞİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 28(2), 907-913.

GİRİŞ

Dünya nüfusunun hızla artmasına paralel olarak kentleşmenin yayılması daha fazla insanın karayolu trafik gürültüsüne maruz kalmasına neden olmaktadır. Trafik gürültüsü, dünya çapında kentsel alanlarda yaygın ve zararlı bir çevresel sorun olarak ortaya çıkmaktadır. Sokak ve otoyollardan geçen araçlardan oluşan trafik gürültüsü sadece günlük yaşamımızı kesintiye uğratmakla kalmamakta, aynı zamanda toplum sağlığını ve refahını da büyük ölçüde tehdit etmektedir (Tiwari et al., 2024).

Yaşam kalitesinin ve zihin sağlığının bozulmasına yol açabilecek önemli bir unsur olan gürültü, dengesiz kentleşme ve kontrolsüz araç trafiğinin genişlemesi nedeniyle toplumun fiziksel ve psikolojik sağlık sorunlarına maruz kalmasına neden olmaktadır. Sürekli trafik gürültüsü emisyonu sadece çevreyi rahatsız etmekle kalmamakta aynı zamanda görev performansının ve konsantrasyonun azalmasına, iskemik kalp hastalığı olasılığının artmasına ve öğrencilerin davranışlarının değişmesine neden olmaktadır (Bhaven & Tandel, 2024). Trafik gürültüsü, yarattığı acil sorunlara ek olarak uyku bozuklukları, kardiyovasküler hastalıklar ve bilişsel bozukluklar da dâhil olmak üzere çok sayıda sağlık sorunuyla ilişkilendirilmiştir (Tiwari & Lakshmi, 2024). Aşırı gürültü seviyeleri doğrudan işitme bozukluğuna neden olabilirken, gürültü aynı zamanda işitme eşiğini etkilemeden iç kulak nöropatisine de yol açarak işitme algısını değiştirip öğrenmeyi etkileyebilmektedir (Vilavella et al. 2024).

Trafikten kaynaklanan gürültü kirliliği dünya çapında kentsel alanlarda yaygın ve zararlı bir çevresel sorun olarak ortaya çıkmaktadır. Trafik gürültüsünün modelleme sürecine dâhil edilmesi durumunda, trafik gürültüsü oluşmasına katkıda bulunan çeşitli etkileyici faktörler bulunmaktadır. Trafik gürültüsü modellerinde dikkate alınması gereken en önemli faktörler; gürültü seviyeleri üzerindeki etkilerini analiz etmek için esas alınan araçların hızı, trafik hacmi ve yolun geometrisidir. Trafik gürültüsü tahmin modelleri, hem otoyollarda hem de otoyol dışı yol projelerinin planlanması ve inşasında ve aynı zamanda trafik düzenindeki mevcut değişikliklerin gürültü seviyelerini nasıl etkilediğinin belirlenmesinde kritik öneme sahiptir (Tiwari & Lakshmi, 2024).

Sürekli yüksek yoğunluklu seyreden trafik gürültüleri, şehir merkezine yayılarak, sürücülere rahatsızlık vermekte ve aynı zamanda trafikte kazalarına ve öfkeye yol açmaktadır. Sınıflar söz konusu olduğunda, akustiği zayıf olan sınıfların hoş olmayan bir öğrenme ortamı oluşturduğu ve öğrencilerin bilişsel gelişimini etkilediği görülmektedir. Bilişsel öğrenme, genel olarak bilgi edinme ve bir kavramı anlama sürecidir. Doğru karar vermeyi, zekâyı, problem çözmeyi, öğrenmeyi ve hafızayı içermektedir. Bilişsel öğrenme sınıflarda gerçekleşmesine rağmen gürültülü sınıflar, her yaştan öğrencinin akademik başarısını ve performansını olumsuz yönde etkilemektedir (Bhaven & Tandel, 2024).

Okullar trafik gürültüsüne duyarlı arazi üzerinde kurulmuş yerleşkelerdir. Okulların sessiz bölgeler içinde bulunması gerekirken, çoğunun kentsel alanlarda yer alması bu alanların yüksek düzeyde gürültüye maruz kalmasına neden olmaktadır (Akabay & Mizrap, 2018).

Nesilleri eğitmek amacıyla kurulmuş eğitim-öğretim kurumları olan okullar içinde yer alan sınıflar ise, öğretmenler ve öğrenciler arasında eğitsel amaçlara ulaşabilmek için bilgi ve yaşantıların paylaşıldığı ortamlardır. Bu amaçlara ulaşabilmek için öğretmen ve öğrenciler arasında kurulan iletişimin kalitesi büyük önem arz etmektedir. Okulun bu görevini yerine getirebilmesi için etkili bir iletişimi sağlayacak, olumlu okul iklimine sahip olması gerekmektedir. Okullardaki gürültü, öğrenme ortamını bozarak sağlıklı iletişimi engellemekte ve eğitim-öğretimin kalitesini düşüren önemli bir faktör olarak karşımıza çıkmaktadır. Gürültülü sınıflarda, ne öğretmen söylediğini iletebilmekte ne de öğrenci öğretmenin anlattıklarını işitebilmektedir. Böylece öğrenmenin tam olarak gerçekleşmesi zorlaşmaktadır (Shaaban & Abouzaid, 2021).

Trafik gürültüsünün birincil kaynağı, araç lastikleri ile yol yüzeyi arasındaki ara yüzden kaynaklanmakta ve trafik tarafından üretilen genel gürültüye önemli ölçüde katkıda bulunmaktadır. Trafik gürültüsü modellerinde dikkate alınması gereken önemli faktörler; trafik hacmi, araç hızı ve yolun geometrisidir. Bu faktörler, gürültü seviyeleri üzerindeki etkileri analiz etmek için esas olan kriterlerdir. Trafik gürültüsü tahmin modelleri, hem otoyol hem de otoyol dışı yol projelerinin planlanması ve inşasında ve aynı zamanda trafik düzenindeki mevcut değişikliklerin gürültü seviyelerini nasıl etkilediğinin belirlenmesinde kritik öneme sahiptir. Karayolu trafik gürültüsünü değerlendirmek için standartlaştırılmış bir endeks üzerinde küresel bir anlaşma bulunmadığından, belirli ülkeler için benzersiz trafik özelliklerine ve yol konfigürasyonlarına dayalı olarak çeşitli gürültü tahmin modelleri geliştirilmiştir (Tiwari & Lakshmi, 2024).

Okul gürültüsü temel olarak rahatsız edici olduğu değerlendirilen tüm sesleri içermektedir. Okul binası içindeki gürültülü faaliyetlerden kaynaklanan gürültü seviyeleri genellikle Dünya Sağlık Örgütü'nün önerdiği seviyeleri önemli ölçüde aşmaktadır. Derslerde 35 db(A) ve teneffüslerde 55 db(A) sınır değer olarak kabul edilirken, okullardaki gerçek ses seviyeleri, duruma bağlı olarak 50 db(A) ile 80 db(A) arasında değişmektedir. Gürültü, okulların etrafındaki trafik hacmiyle pozitif yönde ilişkilidir. Bu da daha yüksek trafik hacmine sahip yerlerin daha yüksek gürültüye sahip olma eğiliminde olduğunu göstermektedir (Jadaan, et al. 2015).

MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışma, Elazığ il merkezinde bulunan dört adet lise ve dört adet ilköğretim okullarında yapılan gürültü düzeyi tespit çalışmalarını kapsamaktadır. Bu çalışmada esas alınan kriter, öncelikli olarak çalışma yapılan bölgede dış ortam gürültüsüne maruz kalan ilköğretim ve liselerdeki gürültü düzeyini belirlemek amacıyla gerçekleştirilmiştir.

Yapılan çalışmada; sınıf içerisindeki yapılacak uyarı hareketliliğin azalmasına neden olacağı için öğrencilere her zamanki gibi doğal davranmaları gerektiği hatırlatılmış ve gürültü ölçümleri bitene kadar öğrencilere çalışma hakkında açıklama yapılmamıştır.

Okullarda yapılan ölçümler 2024 yılı Nisan ve Mayıs ayları içinde gerçekleştirilmiştir. Ölçümlerin yapıldığı günlerin yağmurlu ve rüzgârlı olmadığı günler olmasına dikkat edilmiştir. Ölçümler sabahları 09.00–12.00 saatlerinde öğlenden sonrada 13.00 -16.00 saatleri olmak üzere tüm okullarda aynı saatlerde yapılmıştır.

Çalışma alanında yapılan gürültü ölçümleri, gürültü seviye ölçüm cihazı kullanılarak yapılmıştır. Ölçümler, mikrofon yerden 1,5 m yüksekte tutularak gerçekleştirilmiştir. Kaynağın etkilerini tam olarak yansıtması için aynı mekanın birkaç noktasında ölçüm yapılmıştır. Ses kaynağı mekanda iken ve mekan boşken yapılan ölçümlerin aynı noktalardan olmasına özen gösterilmiştir. Ölçümlerde DIN 45633 tipinde tam setli ses düzeyi ölçme cihazı kullanılmıştır. Ölçümler, okulun açık olduğu, yağmursuz ve rüzgârın sakin olduğu gün ve saatlerde yapılmıştır. Yapılan ölçümlerde minimum ve maksimum değerler kayıt altına alınmıştır. Gürültü düzeylerinin tespitinde gürültü düzey değerleri A ağırlıklı eşdeğer gürültüsü türünden tespit edilmiştir.

BULGULAR

Yapılan çalışmada; Elazığ ili merkezinde belirlenen ilköğretim okulları ve liselerde iç ortam ve dış ortam gürültü düzeyleri ölçülmüştür. Yapılan ölçümlerde; okul binası derslikleri, okul bahçesi, koridorlar, öğretmen odası ve kantin olmak üzere beş farklı mekanda gürültü seviyeleri belirlenmiştir. Okul binasında ölçümler boş ve dolu ortam üzere iki farklı zamanda yapılmıştır.

Yapılan ölçümler desibel cinsinden minimum ve maksimum değerler olarak belirlenmiştir. Bu çalışmada merkezde bulunan 4 ilköğretim okulu ve 4 lisede gürültü ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Ölçüm yapılan ilköğretim okullarının lokasyonu, ölçüm tarihi ve ölçüm saati Tablo 1'de, ölçüm yapılan liseler ise Tablo 2' de verilmiştir.

Tablo 1. Ölçüm Yapılan İlköğretim Ortaokulları

Kurum Adı	Lokasyon	Ölçüm Tarihi	Ölçüm Saati
Bahçelievler İlköğretim Okulu	Cumhuriyet Mah.	09.04.2024	09:00-12:00
Aziz Gül İlköğretim Okulu	Sürsürü Mah.	09.04.2024	13:00-16:00
Atatürk İlköğretim Okulu	Çarşı Mah.	10.04.2024	10:00-12:00
Dumlupınar İlköğretim Okulu	İzzetpaşa Mah.	10.04.2024	13:00-16:00

Tablo 2. Ölçüm Yapılan Liseler

Kurum Adı	Lokasyon	Ölçüm Tarihi	Ölçüm Saati
Gazi Teknik ve Endüstri Meslek Lisesi	Sürsürü Mahallesi	02.04.2024	09:00-12:00
Hıdır Sever Anadolu Lisesi	Sürsürü Mahallesi	02.04.2024	13:00-16:00
Çubuk Bey Anadolu Lisesi	Çaydaçıra Mahallesi	03.04.2024	10:00-12:00
Mehmet Kologlu Anadolu Lisesi	Cumhuriyet Mahallesi	03.04.2024	13:00-16:00

Seçilen İlköğretim Okulu olan Bahçelievler İlköğretim Okulunda, yapılan ölçümlerde, mekanlar boşken ve dolu iken ölçülen gürültü seviyeleri minimum ve maksimum olarak Tablo 3'de verilmiştir.

Tablo 3. Bahçelievler İlköğretim Okulu Gürültü Düzeyi dB(A)

Mekan Adı	**Boş dB(A)**	**Dolu dB(A)**
	min. – max.	**min. – max.**
Bahçe	44-48	55-61
Koridor	42-48	54-62
Derslik	40-43	55-63
Öğretmenler Odası	41-45	52-58
Kantin	44-49	55-63

Bahçelievler Ortaokulunda yapılan ölçümlerde, mekanlar boşken gürültü seviyesinin bahçede 44-48 dB(A), koridorda 42-48 dB(A), dersliklerde 40- 43 dB(A), öğretmenler odasında 41–45 dB(A) ve kantinde 44-49 dB(A) seviyelerinde olduğu tespit edilmiştir. Gürültü seviyesinin ortalama düzeyde çıkmasında binanın araç trafiğinin olduğu alanda bulunmamasının etkisi olduğu düşünülmektedir.

Mekanların dolu olması durumunda ise gürültü seviyeleri ortalama 52-63 dB(A) bandında seyretmektedir. Çevresel Gürültünün Değerlendirilmesi ve Yönetimi Yönetmeliği'ne göre yapılan kıyaslamada olması gereken max. değerlerin aşılmadığı fakat sınır değerlerde olduğu gözlemlenmiştir. Bina ses yalıtımı sağlanarak daha iyi sonuçlar elde edilebilir. Ölçüm yapılan Aziz Gül İlköğretim Okulu'nda ise mekanlar boşken ve dolu iken ölçülen gürültü seviyeleri min. ve max. olarak Tablo 4'de verilmiştir.

Tablo 4. Aziz Gül İlköğretim Okulu Gürültü Düzeyi dB(A)

Mekan Adı	**Boş dB(A)**	**Dolu dB(A)**
	min. – max.	**min. - max.**
Bahçe	42-55	57-70
Koridor	45-54	60-72
Derslik	41-44	59-73
Öğretmenler Odası	42-45	53-75
Kantin	50-58	60-72

Aziz Gül İlköğretim Okulunda yapılan ölçümlerde, mekanlar boşken gürültü seviyesinin bahçede 42-55 dB(A), koridorda 45-54 dB(A), dersliklerde 41-44 dB(A), öğretmenler odasında 42–45 dB(A) ve kantinde 50-58 dB(A) seviyelerinde olduğu tespit edilmiştir. Özellikle bahçede, koridorlar ve kantinde gürültü seviyesinin oldukça yüksek düzeyde çıkmasında binanın araç trafiğinin olduğu alanda bulunmasının etkisi olduğu düşünülmektedir.

Mekanların dolu olması durumunda ise gürültü seviyeleri ortalama 53 -75 dB(A) bandında seyretmektedir. Çevresel Gürültünün Değerlendirilmesi ve Yönetimi Yönetmeliği'ne göre yapılan kıyaslamada olması gereken max. değerlerin aşıldığı gözlenmiştir. Bu da bize mevcut yalıtımın yetersiz kaldığını göstermektedir.

Seçilen Atatürk İlköğretim Okulu'nda yapılan ölçümlerde, mekanlar boşken ve dolu iken ölçülen gürültü seviyeleri min. ve max. olarak Tablo 5'de verilmiştir. Atatürk İlköğretim Okulunda yapılan ölçümlerde, mekanlar boşken gürültü seviyesinin bahçede, 58-65 dB(A), koridorda 53-57 dB(A), dersliklerde 52-59 dB(A), öğretmenler odasında 53-60 dB(A) ve kantinde 58-62 dB(A) seviyelerinde olduğu tespit edilmiştir. Özellikle kantinde ve bahçede gürültü seviyesinin oldukça yüksek düzeyde çıkmasında binanın araç trafiğinin olduğu şehir merkezinde ana caddede bulunmasının etkisi olduğu düşünülmektedir.

Mekanların dolu olması durumunda ise gürültü seviyeleri ortalama 61-75 dB(A) bandında seyretmektedir. Çevresel Gürültünün Değerlendirilmesi ve Yönetimi Yönetmeliği'ne göre yapılan kıyaslamada olması gereken max. değerlerin aşıldığı gözlenmiştir. Bina eski taş yapı olduğundan mevcut yalıtım yetersiz kalmaktadır. Bina mimarisine uygun olarak gerekli yalıtımların yapılması gereklidir.

Tablo 5. Atatürk İlköğretim Okulu Gürültü Düzeyi dB(A)

Mekan Adı	Boş dB(A) min. – max.	Dolu dB(A) min. - max.
Bahçe	58-65	65-75
Koridor	53-57	65-72
Derslik	52-59	61-68
Öğretmenler Odası	53-60	63-67
Kantin	58-62	65-72

Dumlupınar İlköğretim Okulu'nda yapılan ölçümlerde ise mekanlar boşken ve dolu iken ölçülen gürültü seviyeleri min. ve max. olarak Tablo 6'da verilmiştir.

Tablo 6. Dumlupınar İlköğretim Okulu Gürültü Düzeyi dB(A)

Mekan Adı	Boş dB(A) min. – max.	Dolu dB(A) min. - max.
Bahçe	55-65	65-71
Koridor	54-62	63-70
Derslik	51-60	61-67
Öğretmenler Odası	53-62	63-68
Kantin	58-62	65-70

Dumlupınar İlköğretim Okulunda yapılan ölçümlerde, mekanlar boşken gürültü seviyesinin bahçede, 55-65 dB(A), koridorda 54-62 dB(A), dersliklerde 51-60 dB(A), öğretmenler odasında 53–62 dB(A) ve kantinde 58-62 dB(A) seviyelerinde olduğu tespit edilmiştir. Özellikle bahçe, kantin ve koridorlarda gürültü seviyesinin oldukça yüksek düzeyde çıkmasında binanın araç trafiğinin olduğu şehir merkezinde bulunmasının etkisi olduğu düşünülmektedir. Mekanların dolu olması durumunda ise gürültü seviyeleri ortalama 61-71 dB(A) bandında seyretmektedir. Çevresel Gürültünün Değerlendirilmesi ve Yönetimi Yönetmeliği'ne göre yapılan kıyaslamada olması gereken max. değerlerin aşıldığı gözlenmiştir. Bina eski yapı olduğundan mevcut yalıtım yetersiz kalmaktadır. Gerekli yalıtımların yapılması gereklidir. Ortalama değerlere bakıldığında yerleşim yerlerinden uzak olan eğitim kampüslerinin gürültü düzeylerinin daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca yapıların yeni bina olması ve yalıtımlarının yapılmış olması sonuçları doğrudan etkilemektedir.

Ölçüm yapılan Gazi Teknik ve Endüstri Meslek Lisesi'nin farklı birimlerinde yapılan ölçüm sonuçları Tablo 7 'de verilmiştir.

Tablo 7. Gazi Teknik ve Endüstri Meslek Lisesi Gürültü Düzeyi dB(A)

Mekan Adı	Boş dB(A) min. – max.	Dolu dB(A) min. - max.
Bahçe	48-58	55-70
Koridor	51-66	60-89
Derslik	43-53	46-65
Öğretmenler Odası	48-68	57-72
Kantin	55-66	71-81
Makina Atölyesi	52-70	80-100
Kimya Atölyesi	36-50	57-70
Elektrik Atölyesi	58-68	60-87
Bilişim Teknolojileri Atölyesi	50-65	57-67

Gazi Teknik ve Endüstri Meslek Lisesi diğer mahallerde yapılan ölçümlerde, mekanlar boşken gürültü seviyesinin bahçede, 48-58 dB(A), koridorda 51-66 dB(A), dersliklerde 43-53 dB(A), öğretmenler odası 48-68 dB(A) ve kantinde 55–66 dB(A) seviyelerinde olduğu tespit edilmiştir. Özellikle öğretmenler odası ve bahçede gürültü seviyesinin oldukça yüksek düzeyde çıkmasında binanın araç trafiğinin olduğu alanda bulunmasının etkisi olduğu

düşünülmektedir. Çevresel Gürültünün Değerlendirilmesi ve Yönetimi Yönetmeliği'ne göre yapılan kıyaslamada olması gereken max. değerlerin aşıldığı gözlenmiştir. Mevcut pencere ve yalıtım yetersiz kalmaktadır.

Tablo 8. Hıdır Sever Anadolu Lisesi Gürültü Düzeyi dB(A)

Mekan Adı	**Boş dB(A)**	**Dolu dB(A)**
	min. – max.	**min. - max.**
Bahçe	44-52	57-77
Koridor	45-55	60-72
Derslik	41-44	59-73
Öğretmenler Odası	42-45	53-75
Kantin	50-60	60-72

Hıdır Sever Anadolu Lisesinde yapılan ölçümlerde, mekanlar boşken gürültü seviyesinin bahçede 44-52 dB(A), koridorda 45-55 dB(A), dersliklerde 41-44 dB(A), öğretmenler odasında 42-45 dB(A) ve kantinde 50–60 dB(A) seviyelerinde olduğu tespit edilmiştir. Özellikle koridorlarda, kantin ve bahçede gürültü seviyesinin oldukça yüksek düzeyde çıkmasında binanın araç trafiğinin yoğun olduğu alanda bulunmasının etkisi olduğu düşünülmektedir. Mekanların dolu olması durumunda ise gürültü seviyeleri ortalama 60-72 dB(A) bandında seyretmektedir. Çevresel Gürültünün Değerlendirilmesi ve Yönetimi Yönetmeliği'ne göre yapılan kıyaslamada olması gereken max. değerlerin aşıldığı gözlenmiştir. Mevcut pencere ve yalıtım yetersiz kalmaktadır.

Tablo 9. Çubukbey Anadolu Lisesi Gürültü Düzeyi dB(A)

Mekan Adı	**Boş dB(A)**	**Dolu dB(A)**
	min. – max.	**min. - max.**
Bahçe	37-42	48-55
Koridor	37-45	50-60
Derslik	33-42	50-58
Öğretmenler Odası	34-45	49-57
Kantin	38-46	52-62

Çubukbey Anadolu Lisesinde yapılan ölçümlerde, mekanlar boşken gürültü seviyesinin bahçede 37- 42 dB(A), koridorda 37-45 dB(A), dersliklerde 33-42 dB(A), öğretmenler odası 34-5 dB(A) ve kantinde 38-46 dB(A) seviyelerinde olduğu tespit edilmiştir. Gürültü seviyesinin oldukça düşük düzeyde çıkmasında binanın araç trafiğinin olduğu alanda bulunmamasının etkisi olduğu düşünülmektedir. Mekanların dolu olması durumunda ise gürültü seviyeleri ortalama 48-62 dB(A) bandında seyretmektedir. Çevresel Gürültünün Değerlendirilmesi ve Yönetimi Yönetmeliği'ne göre yapılan kıyaslamada olması gereken max. değerlerin aşılmadığı gözlemlenmiştir.

Tablo 10. Mehmet Koloğlu Anadolu Lisesi Gürültü Düzeyi dB(A)

Mekan Adı	**Boş dB(A)**	**Dolu dB(A)**
	min.- max.	**min. - max.**
Bahçe	38-44	50-55
Koridor	39-45	52-60
Derslik	32-42	52-58
Öğretmenler Odası	34-46	47-57
Kantin	40-46	53-64

Mehmet Koloğlu Anadolu Lisesinde yapılan ölçümlerde, mekanlar boşken gürültü seviyesinin bahçede 38-44 dB(A), koridorda 39-45 dB(A), dersliklerde 32-42 dB(A), öğretmenler odası 34-46 dB(A) ve kantinde 40-46 dB(A) seviyelerinde olduğu tespit edilmiştir. Gürültü seviyesinin oldukça düşük düzeyde çıkmasında binanın araç trafiğinin yoğun olduğu alanda bulunmamasının etkisi olduğu düşünülmektedir. Mekanların dolu olması durumunda ise gürültü seviyeleri ortalama 52-64 dB(A) bandında seyretmektedir. Çevresel Gürültünün Değerlendirilmesi ve Yönetimi Yönetmeliği'ne göre yapılan kıyaslamada olması gereken max. değerlerin aşılmadığı gözlemlenmiştir.

Ortalama değerlere bakıldığında yerleşim yerlerinden uzak olan eğitim kampüslerinin gürültü düzeylerinin daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca yapıların yeni bina olması ve yalıtımlarının yapılmış olması sonuçları doğrudan etkilemektedir.

SONUÇLAR

Çalışma, Elazığ ili şehir merkezindeki farklı okulların çevresindeki trafik gürültüsünü araştırmak amacıyla gerçekleştirilmiştir. Seçilmiş bazı ilköğretim okulları ve liselerde iç ortam ve dış ortam gürültü düzeyleri ölçülmüştür. Okulun eğitim kalitesini etkileyen başlıca parametrelerden birisi o okuldaki gürültü düzeyidir. Okul binası içinde oluşan gürültü hem öğrencilerin hem de öğretmenlerin performansını olumsuz yönde etkilemektedir. Elazığ ili şehir merkezinde seçilen ilköğretim okulları ve lise kurumlarında ölçülen gürültü seviyelerinin Ulusal ve Uluslararası normlarda belirtilen sınır değerlerle karşılaştırıldığından standart değerleri aştığı ve bu durumun eğitim-öğretimi olumsuz düzeyde etkileyebilecek seviyede olduğu anlaşılmaktadır. Yapılan çalışmada gürültünün okulların etrafındaki trafik hacmi ile pozitif yönde ilişkili olduğu tespit edilmiştir.

"Çevresel Gürültünün Değerlendirilmesi ve Yönetimi Yönetmeliği" nin ekinde yer alan "İç Ortam Gürültü Seviyesi Sınır Değerleri" incelendiğinde, okullardaki derslikler, özel eğitim tesisleri, kreşler, laboratuvarlar ve benzeri mekanlarda, (kullanım alanlarında herhangi bir faaliyet olmadığı durumlarda) pencere kapalı iken sınır değer 35 L_{eq} (dBA), pencere açık iken ise 45 L_{eq} (dBA) olması gerektiği ifade edilmektedir.

Okulların çevresindeki araç trafiği ve nüfus arttıkça gürültü seviyesi de artmaktadır. Okulların koridor bölümlerinde gürültü seviyesi okulun diğer kısımlarına göre daha yüksektir. Yalıtım işlemi yapılmış mekanlarda, diğer mekanlara göre gürültü seviyesi önemli ölçüde düşüktür. Ölçüm yapılan alanların kullanıldığı durumlarda insan sağlığına zarar verecek düzeyde gürültü oluşmaktadır. Okullarda eğitim gören öğrenciler ve çalışan personel ortam gürültüsünden olumsuz etkilenmektedir. Bu okulların çevresindeki koşulları iyileştirmek için; çok gerekli olan noktalarda ses yalıtımı ve izolasyon işlemlerinin yapılması, okulların etrafındaki kaldırım türlerinin dikkate alınması, trafik akışının düzenlenmesi ve alternatif yolların kullanılması, pencerelerin uygun şekilde yalıtılması, insanlara gürültü kirliliğinin zararları hakkında eğitim verilerek farkındalık oluşturulması gürültü kirliliğine yönelik yasal sınırlamalar getirilerek bunların uygulanması (Jadaan et al., 2015) daha sessiz soğutma, ısıtma ve havalandırma modellerinin kullanılarak gürültü kirliliğinin azaltılması çalışmalarının dikkate alınması gereklidir.

KAYNAKLAR

Akabay, H., & Bulunuz M. (2018). Okul içi ve okul dışı gürültü düzeylerinin karşılaştırılması, *Academy Journal of Educational Sciences*. 2(1), 53-65. https:// doi.org/10.31805/acjes.364014.

Bhaven, A., & Tandel, N. (2024). Association of road traffic noise exposure and school childrens' cognition: A structural equation model approach. *Environmental Research*. 240, Part 1, 117388. https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.117388.

Jadaan K., Gammoh, H., & Al-Hadidi, T.İ. (2015). Evolution of traffic noise ımpacts in Amman, Jordan. *Environmental Science, Engineering International Journal of Automotive Engineering and Technologies*. 6, 7-11. DOI:10.18245/IJAET.09995Corpus ID: 109631093.

Shaaban, K., & Abouzaid, A. (2021). Assessment of traffic noise near schools in a developing country. *Transportation Research Procedia*. 55, 1202-1207. https://doi.org/10.1016/j.trpro.2021.07.100.

Tiwari, S.K., Kumaraswamidhas, L.A., Patel, R., Garg, N., & Vallisree, S. (2024). Traffic noise measurement, mapping, and modeling using soft computing techniques for mid-sized smart ındian city. *Elsevier Science Direct. Measurement: Sensors*. 1-12, Available Online 101203. In Press, https://doi.org/10.1016/j.measen.2024.101203.

Tomek, R. & Urhahne, D. (2023). Testing a model of noise-related stress in school teachers. *Teaching and Teacher Education*. 121, 103933, https://doi.org/10.1016/j.tate.2022.103933.

Vilavella, G.M., Pujol, J., BlancoHinojo, L., Deus, J., Rivas, I., Persavento, C., Sunyr, J., & Foraster, M. (2023). The effects of exposure to road traffic noise at school on central auditory pathway functional connectivity. *Environmental Research*. 226, 1-9. 115574. https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.115574.

KSÜ Mühendislik Bilimleri Dergisi, 28(2), 2025
Araştırma Makalesi

KSU J Eng Sci, 28(2), 2025
Research Article

Kahramanmaras Sutcu Imam University
Journal of Engineering Sciences

Geliş Tarihi : 14.02.2025
Kabul Tarihi :19.03.2025

Received Date : 14.02.2025
Accepted Date : 19.03.2025

HÜNNAP FENOLİK EKSTRAKTI İLAVESİNİN KEFİRLERİN BAZI FİZİKOKİMYASAL VE FİTOKİMYASAL ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ

EFFECT OF JUJUBE PHENOLIC EXTRACT ADDITION ON KEFIRS SOME PHYSICOCHEMICAL AND PHYTOCHEMICAL PROPERTIES

Kader TOKATLI[1*] (ORCID: 0000-0002-3837-0248)
Refia Esma ERKEN[1] (ORCID: 0009-0009-7943-1711)
Elif GÜVEN[1] (ORCID: 0009-0000-7763-7323)
Moutessim HASSAN ZİBER[1] (ORCID: 0009-0001-2578-7669)

[1] Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi, Beslenme ve Diyetetik Bölümü, Tokat, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Kader TOKATLI, kader.tokatli@gop.edu.tr

ÖZET

Bu çalışmada hünnap fenolik ekstraktı ile zenginleştirilen kefirlerin bazı fizikokimyasal, fitokimyasal ve duyusal özelliklerinin belirlenmesi ve karşılaştırılması amaçlanmıştır. İnek sütü ve kefir mayası kullanılarak üretilen kefirlere farklı oranlarda (%0, 0,1 ve 0,3) hünnap fenolik ekstraktı ilave edilmiş ve üretilen kefirlerin kuru madde, pH, titrasyon asitliği, serum ayrılması, renk (L^*, a^* ve b^*), toplam fenolik madde ve antioksidan kapasite analizleri yapılmış ve duyusal analizleri gerçekleştirilmiştir. Kefirlere hünnap fenolik ekstraktı ilavesi pH ve titrasyon asitliğinde anlamlı bir değişim oluşturmamış, serum ayrılması değerinde azalma meydana getirmiştir. Kefirlere ilave edilen hünnap fenolik ekstraktı konsantrasyonundaki artış örneklerin a^* değerlerinin düşmesine ve b^* değerlerinin artmasına neden olmuştur. Kefirlerin toplam fenolik madde miktarları 126,89-152,44 mgGAE/L arasında değişiklik göstermiş ve hünnap fenolik ekstraktı ilavesi örneklerin toplam fenolik madde miktarlarında atış sağlamıştır. Kefirlerin antioksidan aktivite değerleri ise TEAC yöntemi ile 19,56-19,80 mgTE/L ve FRAP yöntemi ile 40,14-72,08 mgTE/L olarak bulunmuştur. Hünnap fenolik ekstraktı ilavesi kefir örneklerinin TEAC ile ölçülen antioksidan kapasite değerlerinde anlamlı bir değişim oluşturmazken FRAP ile ölçülen antioksidan kapasite değerlerinde anlamlı bir değişim meydana getirmiştir. Yapılan duyusal değerlendirme sonucunda kefirlerin kıvam, koku, görünüş ve genel kabul edilebilirlik değerleri istatistiksel olarak farklı bulunmamış, kefirlere ilave edilen hünnap fenolik ekstraktı konsantrasyonunun artması örneklerin tat-lezzet puanının düşmesine neden olmuştur.

Anahtar Kelimeler: Hünnap, kefir, fonksiyonel ürün, antioksidan aktivite

ABSTRACT

This study aimed to determine and compare some physicochemical, phytochemical and sensory properties of kefirs enriched with jujube phenolic extract. Jujube phenolic extract was added to kefirs produced using cow's milk and kefir yeast at different rates (0, 0.1 and 0.3%) and dry matter, pH, titratable acidity, serum separation, color (L^*, a^*, and b^*), total phenolic substance and antioxidant capacity analyses of the produced kefirs were analyzed, and sensory analyses were performed. Addition of jujube phenolic extract to kefirs did not cause a significant change in pH and titratable acidity but caused a decrease in serum separation value. The increase in the concentration of jujube phenolic extract added to kefirs caused a decrease in a^* values and an increase in b^* values of the samples. Total phenolic substance amounts of kefirs varied between 126.89-152.44mgGAE/L and the addition of jujube phenolic extract provided an increase in the total phenolic substance amounts of the samples. The antioxidant activity values of kefirs were found to be 19.56-19.80mgTE/L by TEAC method and 40.14-72.08mgTE/L by FRAP method. While the addition of jujube phenolic extract did not cause a significant change in the antioxidant capacity values of kefir samples measured by TEAC, it caused a significant change in the antioxidant capacity values measured by FRAP.

ToCite: TOKATLI, K., ERKEN, R. E., GÜVEN, E., & HASSAN ZİBER, M., (2025). HÜNNAP FENOLİK EKSTRAKTI İLAVESİNİN KEFİRLERİN BAZI FİZİKOKİMYASAL VE FİTOKİMYASAL ÖZELLİKLERİNE ETKİSİ. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 28(2), 914-922.

As a result of the sensory evaluation, the consistency, odor, appearance, and general acceptability values of kefirs were not found to be statistically different, and the increase in the concentration of jujube phenolic extract added to kefirs caused a decrease in the taste-flavor scores of the samples.

Keywords: Jujube, kefir, functional product, antioxidant activity

GİRİŞ

Günümüzde, insan sağlığı üzerinde yararlı etki gösteren canlı mikroorganizmalar içeren probiyotik gıdalara olan ilgi artmaktadır. Bu durum fermente süt ürünlerinin tüketimindeki artışın nedenlerinden birini oluşturmaktadır. Bu fermente süt ürünlerinden biri de kefirdir. Türk Gıda Kodeksi Fermente Süt Ürünleri Tebliği'nde kefir; "Fermentasyonda spesifik olarak *Lactobacillus kefiri, Leuconostoc, Lactococcus* ve *Acetobacter* cinslerinin değişik suşları ile laktozu fermente eden (*Kluyveromyces marxianus*) ve etmeyen mayaları (*Saccharomyces unisporus, S. cerevisiae* ve *S. exiguus*) içeren starter kültürler veya kefir tanelerinin kullanıldığı fermente süt ürünü" olarak tanımlanmaktadır (Anonim, 2022). Kefir üretimi geleneksel ve endüstriyel yöntem olmak üzere iki yöntem kullanılarak gerçekleştirilir. Bunlardan geleneksel yöntemde kefir daneleri kullanılırken; endüstriyel yöntemde mayalar ve laktik asit bakterilerini içeren liyofilize starter kültürler kullanılır (Otles ve Cagindi, 2003). Kefir üretiminde süt kullanıldığından sütün bileşiminde yer alan mineral maddeler, vitaminler, laktoz ve yağ gibi besin maddelerinin hepsini bileşiminde bulundurmaktadır. Bununla birlikte fermantasyon süresince meydana gelen laktozun parçalanması, bazı vitaminlerin sentezlenmesi ve proteinlerin parçalanması kefirin beslenme açısından değerinin artmasına katkı sağlamaktadır (Cesur, 2014).

Fenolik bileşikler, benzen halkasına bağlı olan bir veya daha fazla hidroksil ve fonksiyonel gruba sahip olan maddelerdir. Biyolojik aktivite göstermeleri, enzim inhibisyonuna neden olmaları ve insan sağlığı üzerine gösterdikleri olumlu etkileri nedeniyle önem taşımaktadır. Bitkisel gıdanın renk, lezzet ve burukluk gibi özelliklerini etkileyerek ürününün tat ve aromasına katkı sağlamaktadır (Saldamlı, 1998; Cemeroğlu vd., 2001). Bununla birlikte antioksidatif, antimikrobiyal, antienflamatuvar ve antiviral etki göstermeleri sebebiyle sağlık üzerinde potansiyel yararlı etki göstermektedir (Raccach, 1984; Kamboj vd., 2012; Ambriz-Pérez vd., 2016; Deveci vd., 2016).

Ülkemizde ılıman iklimin hâkim olduğu Aydın, Denizli ve Antalya gibi yerlerde yaygın olarak yetiştirilen Hünnap (*Zizyphus jujuba*) besin değeri açısından oldukça zengin bir içeriğe sahiptir (Kavas ve Dalkılıç, 2015). Hünnapın toplam fenolik bileşik miktarları, toplam flavonoid miktarları ve antioksidan kapasitesi farklı çalışmalarda ortaya konmuştur (Wojdyło vd., 2016; Yaşa, 2016; Özkan, 2017; Zhang vd., 2010; Küpcü, 2024). Wojdyło vd. (2016) 4 farklı hünnap türünde 10'u flavan-3-ol, 13'ü flavonol, 1'i flavanon ve 1'i de dihidrokalkon olmak üzere 25 farklı fenolik bileşik tanımlamış; Küpcü (2024) ise Hünnap fenolik ekstraktının kateşin, süksinik asit, siyanidin klorür, rosmarinik asit, salisilik asid, rutin, oksalik asit, kuersetin dihidrat ve kuersetin 3-Beta-D-glikozid başta olmak üzere pelargonidin HCL, M P kumarik asit 10-12, T-3-OH sinamik asit, pelargonin klorid, sinamik asit, ferulik asit ve vanilik asit içerdiğini bildirmiştir.

Tüketicilerin sağlıklı alternatiflere yönelmeleri nedeniyle gıdaların biyoaktif özellik gösteren bileşenlerce zenginleştirilmesine yönelik çalışmalar gün geçtikçe artmaktadır. Cesur (2014) kurutulmuş turunçgil (mandalina, portakal ve limon) kabukları; Bengi (2022) propolis; Tita vd. (2022) uçucu yağlar; Ayçiçek vd. (2024) turuncu havuç karotenoidleri; Barazi ve Arslan (2024) taze ve kurutulmuş kara mürver meyvesi; Coşkun vd. (2024) ise zerdeçal ekstraktı ilave ederek fonksiyonel kefir üretimi gerçekleştirmişlerdir. Literatürde farklı bileşenler ilave edilerek kefir üretimlerini içeren çalışmalar mevcut olsa da hünnap fenolik ekstraktı ilaveli kefir üretimini içeren bir çalışma bulunmamaktadır. Bu çalışmada fermente bir içecek olan kefirin antioksidan etki gösteren hünnap fenolik ekstraktı ile zenginleştirilerek yeni bir ürün geliştirilmesi ve bu yeni ürünün bazı fizikokimyasal ve fitokimyasal özellikleri ile duyusal özelliklerinin ortaya konması amaçlanmıştır.

MATERYAL VE METOT

Materyal

Kefir üretimleri için pastörize inek sütü (SEK, Türkiye) ve *Lactobacillus kefiri, Lactobacillus kefiranofaciens subsp. kefiranofaciens, Lactobacillus okefiranofaciens subsp. kefirgranum, Lactobacillus parakefiri, Lactobacillus acidophilus, Lactobacillus casei, Lactobacillus reuteri, Lactobacillus bulgaricus, Lactobacillus helveticus, Lactobacillus fermentum, Lactobacillus plantarum, Leuconostoc mesentereoides, Streptococcus thermophilus,*

Lactococcus lactis subsp. lactis, Bifidobacterium bifidum, Kluyveromyces marxianus, Saccharomyces cerevisiae içeren ticari kefir mayası (Sevdanem, Türkiye) kullanılmıştır.
Hünnap fenolik ekstraktı olarak Küpcü (2024) tarafından hünnaptan geleneksel yöntem ile ekstrakte edilen Hünnap fenolik ekstraktı kullanılmıştır.

Metot

Kefir Üretimi

Kefir üretimi için 1L pastörize inek sütüne 0,5g ticari kefir kültürü inoküle edilmiş ve 25°C'de pH'sı 4,6 olana kadar inkübasyona devam edilmiştir. İnkübasyonu tamamlanan kefirler 24 saat 4°C'de bekletilmiş ardından homojenizasyon sonrasında 250mL'lik cam şişelere doldurulmuştur.

Üretilen kefirlerin üzerine ön denemelerle belirlenmiş olan konsantrasyonlarda (%0,1 ve %0,3) hünnap fenolik ekstraktı ilave edilerek homojenizasyon işlemi yapılmış ve analizlere kadar 4°C'de bekletilmiştir.

Hünnap fenolik ekstraktı ilave edilmemiş kefir örneği kontrol (K), %0,1 hünnap fenolik ekstraktı ilave edilmiş kefir 0,1HK ve %0,3 hünnap fenolik ekstraktı ilave edilmiş kefir 0,3HK olarak adlandırılmıştır. Analizler 1 tekerrür 3 paralel olarak yürütülmüştür.

Fizikokimyasal Analizler

Kuru Madde Tayini

Kefir örneklerinin kuru madde içerikleri gravimetrik olarak belirlenmiştir. Kefir örnekleri darası alınmış kurutma kaplarına yaklaşık 5'er gram tartılmış, 105ºC'lik etüvde sabit tartıma gelinceye kadar bekletilmiştir. Bu süre sonunda kapların desikatörde soğuması sağlandıktan sonra ağırlıkları belirlenmiş ve yüzde (%) kuru madde miktarları hesaplanmıştır (AOAC, 1997).

pH Tayini

Kefir örneklerinin pH değeri WTW Inolab pH 7110 Set 2 (Almanya) model pH-metre kullanılarak ölçülmüştür (AOAC, 1995).

Titrasyon Asitliği Tayini

Kefir örneklerinin titrasyon asitliği değerlerinin belirlenmesi için belli miktarda kefir 0.1 N NaOH ile pH değeri 8.1'e ulaşıncaya kadar titre edilmiş ve titrasyonda sarf edilen NaOH miktarı kullanılarak hesaplama yapılmış, sonuçlar %laktik asit cinsinden ifade edilmiştir (AOAC, 1995).

Serum Ayrılması

50 ml'lik santrifüj tüplerinin darası alındıktan sonra tüplere 25g kefir örnekleri ilave edilmiştir. Tüpler 6000 d/dk'da 10 dk santrifüj edildikten sonra tüplerdeki serum kısmı uzaklaştırılıp çökelti kısmı tartılmıştır. Örneklerin serum ayrılması değerleri % olarak ifade edilmiştir (Mutluer Yalçın, 2021).

Renk

Kefir örneklerine ait renk değerleri Minolta Renk Ölçüm Cihazı (Chroma meter, CR-300, Japonya) kullanılarak gerçekleştirilmiş ve örneklerin L*, a* ve b* değerleri belirlenmiştir (Singh vd., 2005).

Fitokimyasal Analizler

Toplam Fenolik Madde

Örneklerin toplam fenolik madde miktarları spektrofotometrik olarak belirlenmiştir. 1mL kefir örneği üzerine 5 mL folin ayracı ve 15 mL %20'lik $NaHCO_3$ ilave edilip ve 100 mL'ye tamamlanmış ve süzüldükten sonra 2 saat karanlık ortamda bekletilmiştir. 760 nm'de absorbans değerleri okunmuş ve sonuçlar mgGAE/L cinsinden verilmiştir (Franke vd., 2004).

Antioksidan Kapasite

Kefir örneklerinin antioksidan kapasiteleri TEAC ve FRAP yöntemleri ile belirlenmiştir.

TEAC: Stok çözelti, ABTS [2,2'-azinobis (3-ethylbenzothiazoline-6-sulphonic acid] ve potasyum peroksidisülfat çözeltisinin ($K_2O_8S_2$) 12-16 saat karanlık ortamda oda sıcaklığında bekletilmesi ile; çalışma çözeltisi ise stok

çözeltinin etil alkol ile 734 nm'de 0.700-0.800 absorbans değeri verecek şekilde seyreltilmesi ile hazırlanmıştır. Çalışma çözeltisi (3mL) üzerine örnek (300µL) ilave edilip karıştırılmış ve oda sıcaklığında 6 dakika karanlık bir ortamda bekletilmiş ve 734 nm'de absorbans değerleri okunmuştur. Troloks standart olarak kullanılmış ve sonuçlar mgTE/L olarak verilmiştir (Re vd., 1999).

FRAP: 20µL örnek üzerine 2.98mL FRAP çözeltisi ilave edilip karıştırıldıktan sonra karanlık ortamda 30 dakika bekletilmiş ve absorbansları 593nm'de okunmuştur. Standart olarak Troloks kullanılmış ve sonuçlar mgTE/L örnek olarak verilmiştir (Benzie ve Strain, 1996).

Duyusal Değerlendirme

Kefir örnekleri 10 kişilik panelist grubu tarafından 10 puanlık skala üzerinden 1 en düşük, 10 en yüksek olacak şekilde kıvam, tat-lezzet, koku, görünüş ve genel kabul edilebilirlik açısından değerlendirilmiştir. Çalışmada kullanılan duyusal değerlendirme formu Şekil 1'de verilmiştir.

Panelistin adı soyadı: Tarih:

Önünüzde 3 farklı kefir örneği bulunmaktadır. Kefir örneklerini tadarak tabloda belirtilmiş olan özelliklerini 10 puanlık skala üzerinden (1 en düşük, 10 en yüksek) değerlendiriniz.

Özellik	Örnek Kodu		
	E	K	R
Kıvam			
Tat-lezzet			
Koku			
Görünüş			
Genel kabul edilebilirlik			

Not: Her örneği tattıktan sonra, bir sonraki ürün tadımından önce ağzınızı su ile çalkalayınız.

Şekil 1. Kefirlerin Duyusal Değerlendirmesinde Kullanılan Duyusal Değerlendirme Formu

İstatistiksel Analiz

Kefir örneklerindeki fizikokimyasal ve fitokimyasal özellikler açısından örnekler arası farklılığı belirlemek amacıyla, SPSS 17.0 paket programı kullanılarak varyans analizi yapılmış ve anlamlı olanlara Duncan testi uygulanmıştır.

BULGULAR VE TARTIŞMA

Kefirlere ait pH, titrasyon asitliği, kuru madde ve serum ayrılması değerleri Tablo 1'de verilmiştir. Kefirlerin pH değerleri 4,42 ile 4,48 arasında değişiklik göstermiş, en düşük pH değeri kontrol örneğinde, en yüksek pH değeri ise 0,3HK örneğinde tespit edilmiştir. Bununla birlikte kefirler arasında istatistiksel olarak farklılık bulunmamıştır ($p>0,05$). Çalışmamızla benzer şekilde Kulaksız Günaydı (2022) sükroz ile yapay tatlandırıcılar ekleyerek ürettiği meyveli kefirlerin pH'larını 4,19 ile 4,39 arasında; Barazi (2022) yarım yağlı UHT inek sütü kullanarak ürettiği kefirlere taze mürveri %2 ve %4, kuru mürveri ise %1 ve %0,5 ilave ederek ürettiği kefirlerin pH değerlerini 4,25-4,37 arasında bulmuştur.

Tablo 1. Kefirlerin pH, TA, Kuru Madde ve Serum Ayrılması Değerleri (±standart sapma)

Örnek	pH	Titrasyon asitliği, %laktik asit	Kuru madde, %	Serum ayrılması, %
Kontrol	4,42±0,07^{a}	0,88±0,20^{a}	11,14±0,03^{a}	62,77±1,13^{a}
0,1HK	4,47±0,01^{a}	0,69±0,04^{a}	11,10±0,01^{b}	63,70±0,66^{ab}
0,3HK	4,48±0,01^{a}	0,85±0,05^{a}	11,09±0,01^{b}	64,50±0,48^{b}

a-b-c aynı sütunda farklı harflere sahip ortalama değerler istatistiksel olarak birbirinden farklıdır (p<0,05). **Kontrol**: Hünnap fenolik ekstraktı ilave edilmemiş kefir; **0,1HK**: %0,1 hünnap fenolik ekstraktı ilave edilmiş kefir; **0,3HK**: %0,3 hünnap fenolik ekstraktı ilave edilmiş kefir

Kefirlerin titrasyon asitliği değerleri %0,69- %0,88 (laktik asit cinsinden) arasında değişiklik göstermiştir. En düşük TA değeri 0,1HK örneğinde en yüksek TA değeri ise kontrol örneğinde tespit edilmiş, kefirler arasındaki fark istatistiksel olarak önemsiz bulunmuştur (p>0,05). Gürsoy vd. (2020) 6 farklı marka ticari kefir örneğinin asitlik değerlerinin %0,71-%0,93 (%laktik asit) arasında değişim gösterdiğini tespit etmişlerdir. Barazi (2022) ise ürettiği kefire %2 ve %4 taze mürver ve %1 ve %0,5 kuru mürver ilave etmiş ve kefirlerin titrasyon asitliği değerlerini laktik asit cinsinden %0,78-1,09 olarak belirlemiştir.

Çalışmamızda kontrol örneğinin kuru madde değeri %11,14, 0,1HK örneğinin kuru madde değeri %11,10 ve 0,3HK örneğinin kuru madde değeri ise %11,09 olarak belirlenmiştir. Kontrol örneği ile hünnap ekstraktı ilave edilmiş kefir örneklerinin kuru madde değerleri arasındaki fark önemli bulunmuştur (p<0,05). Bununla birlikte 0,1HK ve 0,3HK örneklerinin kuru madde değerleri arasındaki fark istatistiksel olarak önemsizdir (p>0,05). Çalışmamıza benzer olarak Songun (2016), %1 ve %2 inülin ilavesiyle inek-keçi sütü karışımı ile ürettiği kefirlerin kuru madde oranlarını %11,84-%13,53 arasında bulmuştur. Bengi (2022) ise çalışmamızda elde edilen sonuçlardan yüksek olarak kefirlere farklı oranlarda propolis ilave ederek yaptığı çalışma kapsamında ürettiği kefirlerin en düşük kuru madde oranını %16,92, en yüksek kuru madde oranını ise %17,11 olarak tespit etmiştir.

Kefir örneklerinin serum ayrılması değerleri %62,77 ile %64,50 arasında belirlenmiştir. Kefir örneklerine ilave edilen hünnap fenolik ekstraktı konsantrasyonunun artması serum ayrılması değerlerinde artışa neden olmuştur. En düşük serum ayrılması değeri kontrol örneğinde (%62,77) ölçülmüş onu 0,1HK (%63,70) ve 0,3HK (%64,50) izlemiştir. Kontrol örneği ile 0,1HK ve 0,1HK ile 0,3HK arasındaki fark istatistiksel olarak önemsiz bulunmuştur (p>0,05). Arslan (2018), yer fıstığı sütü kullanarak ürettiği kefirlerin serum ayrılması değerlerini %33,73-53,68 aralığında belirlemiştir. Yiğitvar (2023) aloe vera (*Aloe barbadensis Miller*) jeli ilave ederek ürettiği kefirlerin 21 günlük depolanmaları sürecindeki serum ayrılması değerlerinin %57,15-67,29 arasında değişiklik gösterdiğini bildirmiştir. Demir (2020), %10 ve %15 oranında kuşburnu marmelatı ilave ettiği kefir örneklerini 21 gün depolamış ve serum ayrılması değerlerini incelemiştir. Serum ayrılması değerlerinin kontrol örneğinde 5,04-9,98ml/25g, %10 oranında kuşburnu marmelatı ilave edilen kefir örneğinde 4,04-8,68ml/25g ve %15 oranında kuşburnu marmelatı ilave edilen kefir örneğinde 5,03-6,28ml/25 g aralığında saptamıştır.

Kefir örneklerinin renk değerleri Tablo 2'de verilmiştir. Örneklerin parlaklığı ifade eden L^* değerleri 53,10-56,43 arasında değişiklik göstermiştir. En düşük L^* değeri 0,1HK örneğinde tespit edilmiş ve kontrol ve 0,3HK örnekleri ile arasındaki fark önemli bulunmuştur (p<0,05). Çalışmamızda elde edilmiş olan L^* parlaklık değerleri literatürdeki diğer çalışmalardan düşük bulunmuştur. Kahraman (2011), farklı oranlarda yulaf sütü (%0, 15, 30, 45 ve 50), kefir kültürü (%1, 2, 3, 4 ve 5) ve yaban mersini aroması (%9, 12, 15, 18 ve 21) kullanarak ürettiği kefirlerin L^* değerlerinin 69,45-76,29 arasında değiştiğini saptamıştır. Kefirlere ilave edilen yulaf sütü konsantrasyonundaki artış ile L^* değerlerinde azalma olduğunu belirlemiştir. Mutluer Yalçın (2021) %0, 0,25, 0,5 ve 1 oranında havuç lifi ilave ettiği kefirlerin L^* değerlerini 14 günlük depolama süresince 84,06-89,15 aralığında belirlemiş ve kefirlere ilave edilen havuç lif oranının artması ile L^* değerinin düştüğünü belirlemiştir. Bengi (2022) farklı oranlarda (%0,150, 0,225 ve 0,300) propolis ekstraktı ilave ettiği çilek aromalı kefirleri 4°C'de 8 gün boyunca depolanmış ve kefirlerin L^* değerlerini 84,45-85,50 arasında tespit etmiştir.

Tablo 2. Kefirlerin Renk Değerleri (L^*, a^* ve b^*) (±standart sapma)

Örnek	L^*	a^*	b^*
Kontrol	56,23±0,10^b	1,23±0,01^a	0,65±0,06^a
0,1HK	53,10±0,21^a	0,83±0,01^b	1,51±0,02^b
0,3HK	56,43±0,13^b	0,79±0,03^c	1,57±0,03^b

a-b-c aynı sütunda farklı harflere sahip ortalama değerler istatistiksel olarak birbirinden farklıdır (p<0,05). **Kontrol**: Hünnap fenolik ekstraktı ilave edilmemiş kefir; **0,1HK**: %0,1 hünnap fenolik ekstraktı ilave edilmiş kefir; **0,3HK**: %0,3 hünnap fenolik ekstraktı ilave edilmiş kefir

Kefirlerin a^* değerleri kontrol örneğinde 1,23, 0,1HK örneğinde 0,83 ve 0,3HK örneğinde ise 0,79 olarak ölçülmüştür. Kefirlere ilave edilen hünnap fenolik ekstraktı kırmızılık değerinin düşmesine neden olmuş, ilave edilen konsantrasyondaki artış ile kırmızılık değeri azalmıştır. Bununla birlikte örneklerin a^* değerleri arasındaki fark önemli bulunmuştur (p<0,05). Demir (2020), %10 ve %15 oranında kuşburnu marmelatı ilave ederek ürettiği

kefirlerin a* değerini 21 günlük depolama süresince kontrol örneğinde -3,48 ile -3,50, %10 kuşburnu marmelatı ilave ederek ürettiği kefirlerde 0,98 ile 2,44 ve %15 kuşburnu marmelatı ilave ederek ürettiği kefirlerde 1,59 ile 3,14 arasında belirlemiştir. Mutluer Yalçın (2021) %0, 0,25, 0,5 ve 1 oranında havuç lifi ilave ederek ürettiği kefirlerin a* değerlerinin 14 günlük depolama süresince -1.88 ile 1.90 arasında değiştiğini ve kefirlere ilave edilen havuç lif oranının artması ile a* değerinde artış meydana geldiğini saptamıştır.

Örneklerin b* değerleri 0,65-1,57 arasında değişiklik göstermiştir. Hünnap fenolik ekstraktının kefirlere ilave edilmesi, kefirlerin sarılık değerlerinde artış meydana getirmiştir. 0,1HK ve 0,3HK örneklerinin b* değerleri arasındaki fark önemsiz ($p>0,05$) ancak kontrol ile hünnap fenolik ekstraktı ilave edilmiş kefirler arasındaki fark önemli bulunmuştur ($p<0,05$). Çalışmamız ile benzer şekilde Demir (2020)'de kefirlere kuşburnu marmelatı ilavesinin kefirlerin b* değerlerinde artış meydana getirdiğini bildirmiştir. Goncu vd. (2017), kefirlere limon lifi ve elma katkısının b* renk değerini artırdığını, bununla birlikte depolama boyunca b* değerinin etkilenmediğini belirlemişlerdir.

Kefir örneklerinin toplam fenolik madde miktarları ve antioksidan aktivite değerleri Tablo 3' te verilmiştir. Örneklerin toplam fenolik madde miktarları 126,89-152,44 mgGAE/L arasında değişiklik göstermiştir. Kefirlere hünnap fenolik ekstraktı ilavesi örneklerin toplam fenolik madde miktarlarında artış meydana getirmiştir. Kontrol örneğinin toplam fenolik madde miktarı 126,89 mgGAE/L iken %0,1 oranında hünnap fenolik ekstraktı ilave edilen 0,1HK örneğinin toplam fenolik madde miktarı 130,59 mgGAE/L, %0,3 oranında hünnap fenolik ekstraktı ilave edilen 0,3HK örneğinin toplam fenolik madde miktarı ise 152,44 mgGAE/L olarak belirlenmiştir. Kefir örneklerinin toplam fenolik madde miktarları arasındaki fark istatistiksel olarak önemli bulunmuştur ($p<0,05$). Barazi (2022) yarım yağlı UHT inek sütü kullanarak ürettiği kefirlere taze mürveri %2 ve %4, kuru mürveri ise %1 ve %0,5 ilave ederek ürettiği kefir örneklerinin toplam fenolik madde miktarlarını 167,94-531,33 mgGAE/kg aralığında tespit etmiştir. Şimşek (2024) kurutulmuş soğan kabuğu ekstraktı ekleyerek ürettiği kefirlerin toplam fenolik madde miktarlarını 14 günlük depolama süresi boyunca kontrol örneğinde 1020,50-1233,75 mgGAE/g ve soğan kabuğu ekstraktlı kefirlerde 896,25-1099,25 mgGAE/g olarak belirlemiştir. Dündar (2024) arı poleni ekstraktı içeren kefirler (%0, 0,25, 0,5 ve 1) üretmiş ve 4°C'de depolamıştır. Depolama süresince kontrol örneğinin toplam fenolik madde miktarını 62,58-123,25 µgGAE/mg ve arı poleni ekstraktlı kefirlerin toplam fenolik madde miktarlarını 133,22-376,73 µgGAE/mg aralığında belirlemiş, en yüksek toplam fenolik madde miktarını %1 arı poleni ekstraktı ilave ederek ürettiği kefirlerin 7.gününde tespit etmiştir.

Tablo 3. Kefirlerin Toplam Fenolik Madde Miktarları ve Antioksidan Aktivite (TEAC ve FRAP) Değerleri (±standart sapma)

Örnek	Toplam Fenolik Madde (mgGAE/L)	Antioksidan Kapasite	
		TEAC (mgTE/L)	*FRAP (mgTE/L)*
Kontrol	126,89±1,74^{a}	19,80±0,64^{a}	40,14±10,23^{a}
0,1HK	130,59±0,64^{b}	19,56±0,86^{a}	59,03±5,85^{b}
0,3HK	152,44±0,00^{c}	19,77±1,48^{a}	72,08±12,82^{b}

a-b-c aynı sütunda farklı harflere sahip ortalama değerler istatistiksel olarak birbirinden farklıdır ($p<0,05$). **Kontrol**: Hünnap fenolik ekstraktı ilave edilmemiş kefir; **0,1HK**: %0,1 hünnap fenolik ekstraktı ilave edilmiş kefir; **0,3HK**: %0,3 hünnap fenolik ekstraktı ilave edilmiş kefir

Kefir örneklerinin antioksidan kapasite değerleri TEAC ve FRAP olmak üzere 2 farklı yöntemle belirlenmiştir. Örneklerin TEAC değerleri 19,56-19,80 mgTE/L aralığında saptanmış ve örnekler arasında istatistiksel olarak fark bulunmamıştır ($p>0,05$). Örneklerin antioksidan kapasite değerleri FRAP ile değerlendirildiğinde ise kontrol örneği 40,14 mgTE/L iken 0,1HK örneği 59,03 mgTE/L ve 0,3HK örneği 72,08 mgTE/L olarak belirlenmiştir. Kefirlere hünnap fenolik ekstraktı ilave edilmesi 0,1HK örneğinde yaklaşık 1,5, 0,3HK örneğinde ise yaklaşık 1,8 katlık antioksidan kapasitede artışa neden olmuştur. Bununla birlikte kontrol örneği ile 0,1HK ve 0,3HK örneklerinin FRAP ile belirlenen antioksidan aktivite değerleri arasındaki fark istatistiksel olarak önemli bulunmuştur ($p<0,05$). Kullanılan 2 farklı yöntemle elde edilen sonuçlar arasındaki farklılık TEAC yönteminin nötr pH'da, FRAP yönteminin ise asidik pH'da gerçekleşmesinden kaynaklanmış olabilir (Albayrak vd., 2010). Ülker (2023) kereviz tozu (%0, 0,5, 0,75 ve 1) ilavesinin kefirlerin antioksidan özelliklerine etkisini incelediği çalışmasında 21 günlük depolama sürecinde kefirlerin antioksidan aktivitelerini DPPH yöntemi ile %1,62-5,11 inhibisyon aralığında tespit etmiş, en yüksek inhibisyon ise %0,75 kereviz tozu içeren kefirde 14.günde belirlemiştir. Dündar (2024) ise arı poleni ekstraktı (%0, 0,25, 0,5 ve 1) içeren kefirleri 4°C'de 21 gün depolamış ve FRAP yöntemi ile kefirlerin antioksidan kapasitelerinin 31,01-106,80 µgTE/g aralığında olduğunu saptamıştır. Her bir depolama süresince en yüksek FRAP değerlerini %1 arı poleni ekstraktı içeren kefirlerde belirlemiştir. Şimşek (2024) kurutulmuş soğan kabuğu ekstraktı

ekleyerek üretip 14 gün depoladığı kefirlerin antioksidan madde miktarlarını kontrol örneğinde 32,44-35,20 µmolTE/g, soğan kabuğu ekstraktlı kefirlerde ise 31,70-33,27 µmolTE/g aralığında tespit etmiştir.

Tablo 4. Kefir Örneklerinin Kıvam, Tat-Lezzet, Koku, Görünüş ve Genel Kabul Edilebilirlik Değerleri (±standart sapma)

Örnek	Kıvam	Tat-lezzet	Koku	Görünüş	Genel kabul edilebilirlik
Kontrol	8,4±1,1^{a}	7,8±1,5^{a}	7,7±1,3^{a}	8,2±1,2^{a}	8,0±1,3^{a}
0,1HK	8,4±1,4^{a}	6,9±1,4^{a}	7,7±1,3^{a}	7,9±1,6^{a}	7,2±1,8^{a}
0,3HK	8,2±1,7^{a}	5,0±2,4^{b}	7,6±1,8^{a}	7,9±2,1^{a}	6,4±1,8^{a}

a-b-c aynı sütunda farklı harflere sahip ortalama değerler istatistiksel olarak birbirinden farklıdır ($p<0,05$). **Kontrol**: Hünnap fenolik ekstraktı ilave edilmemiş kefir; **0,1HK**: %0,1 hünnap fenolik ekstraktı ilave edilmiş kefir; **0,3HK**: %0,3 hünnap fenolik ekstraktı ilave edilmiş kefir

Kefirlerin duyusal özellikleri kıvam, tat-lezzet, koku, görünüş ve genel kabul edilebilirlik açısından değerlendirilmiştir (Tablo 4). Kefirlerin kıvam puanları 8,2-8,4 arasında değişiklik göstermiş ve istatistiksel açıdan aralarındaki fark önemsiz bulunmuştur ($p>0,05$). Tat-lezzet açısından yapılan değerlendirmede kefirler 5,0-7,8 arasında puan almıştır. Kontrol ve 0,1HK örneklerinin tat-lezzet puanları arasındaki fark önemsiz ($p>0,05$) ancak kontrol ve 0,1HK örneklerinin 0,3HK örneği ile aralarındaki fark istatistiksel olarak önemli ($p<0,05$) bulunmuştur. Kefirlerin koku puanları 7,6-7,7 arasında, görünüş puanları ise 7,9-8,2 arasında değişiklik göstermiş ve hem koku hem de görünüş açısından kefirlerin aldıkları puanlar istatistiksel olarak farklılık göstermemiştir ($p>0,05$). Kontrol örneğinin genel kabul edilebilirlik puanı 8,0, 0,1HK örneğinin ki 7,2 ve 0,3HK örneğinin ki ise 6,4 olarak belirlenmiştir. Bununla birlikte kefirlerin genel kabul edilebilirlik değerleri arasındaki fark istatistiksel olarak önemsiz bulunmuştur ($p>0,05$).

SONUÇ

Bu çalışmada hünnap fenolik ekstraktı ilave edilerek kefirler üretilmiş, üretilen kefirlerin bazı fizikokimyasal, fitokimyasal ve duyusal özellikleri belirlenmiş ve kıyaslanmıştır. Çalışmanın sonuçları kefirlere hünnap fenolik ekstraktı ilave edilerek özellikle toplam fenolik madde ve antioksidan aktivite açısından daha üstün özelliklere sahip ve duyusal açıdan kabul edilebilir özellikte kefir üretilebileceğini göstermiştir. Kefirin yüksek antioksidan aktivite gösteren hünnap fenolik ekstraktı kullanılarak üretilmesi ile kefirin fonksiyonel özellikleri artırılmış ve alternatif sağlıklı fonksiyonel bir ürün geliştirilmiştir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma Tübitak 2209-A Üniversite Öğrencileri Araştırma Projeleri Destekleme Programı kapsamında (Proje no: 1919B012327094) desteklenmiştir.

KAYNAKLAR

Albayrak, S., Sağdıç, O., & Aksoy, A. (2010). Bitkisel ürünlerin ve gıdaların antioksidan kapasitelerinin belirlenmesinde kullanılan yöntemler. *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fen Bilimleri Dergisi*, 26(4), 401-409.

Ambriz-Pérez, D. L., Leyva-López, N., Gutierrez-Grijalva, E. P., & Heredia, J. B. (2016). Phenolic compounds: Natural Alternative in Inflammation Treatment. A Review. *Cogent Food & Agriculture*, 2(1), 1131412.

Anonim. (2022). Türk Gıda Kodeksi Fermente Süt Ürünleri Tebliği, Tebliğ No: 2022/44, Resmi Gazete: 30.11.2022, sayı 32029.

AOAC. (1995). "Official Methods of Analysis of AOAC International", 16th Ed.

AOAC. (1997). "Official Methods of Analysis of AOAC International", 16th. Ed.

Ayçiçek, H. C., Esen, Z. N., Berktaş, S., & Çam, M. (2024). Turuncu Havuç (Daucus Carota L.) Karotenoidleri ile Zenginleştirilmiş Kefir Üretimi. *Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi*, 14(3), 1290-1300.

Barazi, Ü. 2022. Mürverce zenginleştirilmiş fonksiyonel kefir üretimi. Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gıda Mühendisliği Ana Bilim Dalı, (Yüksek lisans tezi), Denizli.

Barazi, Ü., & Arslan, S. (2024). Enhancement of Kefir Functionality by Adding Black Elderberry and Evaluation of its Quality During Storage. *Food Science & Nutrition*, 12(11), 9325-9339.

Bengi, S. (2022). Farklı Oranlarda Propolis İlave Edilmiş Kefirlerin Bazı Fizikokimyasal, Reolojik, Antioksidan, Mikrobiyolojik ve Duyusal Özellikleri. Burdur Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Gıda Mühendisliği Anabilim Dalı (Yüksek Lisans Tezi), Burdur.

Benzie, I. F. F., Strain, J. J. (1996). The Ferric Reducing Ability of Plasma (FRAP) as a Measure of "Antioxidant Power": The FRAP Assay, *Analytical Biochemistry*, 239: 70-6.

Cemeroğlu, B., & Yemenicioğlu, A. (2001). Meyve ve Sebzelerin (Bileşimi), İşleme Teknolojisi. Ankara, 328s.

Cesur, H. (2014). Kurutulmuş Turunçgil Kabuklarının Kefirin Bazı Mikrobiyal, Kimyasal ve Fiziksel Özelliklerine Etkisi. Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Biyoloji Ana Bilim Dalı (Yüksek lisans tezi), Balıkesir.

Coşkun, H., Albayrak, B., Helal, M., Dhyaa, S., & Öztürk, B. B. (2024). Zerdeçal Ekstraktı Kullanımının Kefirin Bazı Fizikokimyasal Özelliklerine Etkisi. *Gıda*, 49(6), 1062-1073.

Demir, B. (2020). Kuşburnu Marmelatı İlaveli Kefirin Depolama Süresince Bazı Özelliklerinin Belirlenmesi. Atatürk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Gıda Mühendisliği Ana Bilim Dalı. (Yüksek Lisans Tezi), Erzurum.

Deveci, H. A., Nur, G., Ali Kırpık, M., Harmankaya, A., & Yıldız, Y. (2016). Fenolik Bileşik İçeren Bitkisel Antioksidanlar. *Kafkas Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 9(1), 26-32.

Dündar, O. (2024). Polen Ekstraktıyla Üretilen Kefirlerin Depolama Süresince Kalite Parametrelerinin Belirlenmesi. Bingöl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Arı ve Arı Ürünleri Ana Bilim Dalı (Yüksek Lisans Tezi), Bingöl.

Franke, S.I.R., Chless, K., Silveria, J.D., Robensam, G. (2004). Study of a Antioxidant and Mutajenic Activity of Different Orange Juices, *Food Chemistry*. 88: 45–55.

Goncu, B., Celikel, A., Guler-Akin, M. B., & Serdar Akin, M. (2017). Some Properties of Kefir Enriched with Apple and Lemon Fiber. *Mljekarstvo: časopis za unaprjeđenje proizvodnje i prerade mlijeka*, 67(3), 208-216.

Gürsoy, O., Kocatürk, K., Güler Dal, H.Ö., Yakalı, H.N., Yılmaz, Y., 2020. Physicochemical and Rheological Properties of Commercial Kefir Drinks. *Akademik Gıda*, 18(4), 375-381.

Kahraman, C. (2011). Production of Kefir From Bovine and Oat Milk Mixture. İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Gıda Mühendisliği Ana Bilim Dalı (Yüksek Lisans Tezi), İzmir.

Kamboj, A., Saluja, A. K., Kumar, M., & Atri, P. (2012). Antiviral Activity of Plant Polyphenols. *J. Pharm. Res*, 5(5), 2402-2412.

Kavas, İ., & Dalkılıç, Z. (2015). Bazı Hünnap Genotiplerinin Morfolojik, Fenolojik ve Pomolojik Özelliklerinin Belirlenmesi ve Melezleme Olanaklarının Araştırılması. *Adnan Menderes Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 12(1), 57-72.

Kulaksız Günaydı, Z. E. (2022). Meyveli Kefir Üretiminde Sükroz ile Birlikte Doğal ve Yapay Tatlandırıcı Kullanımının Ürün Kalitesine Etkisi. Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Gıda Mühendisliği Ana Bilim Dalı, (Doktora tezi), Sakarya.

Küpcü, I. H. (2024). Geleneksel ve Güncel Yöntemlerle Hünnap Meyvesinden Fenolik Bileşenlerinin Ekstraksiyonu ve Karakterizasyonu. Tokat Gaziosmanpaşa Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Gıda Mühendisliği Ana Bilim Dalı (Yüksek lisans tezi), Tokat.

Mutluer Yalçın, M. (2021). Havuç Lifi ile Zenginleştirilmiş Kefirin Bazı Özellikleri. Harran Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü (Yüksek Lisans Tezi), Şanlıurfa.

Otles, S., & Cagindi, O. (2003). Kefir: A Probiotic Dairy-Composition, Nutritional and Therapeutic Aspects. *Pakistan journal of nutrition*, *2*(2), 54-59.

Özkan, H. İ. (2017). Hünnap (Zizyphus Jujuba Mill.) Meyvesinin Bazı Biyokimyasal Bileşenleri ile Antibakteriyel, Hipoglisemik ve Total Antioksidan Aktivitesinin İncelenmesi. Balıkesir Üniversitesi Sağlık Bilimleri Enstitüsü Tıbbi Biyokimya Ana Bilim Dalı (Yüksek lisans tezi), Balıkesir.

Raccach, M. (1984). The Antimicrobial Activity of Phenolic Antioxidants in Foods: A review 1. *Journal of Food Safety*, 6(3), 141-170.

Re, R., Pellegrini, N., Proteggente, A., Pannala, A., Yang, M., Rice-Evans, C. (1999). Antioxidant Activity Applying an İmproved ABTS Radical Cation Decolarization Assay, *Free Radical Biology & Medicine*. 26: 1231–7.

Saldamlı, İ. (1998). Gıda Kimyası. Hacettepe Üniversitesi Yayınları. Ankara.

Singh N, Kaur M, Sandhu KS. (2005). Physicochemical and Functional Properties of Freeze-Dried and Oven Dried Corn Gluten Meals. *Drying Technology*, 23: 975- 988.

Songun, E. G., (2016). İnülin Takviyesi ile Üretilmiş İnek-Keçi Sütü Kefirinin Bazı Özelliklerinin Belirlenmesi. Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Gıda Mühendisliği Anabilim, (Yüksek Lisans Tezi), Balıkesir.

Şimşek, D. S. (2024). Kurutulmuş Soğan (*Allium cepa L.*) Kabuğu Ekstraktı Eklenmiş Kefirin Mikrobiyal ve Kimyasal Özelliklerinin Araştırılması. İstanbul Aydın Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Gıda Güvenliği ve Beslenme Bilimleri Ana Bilim Dalı (Yüksek Lisans Tezi), İstanbul.

Tița, O., Constantinescu, M. A., Tița, M. A., Opruța, T. I., Dabija, A., Georgescu, C. (2022). Valorization on the Antioxidant Potential of Volatile Oils of Lavandula angustifolia Mill., Mentha piperita L. and Foeniculum vulgare L. in the Production of Kefir. *Applied Sciences*, 12(20), 10287.

Ülker, F. Z. (2023). Kereviz (*Apium Graveolens Var. Rapaceum*) İlavesinin Kefirlerin Mikrobiyolojik, Antioksidan ve Besinsel Özelliklerine Etkisi. Gümüşhane Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Gıda Mühendisliği Anabilim Dalı (Yüksek Lisans Tezi), Gümüşhane.

Wojdyło, A., Carbonell-Barrachina, Á. A., Legua, P., & Hernández, F. (2016). Phenolic composition, ascorbic acid content, and antioxidant capacity of Spanish jujube (Ziziphus jujube Mill.) fruits. *Food chemistry*, 201, 307-314.

Yaşa, F. (2016). Türkiye'de Yetiştirilen Hünnap Meyvesinin Bileşimi ve Meyvenin Kurutulması Sırasında Bileşiminde Meydana Gelen Değişimler (Yüksek lisans tezi), Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Yiğitvar, İ. (2023). Aloe Vera ile Zenginleştirilmiş Kefir Üretimi ve Depolama Süresince Kalite Özelliklerinin Belirlenmesi. İnönü Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Gıda Mühendisliği Ana Bilim Dalı, (Doktora Tezi), Malatya.

Zhang, H., Jiang, L., Ye, S., Ye, Y., & Ren, F. (2010). Systematic evaluation of antioxidant capacities of the ethanolic extract of different tissues of jujube (Ziziphus jujuba Mill.) from China. *Food and chemical toxicology*, 48(6), 1461-1465.

KSÜ Mühendislik Bilimleri Dergisi, 28(2), 2025
Araştırma Makalesi

KSU J Eng Sci, 28(2), 2025
Research Article

Kahramanmaras Sutcu Imam University
Journal of Engineering Sciences

Geliş Tarihi : 17.02.2025
Kabul Tarihi :28.02.2025

Received Date : 17.02.2025
Accepted Date : 28.02.2025

A STUDY ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF PLA+ SAMPLES MANUFACTURED USING 3D PRINTING WITH DIFFERENT RASTER ANGLES

FARKLI YAZDIRMA AÇILARI İLE 3D YAZICI KULLANILARAK ÜRETİLEN PLA+ NUMUNELERİNİN MEKANİK ÖZELLİKLERİ ÜZERİNE BİR ÇALIŞMA

Mete Han BOZTEPE[1] (ORCID: 0000-0001-8418-1352)

[1] Şırnak Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Şırnak, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Mete Han BOZTEPE, metehanboztepe@sirnak.edu.tr

ABSTRACT

In this study, the mechanical properties of PLA+ samples produced with different raster angles (0°, 90°, 0°/90°, 45° and ±45°) were investigated. Tensile tests were performed to determine the mechanical properties according to ASTM D-638 standard. The effects of raster angle on mechanical properties such as maximum force, elongation, toughness, modulus of elasticity, and ultimate tensile strength were analyzed. The results show that the raster angle significantly affects the mechanical behavior of PLA+ specimens. The highest maximum force and ultimate tensile strength were observed at 90°. In contrast, the lowest mechanical values were recorded at 0°, indicating a decrease in strength in this configuration. The ±45° raster angle exhibited the highest elongation and toughness, indicating greater ductility and energy absorption capacity. The modulus of elasticity showed relatively small differences between the different raster angles, with the highest value recorded at 90°. These findings highlight the critical role of raster angle selection in optimizing the mechanical performance of PLA+ components and provide valuable insights for additive manufacturing applications.

Keywords: 3D printing, pla+, raster angle, tensile test

ÖZET

Bu çalışmada, farklı yazdırma açıları (0°, 90°, 0°/90°, 45° ve ±45°) ile üretilen PLA+ numunelerinin mekanik özellikleri incelenmiştir. Mekanik özellikleri belirlemek için ASTM D-638 standardına uygun olarak çekme testleri gerçekleştirilmiştir. Yazdırma açısının maksimum kuvvet, uzama, tokluk, elastikiyet modülü ve nihai çekme mukavemeti gibi mekanik özellikler üzerindeki etkileri analiz edilmiştir. Sonuçlar, yazdırma açısının PLA+ numunelerinin mekanik davranışını önemli ölçüde etkilediğini göstermektedir. En yüksek maksimum kuvvet ve nihai gerilme mukavemeti 90°'de gözlenmiştir. Buna karşılık, en düşük mekanik değerler 0°'de kaydedilmiştir, bu da bu konfigürasyonda mukavemette bir düşüş olduğunu göstermektedir. ±45° tarama açısı, daha fazla süneklik ve enerji emme kapasitesine işaret eden en yüksek uzama ve tokluğu sergilemiştir. Elastisite modülü, farklı yazdırma açıları arasında nispeten küçük farklılıklar göstermiş ve en yüksek değer 90°'de kaydedilmiştir. Bu bulgular, PLA+ bileşenlerinin mekanik performansını optimize etmede yazdırma açısı seçiminin kritik rolünü vurgulamakta ve eklemeli üretim uygulamaları için değerli bilgiler sağlamaktadır.

Anahtar Kelimeler: 3B yazıcı, pla+, yazdırma açısı, çekme testi

ToCite: BOZTEPE, M. H., (2025). A STUDY ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF PLA+ SAMPLES MANUFACTURED USING 3D PRINTING WITH DIFFERENT RASTER ANGLES. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 28(2), 923-932.

INTRODUCTION

Nowadays, it has become possible to develop flexible and complex-shaped products thanks to additive manufacturing (AM). This manufacturing method allows the production of parts that are difficult to produce with high dimensional accuracy compared to traditional manufacturing. It also offers a low-cost, fast manufacturing process and high efficiency. There are various methods in the AM, such as Vat Photopolymerization, Material Extrusion, Material Spraying, Powder Bed Fusion, Sheet Lamination, Binder Spraying, and Direct Energy Deposition. Although plastics, polymers, thermosets, liquids, and powders are used in the layer-by-layer production method, there is still a limited variety of materials. The 3D printing method is one of the additive manufacturing methods. This technique makes it possible to produce rapid prototyping and complex parts. 3D printing is used in many areas such as automotive, aviation, and construction (Lalegani & Mohd Ariffin, 2020). In 3D printing technology, the part is designed with computer-aided software (CAD) and produced layer by layer. This technology provides flexible production and convenience in many areas. The most commonly used materials in 3D printing are thermoplastics, ceramics, graphene-derived materials, and metallic materials (Shahrubudin et al., 2019). 3D prints produced with metal materials are generally used in areas such as automotive and marine (Duda & Raghavan, 2016). The most preferred materials in medical applications are ceramics and biomaterials. In addition, smart materials are developed and used with this technology today (Kessler et al., 2020; Lee et al., 2017). There are subtypes of 3D printing technology. One of them is Stereolithography (SLA). With this technique, it is possible to produce parts with high dimensional precision with the help of photocuring (Bagheri & Jin, 2019; Quan et al., 2020). Another technique is Fused Deposition Modeling (FDM). In this technique, thermoplastic materials are printed layer by layer with the help of heat. The selective Laser Sintering (SLS) technique is three-dimensional objects obtained by sintering particulate materials layer by layer using a laser (Chia & Wu, 2015). 3D printing technology has revolutionized many products. It is used in the production of lightweight and complex parts in the aerospace and automotive industries (Duda & Raghavan, 2016). In the energy storage field, devices' performance is increased with precise control of electrodes and electrolytes (Zhang et al., 2017). In addition, 3D printing plays an important role in producing customized agricultural and food products in the farming and food sectors (Shahrubudin et al., 2019).

The mechanical properties of the filaments used in the FDM method directly affect the mechanical properties of the final product. These mechanical properties vary depending on building orientation, raster angle/orientation, layer thickness, and infill percentage. It is possible to determine these mechanical properties with the help of tensile tests. Generally, ASTM D638 and ISO 527 standards are preferred for tensile tests (Çakan, 2021). Ayatollahi et al. conducted tensile and fracture strength tests to determine the mechanical properties of samples produced from PLA filaments. For this purpose, they produced samples with four different raster angles (0/90°, 15/−75°, 30/−60°, and 45/−45°). Specimens with 45/−45° raster angles exhibited maximum percentage elongation and fracture strength compared to specimens with other raster angles. The critical J-integral of the 45/−45° specimen was 6815 J/m2, while this value was 1839 J/m2 for the 0/90° specimen (Ayatollahi et al., 2020). Verma et al conducted a similar study for samples obtained from ABS filaments. They used three raster angles (0°, + 45/− 45°, and 90°). They reported that the samples with + 45/− 45° raster angle had high fracture strength (Verma et al., 2021). In another study, the mechanical properties of PLA and PETG samples with 15° - 30° raster angles were investigated. It was indicated that the raster angle affects the mechanical properties of both material types. The data obtained from the mechanical tests were compared with the study simulated with ANSYS software, and the maximum matching was obtained from the PLA sample with 15° raster angle (Albadrani, 2023). When PLA samples with 0° and 90° raster angles were subjected to tensile testing, the highest tensile strength was obtained with the sample with 0° raster angle (Rajpurohit & Dave, 2019).

The tensile properties of polylactic acid (PLA) and its composites have been extensively studied, revealing significant insights into their mechanical performance and potential applications. PLA, a biodegradable thermoplastic derived from renewable resources, exhibits high tensile strength, typically ranging from 50 to 70 MPa, and a Young's modulus around 3 GPa at room temperature (Aliotta et al., 2019). However, its inherent brittleness limits its applications, necessitating the incorporation of various fillers and reinforcements to enhance its mechanical properties (Kangwanwatthanasiri et al., 2013). The tensile testing of Polylactic Acid (PLA) and its composites is a critical area of research in materials science, particularly due to PLA's increasing use in additive manufacturing and its biodegradable properties. PLA exhibits a range of tensile strengths depending on its formulation and processing conditions. For instance, Vakharia et al. report that the ultimate tensile strength of pure PLA can range between 45 and 50 MPa, while variations such as MI-PLA show strengths between 35 and 40 MPa (Vakharia et al., 2021).

In this study, the effect of specimens with different raster angles on mechanical properties was investigated. The tensile strengths of specimens with raster angles of 0°, 90°, 0°/90°, 45°, and ±45 produced by the FDM technique using PLA+ filaments were determined. Test specimen dimensions were prepared according to ASTM D 638 standard type 1.

MATERIALS AND METHODS

Material

PLA is a frequently used filament in FDM applications due to its environmentally friendly and biodegradable properties. It is also made from renewable resources, so the energy consumed in processing is low. It is used in rapid prototyping and many other applications. However, its mechanical weaknesses and other limitations are being overcome with innovative approaches such as composite materials and surface modifications. These developments allow PLA to be used in a wider range of applications. There are some key differences between PLA (Polylactic Acid) and PLA+ (PLA Plus) filaments. PLA+ is an enhanced version of PLA and offers better performance properties, usually through the addition of various additives. The properties of the PLA+ filament used in this research are given in Table 1. This filament is a product of the eSUN brand. PLA+ is preferred for more durable mechanical parts or applications requiring flexibility and durability.

Table 1. Properties of PLA+ material

Density (g/cm^3)	1.23
Tensile Strength (MPa)	60
Flexural Strength (MPa)	74
Flexural Modulus (MPa)	1973
Elongation at Break (%)	20
Extruder Temperature (°C)	210-230
Bed Temperature (°C)	45-60
Printing Speed (mm/s)	40-100

Specimen Design

The specimens were printed in a dogbone shape to test the tensile strength according to ASTM D-638. The specimen dimensions were set according to type 1 with a thickness of 3 mm and a length of 165 mm. The shape of a specimen and other dimensions are given in Figure 1.

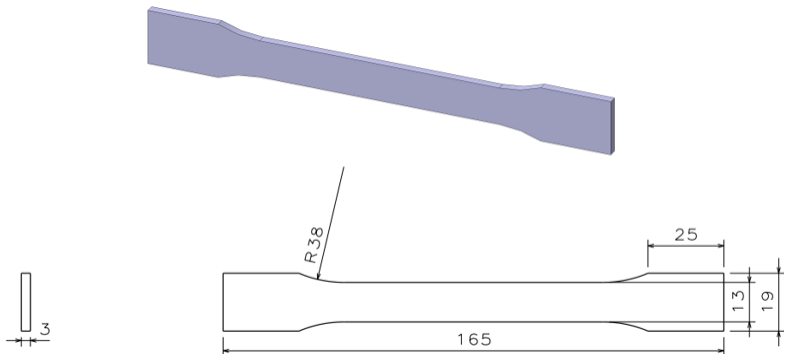


Figure 1. Dimensions of the test specimen according to ASTM D-638

The 3D-Printing Process

3D modeling of the test specimens was designed with CATIA software. The 3D model was converted to STL format for physical printing on the 3D printer. The STL file was then transferred to the computer controlling the 3D printer. As shown in Figure 2, a dogbone specimen was visualized on the 3D printer interface using Cura 5.9.0 software. With this software, parameters such as table and nozzle temperature, print speed, scan angle, and infill density can be easily adjusted. In this study, the table temperature was set to 50 °C, and the nozzle temperature was set to 210 °C. The printing speed was 50 mm/s, and the infill density was 100%. Five angles were used to examine the tensile strength of the specimens depending on the raster angles. These are 0°, 90°, 0°/90°, 45°, ±45° respectively. The raster angles are given in Figure 3.

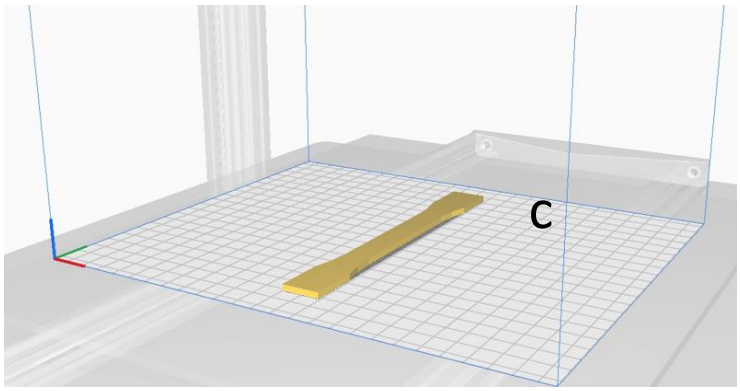


Figure 2. Dogbone specimen on 3D printer image captured from software Cura 5.9.0

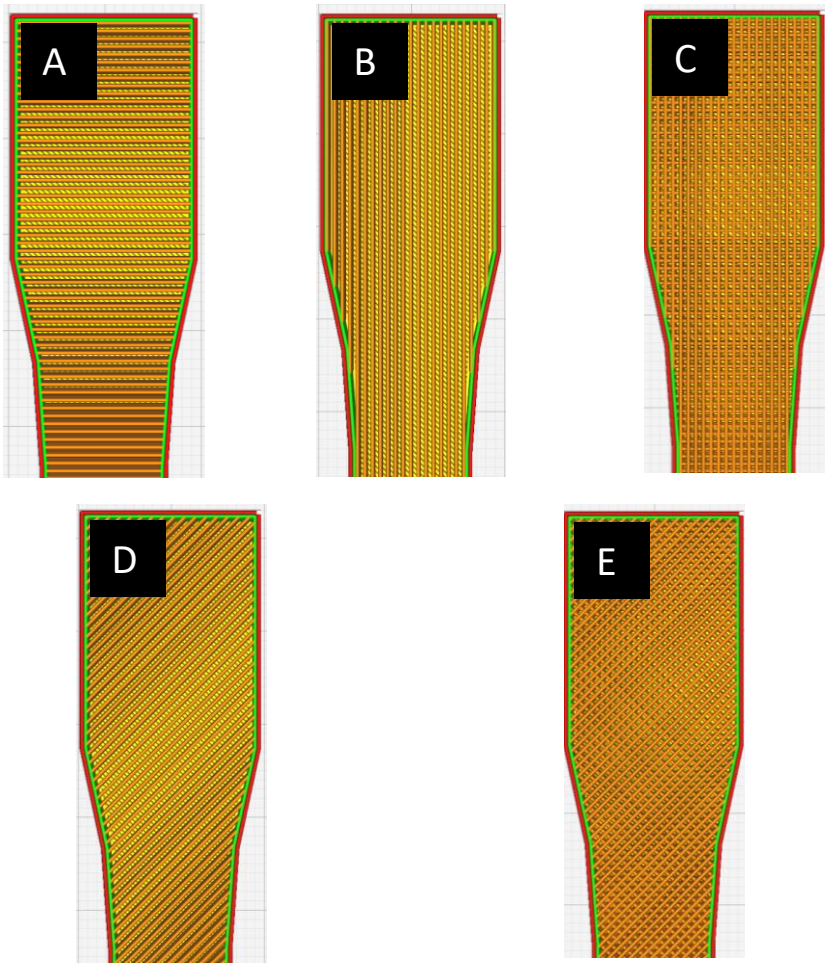


Figure 3. Raster angles of specimens (a) 0°, (b) 90°, (c) 0°/90°, (d) 45°, (e) ±45°

RESULTS AND DISCUSSION

Tensile Test

All the tensile test specimens were tested according to the ASTM D638 standard testing method for plastic material. A universal tensile testing machine with a capacity of 100 kN was used to determine the mechanical properties. The displacement during the test was obtained from data from an extensometer placed on the specimen. To repeat the tests, 2 pieces of each sample were produced and tested at a speed of 5 mm/min.

Toughness is considered the ability of a material to resist tearing or breaking due to tensile load. The term toughness most commonly refers to the energy that a material absorbs as it fractures, and it is the material's modulus of toughness. In materials, stress, and strain curves for tensile tests, the maximum area under the curves measures the modulus of toughness.

Figure 4 shows a graph of the tensile result. In addition, the tensile test results given in Table 2 show the effect of the raster angle used on the mechanical performance of PLA+ specimens. By comparing the maximum force, elongation, and average values of the specimens tested at different raster angles, important findings were obtained about the load-carrying capacity and ductility of the material.

Specimens with 90° raster angle show the highest strength with an average maximum force of 1774.18 N. However, the elongation values are low and average 0.775 mm. This indicates that the material exhibits a more brittle behavior in this direction. The specimens with 0° raster angle have the lowest maximum force value (average 1314.29 N). Also, the elongation values are relatively low, averaging 0.66 mm. This indicates that specimens printed in this orientation have low load-carrying capacity. The combination of 0°/90° angles shows better mechanical performance compared to the 0° angle alignment, with an average maximum force of 1623.32 N. Elongation values are also slightly higher, with 0.91 mm. This combination offers more stable mechanical properties compared to the 0° orientation. The specimens printed with a 45° raster angle show a better load-carrying capacity compared to the specimens with a 0° raster angle, with an average force of 1571.11 N. Elongation values are 1.16 mm on average, and this orientation increases ductility. The combination with ±45° Raster Angle shows the highest ductility. The average maximum force is 1746.85 N, and the elongation value reaches up to 3.68 mm. This result shows that the cross-oriented fibers provide more deformation under stress, allowing the material to absorb more energy before fracture.
The data obtained show that the raster angle has a significant effect on the mechanical properties of PLA+ material. Specimens with a raster angle of 90° have the highest strength but poor ductility. The ±45° combination has the highest elongation capacity and increases ductility, making the material more resistant to fracture.

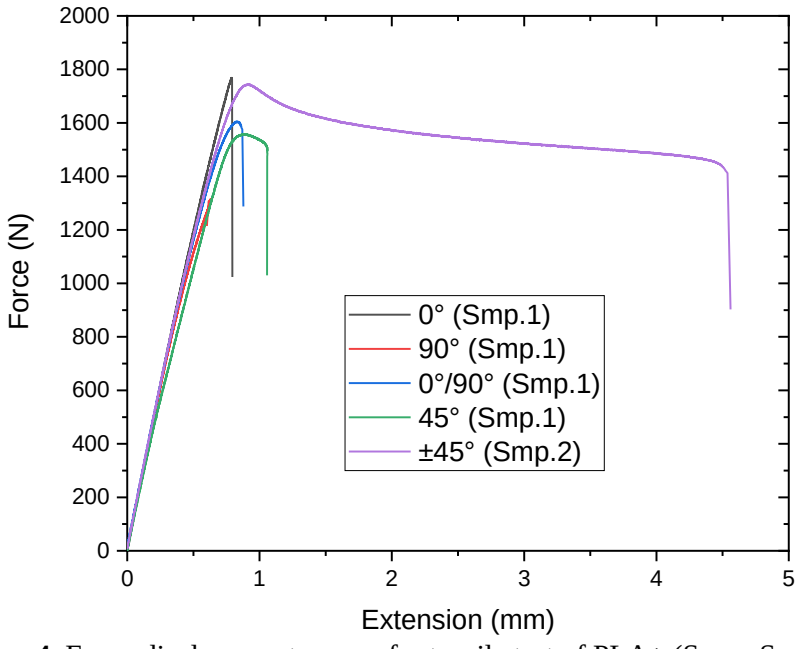


Figure 4. Force-displacement curves for tensile test of PLA+ (Smp.: Sample)

Table 2. The tensile test results for the PLA+ due to the raster angle

Raster Angle	Samples	Max. Force (N)	Extension (mm)	Average Force (N)	Average Extension (mm)
90˚	1	1768.70	0.79	1774.18	0.775
	2	1779.67	0.76		
0˚	1	1314.96	0.63	1314.29	0.66
	2	1313.63	0.69		
0˚/90˚	1	1605.32	0.87	1623.32	0.91
	2	1641.33	0.96		
45˚	1	1557.51	1.06	1571.11	1.16
	2	1584.71	1.27		
±45˚	1	1749.66	2.82	1746.85	3.68
	2	1744.04	4.55		

The mechanical properties presented in Table 3 show that PLA+ specimens exhibit different toughness, modulus of elasticity, and ultimate stress values depending on the raster angle. These results indicate that the material exhibits significant differences in load-carrying capacity and ductility. Stress-strain curves of the specimens are also given in Figure 5.

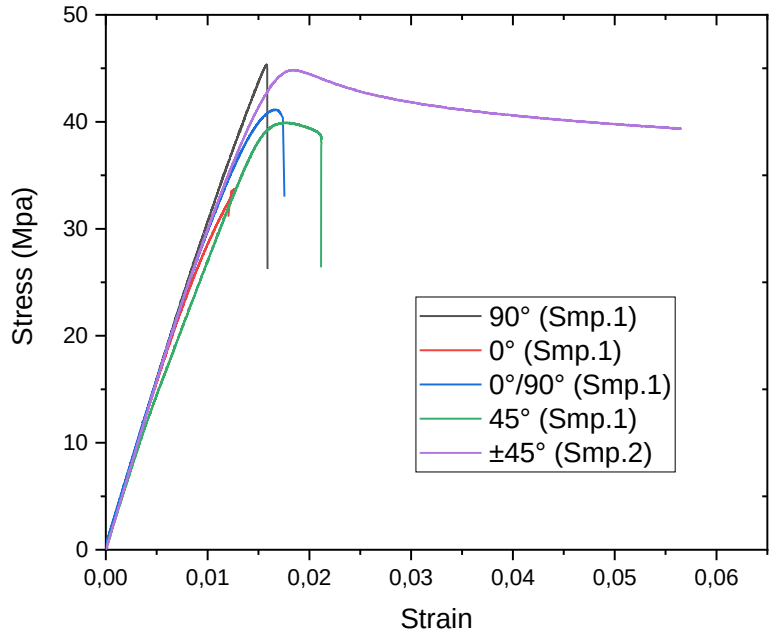


Figure 5. Stress-strain curves for tensile test of PLA+ (Smp.: Sample)

Table 3. Stress-strain results of PLA+ due to the raster angle

Raster Angle	Samples	Modulus Toughness (KJ/m^3)	Modulus Elasticity (GPa)	Ultimate Stress (Mpa)
90˚	1	383±8.26	3.21±0.04	45.35
	2	365±6.12	3.62±0.07	45.63
0˚	1	236±4.12	3.17±0.05	33.71
	2	252±5.46	3.22±0.04	33.68
0˚/90˚	1	433±5.28	3.25±0.08	41.16
	2	503±5.22	3.18±0.07	42.08
45˚	1	547±8.45	2.88±0.06	39.93
	2	732±6.62	2.98±0.06	40.63
±45˚	1	2055±13.20	3.20±0.05	44.83
	2	3352±21.32	3.21±0.06	44.71

Modulus of Toughness

The 90° raster angle specimens have a relatively high energy absorption capacity with toughness values of 383 ± 8.26 and 365 ± 6.12 kJ/m³. The specimens with 0° raster angle show the lowest toughness values of 236 ± 4.12 and 252 ± 5.46 kJ/m³. This indicates that it has a lower deformation capacity under load and exhibits a brittle structure. The 0°/90° specimens exhibit better toughness compared to the 0° specimens with values of 433 ± 5.28 and 505 ± 5.22 kJ/m³. Specimens with a raster angle of 45° show good energy absorption with a toughness value of 732 ± 6.62 kJ/m³ and 547±8.45. The ±45° combination has the highest toughness with values of 2055 ± 13.20 and 3352 ± 21.32 kJ/m³. This indicates that the cross-oriented fibers allow more deformation under load, and the material exhibits ductile behavior.

Modulus of Elasticity

The modulus of elasticity values are between 2.88 GPa and 3.62 GPa. The 90° specimens have the highest modulus of elasticity (3.21-3.62 GPa). This shows that the stiffness of the material increases with this raster angle. The 0° raster angle specimens show a modulus of elasticity between 3.17-3.22 GPa, indicating that the material's stiffness is lower than the 90° specimens. The modulus of elasticity of the 0°/90° specimens was measured as 3.25 ± 0.08 GPa and 3.18 ± 0.07 GPa, respectively. The 45° oriented specimens have the lowest value in terms of modulus of elasticity, in the range of 2.88-2.98 GPa. The ±45° specimens show a balanced modulus of elasticity with 3.20-3.21 GPa. The findings are compatible with the literature (Aliotta et al., 2019).

Ultimate Stress

The ultimate stress values ranged from 33.68 MPa to 45.63 MPa. The 90° raster angle specimens have the highest ultimate stress value of 45.35-45.63 MPa. The 0° specimens have the lowest ultimate stress value of 33.68-33.71 MPa, indicating that the fiber orientation has a lower load-carrying capacity in this direction in accordance with

(Algarni, 2021). The ±45° oriented specimens exhibit high strength with ultimate stress values of 44.71-44.83 MPa. The findings confirm test results and are compatible with the literature (Çakan, 2021).

Fracture Specimens

The fracture zones of PLA+ 3D printed specimens after tensile tests are shown in Figure 6. The 0°, 90°, and 0°/90° raster angle specimens have flat fracture surfaces perpendicular to the loading direction. However, the fracture direction of the 45° raster angle specimen has a 45°degree inclined surface. For the ±45 raster angle specimen, the fracture direction is almost perpendicular to the loading direction. Also, the fractured surfaces of the 45° and ±45° raster angle specimens have a very rough surface, while the 0°, 90°, and 0°/90° raster angle specimens have almost smooth surfaces. Such cases of fracture are linked to the orientation of the constructed layers and the melting and cooling of the PLA filament during the bonding between these layers. Due to the inherent brittleness of PLA material, no necking phenomenon was observed in any of the samples. Crack formation and propagation occurred in the middle part of some samples and in the end regions of others. These differences in the crack initiation points are related to FDM printing defects caused by various factors such as vibrations, printing errors, inhomogeneous infill density, overheating, insufficient material feeding, or air gaps. Specimens with printing flaws are susceptible to high-stress concentrations, which can initiate and propagate cracks (Algarni, 2021).

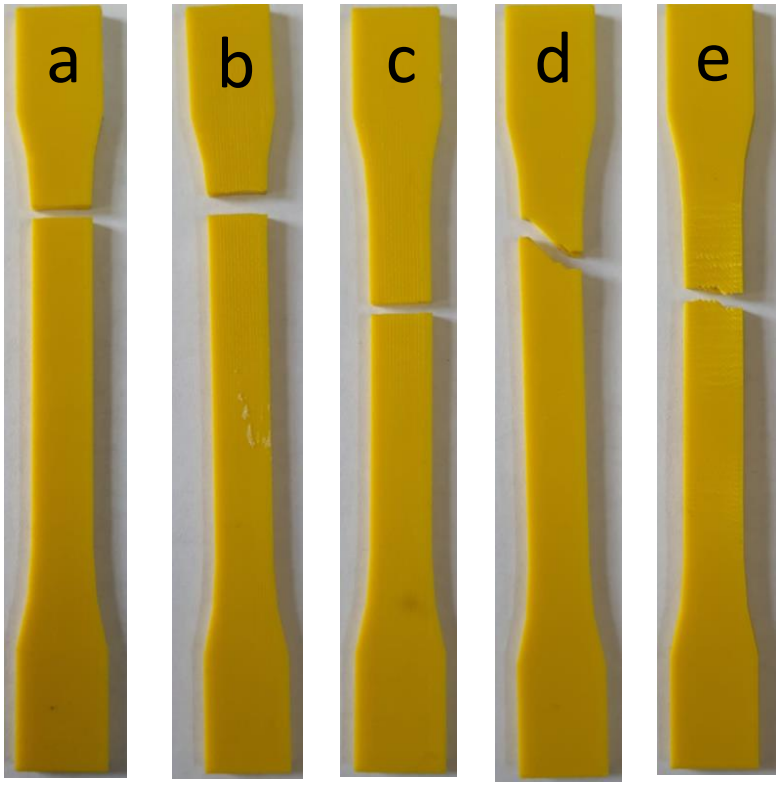


Figure 6. Specimens fractured under tensile load (a) 0°, (b) 90°, (c) 0°/90°, (d) 45°, (e) ±45°

CONCLUSION

In this study, the mechanical properties of PLA+ material produced at different raster angles (0°, 90°, 0°/90°, 45°, ±45°) were investigated by tensile testing. The specimen dimensions and tensile test were performed according to ASTM D-638 standard. As a result of the test, the effects on the toughness, modulus of elasticity, and tensile strength values of the material were investigated. The data obtained show that the raster angle has a significant effect on the mechanical properties of PLA+ specimens. Accordingly, the following findings were obtained.

- **Maximum Force:** The highest maximum force value, with an average value of 1774.18 N, was obtained at 90° raster angle. This result shows that the material has a higher load-carrying capacity at this angle. The lowest maximum force was obtained at 0° raster angle with an average value of 1314.29 N.
- **Elongation Amount:** The highest amount of elongation was obtained at the ±45° raster angle. This indicates that the material has a higher ductility at this angle. The lowest elongation was obtained at 0° raster angle.
- **Modulus of Toughness:** The highest toughness value was obtained at the ±45° raster angle. This result shows that the material has more energy absorption capacity at this angle. The lowest toughness value was obtained at 0° raster angle. This indicates that the material is more brittle at this angle.
- **Modulus of Elasticity:** The modulus of elasticity values do not vary greatly between the different raster angles. However, on average, the highest modulus of elasticity value was obtained at the 90° angle and the lowest at the 45° angle.
- **Ultimate Tensile Strength:** Tensile strength values vary depending on the raster angle. The highest tensile strength value was obtained at 90° angle. This result indicates that the material has a higher load-carrying capacity at this angle.
- **Fracture Specimens:** The fracture direction of PLA+ samples varied depending on the raster angle. Fracture surfaces were smooth in some samples and rough in others. These differences were caused by FDM printing errors and layer orientation of the material.

Acknowledgments

This study was supported by the Scientific Research Projects Coordination Unit (BAP) of Şırnak University, Şırnak, Turkey [grant number 2022.FNAP.06.05.01].

REFERENCES

Albadrani, M. (2023). Effects of Raster Angle on the Elasticity of 3D-Printed Polylactic Acid and Polyethylene Terephthalate Glycol. Designs, 7. https://doi.org/10.3390/designs7050112

Algarni, M. (2021). The Influence of Raster Angle and Moisture Content on the Mechanical Properties of PLA Parts Produced by Fused Deposition Modeling. Polymers, 13(2). doi:10.3390/polym13020237

Aliotta, L., Gigante, V., Coltelli, M., Cinelli, P., Lazzeri, A., & Seggiani, M. (2019). Thermo-mechanical properties of pla/short flax fiber biocomposites. Applied Sciences, 9(18), 3797. https://doi.org/10.3390/app9183797

Ayatollahi, M. R., Nabavi-Kivi, A., Bahrami, B., Yazid Yahya, M., & Khosravani, M. R. (2020). The influence of in-plane raster angle on tensile and fracture strengths of 3D-printed PLA specimens. Engineering Fracture Mechanics, 237, 107225. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2020.107225

Bagheri, A., & Jin, J. (2019). Photopolymerization in 3D Printing. ACS Applied Polymer Materials, 1(4), 593-611. https://doi.org/10.1021/acsapm.8b00165

Chia, H. N., & Wu, B. M. (2015). Recent advances in 3D printing of biomaterials. Journal of Biological Engineering, 9(1), 4. https://doi.org/10.1186/s13036-015-0001-4

Çakan, B. G. (2021). Effects of raster angle on tensile and surface roughness properties of various FDM filaments. Journal of Mechanical Science and Technology, 35(8), 3347-3353. https://doi.org/10.1007/s12206-021-0708-8

Duda, T., & Raghavan, L. V. (2016). 3D Metal Printing Technology. IFAC-PapersOnLine, 49(29), 103-110. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.11.111

Kangwanwatthanasiri, P., Suppakarn, N., & Ruksakulpiwat, Y. (2013). Biocomposites from cassava pulp/polylactic acid/poly(butylene succinate). Advanced Materials Research, 747, 367-370. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.747.367

Kessler, A., Hickel, R., & Reymus, M. (2020). 3D Printing in Dentistry—State of the Art. Operative Dentistry, 45(1), 30-40. https://doi.org/10.2341/18-229-l

Lalegani, M., & Mohd ariffin, M. k. a. (2020). The Effects of Combined Infill Patterns on Mechanical Properties in FDM Process. Polymers, 12, 2792. https://doi.org/10.3390/polym12122792

Lee, J.-Y., An, J., & Chua, C. K. (2017). Fundamentals and applications of 3D printing for novel materials. Applied Materials Today, 7, 120-133. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apmt.2017.02.004

Quan, H., Zhang, T., Xu, H., Luo, S., Nie, J., & Zhu, X. (2020). Photo-curing 3D printing technique and its challenges. Bioactive Materials, 5(1), 110-115. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.bioactmat.2019.12.003

Rajpurohit, S. R., & Dave, H. K. (2019). Analysis of tensile strength of a fused filament fabricated PLA part using an open-source 3D printer. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 101(5), 1525-1536. https://doi.org/10.1007/s00170-018-3047-x

Shahrubudin, N., Lee, T. C., & Ramlan, R. (2019). An Overview on 3D Printing Technology: Technological, Materials, and Applications. Procedia Manufacturing, 35, 1286-1296. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.06.089

Vakharia, V. S., Kuentz, L., Salem, A., Halbig, M. C., Salem, J. A., & Singh, M. (2021). Additive manufacturing and characterization of metal particulate reinforced polylactic acid (pla) polymer composites. Polymers, 13(20), 3545. https://doi.org/10.3390/polym13203545

Verma, P., Ubaid, J., Schiffer, A., Jain, A., Martínez-Pañeda, E., & Kumar, S. (2021). Essential work of fracture assessment of acrylonitrile butadiene styrene (ABS) processed via fused filament fabrication additive manufacturing. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 113(3), 771-784. https://doi.org/10.1007/s00170-020-06580-4

Zhang, F., Wei, M., Viswanathan, V. V., Swart, B., Shao, Y., Wu, G., & Zhou, C. (2017). 3D printing technologies for electrochemical energy storage. Nano Energy, 40, 418-431. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2017.08.037

KSÜ Mühendislik Bilimleri Dergisi, 28(2), 2025
Araştırma Makalesi

KSU J Eng Sci, 28(2), 2025
Research Article

Kahramanmaras Sutcu Imam University
Journal of Engineering Sciences

Geliş Tarihi : 18.02.2025
Kabul Tarihi :21.04.2025

Received Date : 18.02.2025
Accepted Date : 21.04.2025

INNOVATIVE APPROACH TO ENVIRONMENTAL WASTE CLASSIFICATION WITH ENSEMBLE LEARNING MODELS

TOPLULUK ÖĞRENME MODELLERİ İLE ÇEVRESEL ATIK SINIFLANDIRMADA YENİLİKÇİ YAKLAŞIM

Mehmet Umut SALUR[1*] (ORCID: 0000-0003-0296-6266)
Nermin ELMAS[1] (ORCID: 0009-0004-5617-6344)

[1] Gaziantep Islam Science and Technology University, Department of Computer Engineering, Gaziantep, Turkey

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Mehmet Umut SALUR, mehmetumut.salur@gibtu.edu.tr

ABSTRACT

Increasing waste production and inadequate waste management have further complicated global environmental problems. The limited natural resources and the damage caused by waste to the environment necessitate the improvement of waste management systems. Accurate and effective classification of waste provides both economic benefits and reduces environmental impacts. In this study, a hybrid approach is presented by combining deep learning, machine learning, and ensemble learning techniques to classify environmental waste. ResNet50, InceptionResNet-V2, and DenseNet169 models were used, and these models were fine-tuned using pre-trained weights. We created an ensemble model by combining the feature maps obtained from each model. Among the features extracted by the ensemble deep learning model, the most effective features were determined with ANOVA, Variance Threshold, Mutual Information, Random Forests, Lasso, RFE, PCA, and Ridge Regression feature selection methods. The selected features were classified with SVM, MLP and Random Forest, XGBoost, hard voting, and soft voting methods. This study presents the contributions of both individual and ensemble models for environmental waste classification. The effectiveness of the proposed method was tested on two different datasets, and its effectiveness was verified. The results show that the proposed method can make a significant contribution to waste management and recycling processes.

Keywords: Waste classification, ensemble learning, machine learning, deep learning, feature selection.

ÖZET

Artan atık üretimi ve yetersiz atık yönetimi, küresel çevre sorunlarını daha da karmaşık hale gelmiştir. Doğal kaynakların sınırlılığı ve atıkların çevreye verdiği zararlar atık yönetim sistemlerinin iyileştirilmesini zorunlu kılmaktadır. Atıkların doğru ve etkili sınıflandırılması hem ekonomik fayda sağlamakta hem de çevresel etkileri azaltmaktadır. Bu çalışmada, çevresel atıkların sınıflandırmak için derin öğrenme, makine öğrenmesi ve topluluk öğrenme knikleri birleştirilerek hibrit bir yaklaşım sunulmuştur. ResNet50, InceptionResNet-V2 ve DenseNet169 modelleri kullanılmış ve bu modeller önceden eğitilmiş ağırlıklar kullanılarak fine-tuning yapılmıştır. Her bir modelden elde edilen özellik haritaları birleştirilerek ensemble bir model oluşturulmuştur. Ensemble deep learning modeli tarafından çıkarılan öznitelikler arasından ANOVA, Variance Threshold, Mutual Information, Random Forests, Lasso, RFE, PCA ve Ridge Regresyon özellik seçim yöntemleri ile en etkili öznitelikler belirlenmiştir. Seçilen öznitelikler SVM, MLP ve Random Forest, XGBoost, çoğunluk oylama ve yumuşak oylama yöntemleriyle sınıflandırılmıştır. Bu çalışma çevresel atık sınıflandırmak için hem bireysel modellerin hem de ensemble modellerin sağladığı katkıları ortaya koymaktadır. Önerilen yöntemin etkinliği iki farklı veri kümesinde test edilmiş ve etkinliği doğrulanmıştır. Elde edilen sonuçlar, önerilen yöntemin atık yönetimi ve geri dönüşüm süreçlerine anlamlı bir katkı sağlayabileceğini göstermiştir.

ToCite: SALUR, M. U., & ELMAS, N., (2025). INNOVATIVE APPROACH TO ENVIRONMENTAL WASTE CLASSIFICATION WITH ENSEMBLE LEARNING MODELS. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 28(2), 933-956.

Anahtar Kelimeler: Atık sınıflandırma, topluluk öğrenimi, makine öğrenmesi, derin öğrenme, öznitelik seçimi.

INTRODUCTION

In everyday life, a range of environmental waste is produced from the consumption of food and beverages by individuals. Annually, over 2.01 billion tons of solid waste are generated globally, with merely 19% of this quantity being recycled (Kaza et al., 2018). Providing waste management and developing waste recycling systems are important for environmental sustainability. One of the important obstacles to the recycling of environmental waste is the separation of waste according to its type. This process is often costly in terms of both time and labour. However, today, developments in machine learning and deep learning, especially their high capabilities in image processing, offer significant opportunities in classifying environmental waste. The utilization of deep learning and machine learning techniques in environmental waste management is progressively rising.

Recent improvements have been achieved in the investigation of artificial intelligence techniques for waste classification. Deep learning algorithms, including Convolutional Neural Networks (CNN), have been extensively used for visual data classification (Poudel & Poudyal, 2022). However, individual models often exhibit high performance on specific types of data but are generally insufficient for overarching classification tasks (Meyen et al., 2021). To address this issue, ensemble learning methods combine the outputs of various models, providing greater accuracy and precise predictions (Şirin, E. (2017). The challenges encountered in the classification of environmental arise from various factors, including the lack of diversity and size in datasets, imbalances in data distribution, and the complexity of waste types (Shahab et al., 2022)(Abdu & Noor, 2022). DL models offer significant potential in overcoming these challenges by extracting meaningful features from waste images (Ma et al., 2023). Moreover, the use of transfer learning and data augmentation techniques has mitigated the problem of data scarcity (Hutchinson et al., 2017). However, dataset imbalance issues are more effectively addressed through ensemble learning techniques (W. Chen et al., 2024). In addition to ensemble learning, hyperparameter optimization plays a critical role in enhancing the performance of DL models. Zheng and Gu developed the EnCNN-UPMWS model, which implemented a different strategy for classifying household solid waste and attained 93% accuracy on the TrashNet dataset, outperforming other individual models (Zheng & Gu, 2021). Similarly, Single et al. evaluated the performance of DL models in real-world waste classification challenges and achieved 89% accuracy using the Inception V3 model (Single et al., 2023).

Ensemble DL and ensemble machine learning (ML) approaches achieve better classification performance compared to individual models. However, the absence of a model in the literature that integrates both approaches has served as the motivation for this study. In this research, a hybrid model based on ensemble DL and ML is proposed for the classification of environmental waste. In the proposed model, ResNet50, InceptionResNet-V2, and DenseNet169 DL models were fine-tuned and ensembled to extract features from environmental waste images. Subsequently, various feature selection methods, including ANOVA, Variance Threshold (VT), Mutual Information (MI), Random Forests (RF), Lasso, Recursive Feature Elimination (RFE), Principal Component Analysis (PCA), and Ridge Regression (RR), were applied to the features obtained from the ensemble model to identify high-quality features. The selected features were then used as input for Support Vector Machines (SVM), Multi-Layer Perceptron (MLP), Random Forest (RF), XGBoost, hard voting, and soft voting models. In the proposed approach, ensemble methods were employed in both the feature extraction and classification stages. The performance of the proposed model was tested on two different datasets. The key contributions of this study are presented as follows:

- A novel end-to-end hybrid classification model is proposed using an ensemble approach for environmental trash classification, integrating the advantages of both ML and DL.
- Fine-tuning was performed on ResNet50, InceptionResNet-V2, and DenseNet169 models, and an ensemble DL model was constructed by combining these three models.
- Multiple feature selection techniques, including as ANOVA, VT, MI, RF, Lasso, RFE, PCA, and RR, were used to choose the most important features. The effectiveness of these feature selection methods was evaluated.

- Hyperparameter optimization was performed for SVM, MLP, and RF ML algorithms. Environmental waste classification was conducted using XGBoost, hard voting, and soft voting ensemble ML models.

The second section of the paper presents the literature review, the third section details the methodology, the fourth section discusses the experimental results and analysis, and the final section provides the overall conclusions of the study.

LITERATURE REVIEW

The classification of environmental waste and the improvement of recycling processes are critically important for environmental sustainability. Ouedraogo et al. combined transfer learning and ensemble learning to process collected waste images and classify landfill waste into nine categories using InceptionResNet-V2, EfficientNetB3, and DenseNet201 models. While the InceptionResNet-V2, EfficientNetB3, and DenseNet201 models achieved accuracy rates of 86%, 87%, and 88%, respectively, the ensemble model outperformed them with the highest accuracy of 90% (Ouedraogo et al., 2023).

Salur et al. designed a smart waste container prototype using Raspberry Pi. The proposed system performs the tasks of detecting the discarded waste, capturing the image of the discarded waste, classifying the image with DL, and moving the waste to the category to which it belongs via a stepper motor. In the system, DL models. ResNet50, DenseNet201, DenseNet169, Inception-V3, and VGG16 are used to determine the category of the waste. The highest classification accuracy was achieved with the DenseNet169 model at 95.22%. The proposed system has the potential to reduce manual labor and optimize recycling processes (Salur et al., 2024).

Al Duhayyim et al. implemented hazardous and non-hazardous waste detection and classification using the HWDC-EL (Hybrid Weighted Deep Classification - Ensemble Learning) technique. Additionally, the Flower Pollination Algorithm (FPA) was utilized to optimize the hyperparameters of EfficientNet and DenseNet121 models. A weighted voting-based ensemble classifier was constructed using three ML algorithms: Support Vector Machines (SVM), Extreme Learning Machine (ELM), and Gradient Boosting Tree (GBT). The HWDC-EL classifier achieved the highest classification accuracy of 98% (Al Duhayyim et al., 2023).

Zheng and Gu proposed a novel ensemble learning model, EnCNN-UPMWS, based on CNNs and an Unequal Precision Measurement Weighting Strategy (UPMWS). In the proposed method, various deep learning models, including ResNet50, MobileNetV2, and GoogLeNet, are employed as classifiers. The UPMWS strategy was applied to determine the weight coefficients of the ensemble models. The proposed model is tested on the TrashNet dataset. The EnCNN-UPMWS model achieved a 93% accuracy, outperforming other DL models (Zheng & Gu, 2021).

Yıldız et al. utilized AlexNet, GoogLeNet, ResNet50, DenseNet201, ShuffleNet, and SqueezeNet architectures for environmental waste classification. Feature maps were extracted using the DenseNet201 architecture, and these features were fed into Support Vector Machines (SVM), K-Nearest Neighbors (KNN), and Decision Trees (DT) algorithms. The combination of the DenseNet201 architecture with SVM, DT, and KNN classifiers resulted in classification accuracies of 89%, 66%, and 83%, respectively (Yıldız et al., 2023).

Single et al. aimed to provide a more accurate and scalable alternative to traditional waste classification methods (such as visual inspection, weight measurement, and manual sorting) by utilizing various CNN models, including VGG-16, InceptionResNetV2, DenseNet121, Inception V3, and MobileNetV2. The study demonstrated the practical applications of DL in waste classification by using real-world examples in the newly developed RealWaste dataset. Among the tested models, Inception V3 achieved the highest classification performance with an accuracy of 89.19% (Single et al., 2023). Similarly, Younis and Obaid conducted a performance comparison of five commonly used CNN models (EfficientNet, VGG-19, GoogLeNet, ResNet152, and ShuffleNet) on the RealWaste dataset. Their results showed that EfficientNet achieved the highest test accuracy of 96.31%, significantly outperforming the other models (Younis & Obaid, 2024).

Toğaçar et al. reconstructed the waste classification dataset using an AutoEncoder. Features were extracted from the dataset using AlexNet, GoogLeNet, and ResNet50 models, and these feature sets were combined. The Ridge Regression (RR) method was applied to the merged feature set to reduce the number of features. After feature selection, the highest accuracy of 99% was achieved using the SVM classifier (Toğaçar et al., 2020).

Chatterjee et al. investigated the effectiveness of transfer learning and ensemble learning approaches in the automated classification of transparent plastic bottles into well-mannered and poorly-mannered categories. InceptionV3, Xception, ResNet152, and DenseNet169 architectures were used as baseline models for classification. They developed IncepX-Ensemble, an ensemble model based on InceptionV3 and Xception. To address the dataset imbalance problem, data augmentation techniques were applied. As a result, the proposed method achieved 99% accuracy in classifying transparent plastic bottles (Chatterjee et al., 2022).

Santoso et al. have proposed a hybrid approach that combines transfer learning and dimensionality reduction methods to achieve high accuracy in the classification of solid waste. They used CNN and EfficientNet models for feature extraction and PCA for dimensionality reduction. The features extracted from CNN and EfficientNet were combined and sent to the classifier layer. The joint evaluation of both local and global visual features has enhanced the model's success (Santoso et al., 2024)

Yulita et al. performed feature extraction using the Inception V3 model for waste classification. The extracted features were input into various ensemble learning models (XGBoost, AdaBoost, and RF) and classified. XGBoost has shown higher performance than all other algorithms, and it has performed well in cases of class imbalance.

Wu et al. proposed a two-level ensemble CNN model that takes images with different colors and features as input to classify environmental waste. The outputs of two different CNN models operating at the first level are transferred to a third CNN at the second level, not only as class probabilities but also along with the feature maps obtained from the intermediate layers. The CNN at the second level learns multidimensional information to understand which model is more reliable in which situations and classifies complex patterns more accurately.

In the literature on environmental waste classification, studies have primarily focused on transfer learning, ensemble learning, feature extraction and optimization techniques, data augmentation, addressing data imbalance issues, and the combination of ML and DL approaches. Compared to existing studies, the novelty of the proposed model in this research lies in its end-to-end integration of multiple techniques, including fine-tuning DL models, constructing an ensemble model by combining different architectures, applying various feature extraction methods, performing hyperparameter optimization for ML algorithms, and implementing ensemble ML within a single framework.

METHODOLOGY

This study proposes an end-to-end model that utilizes ensemble learning for environmental waste classification. The proposed model has been applied to two different datasets. It consists of three main stages: feature extraction using ensemble DL, feature selection, and classification using ensemble ML. The overall diagram of the proposed model is presented in Figure 1. We propose an end-to-end hybrid model based on ensemble DL and ensemble ML for the classification of environmental waste. The core idea of this integrated approach is the assumed synergy between robust feature extraction and robust classification. Ensemble learning models provide higher performance than individual classifiers since they combine the power of various classifiers. In this direction, in our proposed method, we adopt the ensemble learning approach both in the feature extraction phase with DL models and in the ML classification phase. However, the outputs of the deep learning models have formed high-dimensional feature sets. In this case, we made improvements through feature selection to retain only the most discriminative information. Then, we reasoned that applying ensemble ML techniques (such as soft voting using SVM, MLP, and RF as base models) to these selected features would provide a more reliable and accurate final classification than relying on a single ML model or the direct output of the ensemble DL stage. In fact, this two-stage ensemble strategy aims to leverage the complementary strengths of deep feature learning and ML classification paradigms.

In the proposed method for environmental waste classification, the datasets were initially randomly split into 80% train and 20% test. During the transfer learning, ResNet50, InceptionResNet-V2, and DenseNet169 models, pre-trained on ImageNet, were utilized. Global Average Pooling, Dense, and Dropout layers were added to each model for fine-tuning. The outputs of these models were then combined to generate the main model feature vector. This combined feature vector was further processed through batch normalization, dense, and dropout layers to construct the feature set. Various feature selection methods, including ANOVA, VT, MI, RF, Lasso, RFE, PCA, and RR, were applied to select between 5 and 200 features. After feature selection, the selected features were fed into SVM, MLP, and RF algorithms, optimized using the GridSearchCV method, and their performances were recorded. In addition to ML models, the performance of ensemble methods, including XGBoost, hard voting, and soft voting, was

evaluated on the selected feature sets. The proposed model integrates ensemble DL for feature extraction and ensemble ML for classification. The performance of the proposed model was validated on two different datasets.

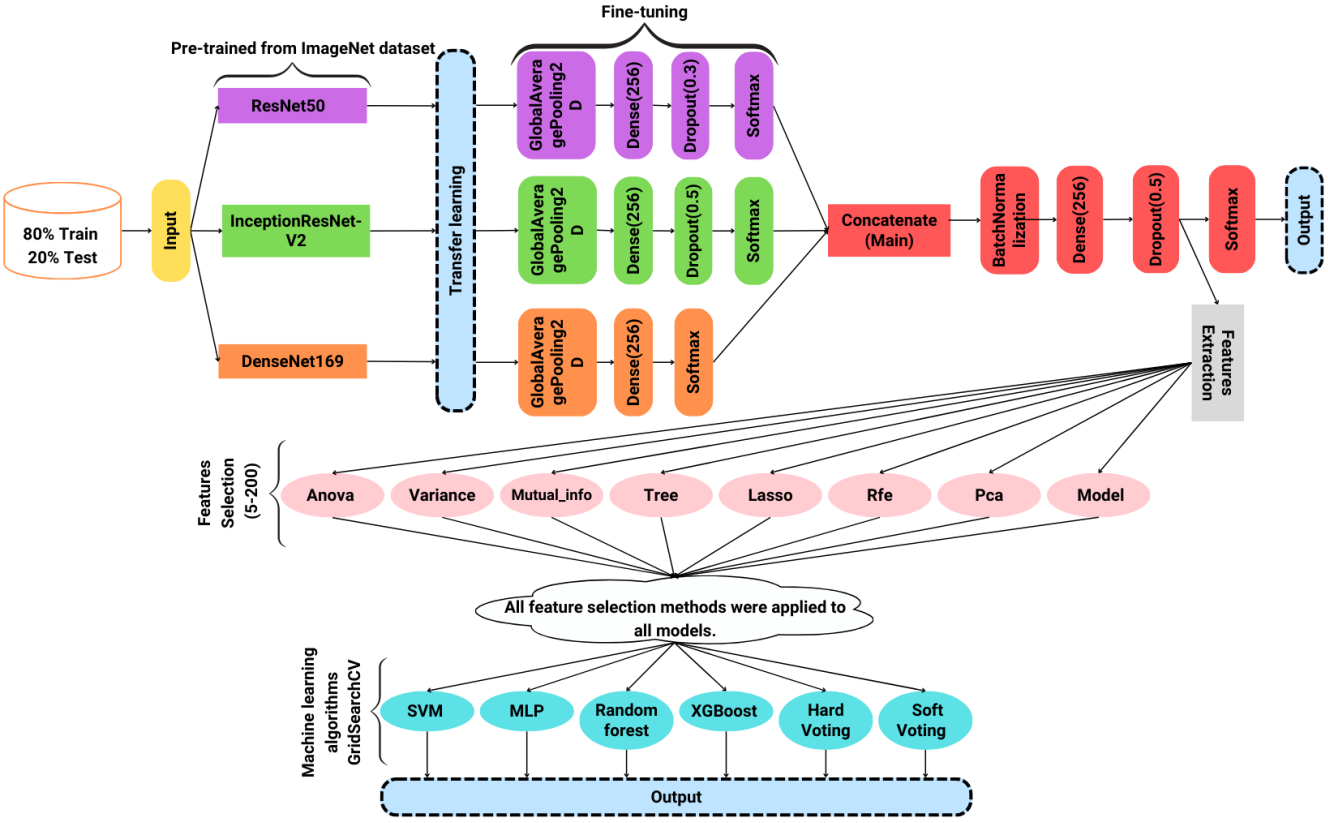


Figure 1. Diagram of the Proposed End-to-End Ensemble Model

Datasets

There are some open access shared datasets for the classification of environmental waste. In order to test the classification performance of the proposed model, two datasets frequently used in the literature were used. This section presents the characteristics of these datasets and their sample distributions.

Dataset-1

The Garbage Classification dataset was utilized to test the performance and analyze the generalization potential of the proposed model. The Garbage Classification dataset is widely preferred in the literature and was published in 2021 (*Garbage Classification*, 2021). The reliability of the dataset is ensured by its availability on the Kaggle platform and the assumption that it is correctly labeled. The dataset consists of a total of 2527 images and includes six classes: cardboard, glass, metal, paper, plastic, and trash. The distribution of images used for training and testing in each class is presented in Figure 2. The dataset is imbalanced in terms of sample distribution. Since ensemble learning can effectively handle class imbalance problems, the performance of the proposed model on this dataset is expected to be more significant compared to a dataset with a balanced distribution.

Dataset-2

To further evaluate the efficacy of the proposed model, the RealWaste dataset was utilized as the secondary dataset (Single et al., 2023). The RealWaste dataset is relatively new in the literature and comprises real-world waste samples. It consists of a total of 4752 images categorized into nine classes: cardboard, food organics, glass, metal, miscellaneous trash, paper, plastic, textile trash, and vegetation. The number of images used for training and testing in each class is presented in Figure 3. Similar to Dataset-1, the RealWaste dataset also exhibits an imbalanced distribution.

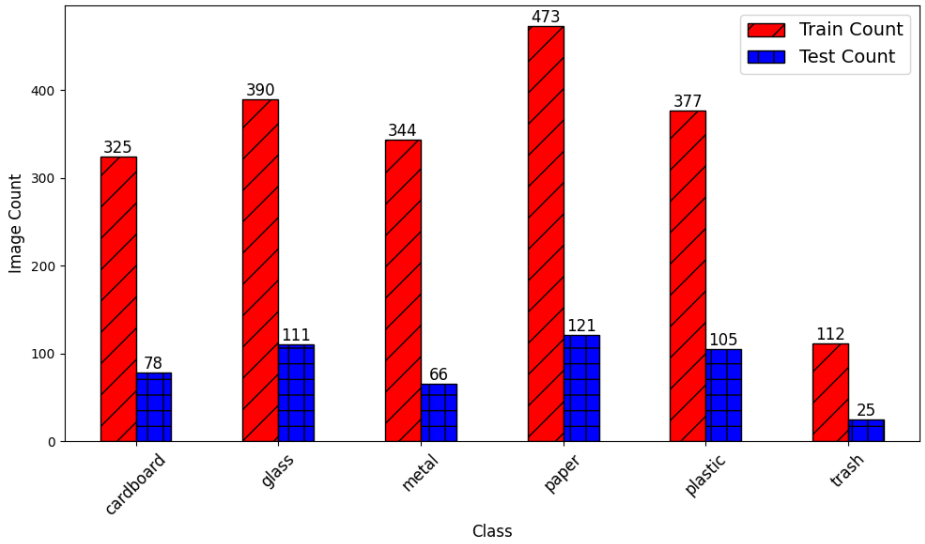


Figure 2. Class Distribution of Dataset-1

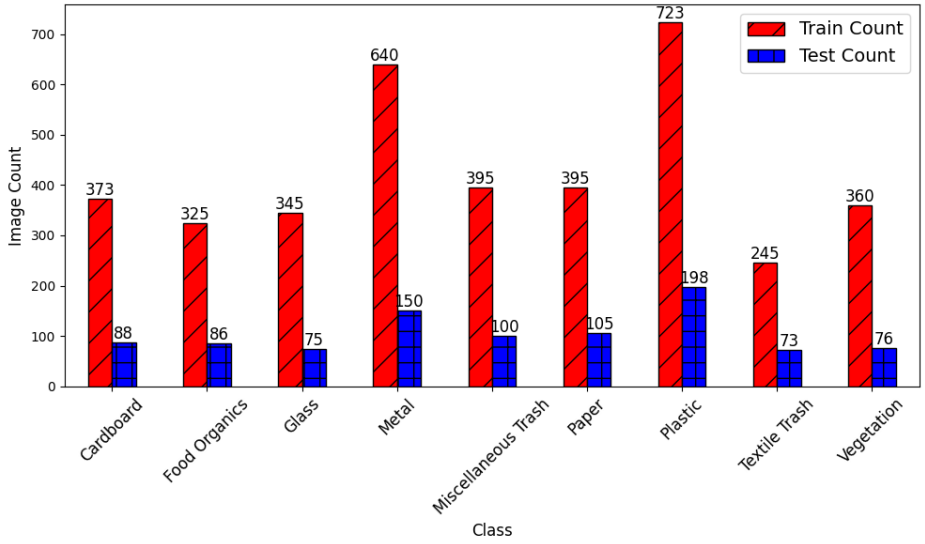


Figure 3. Class Distribution of Dataset-2

Deep Learning Classification Models

For the classification of environmental waste, fine-tuning and parameter optimization were performed to adapt the pre-trained ResNet50, InceptionResNet-V2, and DenseNet169 models to the datasets. Various experiments were conducted by modifying the number of trainable layers and the number of neurons in the dense layers added at the end of the models. Through fine-tuning, an effort was made to optimize computational cost efficiency. Additionally, ResNet50, InceptionResNet-V2, and DenseNet169 models were combined to construct an ensemble model. The details of the ResNet50, InceptionResNet-V2, DenseNet169, and the ensemble model used in this study are presented in Table 1.

Despite the availability of more recent models, we preferred ResNet50, InceptionResNet-V2, and DenseNet169 models owing to their established efficacy in image classification tasks, including waste classification in existing literature. For our objective of creating an ensemble model, these models have represented distinct and successful architectural paradigms (namely, residual connections, inception modules combined with residual connections, and dense connections). This variety in design has been intentionally chosen to pick up different useful features from the input images, which will improve the effectiveness of the next deep learning stage.

Table 1. Fine-tuning Parameters of Deep Learning Models

Model	Reference	Highlight	Layer freeze	Added layers
ResNet50	(He et al., 2016)	ResNet50 is a variant of the ResNet architecture consisting of 50 layers. It utilizes residual connections to address the vanishing gradient problem.	The first 143 layers were frozen, while the remaining layers were trained.	{GlobalAveragePooling2D, Dense (256 unit), Dropout (0.3), Dense (Softmax)}
InceptionResNet-V2	(Szegedy et al., 2017)	InceptionResNet-V2 integrates Inception modules with residual connections, reducing computational cost while achieving higher accuracy.	The last 30 layers were unfrozen, while the preceding layers were kept frozen.	{GlobalAveragePooling2D, Dense (256 unit), Dropout (0.5), Dense (Softmax)}
DenseNet169	(Huang et al., 2017)	By transferring the output of each layer to subsequent layers, it ensures efficient utilization of parameters. DenseNet169 is a 169-layer variant of DenseNet, allowing deep features to be effectively used for classification tasks.	The first 120 layers were frozen, while the remaining layers were trained.	GlobalAveragePooling2D, Dense (256 unit), Dense (Softmax)

The feature vectors (output tensors) extracted from the three models (ResNet50, InceptionResNet-V2, and DenseNet169) were merged using a concatenation layer. The goal was to leverage the diverse feature extraction capabilities of each architecture to build a more robust model. Features obtained from the intermediate or final layers of the models were combined using the Concatenation method, and these combined features were fed into the ensemble classifier. The effectiveness of ensemble methods is explained by their ability to balance individual model errors and enhance overall performance (Dietterich, 2000). The concatenated feature vectors were passed through BatchNormalization, Dense(256), Dropout(0.5), and Dense (Softmax) layers for classification. During the training phase of the ensemble model, the Adam optimizer, a low learning rate (0.00001), the categorical cross-entropy loss function, and accuracy as the performance metric were utilized. Additionally, EarlyStopping was applied during training to prevent the model from overfitting. The validation loss metric was monitored as the EarlyStopping criterion. It has been determined that training will be stopped if there is no improvement in the validation loss value for 5 consecutive times. Additionally, by using the 'restore_best_weights=True' parameter in the model, it was ensured that the model returns to the weights with the lowest validation loss. Thus, the model was ensured to stop at the optimum point and exhibit the best overall performance.

Ensemble models have higher computational costs than individual models. The individual DL models used in this study and the trainable parameter numbers of the ensemble DL model proposed for feature extraction from environmental wastes are presented in Table 2. The proposed ensemble model has approximately 82 M trainable parameters.

Table 2. Trainable Parameters of Deep Learning Models

Model	Trainable params
ResNet50	15.502.857
InceptionResNet-V2	54.671.977
DenseNet169	11.847.241
Main Ensemble DL	82.222.788

Feature vectors were extracted for each of the ResNet50, InceptionResNet-V2, DenseNet169, and Ensemble models. Separate feature vectors were generated for both train and test data for each model and saved in DataFrame format. These feature vectors were then stored as CSV files for use in feature selection and ML algorithms. The combination of different features learned from the three models enhanced the model's generalization capability and improved classification performance.

Feature selection

Feature selection (FS) is a critical preprocessing step in ML processes, aiming to enhance model performance by selecting the most important features from the dataset. This approach helps prevent overfitting and improves the

interpretability of the model. In the proposed model, we performed classification experiments on 8 different feature selection methods. We were to choose this set of methods to cover a variety of established techniques representing different FS approaches (filter, wrapper, embedding, and dimensionality reduction). Our motivation for applying feature selection methods with different characteristics comes from the ensemble use of deep learning models. Because in ensemble deep learning models, different models generate different levels of semantic representations of the same input image. In this case, some features may be more effective than others in the process of combining features. In this study, we observe this situation and analyze the performance of multiple feature selection methods. The methods used for FS in this study are as follows:

- **ANOVA**: ANOVA performs feature selection by statistically testing the relationships between independent variables and target class information. In this method, the variance ratio between groups is calculated using the F-statistic, and then it determines the variables that represent the differences between classes at a significant level (*Filtreleme Yöntemleri · Miuul*, 2021). This method uses techniques such as SelectKBest, which are frequently used in variable selection processes. SelectKBest evaluates each variable based on a specific statistical test and selects the k variable with the highest score. As a result, the selection of the most distinctive features that can contribute to the performance of the model is provided.
- **Variance Threshold (VT)**: This method relates feature selection to the variance of the feature. This method ensures that features with low variance are removed from the dataset. By setting a variance threshold, irrelevant or redundant features are removed from the dataset (Guyon & Elisseeff, 2003).
- **Mutual Information (MI):** This method is used in decision tree algorithms to measure the dependency between variables in determining the nodes. It is also used to determine the relationship between features and the target class variable in FS for a similar purpose. Features with higher mutual information scores are selected as they provide more information about the target variable (*Vergara al., 2014)*.
- **Random Forest (RF):** RF is a powerful ensemble learning model that uses decision trees. Calculates feature importance scores by evaluating each node split using methods such as the Gini index or entropy. Features that reduce impurity the most are considered more important (Genuer et al., 2020).
- **Lasso:** Performs direct feature selection by shrinking the coefficients of less important features towards zero. This approach, which applies L1 regularization, is an effective solution for datasets with excessive irrelevant or redundant features (Tibshirani, 1996).
- **Recursive Feature Elimination (RFE):** RFE is a computationally expensive method that tries to find the most valuable features by starting from the entire feature set and eliminating the less important features from the dataset after each training for feature selection. (Guyon et al., 2002).
- **Principal Component Analysis (PCA):** PCA is a dimensionality reduction technique that transforms data into a new coordinate system, where each axis represents a principal component. Since the features extracted from the DL model are generally in high dimensions, this method is effective in dimension reduction in DL models. PCA selects the components that explain the maximum variance in the dataset (Greenacre et al., 2022).
- **Ridge Regression (RR)**: RR ranks each feature's influence on the target variable and chooses the most significant ones. In order to prevent overfitting during feature selection and train the model appropriately, ridge regression is applied. The model ranks the value of every feature, chooses the top k most significant ones, and reorganizes the train and test sets based on the features that were selected (McDonald, 2009).

Machine learning models

In this study, Support Vector Machines (SVM), Multi-Layer Perceptron (MLP), and Random Forest (RF) were used as individual models for environmental waste classification, while XGBoost, hard voting, and soft voting were employed as ensemble methods. For the hard voting and soft voting ensemble classifiers, SVM, MLP, and RF were used as base models.

- **SVM:** A powerful method used for both linear and nonlinear classification problems. It constructs hyperplanes to classify data and aims to maximize the margin between two classes. With the use of kernel

functions (such as RBF and polynomial), it can also achieve effective results on nonlinear data (Kanevski et al., 2002).

- **MLP:** A feedforward artificial neural network commonly used to learn complex relationships between data. It consists of an input layer, hidden layers, and an output layer. Learning is performed through the backpropagation algorithm (Pinkus, 1999).
- **RF:** An ensemble method formed by combining multiple decision trees. The final prediction is made by voting or averaging the outputs of each tree. It is particularly robust against noisy data and helps reduce the risk of overfitting (Genuer et al., 2020).
- **XGBoost:** An improved version of the gradient boosting algorithm. It is known for its fast execution and ability to achieve effective results in large datasets due to its regularization techniques. It is widely used in classification and regression problems (T. Chen & Guestrin, 2016).
- **Soft Voting:** Combines the probability values of predictions from multiple models and selects the class with the highest average probability. This method integrates the strengths of different models, leading to more balanced results (Dietterich, 2000).
- **Hard Voting:** Uses the class labels predicted by each model and determines the final class based on majority voting (Dietterich, 2000). An odd number of models is used, and the class predicted by the majority is considered the true class.

ML algorithms, while powerful for solving complex classification problems such as environmental waste classification, each have their individual advantages and limitations. In this study, GridSearchCV was used to select the parameters that best fit the algorithms to the datasets to obtain maximum performance from each algorithm. The highest performance of each algorithm for Dataset-1 and Dataset-2 was achieved with the parameters given in Table 3.

Table 3. Machine Learning Models Discovered Using GridSearchCV

	Hyperparameters	
Machine learning models	*Dataset-1 (Gc)*	*Datset-2 (Real weste)*
SVM	{'C': 10, 'gamma': 0.01, 'kernel': 'rbf'}	{'C': 10, 'gamma': 0.01, 'kernel': 'rbf'}
RF	{'criterion': 'gini', 'max_depth': None, 'n_estimators': 50}	{'criterion': 'entropy', 'max_depth': 10, 'n_estimators': 100}
MLP	{'hidden_layer_sizes': (100, 50), 'learning_rate_init': 0.001, 'max_iter': 500}	{'hidden_layer_sizes': (50, 50), 'learning_rate_init': 0.001, 'max_iter': 500}
XGBoost	{'learning_rate': 0.2, 'max_depth': 7, 'n_estimators': 100}	{'learning_rate': 0.2, 'max_depth': 7, 'n_estimators': 100}

Implementation Details

During the model development process, the TensorFlow library was used, and models were implemented using the Keras API. Pre-trained DL models such as ResNet50, DenseNet169, and InceptionResNet-V2 were fine-tuned using ImageNet weights. Image augmentation was applied using ImageDataGenerator to prepare the image data. During the training process, the Adam optimization algorithm and EarlyStopping were employed to control the learning rate and prevent overfitting. For feature extraction, intermediate layer outputs of ResNet50, DenseNet169, and InceptionResNet-V2 models were used to generate separate feature vectors, which were later combined. In this process, libraries such as NumPy and Pandas were utilized for data manipulation.

The performance of different ML models, including SVM, KNN, and RF, was analyzed. Additionally, VotingClassifier was used with both hard voting and soft voting to combine the outputs of multiple models. At the end of the training process, the final models and extracted feature vectors were executed in the Google Colab environment, and the data was stored on Google Drive.

Performance Metrics

The performance evaluation of the classification methods for environmental waste images in both datasets was conducted using well-established metrics from the literature. The confusion matrix is presented in Figure 4. The performance of the models was assessed using Accuracy (Equation 1), Precision (Equation 2), Recall (Equation 3), F-score (Equation 4), and ROC-AUC (Equations 5 and 6).

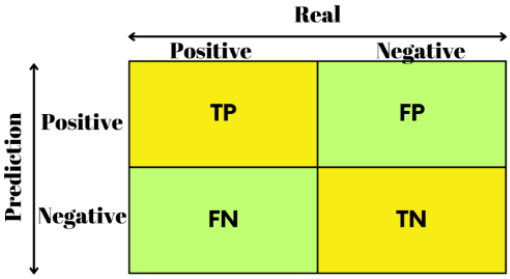


Figure 4. Confusion Matrix

$$\text{Accuracy} = (\text{TP} + \text{TN})/(\text{TP} + \text{TN} + \text{FP} + \text{FN}) \quad (1)$$

$$\text{Recall} = \text{TP}/(\text{TP} + \text{FN}) \quad (2)$$

$$\text{Precision} = \text{TP}/(\text{TP} + \text{FP}) \quad (3)$$

$$\text{F} - \text{score} = 2 * ((\text{Precision} * \text{Recall})/(\text{Precision} + \text{Recall})) \quad (4)$$

$$\text{False Positive Rate (FPR)} = \text{FP}/\text{FP} + \text{TN} \quad (5)$$

$$\{\text{ROC} - \text{AUC}\} = \int_0^1 \{\text{Recall(FPR)}\}, \text{d}(\{\text{FPR}\}) \quad (6)$$

EXPERIMENTAL RESULTS AND DISCUSSION

This section presents the classification performance of the proposed end-to-end ensemble model on Dataset-1 and Dataset-2.

Classification Results of the Dataset-1

The confusion matrix for ResNet50, InceptionResNet-V2, DenseNet169, and the ensemble DL models for Dataset-1 is presented in Figure 5. A detailed analysis of the matrices in Figure 5 reveals that the proposed ensemble DL method achieves higher accuracy than the other individual DL models. The ensemble DL model misclassifies only 28 out of 506 images. Moreover, InceptionResNet-V2 achieved the second-best results following the ensemble DL method. On the other hand, InceptionResNet-V2 correctly predicted 464 waste images, while 42 images were misclassified. When the confusion matrices for each waste class are examined, it is seen that the ensemble DL model exhibits better classification performance than individual models for cardboard, metal, paper, and plastic classes. However, it is seen that the InceptionResNet-V2 model is better than the ensemble DL model for the glass class.

The test results of ResNet50, InceptionResNet-V2, DenseNet169, and the ensemble DL models in terms of Accuracy, Precision, Recall, F-score, and ROC-AUC metrics are presented in Figure 6. While the performance metrics for ResNet50, InceptionResNet-V2, and DenseNet169 models exhibit similar trends, the ensemble DL model shows a 5.05% increase in accuracy.

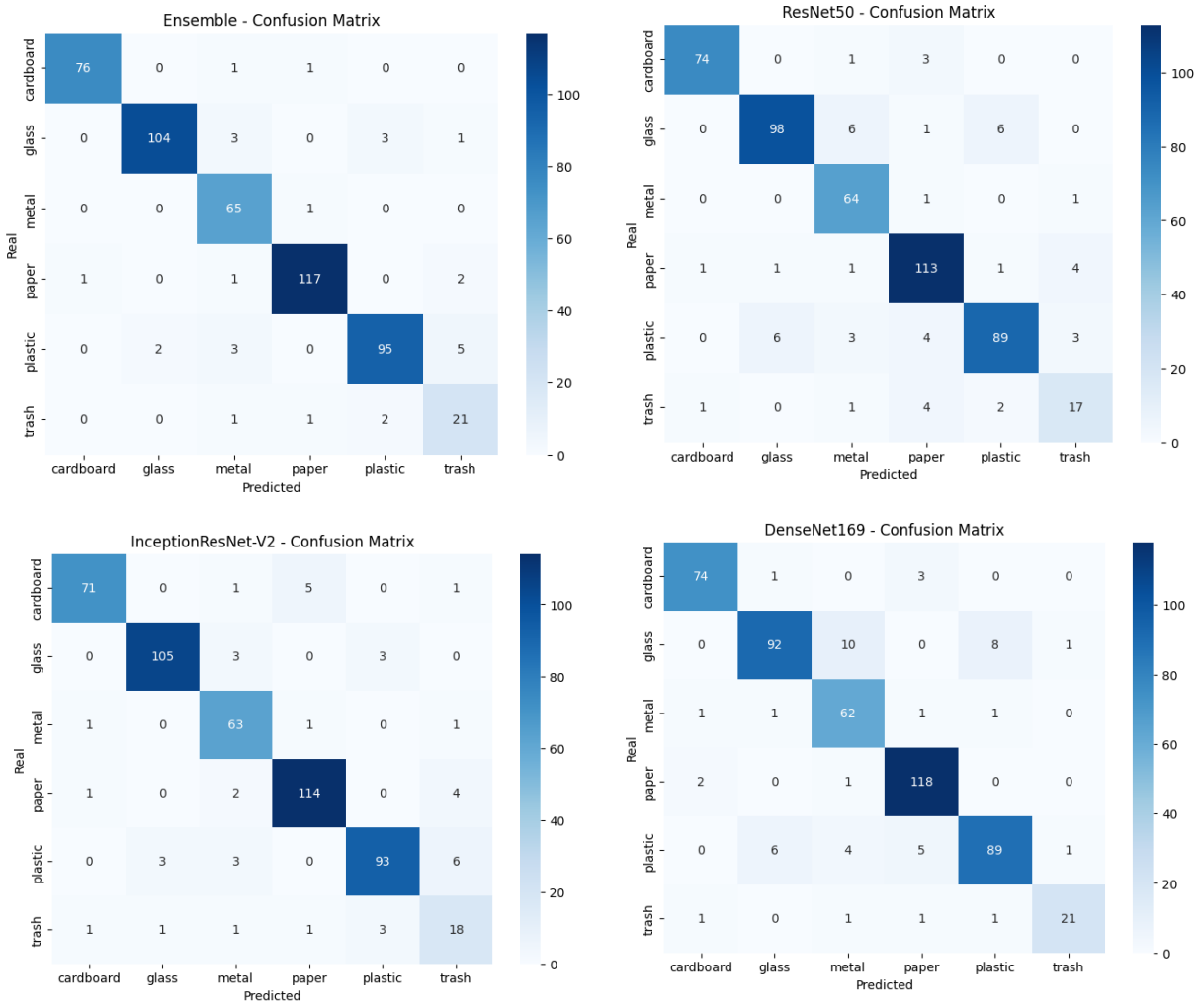


Figure 5. Confusion Matrices of ResNet50, InceptionResNet-V2, DenseNet169 and Ensemble DL Models in Dataset-1

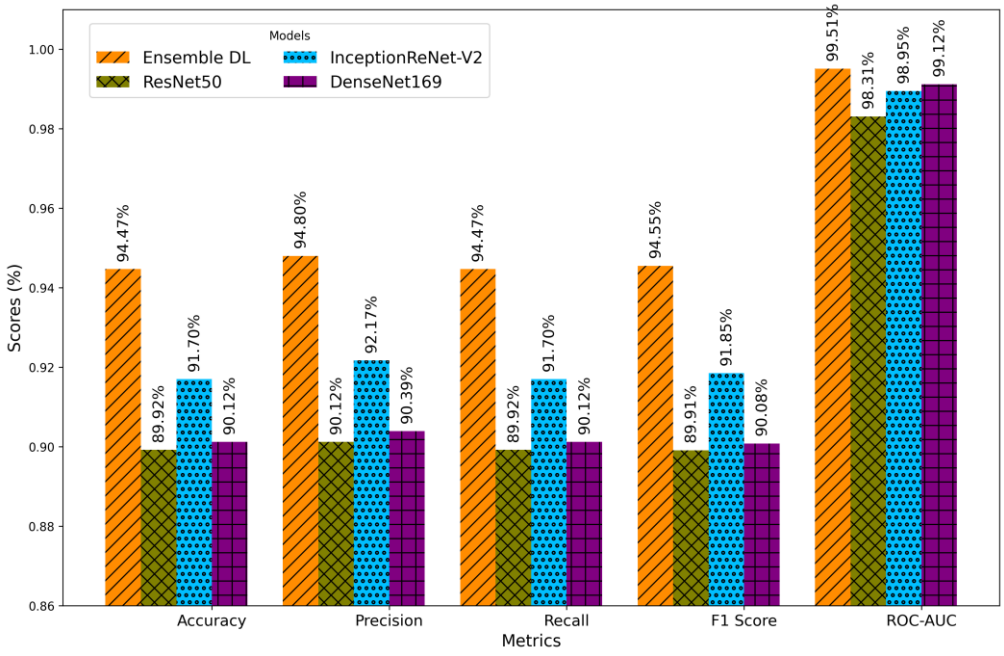


Figure 6. Performance Metrics of ResNet50, InceptionResNet-V2, DenseNet169, and the Ensemble DL Models in Dataset-1

Figure 7 illustrates the accuracy and loss of the models throughout the training and validation. Upon analyzing the curves, the train accuracy curve reveals that the accuracy rates of all models progressively rise, attaining elevated accuracy after 50 epochs. In the validation accuracy curve, the models' validation performance follows a trend parallel to their training performance. Observing the loss curve, both train loss and validation loss decrease as the number of epochs increases, demonstrating that the model optimization process progresses effectively. Notably, the ensemble DL model outperforms the other models by achieving lower validation loss and higher accuracy, indicating the best performance among them. These results confirm that the models were successfully trained and did not encounter issues such as overfitting during the validation phase. Furthermore, the superior performance of the ensemble DL model compared to the other models suggests that it generalizes better to the dataset.

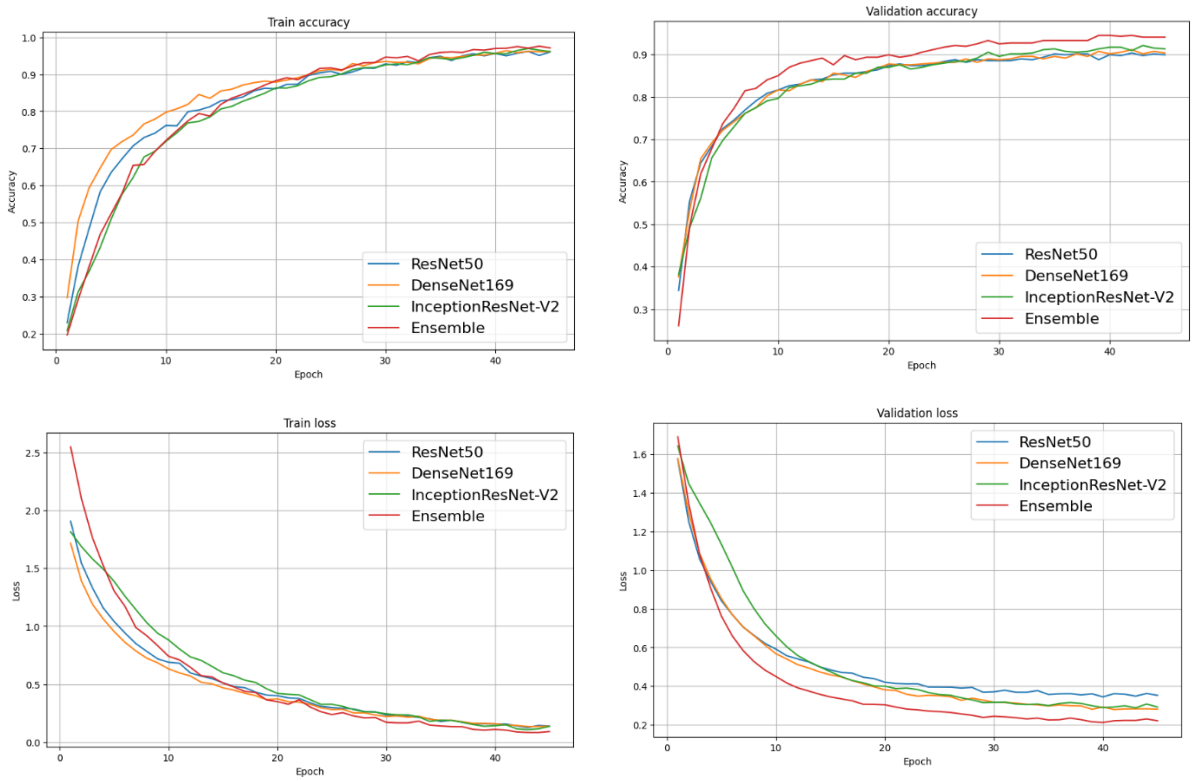


Figure 7. Accuracy and Loss of DL and Ensemble Models During the Train and Test in Dataset-1

The ML approach involved the installation of requisite libraries and the utilization of features derived from the ensemble DL. The labels in the dataset were converted into numerical values for classification algorithms, and the data was scaled using StandardScaler. During the feature selection phase, different feature subsets were created by applying ANOVA, VT, MI, RF, Lasso, RFE, PCA, and RR methods, increasing the number of selected features in increments of five between 5 and 200. Each of these feature subsets was classified using SVM, MLP, RF, and other classification algorithms. For ensemble ML models, SVM, MLP, and RF were used as base classifiers. Additionally, ensemble ML models were developed using XGBoost, hard voting, and soft voting methods. The classification results of the models were comprehensively evaluated using performance metrics such as accuracy, precision, recall, f-score, and ROC-AUC, along with confusion matrices. The classification results were analyzed to compare the performance of feature selection methods and algorithms and to determine the most suitable feature selection method and feature count combinations. Figure 8 illustrates that the Lasso method, utilizing 145 selected features alongside the soft voting ensemble model, attained the highest performance, evidenced by an accuracy of 95.26%. Among the reasons for the superior performance of the Lasso method with 145 features in the Soft Voting classifier is the L1 property, which performs feature selection by forcing the coefficients of less informative features to zero. Therefore, it is understood that Lasso's tendency to create sparse models with L1 regularization is better suited to the feature space of Dataset-1 compared to other methods.

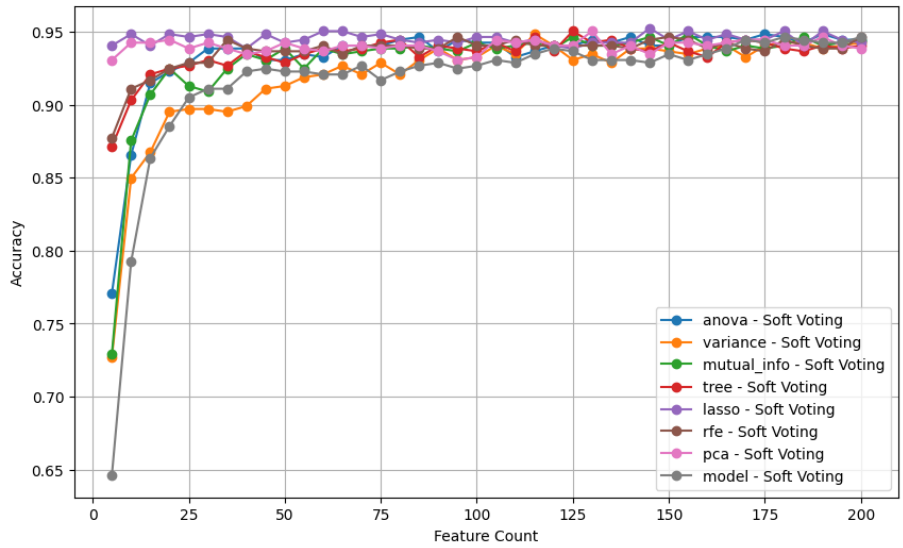


Figure 8. Accuracy Value of the Soft Voting Classifier in Dataset-1 Based on the Feature Selection Method and the Number of Selected Features

The results of accuracy, precision, recall, F1-score, and ROC-AUC metrics for ML and ensemble ML models are presented in Figure 9. The soft voting model demonstrated superior or comparable performance across all metrics, attaining a precision of 95.35%, recall of 95.26%, F1-score of 95.28%, and ROC-AUC of 99.21%. In the classification accuracy metric, both soft voting and hard voting outperformed the other individual models. Among the individual models, the RF model exhibited remarkable performance in the ROC-AUC metric, while the SVM and MLP models provided generally balanced results. However, the XGBoost model showed relatively lower classification performance metrics compared to the others. Considering that Dataset-1 has an unbalanced class distribution, it is obvious that the F1-measure will be important in model performance. The highest F1 score among the six models is 95.28% and 94.72% in soft voting and hard voting models, respectively.

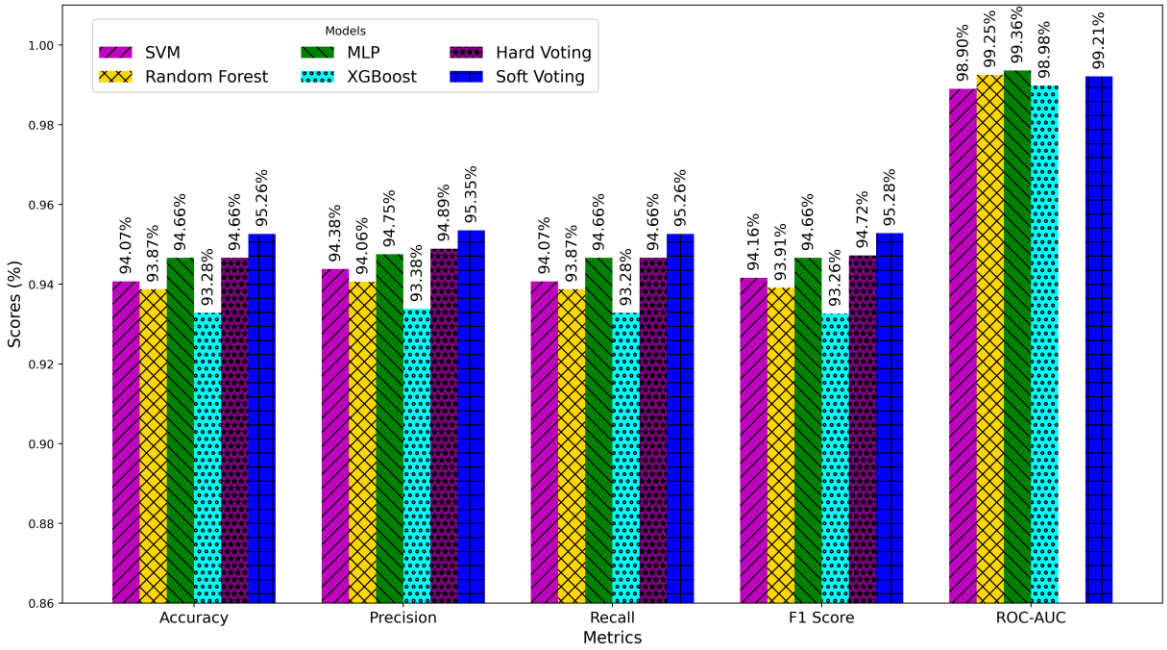


Figure 9. Performance Metrics of ML Models and Ensemble ML Models in Dataset-1

The confusion matrix of the soft voting ensemble ML model (Lasso-145 features) is presented in Figure 10. The examination of the matrix reveals that the proposed ensemble method achieved high classification accuracy. While 24 of the 506 images in Dataset-1 were misclassified, the remaining 492 images were correctly classified. When compared to the DL ensemble method, it was observed that the soft voting ensemble method correctly classified 4

more images. Class-wise analysis indicates that the best classification performance was achieved in the paper class, while the highest misclassification occurred in the trash class.

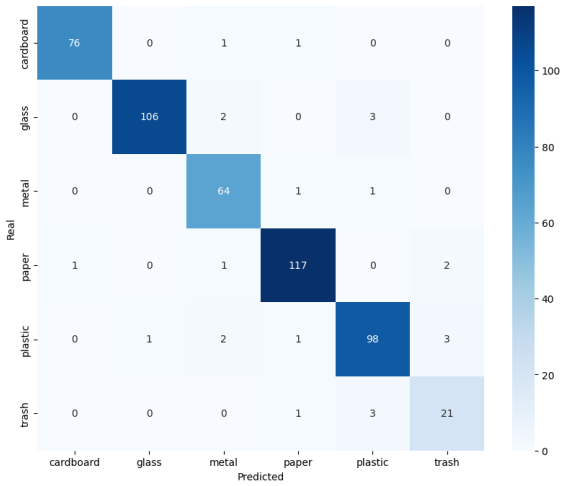


Figure 10. Confusion Matrix of the Soft Voting Model with Lasso-145 Features in Dataset-1

A heatmap summarizing the precision, recall, and F1-score performance metrics for different classes in the soft voting ensemble ML model is presented in Figure 11. The cardboard, glass, metal, paper, and plastic classes have metric values above 90%, indicating that the model has demonstrated a strong ability to distinguish these classes. This indicated that the model has effectively learned the characteristics of these waste types and can accurately classify them. However, the trash class stands out as the lowest-performing class, with precision of 81%, recall of 84%, and F1-score of 82%. These results indicate that the model makes more misclassifications in terms of false positives or false negatives for the trash class. The feature similarity of this class with other classes leads to increased misclassification.

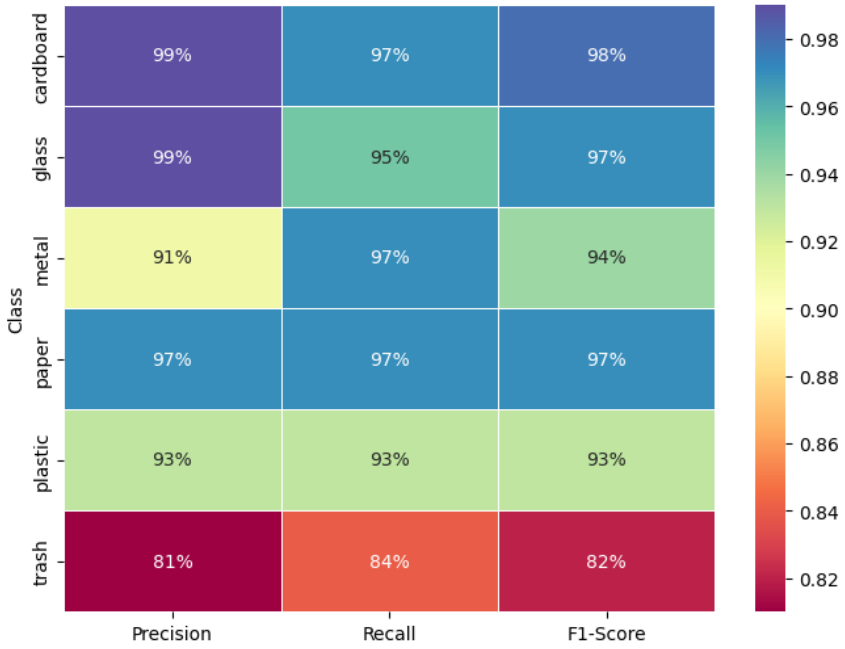


Figure 11. Heatmap of the Soft Voting Model with Lasso-145 Features in Dataset-1

Figure 12 demonstrates the performance metrics of the ensemble DL and ensemble soft voting ML models. The results in Figure 12 indicate that the soft voting model outperforms the ensemble DL model in terms of all classification metrics. The soft voting model achieved 95.26% accuracy, 95.35% precision, 95.26% recall, 95.28% F1-score, and 99.21% ROC-AUC, demonstrating its superior performance. On the other hand, the ensemble DL model attained 94.47% accuracy, 94.80% precision, 94.47% recall, 94.55% F1-score, and 99.51% ROC-AUC. The

ROC-AUC value of 99.51% in the ensemble DL model was found to be slightly higher than that of the ensemble ML soft voting model. However, the fact that soft voting achieved better results in accuracy, precision, recall, and F1-score highlights its potential to accurately predict positive classes and enhance overall classification performance. These findings indicate that soft voting is a effective approach than ensemble DL in terms of classification. Moreover, the fact that the classification metrics (approximately 94% for ensemble DL and 95% for ensemble ML) are close to each other in both ensemble DL and ensemble ML models indicates that the classifiers are stable and have high generalization capacities. However, since the proposed method uses ensemble methods in both feature extraction and feature classification stages, the high computational load is a disadvantage. However, we believe that performance will be more valuable than computational cost for critical tasks such as environmental waste classification.

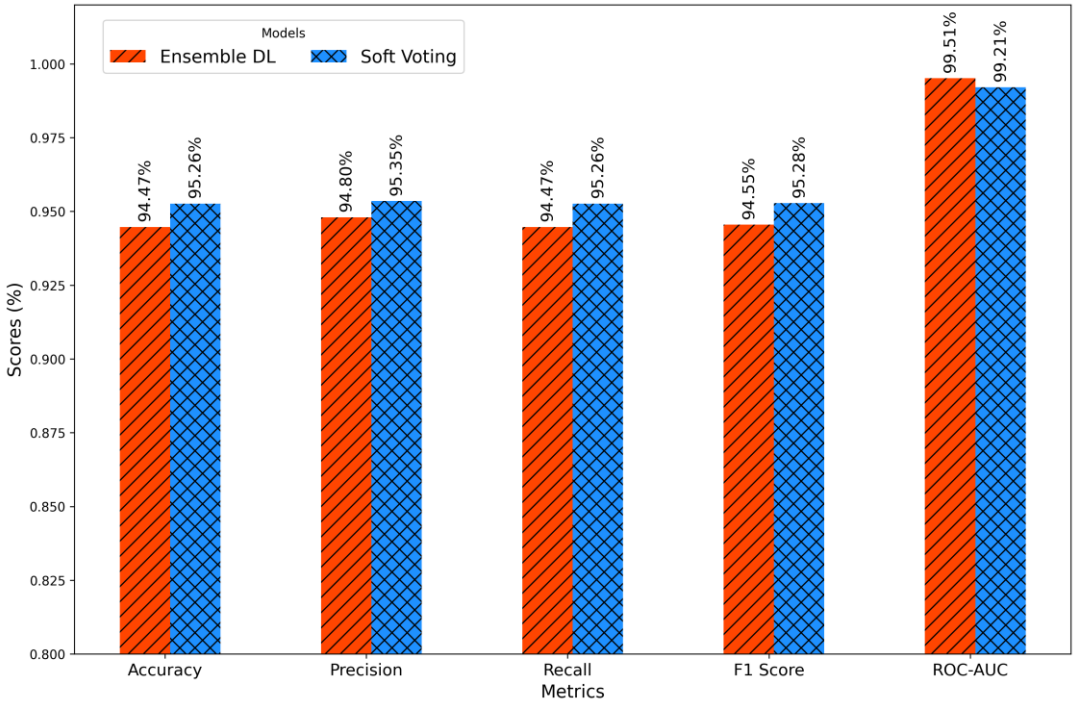


Figure 12. Comparison of the Performance Metrics of the Ensemble DL Model and the Soft Voting Model in Dataset-1

Classification results of the Dataset-2

Dataset-2 is a more comprehensive dataset than Dataset-1, both in terms of classes and instances. Datasets with different characteristics were specifically selected to test the performance of the proposed model. Figure 13 presents the confusion matrices of the ResNet50, InceptionResNet-V2, DenseNet169, and ensemble DL models. The results indicate that the proposed ensemble DL method achieved higher accuracy compared to the other individual models. Additionally, ResNet50 was observed to provide the second-best results after the ensemble DL method. While the Ensemble DL, ResNet50, and DenseNet169 models made the most misclassifications in the plastic class, it was observed that the misclassification examples of the InceptionResNet-V2 model were distributed across all classes. When the confusion matrices for each waste class are examined, it is seen that the ensemble DL model exhibits better classification performance than individual models for cardboard, glass, metal, paper, and textile trash classes. However, it is seen that the InceptionResNet-V2 model is better than the ensemble DL model for the miscellaneous class.

The test accuracy, precision, recall, F-score, and ROC-AUC metrics for ResNet50, InceptionResNet-V2, DenseNet169, and the ensemble DL models are presented in Figure 14. The performance metrics for ResNet50 and InceptionResNet-V2 models exhibit similar levels, while the DenseNet169 model performs relatively weaker. Furthermore, the ensemble DL model showed a 10% increase in accuracy over DenseNet169. The Ensemble DL model outperformed all individual models in all metrics. The reason why the Ensemble DL model is more stable and successful than individual models is that it feeds from different representations of the input image.

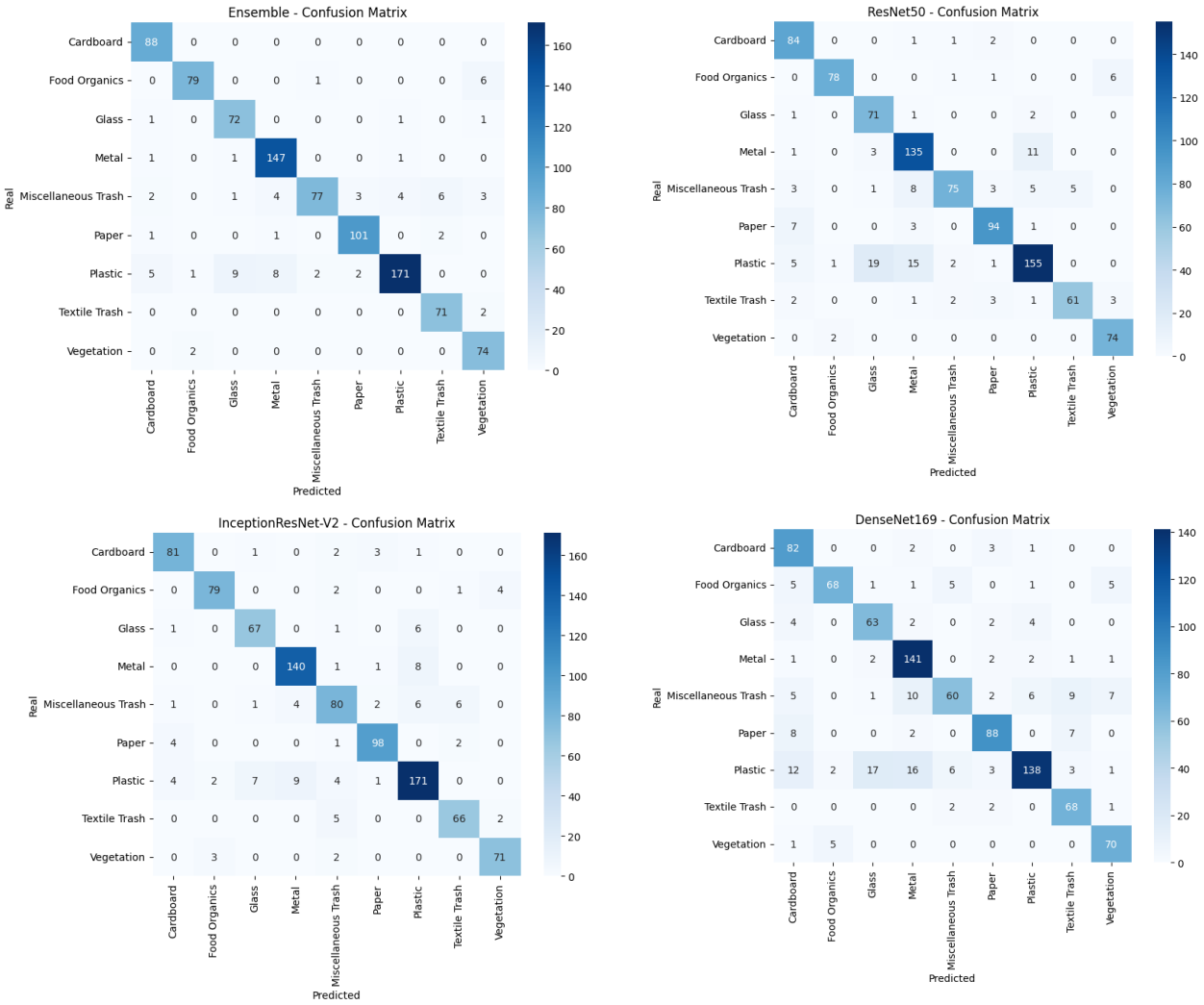


Figure 13. Confusion Matrices of ResNet50, InceptionResNet-V2, DenseNet169, and Ensemble DL Models in Dataset-2

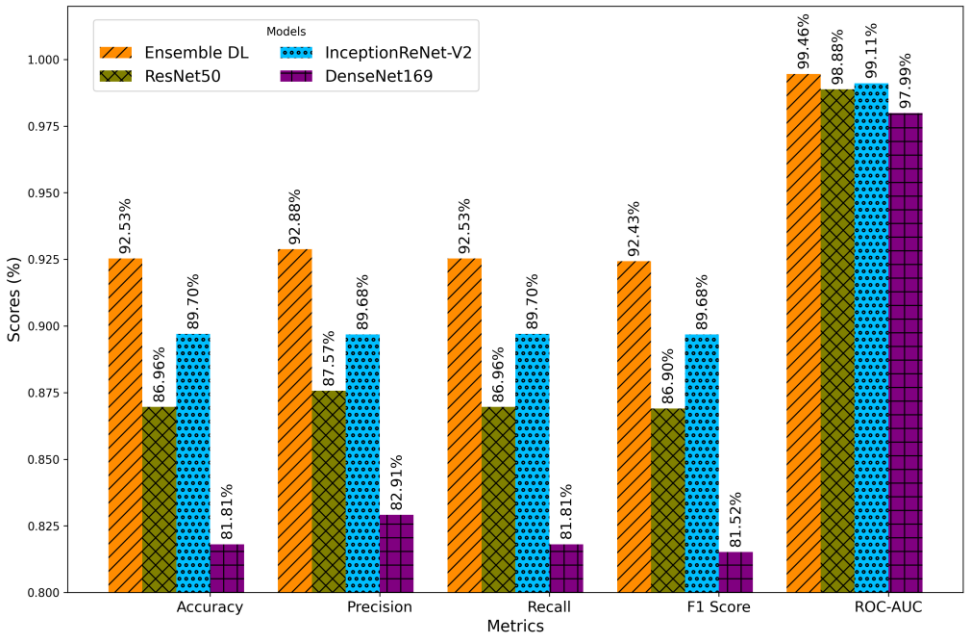


Figure 14. Performance Metrics of ResNet50, InceptionResNet-V2, DenseNet169, and the Ensemble DL Models in Dataset-2

Figure 15 presents the accuracy and loss curves of the models during the training and validation. The train accuracy graph shows that the accuracy rates of all models increased over time, reaching high values after 50 epochs. In the validation accuracy curve, the validation performance of the models follows a trajectory parallel to their training performance. Examining the loss curves, both train loss and validation loss decrease as the number of epochs increases, indicating that the optimization process is progressing effectively. Notably, the ensemble DL model outperforms the other models by achieving lower validation loss and higher accuracy, demonstrating the best performance. These results confirm that the models were successfully trained and did not encounter issues such as overfitting during the validation. Furthermore, the superior performance of the ensemble DL model compared to other individual models indicated that it generalizes better on Dataset-2.

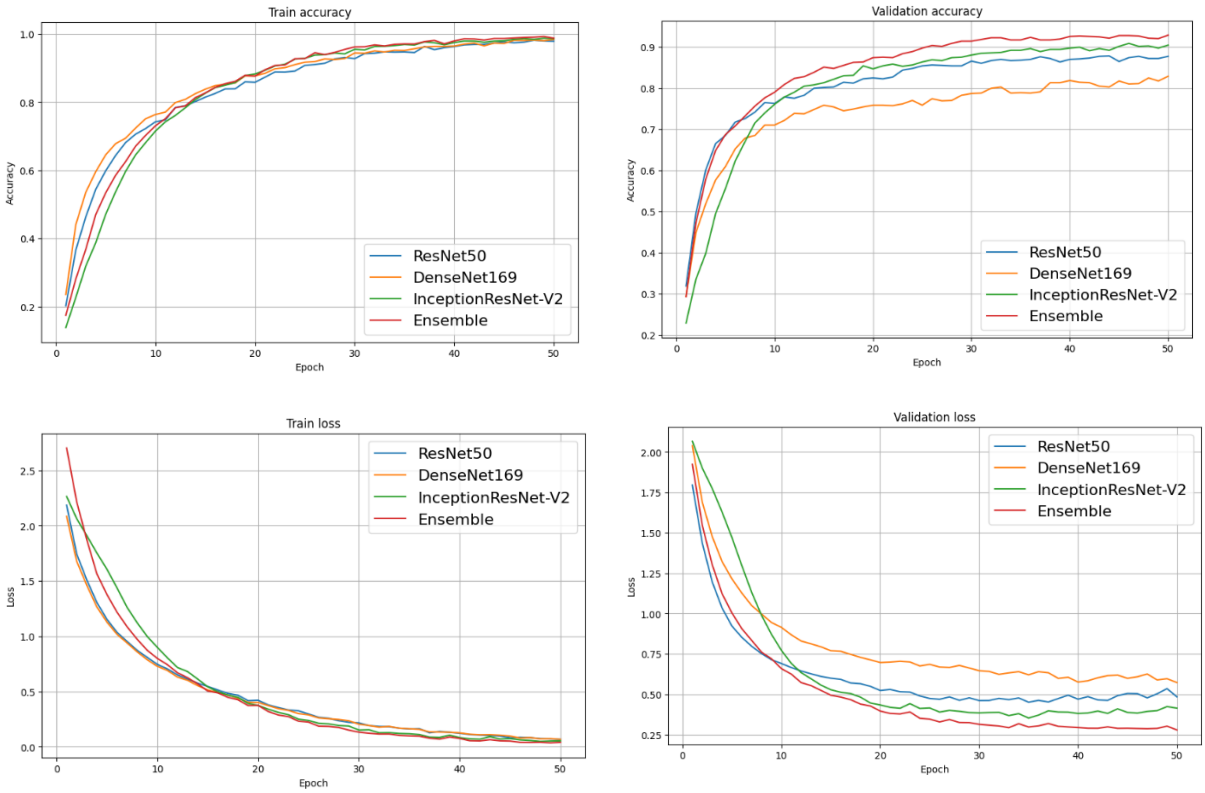


Figure15. Accuracy and Loss of DL and Ensemble Models During the Train and Test in Dataset-2.

In Dataset-2, the ML-based approaches were applied, using ANOVA, VT, MI, RF, Lasso, RFE, PCA, and RR methods to create different feature subsets by increasing the number of selected features in increments of five between 5 and 200. SVM, MLP, and RF classification algorithms are optimized and utilized on selected features. For ensemble ML models, SVM, MLP, and RF were used as base classifiers. The models were comprehensively evaluated using various metrics, including accuracy, precision, recall, F-score, ROC-AUC, confusion matrices, and classification reports. The obtained results were analyzed to compare the performance of the feature selection methods and classification algorithms, as well as to determine the most suitable model-feature count combinations. When all classification results were examined, as shown in Figure 16, the ANOVA method, with 170 selected features and the soft voting model, achieved the highest performance with an accuracy of 93.17%. Dataset-2 is imbalanced in terms of class distribution. Moreover, the number of samples in the plastic and metal classes is significantly different from the other classes. Therefore, the effectiveness of ANOVA's F-test based on inter-class variance in capturing the distinctive features of Dataset-2 has led to superior performance compared to other methods.

Figure 17 presents the comparison of accuracy, precision, recall, F1-score, and ROC-AUC metrics among the models. The proposed soft voting model demonstrated the best performance across all metrics, achieving 93.17% accuracy, 93.28% precision, 93.17% recall, 93.08% F1-score, and 99.32% ROC-AUC. The ensemble DL model, however, achieved a higher ROC-AUC value of 99.46%, outperforming the ensemble ML soft voting model in this specific metric. Meanwhile, the hard voting model also exhibited a competitive performance, with 92.74% accuracy, 92.74% recall, and 92.66% F1-score. Among the various models, the RF attained a notable ROC-AUC score of 99.37%,

although it underperformed in other metrics compared to soft voting. SVM, MLP, and XGBoost models showed balanced performance, though XGBoost obtained relatively lower values compared to the other models. In Dataset-2, it is seen that the best classification performance after soft voting and hard voting is in the SVM algorithm.

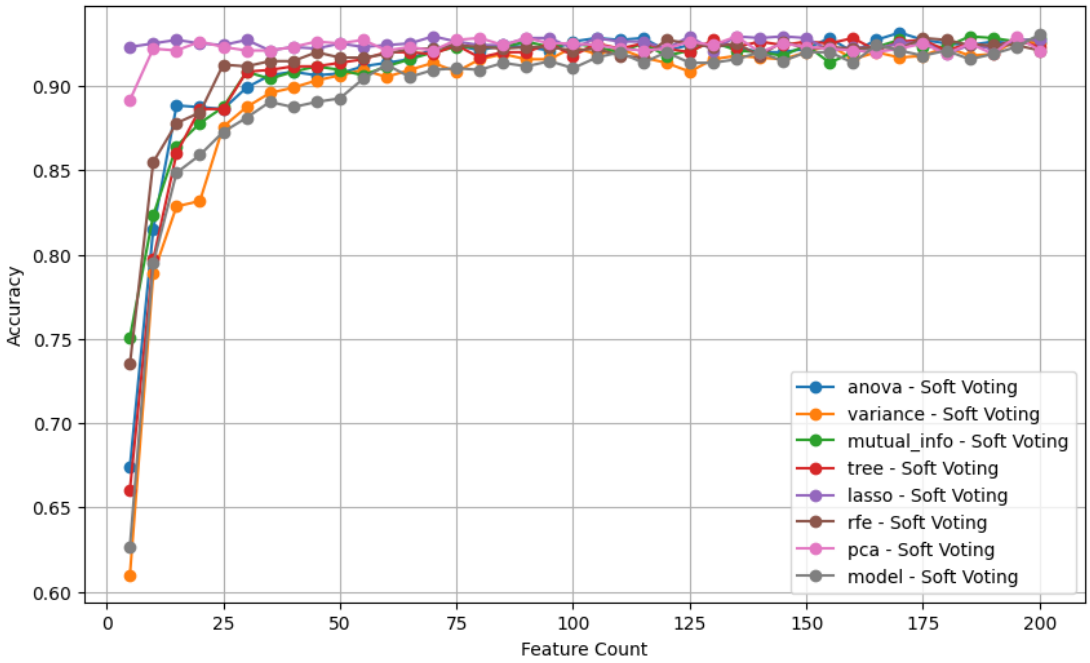


Figure16. Accuracy Value of the Soft Voting Classifier in Dataset-2 Based on the Feature Selection Method and the Number of Selected Features

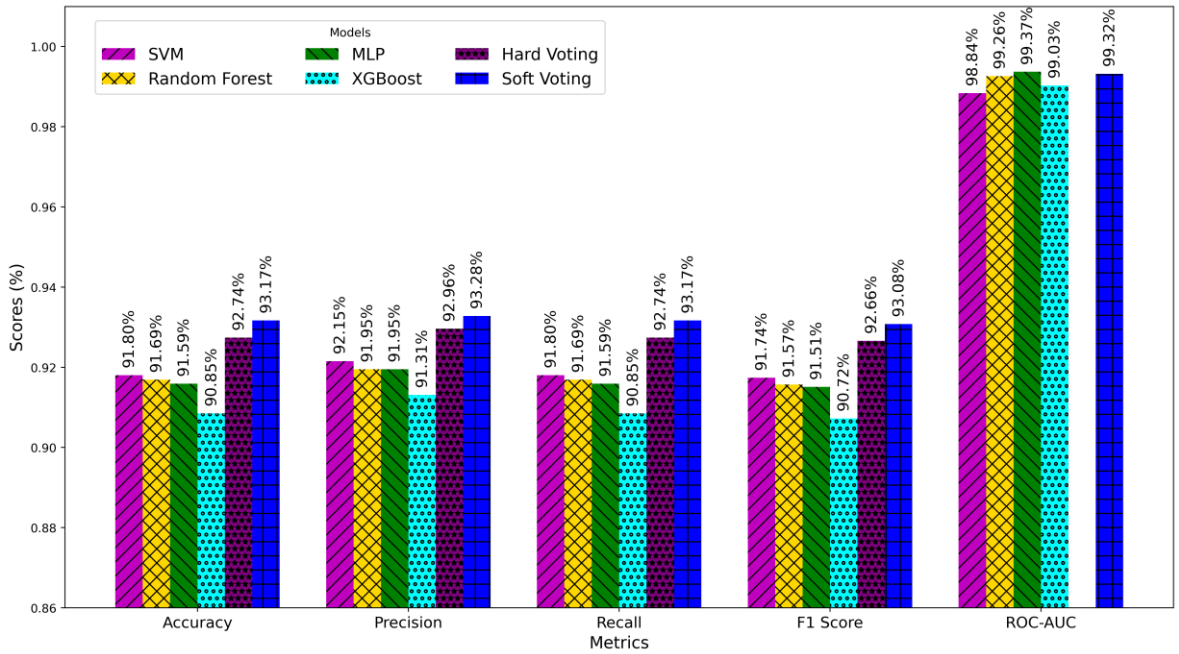


Figure17. Performance Metrics of ML Models and Ensemble ML Models in Dataset-2

The confusion matrix for the ANOVA feature selection method, with 170 selected features and the soft voting ensemble ML method, is presented in Figure 18. The proposed soft voting ensemble method demonstrates high classification accuracy. Among the total of 951 images analyzed, 65 were identified as misclassified, resulting in 886 images being accurately classified. The soft voting ensemble model demonstrated superior classification performance by correctly classifying 6 additional images when compared to the DL ensemble method.

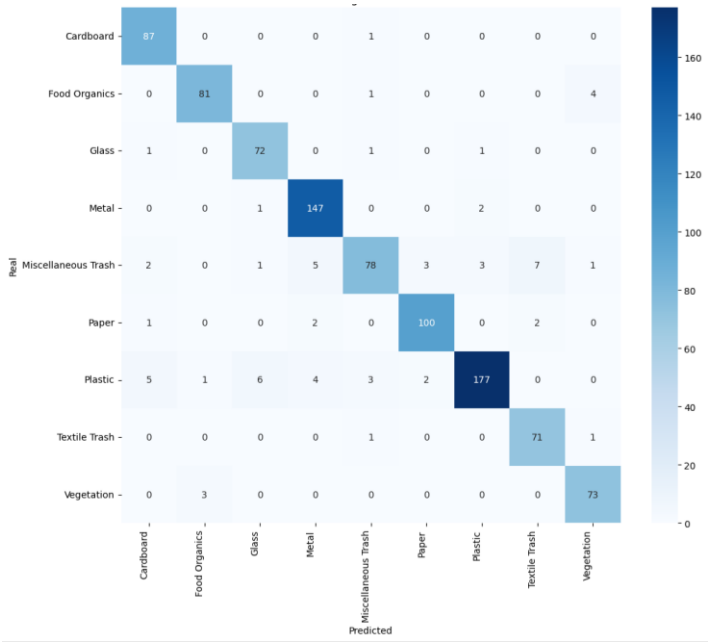


Figure18. Confusion Matrix of the Soft Voting Model with ANOVA -170 Features in Dataset-2

A heatmap summarizing the precision, recall, and F1-score performance metrics for different classes in the ML ensemble method is presented in Figure 19. The cardboard, food organics, glass, metal, paper, plastic, textile trash, and vegetation classes all achieved metric values above 89%, indicating that the model effectively differentiates these classes. This suggests that the model has successfully learned the characteristics of these waste types and can accurately classify them. However, the miscellaneous trash class exhibited the lowest performance, with a recall value of 78%, highlighting a relative difficulty in accurately identifying this class. According to the classification metrics values in Figure 19, it is possible to state that the proposed model fails the most in the miscellaneous trash class in the dataset.

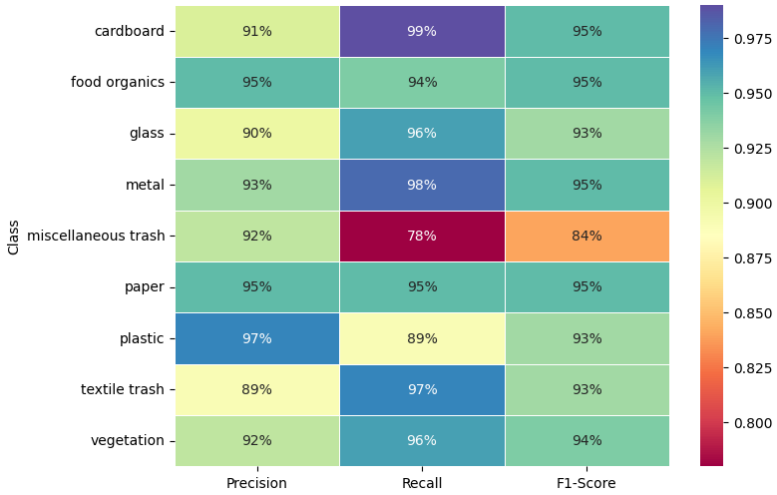


Figure 19. Heatmap of the Soft Voting Model with Lasso-145 Features in Dataset-2

Figure 20 presents a comparison of the performance metrics of the ensemble DL and soft voting ML models. The results indicate that the soft voting model outperforms the ensemble DL model in terms of all metrics. The soft voting model achieved 93.17% accuracy, 93.28% precision, 93.17% recall, 93.08% F1-score, and 99.32% ROC-AUC, demonstrating its superior classification performance. In comparison, the ensemble DL model attained 92.53% accuracy, 92.88% precision, 92.53% recall, 92.43 F1-score, and 99.46 ROC-AUC. The fact that soft voting achieved better results in accuracy, precision, recall, and F1-score highlights its potential to accurately classify positive classes and enhance overall classification performance.

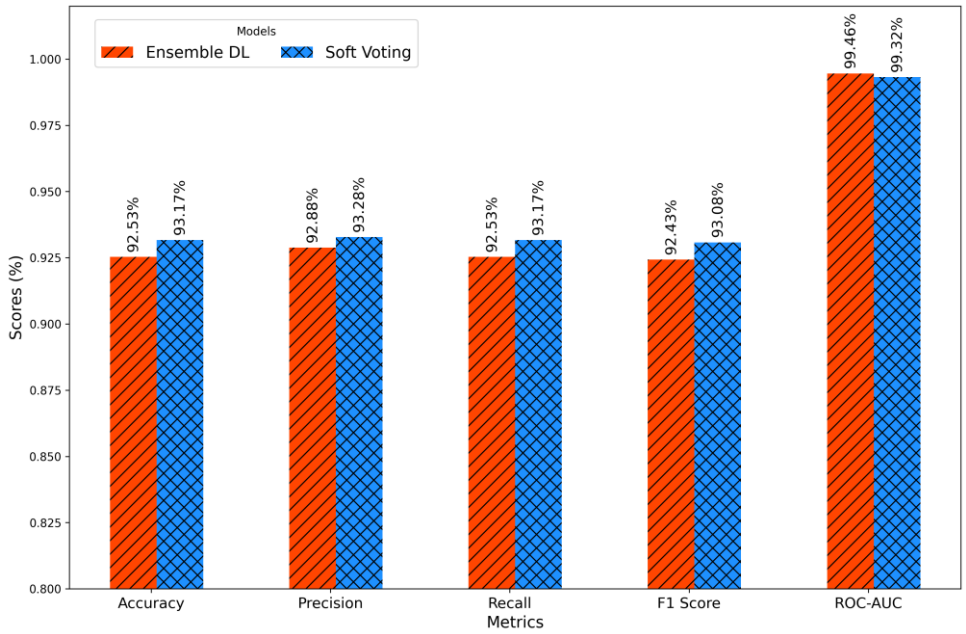


Figure 20. Comparison of the Performance Metrics of the Ensemble DL Model and the Soft Voting Model in Dataset-2

The ensemble ML model has performed better than the ensemble DL model in both Dataset-1 (Figure 12) and Dataset-2 (Figure 20). It is possible to state that both FS and model parameter optimization affect the performance of the ensemble ML model. Moreover, the results of this proposed end-to-end model show that ensemble models improve the classification performance both in the feature extraction stage and in the classification stage, and that the imbalance problems of the dataset are least affected. However, the proposed method has some disadvantages. Firstly, ensemble methods require more computation than individual methods. The fact that the proposed method adopts an ensemble approach in both the feature extraction and classification can be considered a deficiency in terms of computational requirements. Secondly, since GridSearchCV, which is used in ML parameter optimization, uses a brute-force strategy, it can be considered a disadvantage in terms of both time and computation in large search spaces.

Comparison of the proposed model results with the previous studies

Figure 21 shows that the ensemble learning-based method created for sorting environmental trash did as well as or better than other studies that have been done. The proposed method showed 95.26% accuracy on Dataset-1 with six classes. Salur et al., using the same dataset with four classes, achieved 95.22% accuracy (Salur et al., 2024). Furthermore, Sürücü et al. obtained an accuracy of 94.69% using an InceptionV3-based model, which is inferior to the performance of the proposed method (Sürücü & Ecemiş, 2022). On the other hand, the accuracy of 95.93% obtained by Tatke et al. is a remarkable achievement. However, the fact that this result was obtained using a single model suggests that its effectiveness on imbalanced datasets will be limited compared to ensemble models. (Tatke et al., 2021). The model proposed by Alsubaei et al. achieved an accuracy of 98.61%, outperforming the proposed method in terms of classification performance (Alsubaei et al., 2022). However, when compared to the 89.75% accuracy achieved by Yıldız et al., the proposed method demonstrates superior performance. Additionally, the 98% accuracy reported by Al Duhayyim et al. can be attributed to the fact that their dataset was classified into only two categories: "hazardous" and "non-hazardous", which simplifies the classification task (Al Duhayyim et al., 2023). In light of all these comparisons, the proposed method stands out as a strong and effective alternative in the field of environmental waste classification, offering high accuracy rates and superior generalization capability. Moreover, these compared studies do not have a plug-and-play structure as in our proposed model. One of the advantages of the model proposed in this study is that it allows the use of different models in the feature extraction, feature selection, and classification stages.

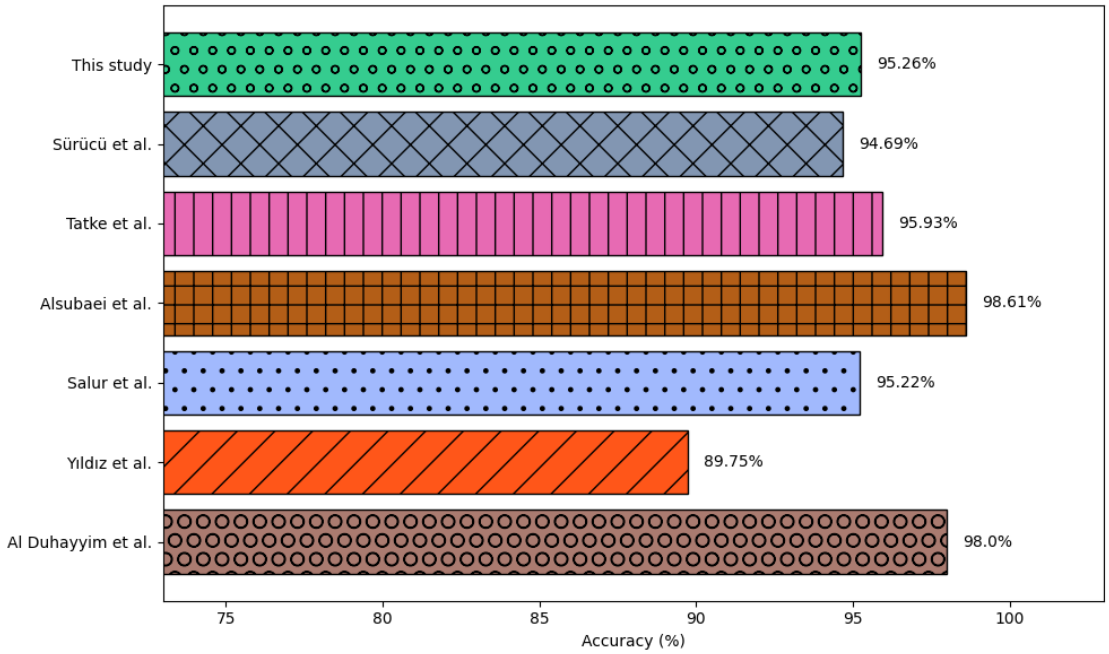


Figure 21. Comparison of the Performance of the Proposed Model on Dataset-1 with Previous Studies

Previous studies in the field of waste classification have been thoroughly analyzed, and the accuracy rates of existing methods have been compared. While some approaches in the literature have achieved high accuracy through techniques such as transfer learning and hyperparameter optimization, they have often been tested on a smaller number of classes or narrow-scope datasets. As shown in Figure 22, the proposed method achieved 93.17% accuracy on the Dataset-2, which is significantly higher than the 89.19% accuracy reported by Single et al. This discrepancy is mainly because Single et al. relied solely on individual models for waste classification, limiting their performance. On the other hand, the 96.31% accuracy achieved by Younis and Obaid using the EfficientNet model slightly surpasses the classification performance of our proposed method.

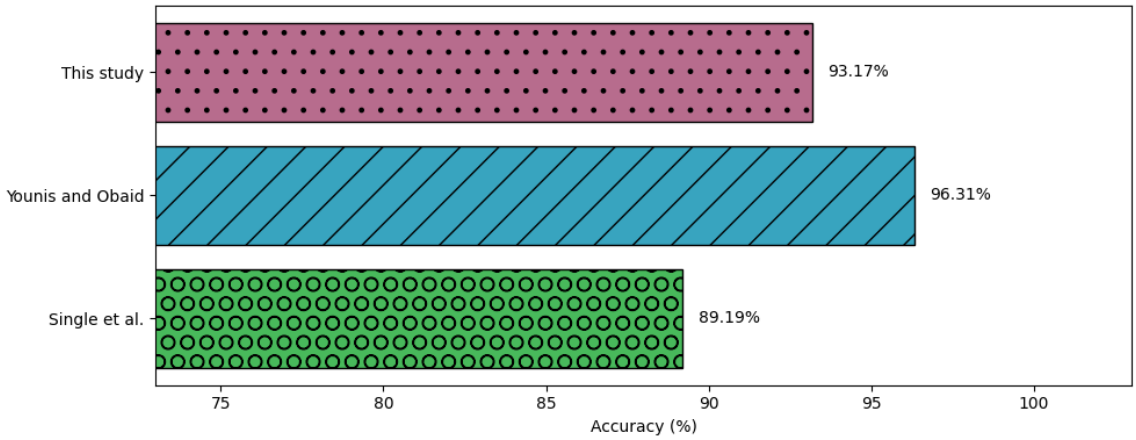


Figure 22. Comparison of the Performance of the Proposed Model on Dataset-2 with Previous Studies

CONCLUSION

The classification of environmental waste is crucial for enhancing the efficiency of sustainable waste management and recycling processes. Proper classification of waste facilitates the segregation of recyclable materials, contributing to natural resource conservation and energy savings. Moreover, it plays a vital role in ensuring the proper disposal of hazardous waste, thereby reducing environmental pollution and potential health risks. This study presents an end-to-end approach that integrates DL and ML techniques for environmental waste classification. By combining DL and ML with ensemble learning methods, the proposed approach enables accurate and efficient classification of

environmental waste. To determine the effectiveness of the proposed model, tests were performed on two datasets (Dataset-1 and Dataset-2) for environmental waste classification, including several classification tasks.

In the pipeline of the proposed model, fine-tuning was applied to ResNet50, InceptionResNet-V2, and DenseNet169 models. These individual models were then combined to form an ensemble DL model. The extracted features from DL methods were subjected to various feature selection techniques, and the selected features were subsequently fed into ML algorithms as input, ensuring a comprehensive classification process. In the feature selection phase, methods such as ANOVA, Lasso, PCA, and MI were employed to eliminate irrelevant or low-importance features from the datasets. This process not only reduced model complexity but also enhanced classification performance. For ML classification, algorithms such as SVM, MLP, and RF were utilized, along with ensemble methods like XGBoost, hard voting, and soft voting, achieving high accuracy rates. The experiments conducted on Dataset-1 and Dataset-2 demonstrated the generalization capability of the proposed method. The ensemble ML model achieved 95.26% accuracy on Dataset-1, outperforming individual models. Similarly, an accuracy of 93.17% was obtained on Dataset-2. The superior performance of ensemble models over individual models clearly highlights the advantages of combining different model architectures. Additionally, the contributions of feature selection and optimization processes in ML classification were supported by thorough analysis. The proposed method represents a significant step toward the automation of waste management and recycling processes. This approach accelerates waste classification, reduces reliance on manual labor, and contributes to the development of a more efficient waste management system. The applicability of the proposed model is particularly noteworthy in increasing recycling rates and reducing waste management costs. The innovative methodologies introduced in this study serve as a foundation for future research aimed at enhancing environmental sustainability. Future studies may focus on integrating the proposed model into real-time waste management systems, testing it on diverse datasets with a wider variety of waste classes, and exploring its integration with sensor-based or robotic applications for large-scale solutions.

ACKNOWLEDGEMENTS

This study was supported by Gaziantep Islam Science and Technology University Scientific Research Projects Coordination Unit under Project No: 2024-GAP-Mühe-0008.

REFERENCES

Abdu, H., & Noor, M. H. M. (2022). A survey on waste detection and classification using deep learning. IEEE Access, 10, 128151–128165. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3226682

Al Duhayyim, M., Alotaibi, S. S., Al-Otaibi, S., Al-Wesabi, F. N., Othman, M., Yaseen, I., Rizwanullah, M., & Motwakel, A. (2023). An Intelligent Hazardous Waste Detection and Classification Model Using Ensemble Learning Techniques. Computers, Materials & Continua, 74(2). https://doi.org/10.32604/cmc.2023.033250

Alsubaei, F. S., Al-Wesabi, F. N., & Hilal, A. M. (2022). Deep Learning-Based Small Object Detection and Classification Model for Garbage Waste Management in Smart Cities and IoT Environment. Applied Sciences (Switzerland), 12(5). https://doi.org/10.3390/app12052281

Chatterjee, S., Hazra, D., & Byun, Y. C. (2022). IncepX-Ensemble: Performance Enhancement Based on Data Augmentation and Hybrid Learning for Recycling Transparent PET Bottles. IEEE Access, 10, 52280–52293. https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3174076

Chen, T., & Guestrin, C. (2016). Xgboost: A scalable tree boosting system. Proceedings of the 22nd Acm Sigkdd International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining, 785–794. https://doi.org/10.1145/2939672.2939785

Chen, W., Yang, K., Yu, Z., Shi, Y., & Chen, C. L. (2024). A survey on imbalanced learning: latest research, applications and future directions. Artificial Intelligence Review, 57(6), 1–51. https://doi.org/10.1007/s10462-024-10759-6

Dietterich, T. G. (2000). Ensemble methods in machine learning. International Workshop on Multiple Classifier Systems, 1–15. https://doi.org/10.1007/3-540-45014-9_1

Filtreleme yöntemleri· Miuul. (2021). https://miuul.com/blog/filtreleme-yontemleri-ile-makine-ogrenmesinde-degisken-secimi Accessed 11.01.2025.

Garbage Classification. (2021). https://www.kaggle.com/datasets/asdasdasasdas/garbage-classification Accessed 10.01.2025. https://doi.org/10.34740/kaggle/ds/81794

Genuer, R., Poggi, J.-M., Genuer, R., & Poggi, J.-M. (2020). Random forests. Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-56485-8_3

Greenacre, M., Groenen, P. J. F., Hastie, T., d'Enza, A. I., Markos, A., & Tuzhilina, E. (2022). Principal component analysis. Nature Reviews Methods Primers, 2(1), 100. https://doi.org/10.1038/s43586-022-00184-w

Guyon, I., & Elisseeff, A. (2003). An introduction to variable and feature selection. Journal of Machine Learning Research, 3(Mar), 1157–1182.

Guyon, I., Weston, J., Barnhill, S., & Vapnik, V. (2002). Gene selection for cancer classification using support vector machines. Machine Learning, 46, 389–422. https://doi.org/10.1023/A:1012487302797

He, K., Zhang, X., Ren, S., & Sun, J. (2016). Deep residual learning for image recognition. Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 770–778.

Huang, G., Liu, Z., Van Der Maaten, L., & Weinberger, K. Q. (2017). Densely connected convolutional networks. Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 4700–4708.

Hutchinson, M. L., Antono, E., Gibbons, B. M., Paradiso, S., Ling, J., & Meredig, B. (2017). Overcoming data scarcity with transfer learning. ArXiv Preprint ArXiv:1711.05099. https://doi.org/10.48550/arXiv.1711.05099

Kanevski, M., Pozdnukhov, A., Canu, S., & Maignan, M. (2002). Advanced spatial data analysis and modeling with Support Vector Machines.

Kaza, S., Yao, L., Bhada-Tata, P., & Van Woerden, F. (2018). What a waste 2.0: a global snapshot of solid waste management to 2050. World Bank Publications.

Ma, X., Chen, L., Deng, Z., Xu, P., Yan, Q., Choi, K.-S., & Wang, S. (2023). Deep image feature learning with fuzzy rules. IEEE Transactions on Emerging Topics in Computational Intelligence, 8(1), 724–737. https://doi.org/10.1109/TETCI.2023.3259447

McDonald, G. C. (2009). Ridge regression. Wiley Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics, 1(1), 93–100. https://doi.org/10.1002/wics.14

Meyen, S., Göppert, F., Alber, H., von Luxburg, U., & Franz, V. H. (2021). Specialists Outperform Generalists in Ensemble Classification. ArXiv Preprint ArXiv:2107.04381. https://doi.org/10.48550/arXiv.2107.04381

Ouedraogo, A. S., Kumar, A., & Wang, N. (2023). Landfill Waste Segregation Using Transfer and Ensemble Machine Learning: A Convolutional Neural Network Approach. Energies, 16(16), 5980. https://doi.org/10.3390/en16165980

Pinkus, A. (1999). Approximation theory of the MLP model in neural networks. Acta Numerica, 8, 143–195. https://doi.org/10.1017/S0962492900002919

Poudel, S., & Poudyal, P. (2022). Classification of waste materials using CNN based on transfer learning. Proceedings of the 14th Annual Meeting of the Forum for Information Retrieval Evaluation, 29–33. https://doi.org/10.1145/3574318.3574345

Santoso, H., Hanif, I., Magdalena, H., & Afiyati, A. (2024). A Hybrid Model for Dry Waste Classification using Transfer Learning and Dimensionality Reduction. JOIV: International Journal on Informatics Visualization, 8(2), 623-634. https://dx.doi.org/10.62527/joiv.8.2.1943

Salur, M. U., Elmas, N., Koçak, A. N., & Kaymaz, M. (2024). Derin Öğrenme ile Çevresel Atıkların Sınıflandırılmasına Dayalı Akıllı Çöp Konteyneri Tasarımı ve Prototipinin Geliştirilmesi. Adıyaman Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 11(24), 547–563. https://doi.org/10.54365/adyumbd.1557588

Shahab, S., Anjum, M., & Umar, M. S. (2022). Deep learning applications in solid waste management: A deep literature review. International Journal of Advanced Computer Science and Applications, 13(3). https://doi.org/10.14569/ijacsa.2022.0130347

Single, S., Iranmanesh, S., & Raad, R. (2023). RealWaste: A Novel Real-Life Data Set for Landfill Waste Classification Using Deep Learning. Information (Switzerland), 14(12). https://doi.org/10.3390/info14120633

Sürücü, S., & Ecemiş, İ. N. (2022). Garbage classification using pre-trained models. Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, 36, 73–77. https://doi.org/10.31590/ejosat.1103628

Szegedy, C., Ioffe, S., Vanhoucke, V., & Alemi, A. (2017). Inception-v4, inception-resnet and the impact of residual connections on learning. Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence, 31(1). https://doi.org/10.1609/aaai.v31i1.11231

Şirin, E. (2017). Ensemble Yöntemler: Basit Teorik Anlatım ve Python Uygulama - Veri Bilimi Okulu - Veri Bilimi Okulu. https://www.veribilimiokulu.com/ensemble-yontemler-topluluk-ogrenmesi-basit-teorik-anlatim-ve-python-uygulama/ Accessed 10.01.2025

Tatke, A., Patil, M., Khot, A., & Karad's, P. J. V. (2021). Hybrid approach of garbage classification using computer vision and deep learning. International Journal of Engineering Applied Sciences and Technology, 5(10). https://doi.org/10.33564/IJEAST.2021.v05i10.032

Tibshirani, R. (1996). Regression shrinkage and selection via the lasso. Journal of the Royal Statistical Society Series B: Statistical Methodology, 58(1), 267–288. https://doi.org/10.1111/j.2517-6161.1996.tb02080.x

Toğaçar, M., Ergen, B., & Cömert, Z. (2020). Waste classification using AutoEncoder network with integrated feature selection method in convolutional neural network models. Measurement: Journal of the International Measurement Confederation, 153. https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.107459

Vergara, J. R., & Estévez, P. A. (2014). A review of feature selection methods based on mutual information. Neural computing and applications, 24, 175-186. https://doi.org/10.1007/s00521-013-1368-0

Wu, N., Wang, G., & Jia, D. (2024). A Hybrid Model for Household Waste Sorting (HWS) Based on an Ensemble of Convolutional Neural Networks. Sustainability, 16(15), 6500. https://doi.org/10.3390/su16156500

Yıldız, E. N., Bingöl, H., & Yıldırım, M. (2023). Önerilen Derin Öğrenme ve Makine Öğrenmesi Tabanlı Hibrit Model ile Çevresel Atıkların Sınıflandırılması. Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 35(1), 353–361. https://doi.org/10.35234/fumbd.1230982

Younis, H., & Obaid, M. (2024). Performance Comparison of Pretrained Deep Learning Models for Landfill Waste Classification. International Journal of Advanced Computer Science & Applications, 15(11). https://dx.doi.org/10.14569/IJACSA.2024.0151166

Yulita, I. N., Ardiansyah, F., Sholahuddin, A., Rosadi, R., Trisanto, A., & Ramdhani, M. R. (2024, January). Garbage Classification Using Inception V3 as Image Embedding and Extreme Gradient Boosting. International Conference in Emerging Technologies for Sustainability and Intelligent Systems (ICETSIS) (pp. 1394-1398). IEEE. https://doi.org/10.1109/ICETSIS61505.2024.10459560

Zheng, H., & Gu, Y. (2021). Encnn-upmws: Waste classification by a CNN ensemble using the UPM weighting strategy. Electronics (Switzerland), 10(4), 1–21. https://doi.org/10.3390/electronics10040427

KSÜ Mühendislik Bilimleri Dergisi, 28(2), 2025
Araştırma Makalesi

KSU J Eng Sci, 28(2), 2025
Research Article

Kahramanmaras Sutcu Imam University
Journal of Engineering Sciences

Geliş Tarihi : 23.02.2025
Kabul Tarihi :07.05.2025

Received Date : 23.02.2025
Accepted Date : 07.05.2025

EFFECT OF DIFFERENT VERTICAL STRUCTURAL IRREGULARITIES ON NONLINEAR RESPONSE OF REINFORCED CONCRETE BUILDINGS

FARKLI DÜŞEY DOĞRULTUDAKİ YAPISAL DÜZENSİZLİKLERİN BETONARME BİNALARIN DOĞRUSAL OLMAYAN DAVRANIŞINA ETKİSİ

Rebaz KARİM [1] (ORCID:0009-0009-2108-370X)
Esra Mete GÜNEYİSİ[1] (ORCID: 0000-0002-4598-5582)*

[1] Gaziantep Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Gaziantep, 27310, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Esra Mete GÜNEYİSİ, eguneyisi@gantep.edu.tr

ABSTRACT

To achieve either some architectural view or functional utilization, many structures have been designed with some irregularity in plan or elevation. However, during the recent earthquakes, it has been noted that the presence of such irregularities can lead to structural damage in a single member or even the collapse of an entire building. In the current study, the seismic behavior of vertically irregular low-rise and medium-rise buildings was examined in comparison with the regular ones. As low- and medium-rise buildings, those with three and seven stories, respectively, and as types of vertical irregularities, stiffness/strength irregularity (missing beams or columns), mass irregularity, and vertical geometric irregularity due to setbacks were considered. For this purpose, analytical models of the two reference regular framed structures and thirty different irregular framed structures were developed, and their seismic behavior was evaluated using nonlinear finite element analysis. The effects of different irregularities on the seismic demand were discussed in terms of the variations in capacity curves, plastic hinge formations, and axial internal forces obtained in the columns. The results of the analysis indicate that, depending on the type of irregularity, buildings with irregularities, especially those with missing columns, become more vulnerable to seismic impacts.

Keywords: Capacity curves, nonlinear analysis; regular buildings; seismic response; vertical irregularity

ÖZET

Mimari görünüm veya işlevsel kullanım sebebiyle pek çok yapı yatayda ve düşeyde düzensizliklere sahip olarak tasarlanmaktadır. Ancak, son dönemde yaşanan depremler, yapılarda bu tür düzensizliklerin olması durumunda yapısal elemanlarda hasar oluşabileceği, hatta binada çökme meydana gelebileceğini göstermiştir. Bu çalışmada düşeyde düzensiz olan az ve orta katlı binaların sismik davranışları düşeyde düzenli binalarla karşılaştırmalı olarak incelenmiştir. Az ve orta katlı binalar olarak üç ve yedi katlı binalar düşünülmüştür. Düşey düzensizlikler olarak da kiriş veya kolon eksikliğinden kaynaklı düşeyde rijitlik ve dayanım düzensizliği, kütle düzensizliği ve düşeyde geometrik düzensizliği dikkate alınmıştır. Bu sebeple, referans olarak iki düzenli çerçeveli yapının ve otuz farklı düzensiz çerçeveli yapının analitik modelleri geliştirilmiş ve doğrusal olmayan sonlu elemanlar analizi kullanılarak sismik davranışları değerlendirilmiştir. Farklı düzensizliklerin sismik talep üzerindeki etkileri, kapasite eğrilerindeki değişimler, plastik mafsal oluşumları ve kolonlarda elde edilen eksenel iç kuvvetler açısından tartışılmıştır. Analiz sonuçları, düzensizlik türüne bağlı olarak, özellikle de kolonları düzensiz olan binaların sismik etkiler karşısında daha riskli hale geldiğini göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Kapasite eğrileri, doğrusal olmayan analiz, düzenli binalar, sismik tepki, dikey düzensizlik

ToCite: KARİM, R., & GÜNEYİSİ, E.M., (2025). EFFECT OF DIFFERENT VERTICAL STRUCTURAL IRREGULARITIES ON NONLINEAR RESPONSE OF REINFORCED CONCRETE BUILDINGS. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 28(2), 957-974.

INTRODUCTION

Nowadays, irregular buildings are constructed widely around the world, especially in developed countries. That is simply due to the development of art and architecture. Architects take advantage of irregularity to enable them to express their thoughts openly. In addition, "form follows fiction," "form follows beauty," and form follows nature" are prominent doctrines that architects work based on. Irregularity provides architects with more opportunities to work freely based on the doctrines they prefer. Moreover, modern architecture presents a challenge in achieving both functional and artistic structures simultaneously. Thus, regular buildings are obstacles to designers. To construct buildings with optimal functionality and challenge the best projects that become a phenomenon, buildings must be irregular. Indeed, the role of civil engineers is more challenging in cases involving irregular buildings, especially in high-seismic zones. However, the ratio of irregularity and how it responds to seismic loads is specified by building codes (Soni and Mistry 2006).

When an earthquake occurs, the ground begins to shake, and the structures supported on it undergo this motion. The dynamic loads developed by an earthquake over the structures aren't external loads; however, the inertial influence is due to the motion of the supports. In this case, several factors contributing to the damage of the structures during earthquakes can be considered due to the irregularities (Kamath et al., 2014). According to current national and international codes, vertical irregularities are defined in details, for example, TBDY (2018) states three significant types of vertical irregularities, namely, strength irregularity between adjacent stories (weak story, whose lateral strength is lower than that of the above story), stiffness irregularity between adjacent stories (soft story, whose lateral stiffness is lower than that of the above or below story), and discontinuity of vertical elements of the structural system. In addition to these irregularities, ASCE/SEI 7 (2016), Eurocode 8 (2004), and IS 1893 (2016) also address two types of irregularities: mass irregularity and vertical geometric irregularity. It is worth noting that among codes, there may be discrepancies in the description and limitations of such vertical irregularities in structures.

In the literature, several studies have been conducted to evaluate the response of different types of vertical irregularity (Cassis and Cornejo 1996, Das and Nau 2003, Mezzi et al. 2004, Güler et al. 2008, Sadashiva et al. 2008, Kumar et al. 2012, Kara and Celep 2012, Akberuddin et al. 2013, Wasey et al. 2022, Raheem et al. 2024). For example, in the study of Cassis and Cornejo (1996), the nonlinear behavior of reinforced concrete (RC) buildings with irregularities in elevation was investigated. They determine the variation in strength and displacement capacity of buildings with and without irregularities. A brittle failure mode was observed in the structure, which had no infill wall over its elevation. Mezzi et al. (2004) conducted a numerical study to develop a technique for earthquake design of buildings, taking into account various factors that impact the building's seismic behavior. Based on the analysis of the results, they proposed a sample design procedure. Güler et al. (2008) studied the retrofitting of existing vertically irregular RC buildings based on seismic loading. For the numerical solution, SAP2000 and ZEUS-NL software were utilized. The retrofitted system was then analyzed for the performance assessment. The demand and capacity curves were plotted. It was reported that the existing irregular structure failed to meet the life-safety performance level, whereas the retrofitted one satisfied the required performance level. In the study by Sadashiva et al. (2008), which employed various nonlinear analysis methods, a simple procedure was proposed for considering structural irregularity limits in building design. Irregularity limits based on the inter-story drift response of the building as a result of mass irregularity were determined. Kumar et al. (2012) conducted a performance evaluation of RC buildings with vertical irregularities. For different seismic zones, the diverse dynamic affecting factors for the variation in base shear, period, and story displacement of buildings were computed and discussed comparatively. Akberuddin et al. (2013) performed a nonlinear static analysis of RC frames with vertical irregularity using ETABS software. It was observed that the irregularity in the building's elevation significantly reduced the structure's performance state. Wasey et al. (2022) investigated the performance of regular and irregular buildings equipped with base isolators, fluid viscous dampers, and shear walls. The optimum seismic control system was proposed based on the nonlinear time history analysis. It was found that the base-isolated and damped irregular buildings behaved more efficiently in diminishing the earthquake effect. In another recent study, Raheem et al. (2024) investigated the influence of pounding on the earthquake response of adjacent irregular buildings with a moment-resisting frame structural system and collinear alignment eccentricity. The results showed that low-rise buildings with eccentricity did not significantly influence inter-story drift demands. In contrast, pounding cases revealed decreased story drifts compared to non-pounding cases. Blasi et al. (2024) investigated the behavior of seismically designed and gravity load-designed irregular four-story RC buildings under earthquake loading. A model incorporating nonlinear flexural and shear behavior of the building was established, and a nonlinear incremental dynamic analysis was conducted. It was observed that the accelerations and displacements measured at the floor level were substantially influenced by the irregularity. In the

study by Santos et al. (2024), the influence of vertical irregularities on reinforced concrete (RC) buildings was evaluated by Eurocode 8. The five-story moment-resisting frame structures, which exhibit vertical irregularity due to varying column heights and cross-sections, were analyzed, and it was found that the imposed irregularities in elevation have different influences on the seismic performance. It was also noted that more investigations on this issue were needed to permit their results to be more generalized. The susceptibility evaluation of vertically irregular medium-rise RC buildings with lead rubber bearings was investigated by Chavan and Mate (2025). They determined the acceleration, base shear, story displacement, story drift, and periods to assess the vulnerability response of the buildings. The inclusion of the lead rubber bearing diminished the rapid rise in the drift value where the stiffness irregularity existed. Aslani and Tehrani (2025) investigated the earthquake behavior and collapse capacity evaluation of dual eight- and twelve-story RC buildings with vertical irregularities in their shear walls. The irregularity was related to the lessening in the shear wall width. It was demonstrated that the current seismic code was ineffective in providing an accurate estimation of the earthquake response of RC shear wall buildings with such irregularities, and suggestions were provided for enhancing the existing seismic design provisions.

The studies above highlight the importance of vertical irregularity and the necessity of further analytical research to understand better the seismic response of buildings with different vertical irregularities as a powerful and safer alternative to seismic design. Within this context, apart from the above studies, this investigation addresses the effect of variation in type, degree, and location of vertical irregularity, along with their different distributions over the building elevation, on the seismic performance of the low-rise and medium-rise case studied RC buildings. In the selection of the type of the vertical irregularities, the ones mainly applied due to architectural purposes or for use of the building were taken into account and three different irregularities such as stiffness/strength irregularity due to discontinuous beams or columns, irregularity in mass, and geometric irregularity due to setback and various cases for each kind of vertical irregularity were considered. A total of thirty-two frame models were developed and analyzed to identify the critical irregularities for the studied structures. The variation in the capacity curve, plastic hinge formation, and axial internal force in the side and center columns of the structures was determined and compared for regular and irregular RC buildings.

MODEL DEFINITION

The study focuses on low-rise and medium-rise structures that are chosen to symbolize both regular and irregular buildings. The nonlinear analysis method was selected to determine the behavior of regular and irregular building models under seismic effects. For this purpose, the structural analysis program of SAP 2000 (2011) was employed. As a low-rise building, a three-story framed structure (G+2) was considered, whereas a medium-rise seven-story framed structure (G+6) was also considered. Several types of irregularities that may occur in the buildings, such as mass irregularities, vertical geometry irregularities (setbacks), and stiffness/strength irregularities with missing beams and columns, were investigated.

As reference buildings, typical reinforced concrete frames with a height of three meters and four bays with a span length of four meters in each direction were considered. The concrete strength of the buildings was 30 MPa, and the steel yield strength was 420 MPa. The columns were mainly 30x40 cm and 30x55 cm, reinforced using 1.2% reinforcement in the low-rise and medium-rise buildings, respectively. The beams were mainly 35x55 cm in size, while the beams supporting the missing columns were 35x70 cm. The depth of the slab was 15 cm. The dead load and live load for the building were taken as 5.5 and 5.0 kN/m^2, respectively. ASCE/SEI 7 (2016) was used to determine the loads acting through the buildings, assuming the building is used as a commercial building. For both low-rise and medium-rise buildings, a total of 32 models were generated, representing both regular and irregular building forms. Each irregular structure model was configured to examine which one most significantly influences the structure's reaction to seismic forces. The floor plan and 3D model of the low- and medium-rise regular buildings, considered as reference structures, are given in Figures 1 and 2. The elevation views of the low- and medium-rise irregular frames, which exhibit strength and stiffness irregularities due to missing beams, are presented in Figures 3 and 4, respectively. Additionally, the elevation views of the three-story and seven-story framed structures, which exhibit strength/stiffness irregularities formed by missing columns, are displayed in Figures 5 and 6, respectively. The locations of the missing beams and columns were selected from the bottom, middle, and top story levels of the buildings to illustrate their effects. For this, example cases were selected. In the low-rise structure, the absence of beams in the first and second stories was considered. In the medium-rise structure, the absence of beams was considered in the first, fourth, and sixth stories. Single and double missing column cases in the first and third stories of the low-rise buildings, as well as in the first, fourth, and seventh stories of the medium-rise buildings, were taken

into account. The investigated three-story and seven-story structures, which exhibit mass irregularity and vertical geometric irregularity (setbacks), are presented in Figures 7 through 10. In the cases of mass irregularity exemplified, for the low-rise and medium-rise buildings, the masses at the first and third floor levels were increased. In contrast, the masses at the first, third, fifth, and seventh floor levels were increased by four times the masses at the other floor levels. As seen from these figures, the low-rise buildings with strength/stiffness irregularity caused by a missing beam are denoted as BL, whereas the medium-rise ones are indicated as BM. Similarly, low-rise irregular buildings with strength or stiffness irregularity due to missing columns are denoted as CL, while CM indicates medium-rise ones. For buildings with mass irregularity, ML and MM are used to indicate the low- and medium-rise frames, respectively. On the other hand, irregular buildings with setbacks (vertical geometric irregularity) are represented by SL and SM for the three-story and seven-story structures, respectively.

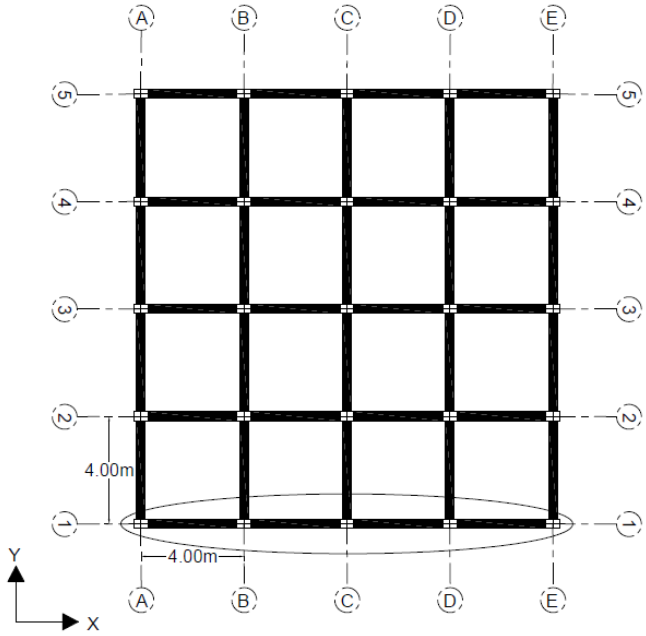


Figure 1. Floor Plan of Regular Buildings

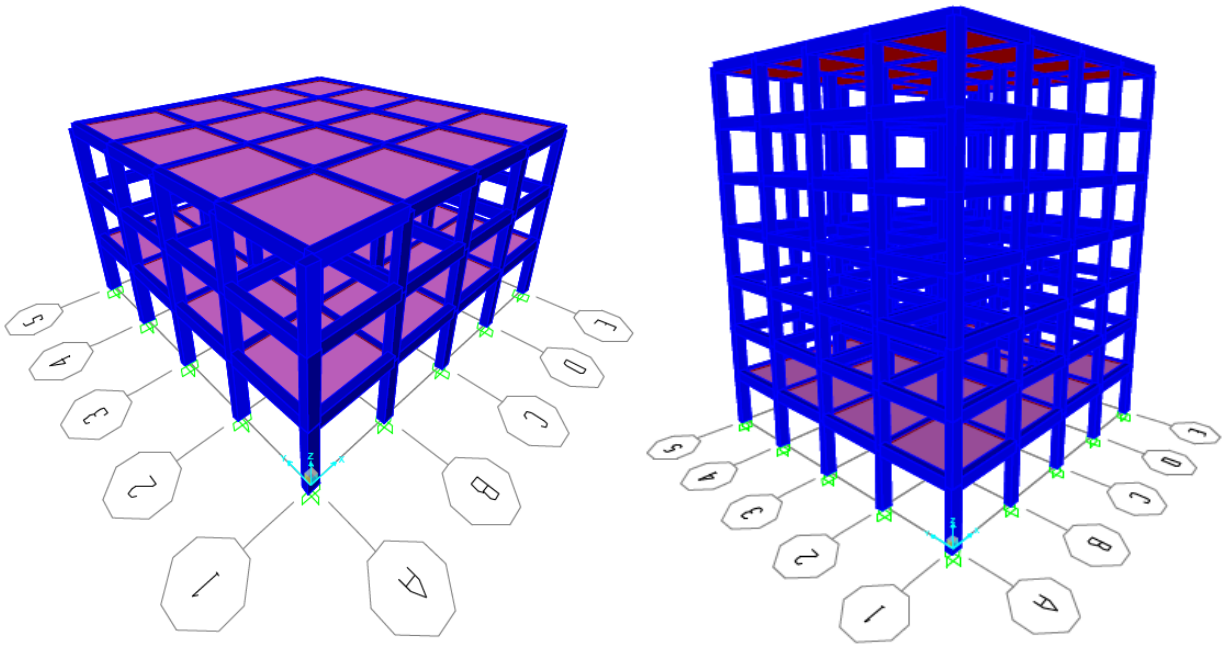


Figure 2. 3D Model of Low and Medium-Rise Regular Buildings

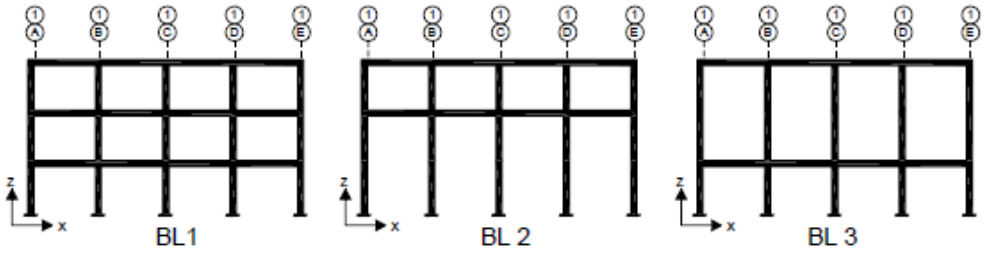


Figure 3. Low-Rise Frames with Strength/Stiffness Irregularity (Missing Beam)

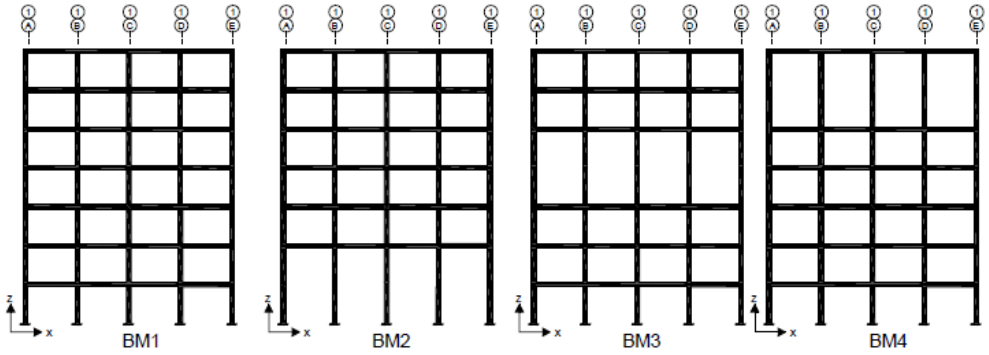


Figure 4. Medium-Rise Frames with Strength/Stiffness Irregularity (Missing Beam)

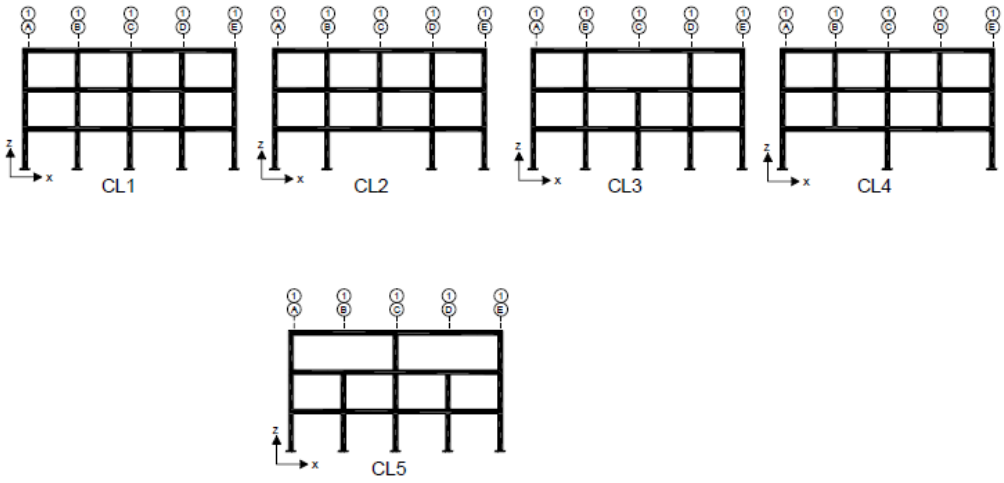


Figure 5. Low-Rise Frames with Strength/Stiffness Irregularity (Missing Column)

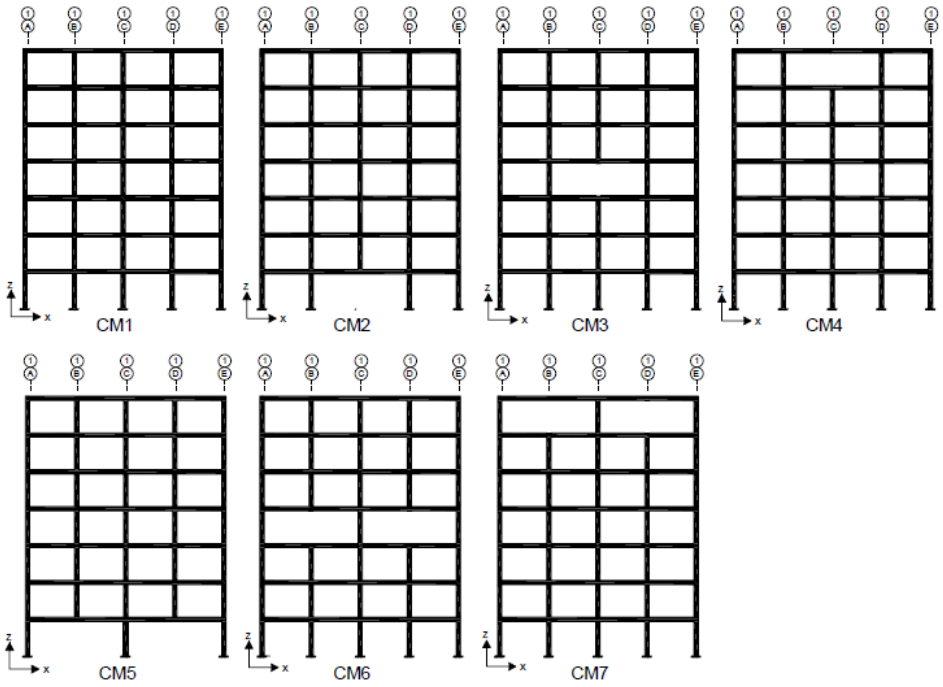


Figure 6. Medium-Rise Frames with Strength/Stiffness Irregularity (Missing Column)

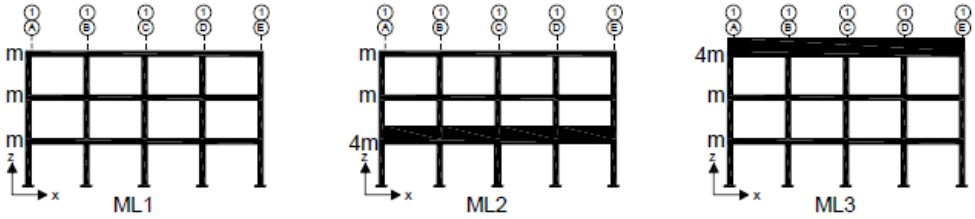


Figure 7. Low-Rise Frames with Mass Irregularity

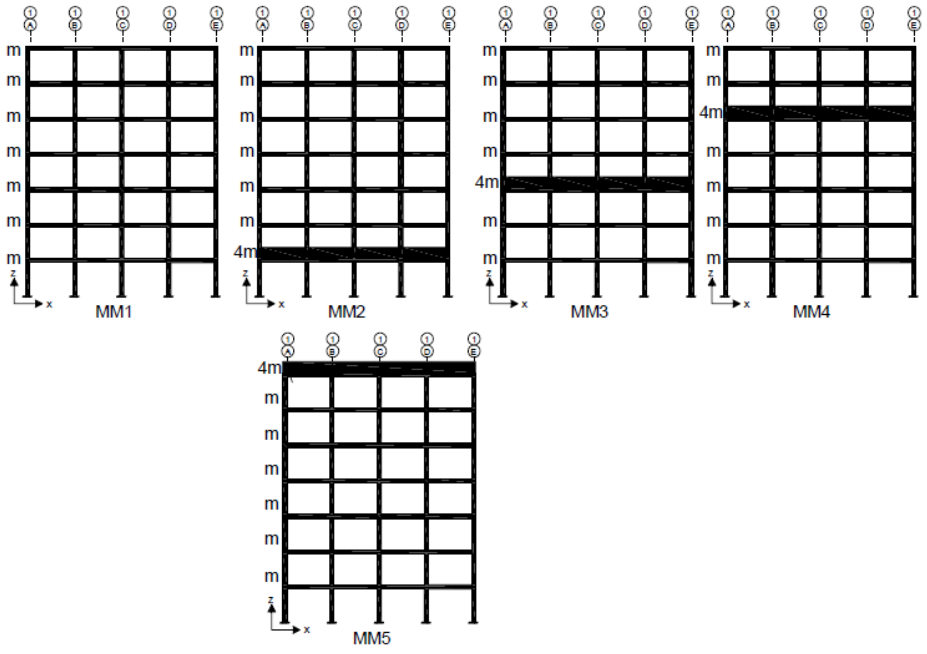


Figure 8. Medium-Rise Frames with Mass Irregularity

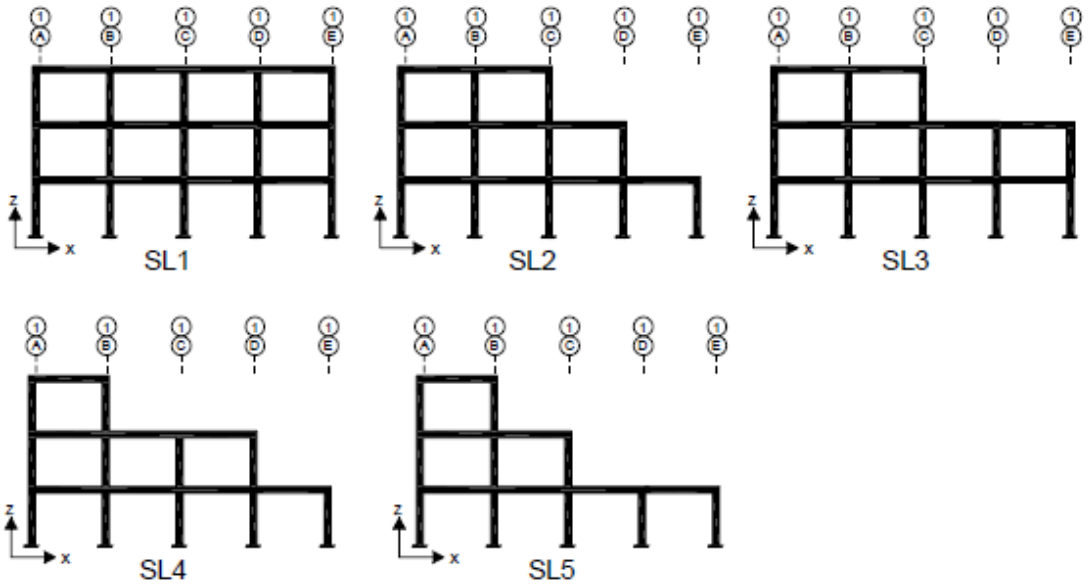


Figure 9. Low-Rise Vertical Geometric Irregular Setback Frames

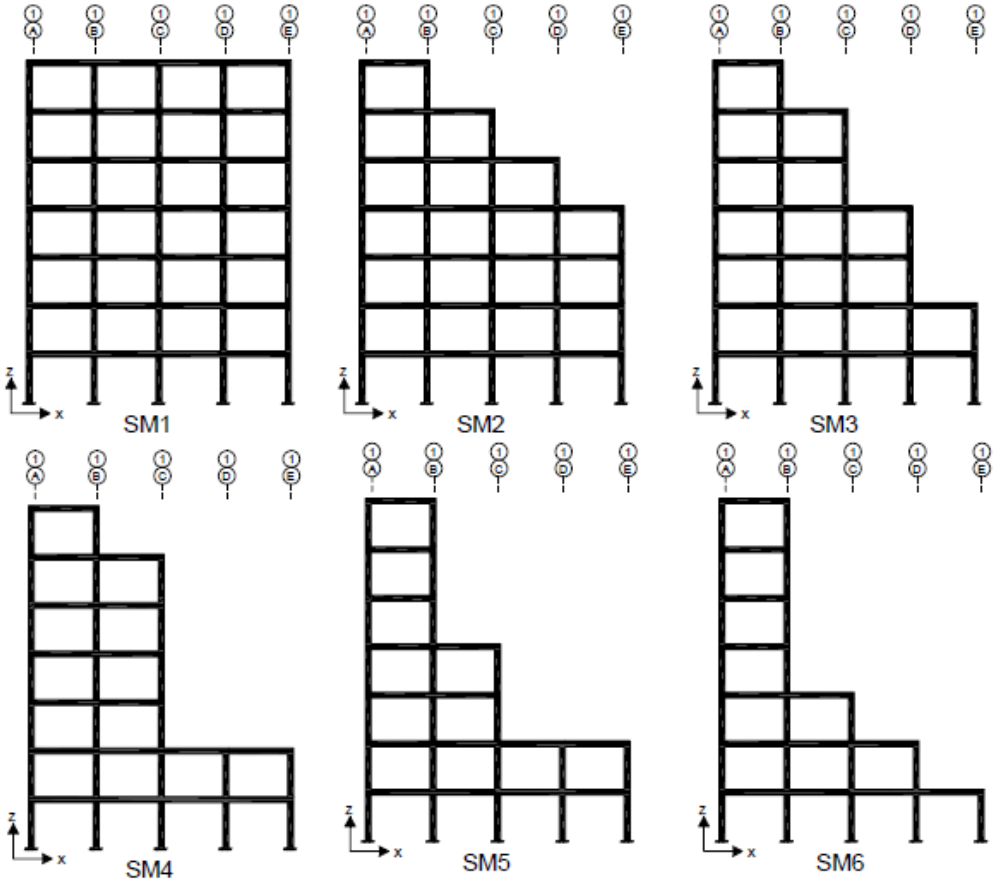


Figure 10. Medium-Rise Vertical Geometric Irregular Setback Frames

NONLINEAR ANALYSIS METHOD

To determine the effect of vertical irregularity on the seismic demand of the studied RC frames, a nonlinear pushover analysis was conducted using the SAP 2000 finite element program. This analysis is a preferred method for evaluating the seismic response of low- to medium-rise buildings. In this method, by exposing a structure to a pattern of

monotonically increasing lateral forces, the inertial forces and displacement demands that the structure would experience when subjected to ground shaking can be simulated. In this study, firstly, gravity loading was applied, and then, based on the first mode of the building, lateral loads were imposed and incrementally increased up to failure.

In addition to the elastic behavior, the plastic behavior of the structural members was considered for the occurrence at possible specific locations defined as plastic hinges in the analytical models. Thus, elastic behavior occurs across the length of the structural members, whereas the hinges defined in the model specifically and separately, completely deform beyond the elastic limit. The integration of plastic strain and plastic curvature, which occurred within a specific hinge length, typically at the order of member depth, represented the inelastic behavior. A chain of hinges was developed to describe the plasticity dispersed along the member length. Additionally, different hinges were defined at the same member based on the types of internal forces that occur on these members. Plasticity was associated with moment-rotation for torsion and bending, while it was related to force-displacement behaviors for axial and shear forces. In this study, hysteretic relations of plastic hinges, as defined according to FEMA 356 (2000), were used at both ends of the column and beam components to account for nonlinearity. Axial force and biaxial moment hinges (PMM) were taken into consideration for the column members, while flexural moment hinges (M3) were taken into consideration for the beams.

Another crucial aspect in the nonlinear static analysis that is utilized to consider the ductility of the structural components comes from the correct and detailed definition of the material models. When modeling beam and column elements, their actions are governed by deformation; the simplified force-deformation model depicted in Figure 11 was utilized (Barros et al., 2014; Bento et al., 2004). The load-deformation curve's initial line, indicated as AB, shows a linear response for a structural member, reaching its yield capacity at point B. The following part of the curve, BC, indicates some hardening capacity for the member, having typically low inclination, ranging from 0% to 10% of the elastic part's slope AB value. The CD part shows the decrease in resistive ability, while the DE part denotes the plasticization. For both primary (P) and secondary (S) structural members, the criteria for acceptable deformation could be determined as given in Figure 11. As seen in the figure, three performance levels were defined: immediate occupancy (IO) for the structure's utility and serviceability, life safety (LS) for life preservation, and collapse prevention (CP). These were defined according to FEMA-356 (2000).

As mentioned above, the nonlinear behavior, defined by the plastic hinge characteristics of the structural elements, was taken into account based on the component type and failure mechanism, as outlined in FEMA 356 (2000). In the pushover analysis, firstly, constant gravity loads are applied and kept on the structure. Secondly, the lateral loads were used based on an assumed pattern determined in general according to the first mode of vibration. Due to the increased lateral loads, the structural members could behave beyond the elastic range, and the observed elastic and inelastic deformations also progressed. A total base shear versus roof level displacement curve, also known as a capacity curve, was obtained. This curve illustrates the loss of rigidity, the potential early failure, and the deformation demand expected under seismic effects. (Fardis et al., 2015). Therefore, from the analysis, the nonlinear behavior in terms of plastic rotation observed in the structural members under progressively increasing lateral loads was evaluated, and the capacity curves of regular and irregular frame buildings with different types of vertical irregularities were obtained.

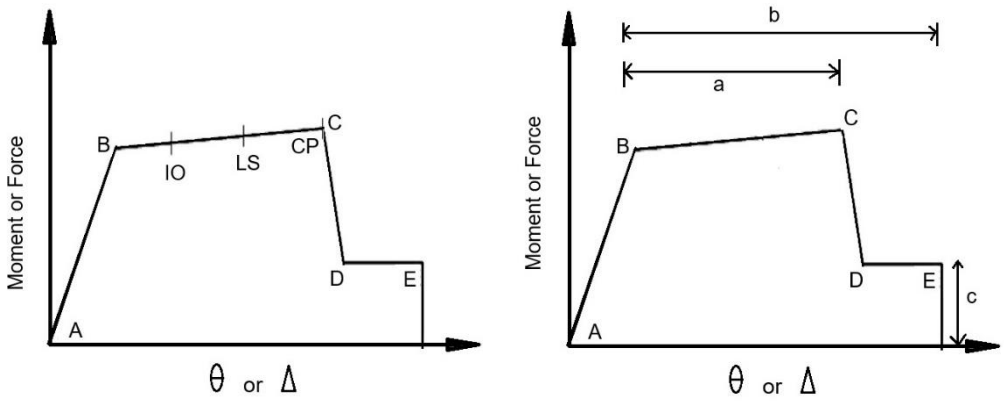
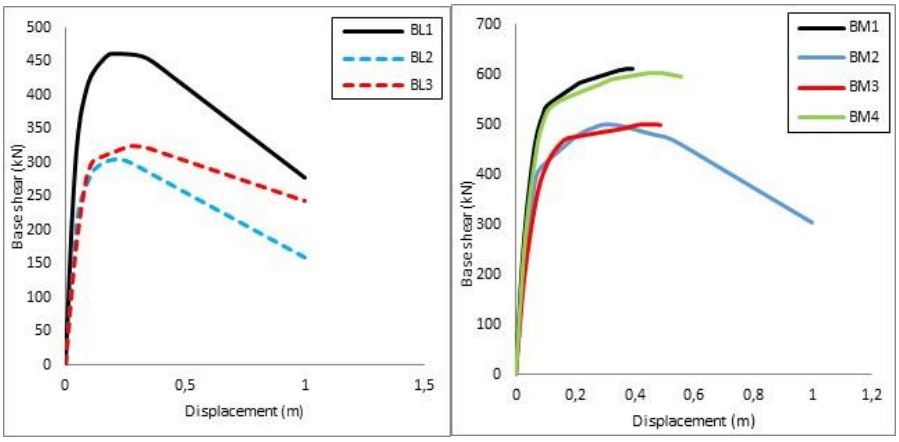


Figure 11. Inelastic Behavior Model Used for the Structural Elements (FEMA 356, 2000)

RESULTS AND DISCUSSION

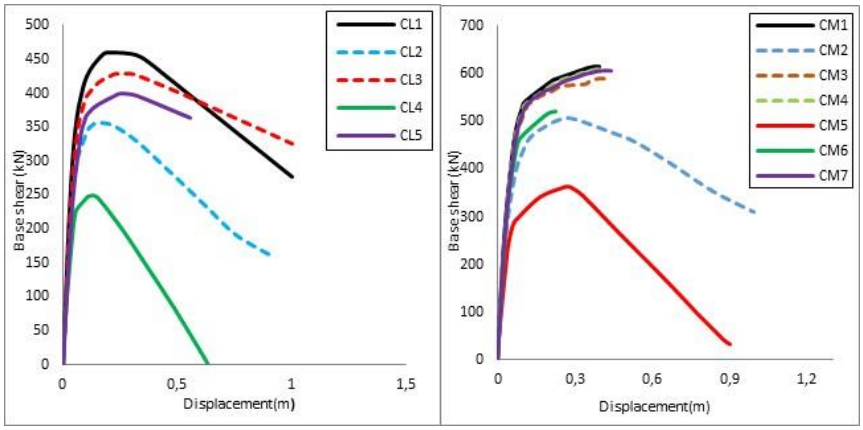
In the current study, low-rise and medium-rise buildings having vertical irregularities such as irregularity in mass, geometry (setbacks), strength/stiffness; totally 32 different cases were analyzed by the application of nonlinear static analysis methodology and the results of the analyses were compared to elaborate the impacts of various kinds of vertical irregularities on the seismic behavior of the case studied buildings.

Pushover curves for the frames with strength and stiffness irregularities due to missing beams are illustrated in Figure 12. As seen from this figure, the regular frame BL1's maximum base shear was approximately 450 kN, whereas for the irregular buildings BL2 and BL3, this value reached approximately 300 kN and 325 kN, respectively. When medium-rise structures were compared, the regular frame BM1 had a base shear up to about 620 kN, whereas the irregular frames BM2, BM3, and BM4 had base shears reaching up to 520, 500, and 600 kN, respectively. Additionally, the behavior in stiffness seemed to be similar to that of the base shear, which means that the regular 3-story and 7-story frames, namely BL1 and BM1, had greater stiffness than the irregular frames. As seen in Figure 12, the low-rise and medium-rise case studied frames had nearly equal strength and stiffness up to 200 kN and 350 kN, respectively. After those points, differences among the case study frames become evident, which comes from the differences in the nonlinear behavior of the frames. Additionally, due to the missing beam located in a lower story, in BL2 and BM2, the frames' strength and stiffness are significantly lower than those found in BL3 and BM3, which have missing beams in the upper stories.



(a) (b)

Figure 12. Capacity Curves of Case Studied a) 3-Story and b) 7-Story Buildings Having Strength and Stiffness Irregularity Due to Discontinuous Beams

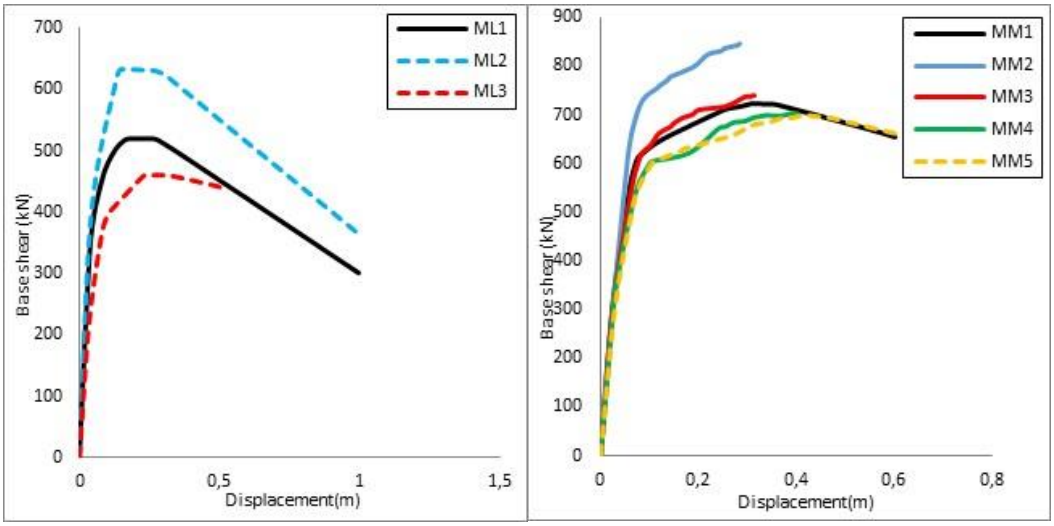


(a) (b)

Figure 13. Capacity Curves of Case Studied a) 3-Story and b) 7-Story Buildings Having Strength and Stiffness Irregularity Due to Discontinuous Columns

Figure 13 displays the lateral load carrying capacity of the frames with strength and stiffness irregularity because of the discontinuous column cases, similar to the previous strength and stiffness irregularity because of the missing beam cases, it was revealed that the base shear capacity of regular frames CL1 and CM1 were higher than that of the irregular frames.

Figure 14 illustrates the lateral load-carrying capacity of the case study mass irregularity frames. As realized from the figure, the base shear capacity of the irregular low-rise frame having mass irregularity, as in the case of ML2, is greater than that of the regular and the other irregular cases in mass. On the other hand, among the medium-rise frames having mass irregularity, the lateral load capacity of MM2 and MM3 irregular frames is higher than that of the regular and the other irregular cases in mass. It was noted that the peak base shear occurred in the low-rise buildings designated as ML2, which was approximately 630 kN; in contrast, for medium-rise buildings, it was observed in MM2, which was about 850 kN. It is worth noting that for cases MM2 and MM3, after the peak capacity for the base shear was reached, the frames also lost their deformation capacity. On the other hand, among the medium-rise frames, MM1, MM4, and MM5, which are the case-study frames, the low-rise frames, ML2 and ML3, display a more ductile behavior.



(a) (b)

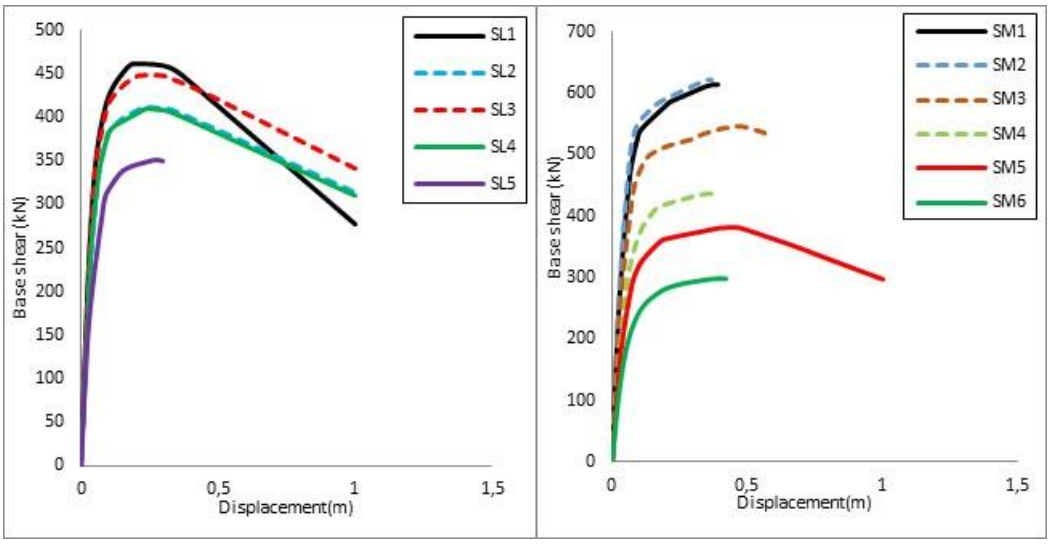
Figure 14. Capacity Curves of Case Studied a) 3-Story and b) 7-Story Buildings Having Mass Irregularity

Figure 15 demonstrates that for the vertical geometric irregularity-setback frames, the stiffness values for all cases are relatively close to each other until the base shear reaches 200 kN and 150 kN for the 3-story and 7-story frames, respectively. After considering these points, the variation in stiffness and the difference in their nonlinear behavior become obvious. The regular cases generally had a greater load capacity than the irregular ones, except for the cases of SM2 and SL3, which were almost the same as the regular ones. Among the frames with vertical geometry irregularity, as the ratio of the setback increases, both the lateral load-carrying capacity and the stiffness of the frames decrease, indicating that SL5 and SM6 had the lowest lateral load capacity among the low- and medium-rise frames, respectively.

For all case study buildings, the nonlinear behavior observed at the end of the pushover analysis is presented in Figures 16 to 23, which show the deformed shapes and plastic hinges formed during the last step of the pushover analysis, based on the FEMA 356 performance limit state definition. It is worthy to note that in these figures, there isn't plastic deformation till point B, where the hinge comes to the yield point, point C indicates the ultimate capacity, point D shows the residual strength and point E denotes the peak displacement capacity of the hinge afterward getting the total failure (Pambhar, 2012). At each deformation step of the pushover analysis, the location of the hinges and their plastic rotation in the elements, as well as the performance limit state of the hinges defined based on FEMA 356, which are IO, LS, and CP, can be identified by color alteration.

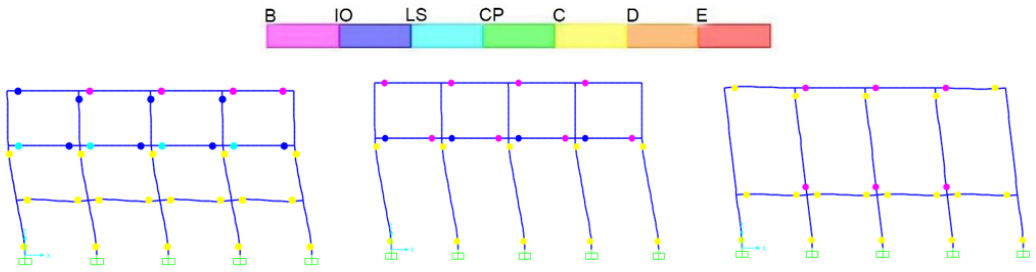
The distribution of plastic hinges in the final stage for the three-story buildings, BL1, BL2, and BL3, is shown in Figure 16. The graphic shows that in the situations of BL1 and BL3, the building reaches a collapsed state not only

in the columns but also in the beams. Nevertheless, in the case of BL2, it only reaches a collapsed state in the columns. Only the first-floor beams came to the collapse point in instance BL1, while both the first and second-story columns went to the same point. However, in the case of BL3, the column and beam elements at that story receive a collapse prevention level since the second-story beam elements have not been available. In other situations, because the second-floor beams support a relatively normal load, they are at the Immediate Occupancy performance level. The regular building reached a state of collapse due to the formation of nonlinear behavior in the first and second-story columns, as well as the first-story beams, which had the most significant capacity among all. In the irregular building BL2, with the absence of the first-story beams, it was observed that the building reached its capacity with the formation of the hinges in the columns of the first and second stories. In the case of BL3, a behavior closer to the regular one, characterized by nonlinear behavior at the first-story beams, was observed. However, due to the missing beams, the nonlinear behavior shifted to the third-story columns.



(a) (b)

Figure 15. Pushover Curves of Case Studied a) 3-Story and b) 7-Story Frames Having Vertical Geometry Irregularity-Setback



BL1 BL2 BL3

Figure 16. Plastic Hinge Formation for Low-Rise Frames with Strength/Stiffness Irregularity Due to Missing Beam

Based on the outcomes displayed in Figure 17, except for BM2, where the first-story beams do not exist, the beams of the first three stories reached failure. In all the case study buildings, some or all of the ground floor columns reached a state of collapse, while for BM, three more columns on the third floor also reached a state of collapse. Since the fourth floor's beams have been removed, the columns must support a greater load than in the regular case, which results in a higher deformation demand for them. However, the structure is not significantly impacted by the removal of the beams on the sixth story. Additionally, the higher floor beams and columns have an immediate occupancy limit state, are in a safe condition, or have just reached yield.

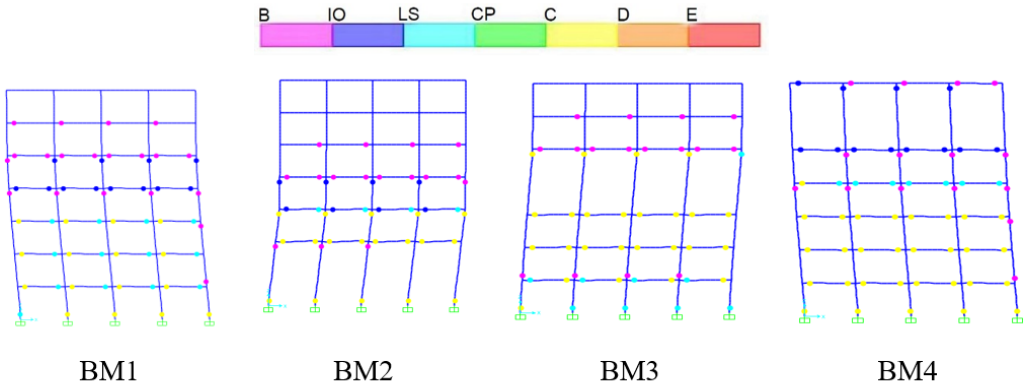


Figure 17. Plastic Hinge Formation for Medium-Rise Frames with Strength/Stiffness Irregularity Due to Missing Beam

In the case of the ground story, beam elements achieve their maximum deformation capacity. CL4 is the worst scenario, as indicated by the formation of plastic hinges, as shown in Figure 18. This occurs as a result of the removal of ground-level columns, which necessitates that beams transfer their weight to nearby columns, and existing columns must carry a greater amount of lateral loads. Additionally, as a result, the collapse prevention state is seen for every column on that floor. Although the beam elements adjacent to the missing column undergo the maximum deformation, the irregular frame CL2 poses fewer risks compared to the irregular frame CL4. There are varying amounts at various locations, ranging from the yield point to collapse prevention performance states, in the remaining CL1, CL3, and CL5 cases.

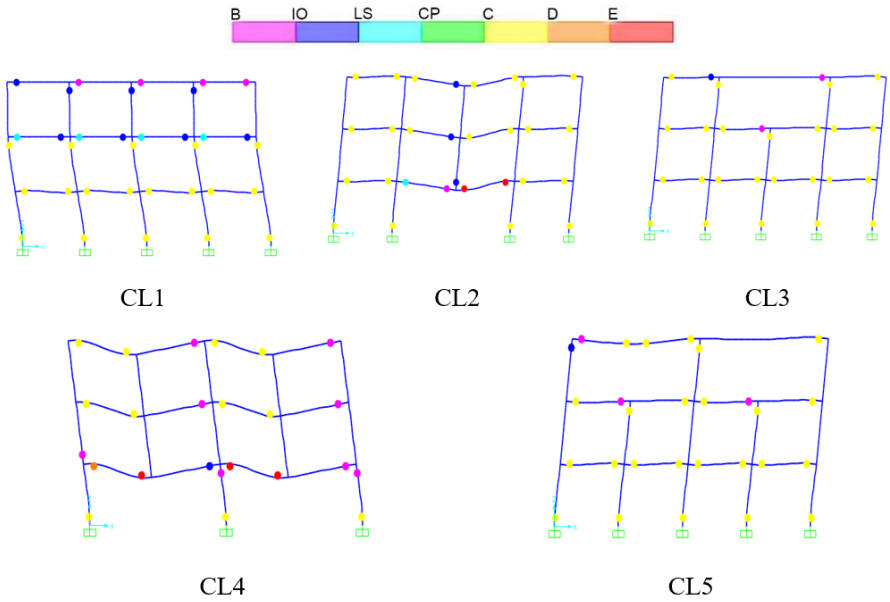


Figure 18. Plastic Hinge Formation for Low-Rise Frames with Strength/Stiffness Irregularity Due to Missing Column

As observed in Figure 19, the removal of ground floor columns in the irregular building of CM5 requires the beam elements to transfer their loads to the neighboring columns, which are then subjected to a greater amount of both gravity and lateral loads. In addition to this, since the ground floor beams reach their maximum displacement capacity at many points and the collapse level was reached by the columns on that floor, among the irregular buildings with missing columns, CM5 becomes the worst-case scenario. Although the beams adjacent to the discontinuous column achieve the ultimate capacity for displacement, the irregular case CM2 appears to be better than the irregular case CM5, as it requires a smaller number of points to reach failure. Different performance levels, ranging from yield to collapse prevention states at various locations within the structural members, were observed in other irregularly designed case study buildings, designated as CM1, CM3, CM6, and CM7.

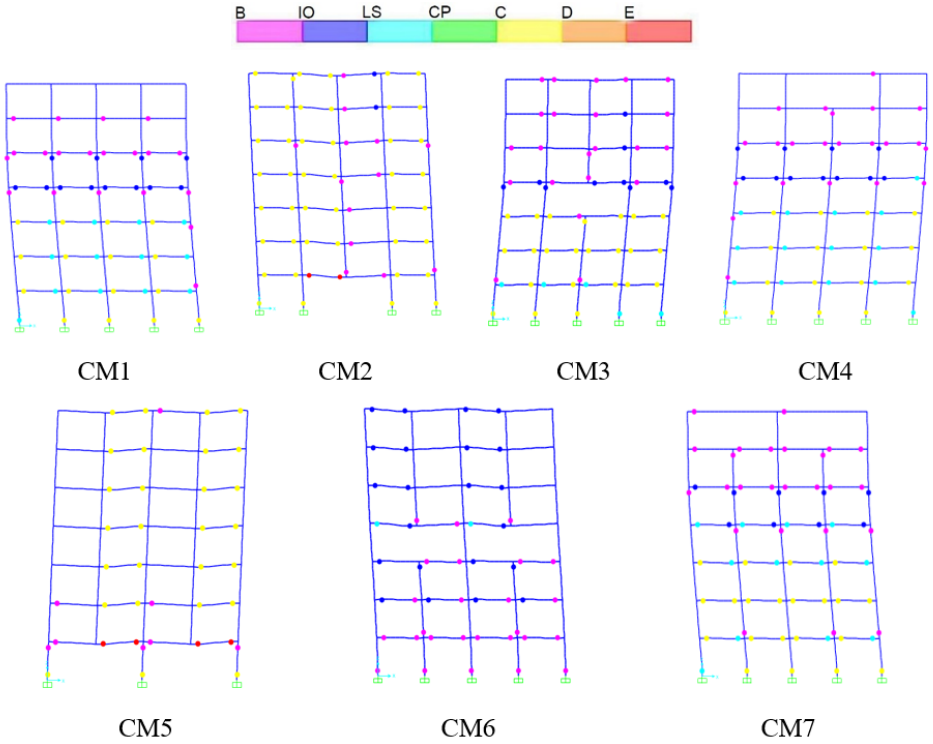


Figure 19. Plastic Hinge Formation for Medium-Rise Frames with Strength/Stiffness Irregularity Due to Missing Column

Figure 20 reveals that there is little difference in the failure behavior of the ML1 and ML2 buildings, indicating that the greater mass at the first floor has a slight effect on the deformed shape at the final stage. However, when a greater mass was applied on the second floor, its impact was evident throughout the entire structure, as indicated by a larger number of members; nearly every floor's columns and beams reached a state of collapse prevention.

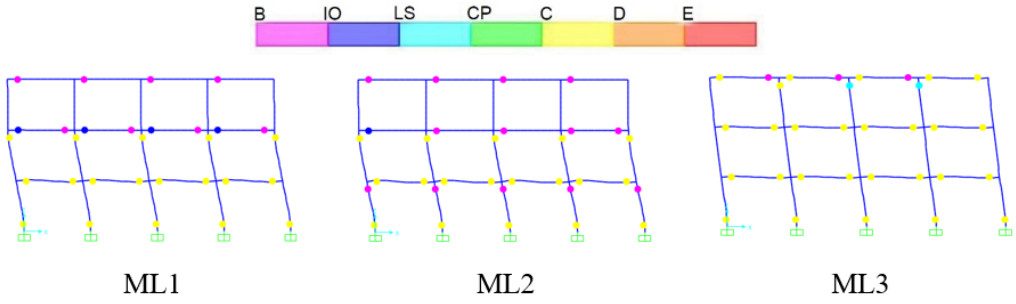


Figure 20. Plastic Hinge Formation for Low-Rise Frames with Strength/Stiffness Irregularity Due to Mass Irregularity

For medium-rise buildings similar to low-rise ones, many of the beam and column members beneath the greater mass were subjected to collapse prevention. At the same time, some were also required to meet life safety performance standards, as shown in Figure 21. On the other hand, for the beam and column members above the heavy mass level, generally yield and immediate occupancy states were experienced, indicating that the excessive weight has a slight impact on the structural parts above. Figures 22 and 23 illustrate the variation in the distribution of plastic hinges for regular and irregular buildings with vertical geometry-setback, respectively, for 3-story and 7-story buildings. Based on these figures, it was noted that the uneven geometry primarily affects the beam elements rather than the column elements. Most of the beams achieve a collapse prevention level in the irregular buildings, except for SL5 and SM4, which have fewer beams in the collapse prevention limit state.

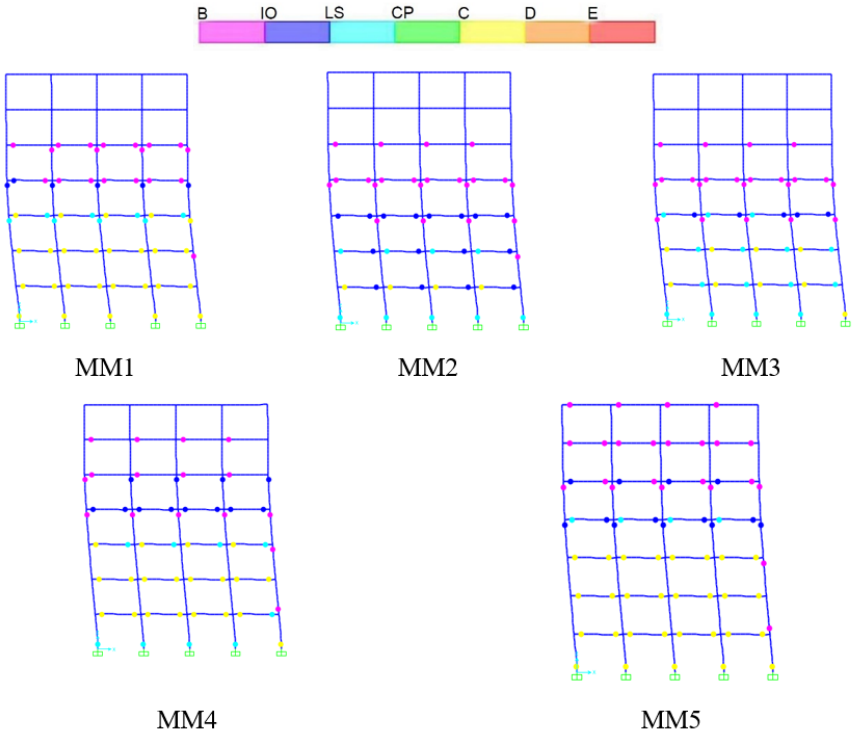


Figure 21. Plastic Hinge Formation for Medium-Rise Frames with Mass Irregularity

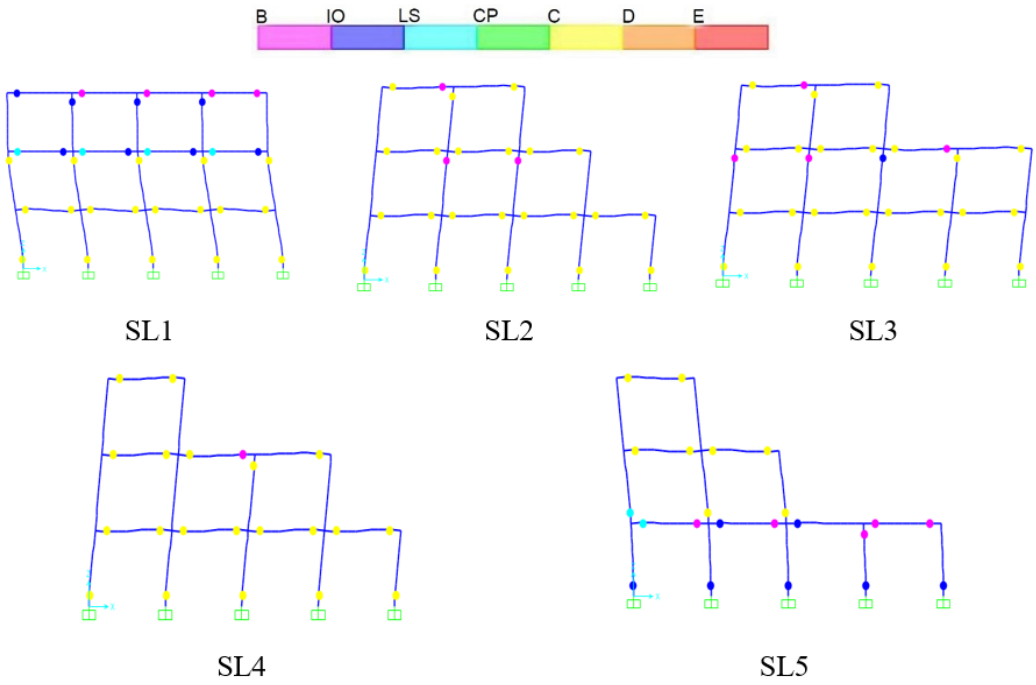


Figure 22. Plastic Hinge Formation for Low-Rise Frames Having Vertical Geometry Irregularity Due to Setback

For the strength and stiffness of irregular buildings with missing columns, the variation of axial force in the columns was investigated. For this purpose, the axial internal forces in the central and side columns of three- and seven-story irregular reinforced concrete (RC) buildings were compared. These values were taken from the nonlinear static analysis results. According to the findings presented in Figure 24(a), for the case studied, the absence of a middle column has almost no effect on the axial force of the side column for buildings of CL2 and CL3. It was observed that the axial force in the side columns of the CL1, CL2, and CL3 case studied buildings varied from approximately 230

kN to 80 kN from the first through the third story. Since the side column in CL4 had to support the axial force of the discontinuous column, the axial internal force in that column peaked on the first floor. Furthermore, among the other investigated buildings in CL5, the axial force value in the side column is the greatest on the third floor, as the missing column is located on that floor. Figure 24(b) reveals that in CL2 and CL3, the middle column axial forces were lower than the usual frame axial internal forces due to the absence of the column. However, since the middle column should support the missing columns' axial force, the axial internal force was recorded as the maximum in CL4 and CL5 situations. In CL4, once the discontinuous column was on the first story, the axial force increased quickly from the third to the first floor column; however, in CL5, once the missing column was on the third story, the axial internal force rose slightly as compared to CL4. In CL2, in the first story, the column axial force was zero because there was no column on the first floor of the building. Since there wasn't a column to support the force, it was evident that the first floor's axial force, like in CL2, was observed to be zero.

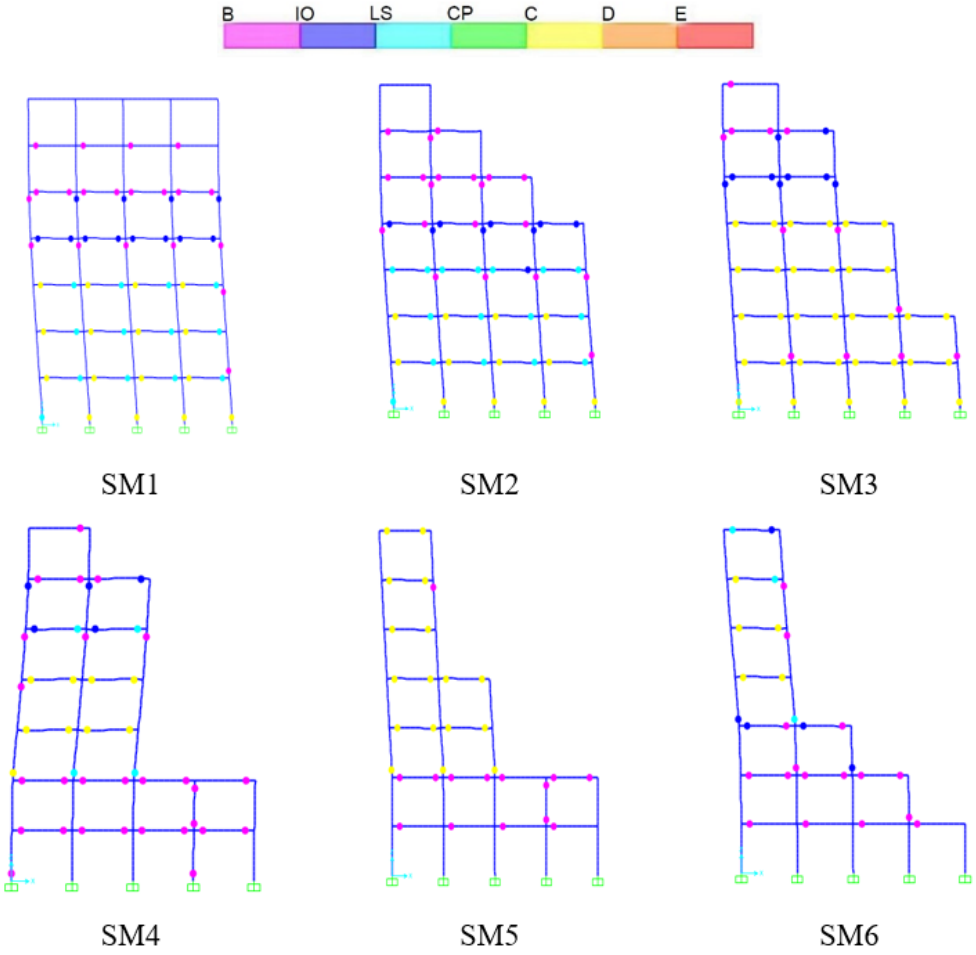
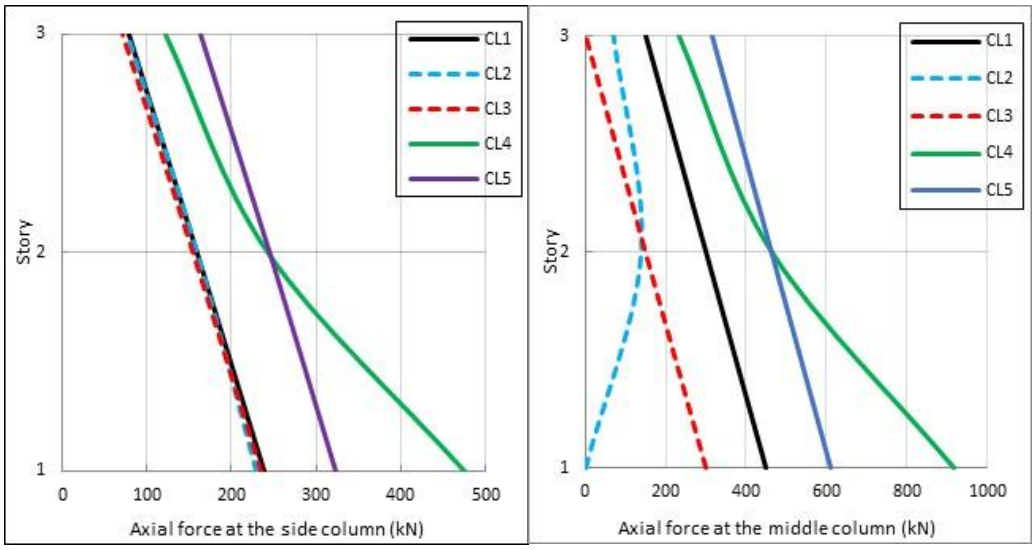


Figure 23. Plastic Hinge Formation for Medium-Rise Frames Having Vertical Geometry Irregularity Due to Setback

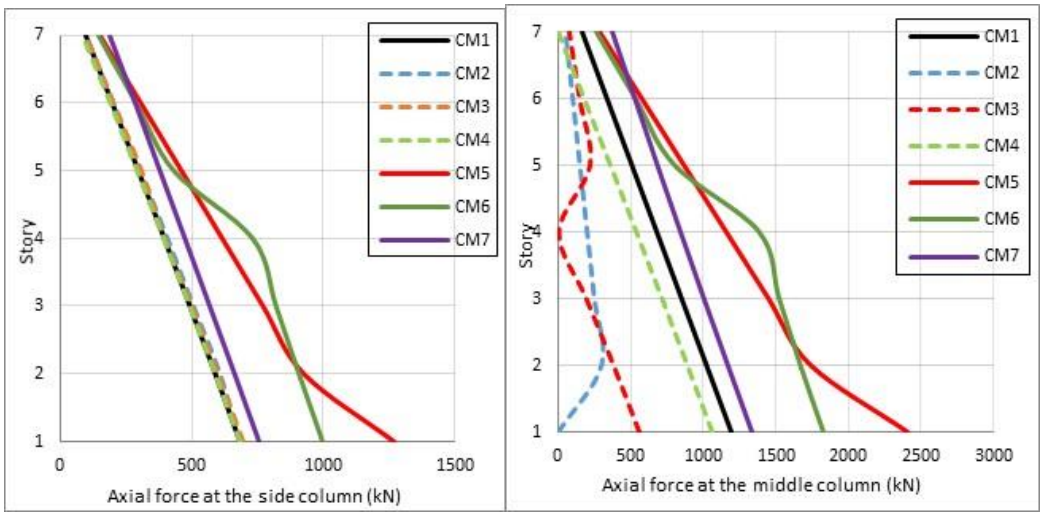
In the case of CM2, CM3, and CM4, the middle missing column didn't alter the side column axial force as shown in Figure 25(a). It was noted that the axial force applied to the side columns did not affect the middle one. Thus, from the seventh to the first level, for instance, the axial force for the case of CM1, CM2, CM3, and CM4 dropped linearly. Since the side column on the first floor should support the missing columns' axial force, it reached its maximum in the irregular frame CM5 once the discontinuous column was not the middle one. Furthermore, the axial force grew linearly from the third floor to the first floor, but it was larger when the missing column was in the middle column on the fourth floor. The axial force positively varied from the seventh story to the first story if the discontinuous column was in the middle.



(a) side column (b) middle column

Figure 24. Plotting of Axial Forces at the Side and Middle Columns of the 3-Story Frame with a Missing Column

Since there wasn't a column to support the force, it was clear from the result curves given in Figure 25(b) that the internal axial forces of the cases CM3 on the third level and CM2 on the first floor were zero. For the scenario of CM7, where the missing column was in the center of the seventh floor, the axial force grew directly from the seventh story to the first story column; whereas, for scenario CM5, where the discontinuous column was in the first story, the axial force increased quickly. Additionally, when there was a discontinuous column in the middle of CM2, CM3, and CM4, the internal axial force of the middle column was lower than that of the usual frame. However, as the intermediate column should transmit the axial force of the missing columns, the axial force was the maximum in the other irregular frames, namely, CM5, CM6, and CM7.



(a) side column (b) middle column

Figure 25. Plotting of Axial Forces at the Side and Middle Columns of the 7-Story Frame with a Missing Column

CONCLUSIONS

The seismic response of reinforced concrete (RC) buildings with varying vertical irregularities was investigated. From the findings of this investigation, the following conclusions could be obtained:

- It was observed that in the presence of vertical irregularity, the seismic response of both low-rise and medium-rise RC buildings was negatively influenced. However, the degree of this effect depended mainly on the type of vertical irregularity existing in the structures.

- The vertical irregularity and the corresponding base shear capacity of the building had a reverse relationship. The base shear of the building generally diminished when the degree of irregularity increased. Accordingly, the lateral seismic capacity of the building is reduced. This issue needs to be considered in the design of structures with irregular elevations.
- The seismic demand of the building was observed to be related to the existence of vertical regularity. The strength and displacement capacity of irregular buildings was observed to be considerably different from that of regular ones. The type and degree of irregularity that occurred in the building are the primary focus of this response.
- The energy absorption capacity of irregular buildings was mainly lower than that of the regular ones, especially for low-rise cases with the strength/stiffness irregularity due to the missing beam and column.
- It was pointed out that both low-rise and medium-rise buildings with the strength/stiffness irregularity (missing column) yielded adverse results as compared to the buildings with other types of vertical irregularities of strength and stiffness due to missing beam, mass, and geometry due to setbacks.
- For most cases, the stiffness and strength of low-rise and medium-rise regular buildings were considerably higher than that of irregular buildings, irrespective of the type of vertical irregularity.
- For the case of strength and stiffness irregularity in buildings due to missing columns, the absence of columns in the buildings had a vital effect, irrespective of the number of stories of the buildings. Moreover, the location of the missing columns, especially from which story they were removed, influenced the axial force distribution in the other column members and also the plastic hinge formations observed in these irregular buildings.

RECOMMENDATIONS FOR FUTURE RESEARCH

In this study, the results of nonlinear static analysis, focusing on the differences between regular and vertically irregular buildings, were investigated. The vertical irregularities, strength/stiffness irregularities due to missing columns and beams, irregularities in mass, and geometric setbacks were considered. The effect of varying the location of vertical irregularity over the building height was considered. Thus, based on different types of vertical irregularities, their varying degrees and distributions, a total of thirty-two buildings were examined comparatively. However, as a further research, to be able to draw more general conclusions, considering different seismic demands and different soil conditions, performance points for each type of building could be determined; their performance states at these performance points could be comparatively analyzed, the types of the buildings, the variation in the location of the irregularities, could be increased. By using earthquake accelerations determined for various seismic demands, time-history analysis could be conducted.

REFERENCES

Akberuddin, M.A.M., & Saleemuddin, M.Z.M. (2013). Pushover analysis of medium-rise multi-story RCC frame with and without vertical irregularity. *International Journal of Engineering Research and Application*, 3(5), 540-546.

Aslani, M., Tehrani, P. Seismic response and collapse capacity assessment of dual RC buildings with vertical irregularities in shear walls. Sci Rep 15, 9966 (2025). https://doi.org/10.1038/s41598-025-94328-z.

ASCE/SEI 7 2016. Minimum design loads for buildings and other structures. Reston, VA: American Society of Civil Engineers, USA.

Barros, R.C., Braz-César, M.T., Naderpour, H., & Khatami, S.M. (2014). Comparative review of the performance-based design of building structures using static non-linear analysis. *Journal of Rehabilitation in Civil Engineering*, 2(1), 75-92. https://doi.org/10.22075/jrce.2014.214

Bento, R., Falcao, S., & Rodrigues, F. (2004) Nonlinear static procedures in performance based seismic design. In 2004, 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, Canada. Paper No. 2522

Blasi, G., Scarlino, A.S., Chirivì, S. et al. Seismic response of irregular RC buildings designed for gravity and seismic loads. Bull Earthquake Eng 22, 5231–5257 (2024). https://doi.org/10.1007/s10518-024-01971-4

Chavan, S.A., Mate, N.U. Vulnerability assessment of vertical irregularities in medium-rise reinforced concrete structures using lead rubber bearing. Asian J Civ Eng (2025). https://doi.org/10.1007/s42107-024-01260-0

Cassis, J.H., & Cornejo, E. (1996) Influence of vertical irregularities in the response of earthquake resistant structures. In 1996, 11th World Conference on Earthquake Engineering, Balkema, Rotterda, Paper No. 1102.

Das, S., & Nau, J.M. (2003). Seismic design aspects of vertically irregular reinforced concrete buildings. *Earthquake Spectra*, 19(3), 455-477. https://doi.org/10.1193/1.1595650

Eurocode 8 2004 Design of Structures for Earthquake Resistance - Part 1: General Rules, Seismic Actions and Rules for Buildings (BS EN 1998-1:2004), European Committee for Standardization, Brussels, Belgium.

Fardis, M. N., Carvalho, E. C., Fajfar, P., & Pecker, A. (2015). Seismic design of concrete buildings to Eurocode 8. 1st Edition, CRC Press, London. https://doi.org/10.1201/b18097

FEMA-356, (2000). Prestandard and Commentary for the Seismic Rehabilitation of Building. Federal Emergency Management Agency, Washington (DC).

Güler, K., Güler, M.G., Taskin, B., & Altan, M. (2008) Performance Evaluation of a Vertically Irregular RC Building. In 2008, 14th World Conference on Earthquake Engineering, Beijing, China

IS-1893 2016 Part 1. Criteria for earthquake resistant design of structures, Part 1, General provisions and buildings, Rev. 5, Bureau of Indian Standards, New Delhi, India.

Kamath, K., Kalibhat, M.G., Prasad, S.K., & Pai, R.R. (2014). Seismic performance of soft storey rc frames at different storey levels from pushover analysis. *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering*, 3, 7-13

Kara, N., & Celep, Z. (2012) Nonlinear seismic response of structural systems having vertical irregularities due to discontinuities in columns. In 2012, 15th World Conference on Earthquake Engineering, Lisbon, Portugal.

Kumar, C.R., Narayan, K.B., Prashanth, M.H., Manjunatha, H.B., & Reddy, D.V. (2012) Seismic Performance Evaluation of RC Buildings with Vertical Irregularity. In 2012, the Iset Golden Jubilee Symposium, Indian Society of Earthquake Technology, Department of Earthquake Engineering Building, IIT Roorkee, Roorkee, Paper No. E012.

Wasey, M.A., Siddiqui, M.M., & Azeem M.A. (2022) Optimum seismic control systems for vertically irregular buildings. *Materials Today: Proceedings*, 65(2) 1674-1689. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.04.710

Mezzi, M., Parducci, A., & Verducci, P. (2004) Architectural and structural configurations of buildings with innovative aseismic systems. In 2004, 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, B.C., Canada, Paper No. 1318.

Pambhar, D. J. (2012). Performance based pushover analysis of RCC frames. *International Journal of Advanced Engineering Research and Studies IJAERS*, 1, 329-333.

Raheem, S.E.A., Youssry, A., Soghier, M.H., Fooly, M.Y.M., Gamal Y.A.S. (2024) Pounding impact on seismic demands for adjacent irregular buildings with collinear alignment eccentricity. *Structures*, 69, 107269. https://doi.org/10.1016/j.istruc.2024.107269

Sadashiva, V. K., MacRae, G. A., & Deam, B. L. (2008). Determination of irregularity limits. In 2008, 14th World Conference on Earthquake Engineering, Beijing, China.

Santos, D.; Melo, J.; Varum, H. Comparative Analysis of the Impact of Vertical Irregularities on Reinforced Concrete Moment-Resisting Frame Structures According to Eurocode 8. Buildings 2024, 14, 2982. https://doi.org/10.3390/buildings14092982.

SAP 2000 (2011) Computers and Structures Inc., Structural Analysis Program Manual, Berkeley, CA.

Soni, D.P., & Mistry, B.B. (2006). Qualitative review of seismic response of vertically irregular building frames. *ISET Journal of Earthquake Technology*, 43(4), 121-132.

TBDY 2018. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği. Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Ankara.

KSÜ Mühendislik Bilimleri Dergisi, 28(2), 2025
Araştırma Makalesi

KSU J Eng Sci, 28(2), 2025
Research Article

Kahramanmaras Sutcu Imam University
Journal of Engineering Sciences

Geliş Tarihi : 02.03.2025
Kabul Tarihi :12.04.2025

Received Date : 02.03.2025
Accepted Date : 12.04.2025

EXPLORING THE EFFECTIVENESS OF PRE-TRAINED TRANSFORMER MODELS FOR TURKISH QUESTION ANSWERING

TÜRKÇE SORU CEVAPLAMA İÇİN ÖNCEDEN EĞİTİLMİŞ TRANSFORMER MODELLERİNİN ETKİNLİĞİNİ KEŞFETME

Abdullah Talha KABAKUŞ (ORCID: 0000-0003-2181-4292)

Düzce Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Düzce, Türkiye

Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Abdullah Talha KABAKUŞ, talhakabakus@duzce.edu.tr

ABSTRACT

Recent advancements in Natural Language Processing (NLP) and Artificial Intelligence (AI) have been propelled by the emergence of Transformer-based Large Language Models (LLMs), which have demonstrated outstanding performance across various tasks, including Question Answering (QA). However, the adoption and performance of these models in low-resource and morphologically rich languages like Turkish remain underexplored. This study addresses this gap by systematically evaluating several state-of-the-art Transformer-based LLMs on a curated, gold-standard Turkish QA dataset. The models evaluated include *BERTurk*, *XLM-RoBERTa*, *ELECTRA-Turkish*, *DistilBERT*, and *T5-Small*, with a focus on their ability to handle the unique linguistic challenges posed by Turkish. The experimental results indicate that the *BERTurk* model outperforms other models, achieving an F1-score of 0.8144, an Exact Match of 0.6351, and a BLEU score of 0.4035. The study highlights the importance of language-specific pre-training and the need for further research to improve the performance of LLMs in low-resource languages. The findings provide valuable insights for future efforts in enhancing Turkish NLP resources and advancing QA systems in underrepresented linguistic contexts.

Keywords: Artificial intelligence, question answering, transformer, large language model, natural language processing

ÖZET

Doğal Dil İşleme (NLP) ve Yapay Zekâ (AI) alanındaki son gelişmeler, Soru Cevaplama (QA) gibi çeşitli görevlerde olağanüstü performans sergileyen Transformer tabanlı büyük dil modellerinin (LLM'ler) ortaya çıkmasıyla ivme kazanmıştır. Ancak, bu modellerin düşük kaynaklı ve morfolojik açıdan zengin dillerde, özellikle Türkçe'de benimsenmesi ve performansı yeterince araştırılmamıştır. Bu çalışma, özenle hazırlanmış, altın standart bir Türkçe QA veri kümesi üzerinde çeşitli son teknoloji Transformer tabanlı LLM'leri sistematik olarak değerlendirerek bu boşluğu doldurmayı amaçlamaktadır. Değerlendirilen modeller arasında *BERTurk*, *XLM-RoBERTa*, *ELECTRA-Turkish*, *DistilBERT* ve *T5-Small* yer almakta olup, bu modellerin Türkçenin kendine özgü dilsel zorluklarını ele alma yeteneklerine odaklanılmıştır. Deneysel sonuçlar, BERTurk modelinin diğer modellerden üstün performans göstererek 0.8144 F1-skoru, 0.6351 Exact Match ve 0.4035 BLEU skoru elde ettiğini ortaya koymaktadır. Çalışma, dile özgü ön eğitimlerin önemini vurgulamakta ve düşük kaynaklı dillerde LLM performansını artırmaya yönelik daha fazla araştırmaya duyulan ihtiyacı ortaya koymaktadır. Elde edilen bulgular, Türkçe NLP kaynaklarını geliştirme ve yeterince temsil edilmeyen dil bağlamlarında QA sistemlerini ilerletme çabalarına değerli katkılar sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Yapay zekâ, soru cevaplama, transformer, büyük dil modeli, doğal dil işleme

ToCite: KABAKUŞ, A. T. (2025). EXPLORING THE EFFECTIVENESS OF PRE-TRAINED TRANSFORMER MODELS FOR TURKISH QUESTION ANSWERING. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 28(2), 975-993.

INTRODUCTION

Recent progress in Natural Language Processing (NLP) and Artificial Intelligence (AI) has been driven by the rise of Transformer-based large language models (LLMs), which have demonstrated exceptional performance in diverse tasks, such as Question Answering (QA). QA is the task of predicting a text span within a given paragraph that contains the answer to a specific question. It has become a cornerstone of information retrieval and user interaction, evolving significantly from its early implementations in search engines like *Google*. QA systems enable users to extract precise information quickly, catering to the increasing demand for efficient and accurate query resolution. Moreover, with the rise of Transformer-based models, QA has also emerged as one of the primary methods of interacting with LLMs like *ChatGPT*, *DeepSeek*, *Gemini*, *Grok*, and *Claude*, which leverage advanced understanding of context and semantics to provide detailed and human-like responses. Thanks to these advancements in AI, LLM apps have become one of the hottest topics worldwide, with their introduction being truly groundbreaking. Some recent examples are as follows: *ChatGPT* amassed 100 million users within just 2 months of its launch, becoming the fastest-growing consumer application in history, largely due to its powerful QA capabilities (Hu, 2023). *DeepSeek*, a recently launched LLM app, claimed the No. 1 spot on both the *Google Play Store* and *Apple App Store* in many countries within just two weeks of its initial release (Bonov, 2025; Mehta, 2025). These statistics demonstrate the groundbreaking reception of LLM technologies in the field of Information Technology (IT). These applications are now widely used in various domains, such as customer support, education, healthcare, and virtual assistants, demonstrating their versatility and growing importance in modern technology ecosystems. LLMs have several advantages over humans, including incredible speed, scalability, and consistency in processing vast amounts of data without fatigue. They operate 24/7, provide multilingual capabilities, and have access to extensive knowledge instantly. Unlike humans, they excel in repetitive tasks with minimal errors and maintain objectivity without emotional biases. Their ability to generate, analyze, and summarize information quickly makes them highly efficient for automation, research, and customer support. All of these capabilities stem from unprecedented, groundbreaking advancements in AI technologies, which combine various disciplines, including but not limited to mathematics, statistics, linguistics, electrical & computer engineering, cognitive science, and robotics. The foundations of LLMs can be listed as follows: (i) Neural Networks & Deep Learning, (ii) Transformers, a type of Deep Neural Network (DNN) architecture tailored for sequential data, leveraging self-attention mechanisms to efficiently capture intricate dependencies and relationships in textual data, (iii) tokenization, pre-training & fine-tuning, embeddings to represent words as vectors, (iv) attention mechanism to assign different importance to words, and (v) Reinforcement Learning with Human Feedback to improve responses using human feedback.

Recurrent Neural Networks (RNNs), along with their enhanced versions such as LSTMs (Long Short-Term Memory) and GRUs (Gated Recurrent Units), have proven effective in handling sequential data, demonstrating solid performance in applications like language modeling, speech recognition, and time-series analysis. Unlike RNNs, including LSTMs and GRUs, which process data sequentially and suffer from limitations like vanishing gradients and long training times, Transformers can process entire sequences in parallel, leading to significantly faster training and the ability to capture long-range dependencies more effectively. Transformer-based models, such as *BERT* (*Bidirectional Encoder Representations from Transformers*) (Devlin, Chang, Lee, and Toutanova, 2019), *RoBERTa* (*Robustly Optimized BERT Pre-training Approach*) (Liu et al., 2019), and their multilingual variants, have fundamentally reshaped how machines process and understand human language, even when it is not grammatically perfect. Leveraging self-attention mechanisms, Transformer architectures effectively capture long-range dependencies and contextual relationships, making them particularly adept at complex NLP challenges. While much of the early research focused on widely spoken languages such as English, the adoption and performance of LLMs in low-resource and morphologically rich languages like Turkish remain limited. Turkish, as an agglutinative language, poses unique challenges to NLP systems due to its complex morphology, extensive vocabulary, and word order variability. These linguistic characteristics make it imperative to evaluate and adapt state-of-the-art LLMs for Turkish to ensure their applicability and effectiveness in real-world applications. The QA task is a cornerstone of NLP research and a critical benchmark for evaluating the capabilities of LLMs. It requires models to comprehend a given context and accurately pinpoint relevant answers to specific questions. In recent years, various pre-trained and fine-tuned Transformer models have been introduced for Turkish NLP, such as *BERTurk*, *Multilingual BERT*, and *XLM-RoBERTa* (Conneau et al., 2020). However, a systematic evaluation of their performance on gold-standard Turkish QA datasets is still lacking. Such an evaluation is essential to understand the strengths and limitations of these models and to guide future efforts in improving Turkish NLP resources. This study aims to address this gap by comparing the performance of several state-of-the-art Transformer-based LLMs on a curated, gold-standard Turkish QA dataset. By fine-tuning and evaluating models specifically designed or adapted for Turkish, we seek to provide

comprehensive insights into their capabilities in handling the nuances of the Turkish language. The main contributions of this study are as follows:

- A systematic evaluation of Transformer-based LLMs on a gold-standard QA dataset.
- Highlighting the limited adoption and performance of Transformer-based LLMs in low-resource and morphologically rich languages, with a focus on Turkish.
- A comprehensive assessment of both monolingual and multilingual Transformer-based LLMs for performance comparison in Turkish QA task.
- An in-depth error analysis that uncovers key failure modes in model predictions, including challenges with token span precision, morphological variation, and entity disambiguation in Turkish QA.
- An empirical analysis of computational efficiency, including inference time and GPU memory consumption, to assess the practical applicability of Transformer models in resource-constrained environments.

The rest of the paper is organized as follows: Section 2 provides an overview of related work, Section 3 outlines the materials and methods employed in this study, Section 4 details the experimental results and includes a discussion, and Section 5 concludes the paper with future directions.

RELATED WORK

Early approaches employed rule-based systems, statistical methods, and Information Retrieval (IR) techniques for QA tasks. *Celebi et al.* (Celebi, Gunel, and Sen, 2011) proposed an approach that focuses on processing documents using pattern matching techniques to extract features for a Turkish QA system. The proposed method involves automatically categorizing questions and selecting the correct answer from a predefined answer set. Named Entity Recognition (NER) and pattern-matching are utilized for question categorization, while range queries are employed for submitting questions. A novel approach to ranking similar documents is introduced, replacing traditional distance metrics. *Derici et al.* (Derici et al., 2015) employed a combination of rule-based and statistical approaches to analyze Turkish questions in the geography domain, focusing on focus extraction and question classification. For focus extraction, a rule-based system, termed the Distiller, utilized manually crafted rules over dependency parse trees to identify focus parts, with confidence scores assigned based on expert performance. Additionally, a statistical model, HMM-Glasses, modeled focus extraction as a sequential classification task using a Hidden Markov Model (HMM) and the Viterbi algorithm, leveraging serialized dependency trees in both forward and backward modes to enhance learning diversity. The outputs of these models were combined using weighted confidence scores to determine the final focus parts. For question classification, a rule-based classifier employed unique pattern phrases to assign coarse classes to questions, while a baseline statistical classifier using a TF-IDF-weighted Bag-of-Words (BoW) approach provided a comparison. *Bilgin et al.* (Bilgin, Bozdemir, and Demir, 2024) investigated the performance of LLMs on Turkish QA tasks by fine-tuning five models, namely, (*i*) *bert-base-uncased*, (*ii*) *bert-base-turkish-cased*, (*iii*) *distilbert-base-multilingual-cased*, (*iv*) *mt5-base*, and (*v*) *mBart-large-50*—using a *Turkish SQuAD 1.1* dataset. The research evaluates the models using Exact Match (EM), F1, and Rouge metrics, with *mBART* achieving the highest performance due to its encoder-decoder architecture and multilingual training. The experimental results show that multilingual models generally outperform monolingual ones, while encoder-decoder architectures (e.g., *mBART*, *mT5*) yield better results than encoder-only models like BERT. While *Bilgin et al.*'s work offers valuable insights into model architecture differences and highlights the potential of multilingual transformer models, our study differs in several key aspects. First, we utilize a publicly available gold-standard dataset that includes a distinct structure and richer context-question-answer pairs, enabling a more rigorous evaluation. Second, our study benchmarks a broader range of widely used pre-trained transformer architectures under a unified, reproducible training and evaluation pipeline. Unlike *Bilgin et al.*, who emphasize model-type comparisons, our work additionally incorporates interpretability analysis, inference time comparisons, and model efficiency—crucial aspects for real-world deployment.

In recent years, approaches based on DL and NLP have emerged, providing state-of-the-art solutions for the QA task. *Xu et al.* (Xu, Reddy, Feng, Huang, and Zhao, 2016) proposed a Multi-Channel Convolutional Neural Networks (MCCNNs) model that enhances the learning of robust relation representations by incorporating both lexical and syntactic perspectives. This approach leverages word embeddings as inputs, making it suitable for Knowledge Base Question Answering (KBQA) tasks involving extensive relations within a Knowledge Base (KB). It effectively addresses the data sparsity challenges and improves generalization to unseen words, outperforming traditional feature-based extraction models. *Yu et al.* (Yu et al., 2017) proposed a Hierarchical Residual BiLSTM (HR-BiLSTM)

model designed to enhance relation detection in KB relations by integrating information from two levels: word-level and relation-level representations. To handle unseen relations and utilize lexical semantics, they decomposed relation names into sequences of words, enabling word-level matching between questions and relations. Additionally, they recognized the value of treating relation names as single tokens for better generalization on seen relations, introducing a relation-level matching channel to complement the word-level approach. *Zhu et al.* (Zhu, Cheng, and Su, 2020) introduced a tree-to-sequence method for converting natural language questions into executable queries. They started by constructing candidate queries for a question based on its linked entities. To match these queries with the questions, they utilized an LSTM-based model. For encoding, a tree-based LSTM was employed to capture the contextual structure of entities or relations in a query, effectively encoding the query's structure. A mixed-mode decoder was then used to identify the best query, operating in two modes: the generating mode, which emphasized semantic-level correlations, and the referring mode, which focused on surface-level correlations and language variations. *Luo et al.* (Luo, Lin, Luo, and Zhu, 2018) proposed a neural network-based semantic parsing method that embeds questions and query graphs into a uniform vector space. Query graphs were generated with entity, type, time, and ordinal constraints in five steps, then split into predicate sequences for semantic representation. Global (token-based) and local (dependency path-based) representations were combined using Bi-GRUs, with max pooling applied before cosine similarity calculation. An ensemble approach improved entity linking, and their method encoded entire query graphs instead of word sequences, validated through detailed experiments. *Kotstein* and *Decker* (Kotstein and Decker, 2024) introduced a Transformer encoder model designed for semantic search within Web API documentation, treating the task as a QA problem. Their model matched natural language queries with Web API elements, addressing two tasks: endpoint discovery and parameter matching. Pre-trained BERT models, namely *CodeBERT* and *RoBERTa* were fine-tuned on 1,085,051 samples for parameter matching and 55,659 samples for endpoint discovery, extracted from 2,321 OpenAPI documents. Experimental results showed that CodeBERT slightly outperformed *RoBERTa*, though differences in top-1 accuracy ($\sim$1%) were minimal. Parameter matching performed best with a model fine-tuned on both tasks (81.95% top-1 accuracy), while endpoint discovery achieved its highest accuracy with a task-specific model (88.44% top-1 accuracy). Errors were attributed to missing context in queries, and robustness tests revealed sensitivity to synonyms in domain-specific terms. *Xue et al.* (Xue, Zhang, and Chen, 2024) tackled the challenge of building code compliance checking by introducing a question-answering framework consisting of two main components: (i) a retriever for efficient context extraction from building codes, and (ii) a reader for accurate answer generation. The BM25-based retriever demonstrated strong performance, achieving top-1 precision, recall, and F1-score of 0.95, and top-5 scores of 0.97, 1.00, and 0.99, respectively. The transformer-based reader, utilizing the *xlm-roberta-base-squad2-distilled* model, attained a top-4 accuracy of 0.95 and a top-1 F1-score of 0.84. *Vazrala* and *Khatoon Mohammed* (Vazrala and Khatoon Mohammed, 2025) introduced a Hybrid Gradient Regression-Based Transformer Model (RBTM), which integrates semantic similarity quantification with deep learning methods. Their approach consisted of three main stages: component identification, semantic similarity measurement at both the component and sentence levels, and similarity scoring. The methodology employed tools such as the LemmaChase Lemmatizer for feature extraction, the SNOMED-CT ontology for domain-specific concept identification, and concept2Vec for enhanced vector representations. Additionally, RBTM integrated XGBoost with a transformer architecture to generate similarity scores for answer selection. Evaluated on the *MedQuAD* dataset, the model achieved high performance with 99.09% accuracy, a R^2 score of 97.07%, and an MSE of 0.00227. *Kuligowska* and *Kowalczuk* (Kuligowska and Kowalczuk, 2021) proposed an approach that evaluates various DL models for a QA task, focusing on Recurrent Neural Networks (BiGRU + GloVe + CNN) and fine-tuning *DistilBERT*. The BiGRU model employed early stopping, the *Adam* optimizer, and hyperparameters such as a batch size of 512, 27 epochs, 1-Dimensional (1D) convolution layer with 256 filters and kernel size of 5, two Bidirectional GRU layers with 256 units separated by dropout of 0.1, one-dimensional Global Max Pooling layer, and dense layer with 128 units and Rectified Linear Unit (ReLU) activation function. *DistilBERT* fine-tuning involved batch sizes of 16 or 32, learning rates of $2 \times e^{-5}$ to $5 \times e^{-5}$, and a maximum of 4 epochs, avoiding overfitting and catastrophic forgetting. *DistilBERT* variations included CNN and RNN enhancements. On validation data, the *DistilBERT* ($[CLS]$ token) model achieved the highest Spearman's rank correlation (0.3677), outperforming other models, including BiGRU (0.2817). Using pseudo-labeling, predictions on an unlabeled dataset were incorporated into the training set, further fine-tuning the best-performing *DistilBERT* model for two additional epochs. The pseudo-labeled model significantly improved performance on test data, achieving a Spearman's rank correlation of 0.3866, compared to 0.3785 for the original *DistilBERT*. The findings in light of the experimental results demonstrate that pseudo-labeling and leveraging larger datasets enhance model performance, validating the proposed *DistilBERT*-based approach as superior to other architectures. Unlike previous studies that primarily focus on rule-based or statistical methods for specific domains or rely on traditional DL models, the proposed study systematically evaluates state-of-the-art Transformer-based models on a gold-standard Turkish QA dataset. This

research is critical for advancing the understanding of how modern LLMs perform in low-resource languages, addressing a significant gap in QA systems for underrepresented linguistic contexts. Table 1 provides a comparative overview of key methodologies and their contributions to the QA task, highlighting the evolution from rule-based approaches to advanced transformer-based models.

Table 1. Summary of Pre-Trained Transformer Models Evaluated in This Study. The Table Contextualizes the Comparative Performance Analysis by Presenting Each Model's Architecture, Language Scope, And Tokenization Strategy, Thereby Linking to The Hypothesis That Model Architecture and Language Specialization Significantly Impact QA Performance.

Study	Approach	Key Features	Domain	Performance Highlights
(Celebi et al., 2011)	Rule-based system with NER and pattern matching	Question categorization, predefined answer selection, and range queries	Turkish QA	Introduced novel document ranking to replace traditional distance metrics
(Derici et al., 2015)	Hybrid rule-based and statistical approaches	Focus extraction (rule-based Distiller and HMM-Glasses), question classification with rule-based and statistical methods	Geography	Improved focus identification using a weighted combination of models
(Xu et al., 2016)	Multi-Channel CNN for robust relation representations	Combining lexical and syntactic perspectives, word embeddings for KBQA	Knowledge Base Question Answering	Addressed data sparsity challenges, improving generalization to unseen words
(Yu et al., 2017)	Hierarchical Residual BiLSTM	Word- and relation-level representations, matching unseen relations with lexical semantics	Knowledge Base relations	Enhanced relation detection using hierarchical representations
(Zhu et al., 2020)	Tree-to-sequence model for query conversion	Tree-based LSTM encoder, mixed-mode decoder for query matching	Knowledge Base Question Answering	Effectively encoded query structures, improving correlation-based query selection
(Luo et al., 2018)	Bi-GRU-based semantic parsing for query graph embedding	Combines global and local representations, ensemble approach for entity linking	Knowledge Base Question Answering	Achieved high performance through uniform query graph encoding
(Kotstein and Decker, 2024)	Transformer-based model for semantic search in Web API documentation	Fine-tuned CodeBERT and RoBERTa for parameter matching and endpoint discovery	Web API	CodeBERT outperformed RoBERTa slightly; endpoint discovery achieved 88.44% top-1 accuracy
(Xue et al., 2024)	QA framework with BM25 retriever and transformer-based reader	Combines BM25 for retrieval and xlm-roberta-base-squad2-distilled for reading	Code Compliance	BM25 retriever achieved top-1 precision/recall of 0.95; reader had a top-4 accuracy of 0.95
(Vazrala and Khatoon Mohammed, 2025)	Hybrid Gradient Regression-Based Transformer Model	Semantic similarity scoring using XGBoost and transformers, domain-specific ontology, and embeddings	Medical	Achieved 99.09% accuracy, with low MSE (0.00227)
(Kuligowska and Kowalczuk, 2021)	Evaluation of BiGRU + GloVe + CNN and DistilBERT-based models for QA	Fine-tuned DistilBERT with pseudo-labeling and dataset augmentation	General QA	DistilBERT achieved the best Spearman's rank correlation (0.3866 with pseudo-labeling)

MATERIAL AND METHOD

Python programming language was used for all programming aspects of this study. More specifically, the *transformers* (Wolf, Debut, Sanh, Chaumond, and ..., 2020), a widely used Python package developed by *Hugging Face*, was employed to train state-of-the-art LLMs, particularly transformer architectures, such as *BERT*, *GPT (Generative Pre-trained Transformer)*, *RoBERTa*, *Llama* (Large Language Model Meta AI), and *T5* (*Text-to-Text Transfer Transformer*). In addition to the *transformers* library, the *evaluate* ("Evaluate," 2025) package developed by *Hugging Face* was also employed to assess model performance in a more straightforward and standardized manner. *PyTorch* (Paszke et al., 2019) was utilized as the DL backend because of its dynamic computation graph, offering flexibility in model design and facilitating rapid experimentation. This adaptability is essential for developing and fine-tuning complex architectures, such as Transformers, as applied in the proposed study. Additionally, *PyTorch*'s seamless GPU support via CUDA ensures efficient handling of large-scale computations. *Scikit-learn* (Pedregosa et al., 2011) and *Pandas* (The pandas development team, 2020), two widely used Python packages were employed for data analysis and data manipulation. *Matplotlib* (Hunter, 2007) and *seaborn* (Waskom,

2021) were employed for visualization purposes, including generating model training plots and conducting exploratory data analysis. All the experiments conducted in this study were performed on *Kaggle*, as it offers a robust, powerful, and efficient environment for developing ML models. In the following subsections, the utilized dataset, the employed Transformer-based LLMs, and evaluation metrics are described, respectively. Fig. 1 illustrates an overview of the workflow of the proposed approach. The process begins with loading the dataset, followed by tokenizing the text to prepare it for model input. Next, an appropriate Transformer model is selected and fine-tuned using the training data. Finally, the fine-tuned model is evaluated using key performance metrics to assess its effectiveness in answering questions accurately.

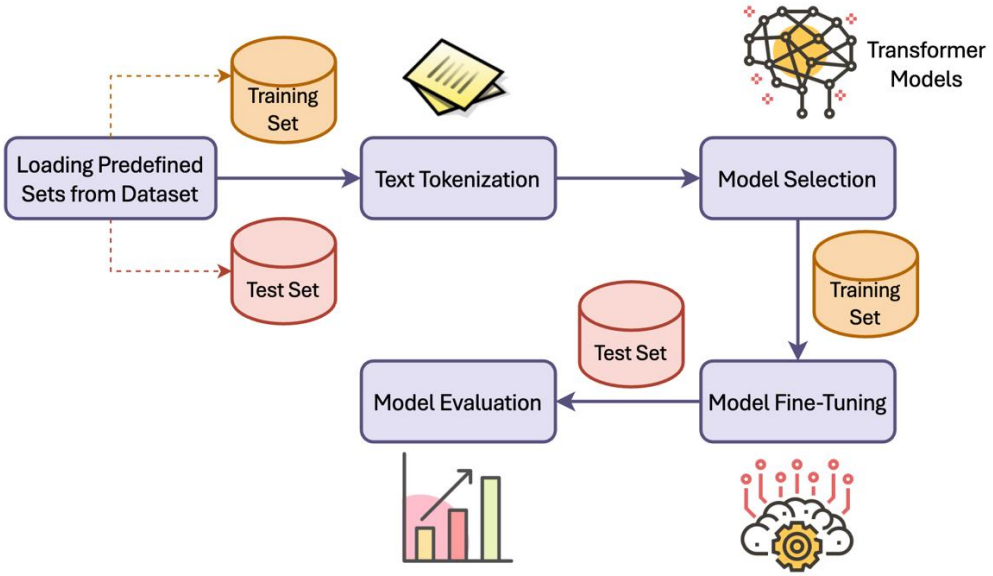


Figure 1. Overview Of the Turkish QA Pipeline Used in This Study. This Architecture Illustrates the Flow from Input (Context and Question) To Answer Prediction Using a Pre-Trained Transformer Model. It Highlights the Central Hypothesis That Fine-Tuning Existing Multilingual or Monolingual LLMs On a Structured, Gold-Standard Turkish Dataset Can Yield High Accuracy in Turkish QA Tasks.

Dataset Description and Data Preprocessing

Using a gold-standard dataset enhances the reliability, comparability, and credibility of the study's results, allowing for accurate benchmarking and validation against established standards. Therefore, we utilized a publicly available gold-standard Turkish QA dataset (Soygazi, Ciftci, Kok, and Cengiz, 2021) consisting of two JSON files: one for training and one for evaluation. The training and evaluation sets consisted of 14,221 and 3,114 question-answer pairs, respectively. As these sets are predefined by the dataset providers, no additional splitting or shuffling was performed, thereby maintaining consistency with the benchmark configuration. The structure of the data within these JSON files is as follows: Each subject (referred to as "*title*") contains multiple contexts. Under each context, there is one or more questions paired with their respective answers. To align with the common practice in ML, we converted these JSON files into CSV format. The resulting CSV files include the following fields: (*i*) "*question*" stores each individual question, (*ii*) "*answer*" contains the respective answer for each question, and (*iii*) "*context*" holds the context relevant to the question. The average lengths of the "*question*," "*answer*," and "*context*" fields are 66, 26, and 1,239 characters, respectively. For a clearer understanding of the variability and typical sizes of the dataset entries, the length distributions of these fields are visualized in Fig. 2.

The dataset comprised 652 unique subjects from Turkish & Islamic Science History. Some sample subjects are given (*in English*) as follows: "*Science in Anatolia*", "*Clocks*", "*Ibn Khaldun*", "*Platon*", "*Treaty of Paris*", and "*Science in Central Asia*". Some sample questions, answers, and their corresponding contexts from this dataset are provided in Table 2.

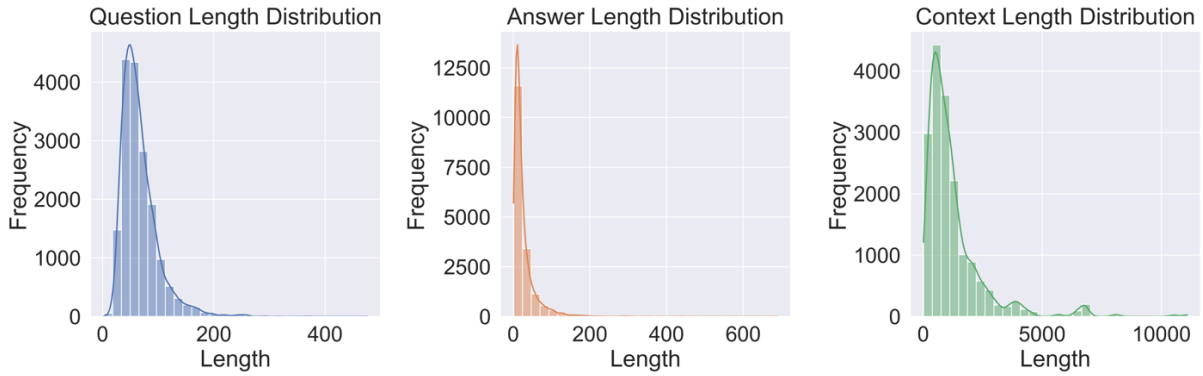


Figure 2. The Length Distributions of the Fields Available in the Dataset, Illustrating the Character Counts for the "*Question*," "*Answer*," and "*Context*" Fields, from Left to Right. These Plots Reveal the Variability in Input Sizes, Supporting the Challenge That Transformer-Based Models Must Generalize Across Diverse Linguistic Structures and Lengths, Especially in Morphologically Rich Languages Like Turkish.

As described, each sample in the dataset consists of a triplet: (***i***) *context*, (***ii***) *question*, and (***iii***) *answer*. We utilized the *Hugging Face transformer*'s *AutoTokenizer* class to tokenize the *question* and *context* together, with truncation enabled and maximum length set to **512** tokens. Answers were mapped back to token positions by first identifying their character start index in the context and then using offset mappings to locate the corresponding start and end token positions. If an answer span could not be precisely aligned due to truncation or tokenization edge cases, the sample was excluded to maintain data quality.

Employed Models

For the task of Turkish QA, we utilized several transformer-based models pre-trained on large-scale datasets. These models have shown strong performance in various NLP tasks, including QA, and are well-suited for processing Turkish text due to their language-specific adaptations and multilingual capabilities. Some of these pre-trained models come in two versions based on case-sensitivity: (i) cased, and (ii) uncased. Since the dataset we used is case-sensitive, we intentionally chose the cased versions of the pre-trained models. One more criterion for model selection was the use of both monolingual and multilingual Transformer-based LLMs to compare their performance in the Turkish QA task. All models were evaluated on the identical, predefined training and testing sets from the gold-standard Turkish QA dataset as using fixed splits ensures direct comparability across models, eliminating variability from random partitioning. This approach aligns with standard practices in QA benchmarking (e.g., *SQuAD* evaluations). We employed the *AutoModelForQuestionAnswering* class from the *Hugging Face*'s *transformers* library, which wraps each model with a span-based question answering head — typically composed of two linear layers projecting the transformer output to start and end logits. Five transformer models were evaluated: (i) *ELECTRA-Turkish*, (ii) *XLM-RoBERTa*, (iii) *BERTurk*, (iv) *DistilBERT*, and (v) *T5-Small*. While the first four are encoder-only models with span prediction heads, *T5-Small* uses an encoder-decoder architecture to generate free-form answers in a sequence-to-sequence manner. The employed models within the scope of this study are described in the following subsections.

ELECTRA-Turkish

ELECTRA (*Efficiently Learning an Encoder that Classifies Token Replacements Accurately*) (Clark, Luong, Le, and Manning, 2020) is a state-of-the-art transformer model that improves upon *BERT* by using a more sample-efficient pre-training approach. The *electra-base-turkish-cased-discriminator* (MDZ Digital Library team, 2024b) (hereafter referred to as *ELECTRA-Turkish*) model is a version of *ELECTRA* pre-trained proposed for Turkish. Unlike traditional masked language models like *BERT*, *ELECTRA* generates corrupted tokens and trains the model to distinguish between real and fake tokens. This makes it more efficient and capable of learning better contextual representations, which is crucial for tasks like QA in Turkish, where understanding subtle linguistic nuances is essential.

Table 2. Some Sample Questions, Answers, and Their Contexts from the Utilized Dataset (Translated to English and the Original Turkish Text are Given in Parentheses).

Question	Answer	Context
When was the Battle of Otlukbeli fought? (TR: *Otlukbeli Savaşı hangi tarihte yapıldı?*)	On August 11, 1473 (TR: *11 Ağustos 1473'te*)	In the face of the growing power of the Ottoman Empire, the Karamanids allied with the Aq Qoyunlu in Eastern Anatolia. In 1466, Mehmed the Conqueror launched a new Anatolian campaign and captured Konya, the capital of the Karamanids. However, after his return to Istanbul, the Karamanids regained the territories that had fallen to the Ottomans. Gedik Ahmed Pasha, who would later become grand vizier, defeated the Karamanids once again in 1471. The Aq Qoyunlu continued to support the Karamanids. On August 11, 1473, the Ottoman forces inflicted a heavy defeat on the Aq Qoyunlu ruler Uzun Hasan at the Battle of Otlukbeli. In 1474, the Karamanid Principality was completely eliminated. (TR: *Osmanlı Devleti'nin gelişen bu gücü karşısında Karamanoğulları, Doğu Anadolu'daki Akkoyunlular'la ittifak kurdu. Fatih, 1466'da yeni bir Anadolu seferine çıktı.Karamanoğullarının başkenti Konya'yı ele geçirdi.Ama İstanbul'a dönünce Karamanoğulları, Osmanlılara geçen yerleri geri aldılar. Sonradan sadrazam olacak olan Gedik Ahmed Paşa 1471'de Karamanoğullarını bir kez daha yenilgiye uğrattı.Akkoyunlular, Karamanoğullarını desteklemeye devam ettiler. 11 Ağustos 1473'te Otlukbeli Savaşı'nda Akkoyunlu hükümdarı Uzun Hasan'ı ağır bir yenilgiye uğrattı. 1474 yılında Karamanoğulları Beyliği'ni tamamen ortadan kaldırdı.*)
Who drew the first world map? (TR: *İlk dünya haritasını kim çizdi?*)	Piri Reis	The Italian navigator Christopher Columbus, who discovered the American continent, presented his transoceanic voyage, which he had been planning for about 14 years, to the King of Portugal in 1484, but it was rejected. Unable to find a financial backer, Columbus faced financial difficulties and engaged in trade between Europe and the Ottoman Empire. During this period, in 1484, he applied to Sultan Bayezid II with a priest. The Sultan did not take this eccentric man seriously and rejected his request. Two years after Bayezid's refusal, Columbus approached the King and Queen of Spain and unknowingly discovered America in 1492. Mistaking the land he reached for India, he called the native people 'Indians.' Years later, a Spaniard who had accompanied Columbus on three voyages to America was captured by Piri Reis's uncle, Kemal Reis, after a battle. The Spaniard gave Kemal Reis a map of the American coasts discovered by Columbus. Based on the information from this map, Piri Reis drew the first world map in 1513. (TR: *Amerika kıtasını keşfeden İtalyan denizci Kristof Kolomb, yaklaşık 14 yıldır tasarladığı okyanus ötesinde yolculuğu 1484'te Portekiz Kralına sundu ama reddedildi. Destekleyecek bir finansör bulamayınca maddi zorluklara giren Kolomb, Avrupa ile Osmanlı arasında ticaret ile uğraştı. Bu dönemde, 1484'te Sultan II. Bayezid'e bir papaz eşliğinde başvurdu.Sultan, karşısına çıkan bu delidolu insanı ciddiye almadı ve talebini reddetti.Kolomb, Bayezid'den 2 yıl sonra İspanyol kral ve kraliçesine müracaat etti, ve 1492'de de Amerika'yı farkında olmadan keşfetti. Geldiği yeri Hindistan zannederek karşılaştığı halka Hindistanlılar 'Indian' dedi.İlerki yıllarda Kolomb ile 3 kez Amerika'ya gitmiş bir İspanyol, bir savaş sonrasında Piri Reis' in amcası Kemal Reis'e esir düştü ve Kolomb'un keşfettiği Amerika kıyılarının haritasını amcasına verdi. Piri Reis bu haritadaki bilgilerden yola çıkarak 1513'de ilk dünya haritasını çizdi.*)
In which year was the Italian translation of the work by Al-Idrisi made? (TR: *El-İdrisi'ye ait olan eserin İtalyanca çevirisi hangi yılda yapılmıştır?*)	1600	Another astonishing fact—unlike the maps—is that the text of Al-Idrisi's work, mentioned above, became known in Europe in a late, highly abridged, and even almost distorted edition. This text was first published in 1592 in Rome, then translated into Italian by B. Baldi in 1600, and into Latin by two Maronites, Gabriel Sionita and Johannes Hesronita, in 1619. However, the Latin translation was published under the title *Geographie Nubiensis* (Geography of the Nubian), without mentioning the author Al-Idrisi, and for a long time, it was cited in this way. While Arab-Islamic human geography remained largely unknown outside of Spain in Europe for a long time, today we can undoubtedly trace how mathematical geography and cartography from the Arab-Islamic cultural sphere profoundly influenced European successors from the 11th to the 18th century. (TR: *Yine hayrete düşüren bir diğer husus –haritaların aksine– yukarıda bahsedilen el-İdrisi'ye ait eser metninin geç dönemde ve aşırı kısaltılmış, hatta neredeyse tahrif edilmiş bir redaksiyonla Avrupa'da tanınmış olmasıdır. Bu metin ilkin 1592 yılında Roma'da basıldı ve 1600 yılında B. Baldi tarafından İtalyanca'ya ve 1619 yılında iki Maronit Gabriel Sionita ve Johannes Hesronita tarafından Latince'ye çevirildi. Fakat Latince çeviri, yazar elİdrisi adı anılmaksızın, Geographie Nubiensis (Sudanlının Coğrafyası) diye yayınlandı ve uzunca bir süre bu şekilde alıntılandı. Arap-İslam beşeri coğrafyası geniş ölçüde ve uzun zaman İspanya dışı Avrupa'da bilinmemiş olarak kaldıysa da, bugün biz kuşkusuz, Arap-İslam kültür çevresine ait matematiksel coğrafya ve kartografyanın 11. yüzyıldan 18. yüzyıla kadar Avrupalı ardıllarını çok derinden etkilediğini tespit edebiliyoruz.*)

XML-RoBERTa

XLM-RoBERTa is a multilingual transformer model pre-trained in a vast number of languages, including Turkish. It is based on *RoBERTa* (Liu et al., 2019), an optimized version of BERT that removes the Next Sentence Prediction (NSP) objective. *XLM-RoBERTa* is designed to work across multiple languages, and its multilingual nature would allow it to generalize well for Turkish QA tasks, even if the model was primarily trained on other languages, making it a robust choice for multilingual or cross-lingual QA systems.

BERTurk

The *bert-base-turkish-cased* (*a.k.a. BERTurk*) (MDZ Digital Library team, 2024a) model is a pre-trained version of BERT proposed for Turkish. BERT has set new benchmarks in NLP tasks like text classification, Named Entity Recognition (NER), and QA. The BERT architecture enables a strong contextual understanding of Turkish text, making it highly suitable for extracting answers from Turkish text-based documents.

DistilBERT

DistilBERT (Sanh, Debut, Chaumond, and Wolf, 2019) is a lighter, faster version of *BERT*, offering a smaller model size with comparable performance. It is distilled from the *BERT* architecture, reducing the number of parameters while retaining much of *BERT*'s capabilities. *DistilBERT* is particularly useful for QA tasks where computational efficiency and inference speed are critical. Given its smaller size, it is a practical choice for deploying real-time question-answering systems in Turkish, while still leveraging the core strengths of *BERT* for understanding and extracting answers from the text.

T5-Small

T5-Small is a lightweight variant of the *T5* model (Raffel et al., 2020), designed for various NLP tasks using a unified text-to-text approach. Unlike encoder-only models like BERT or decoder-only models like GPT, *T5* employs an encoder-decoder architecture, making it particularly effective for generative tasks such as text summarization, translation, and QA. With approximately 60M parameters, *T5-Small* is computationally efficient while maintaining strong performance across multiple languages, including Turkish. A comparison of the employed models is given in Table 3.

Table 3. Comparative Overview of The Transformer-Based Models Employed for The Turkish QA Task. This Table Highlights the Architectural Differences, Language Specialization, And Parameter Sizes of Each Model, Along with Their Strengths and Weaknesses in Handling Turkish QA Challenges. It Supports the Study's Hypothesis That Monolingual Models with Language-Specific Pre-Training (e.g., *BERTurk*, *ELECTRA-Turkish*) May Offer Better Linguistic Understanding for Turkish, While Lighter or Multilingual Models Provide Advantages in Efficiency and Cross-Lingual Generalization.

Model	Architecture	Language	Size	Strengths	Weakness
ELECTRA-Turkish	ELECTRA	Turkish	$\sim 135M$ parameters	Efficient pre-training, better token-level understanding, and high contextual representation.	Requires more resources for fine-tuning compared to lighter models.
XLM-RoBERTa	RoBERTa	Multilingual	$\sim 270M$ parameters	Strong cross-lingual performance, robust for multilingual and limited-resource tasks.	Larger size leads to higher computational demands, and less optimized for Turkish-specific nuances.
BERTurk	BERT	Turkish	$\sim 110M$ parameters	Captures Turkish grammar and semantics well, proven performance in various NLP tasks.	May underperform in tasks requiring case sensitivity; relatively resource-intensive.
DistilBERT	Distilled BERT	Multilingual	$\sim 66M$ parameters	Faster inference, lower resource requirements, suitable for real-time applications.	Lower accuracy compared to full-sized BERT models, lacks Turkish-specific pre-training.
T5-Small	T5	Multilingual	$\sim 60M$ parameters	Strong generative capabilities, effective for text-to-text tasks, lightweight compared to larger T5 variants.	Lower performance on specialized tasks; may require fine-tuning for Turkish-specific applications.

Evaluation Metrics

We employed a range of evaluation metrics to comprehensively assess the performance of the transformer-based language models on the Turkish QA task. These metrics provide quantitative insights into the effectiveness of the models in understanding and responding to questions in Turkish. The metrics used in this study are described in the following subsections.

Exact Match

The Exact Match (EM) metric calculates the proportion of questions where the predicted answer precisely matches the ground truth answer. It is a stringent metric that ensures the model provides accurate answers without any deviation. The equation for EM is given in Eq. 1, where N is the total number of questions, and $\mathbb{1}$ is the indicator function that equals 1 when the prediction is identical to the ground truth and 0 otherwise.

$$EM = \frac{1}{N}\sum_{1}^{N} \mathbb{1}(Prediction_i = Ground\ Truth_i) \tag{1}$$

F1-Score

The F1-Score assesses the similarity between the predicted and ground truth answers by balancing precision and recall. It is particularly useful when partial matches between answers are significant, as it accounts for token-level correctness. To define these metrics more clearly, we first introduce the following terms: T (True Positives) refers to the tokens that are correctly predicted as part of the answer; N (True Negatives) refers to the tokens that are correctly predicted as not part of the answer; P (predicted Positives) represents the tokens predicted by the model as part of the answer, regardless of whether they are correct; and F (False Positives) represents the tokens that are incorrectly predicted as part of the answer. Precision is defined as the fraction of predicted positive tokens that are also correct. The equation for Precision is provided in Eq. 2. Recall, on the other hand, measures the fraction of true positive tokens that are correctly predicted, and its equation is given in Eq. 3. Precision quantifies the fraction of tokens in the predicted answer that also appear in the ground truth, while Recall measures the fraction of tokens in the ground truth that are present in the prediction. The F1-Score is the harmonic mean of Precision and Recall, with its equation given in Eq. 4.

$$Precision = \frac{T}{P + F} \tag{2}$$

$$Recall = \frac{T}{T + N} \tag{3}$$

$$F1 - Score = 2 \times \frac{Precision \times Recall}{Precision + Recall} \tag{4}$$

In our evaluation, we used the *load_metric("f1")* function from the *Hugging Face*'s *Datasets* ("Datasets," 2025) library, which computes the F1-score based on the token-level overlap between the predicted answer and the ground truth. Specifically, this implementation calculates Precision and Recall by comparing the number of overlapping tokens in the predicted and reference answers. The F1-score is then computed as the harmonic mean of these two values. It is worth mentioning that this metric does not rely on exact string matching and allows for partial matches when the predicted answer contains relevant words from the ground truth. While this method does not perform semantic similarity assessment like BLEU or embedding-based metrics, it offers a balance between exactness and flexibility, especially in extractive or short-form QA tasks where small variations can occur due to tokenization or model generation behavior.

BLEU Score

BLEU (Bilingual Evaluation Understudy) (Papineni, Roukos, Ward, and Zhu, 2002) measures the similarity between the predicted and ground truth answers by comparing n-grams. It is commonly used in NLP tasks to evaluate the quality of generated text. The equation for the BLEU score is given in Eq. 5, where BP is the brevity penalty, w_n are weights for n-grams, and p_n is the precision for n-grams of size n.

$$BLEU = BP \times exp\left(\sum_{n=1}^{N} w_n log p_n\right) \quad (5)$$

EXPERIMENTAL RESULTS AND DISCUSSION

The models employed in the study were trained on the training set using the same configuration to ensure a fair environment for benchmarking their QA performance. All experiments were conducted using the Hugging Face transformers and datasets libraries in a Kaggle notebook environment with GPU ($T4 \times 2$) acceleration. For each model, we employed a consistent training pipeline to ensure fair comparison. The models were fine-tuned using the *AdamW* (Loshchilov and Hutter, 2019) optimizer with a learning rate of $5 \times e^{-5}$, a batch size of 4 for both training and evaluation, and a total of 3 epochs. To prevent overfitting, early stopping was applied with patience of 2 evaluation steps based on the F1-score on the validation set. Gradient clipping with a maximum norm of 1.0 was used to improve training stability. Additionally, a linear learning rate scheduler with warm-up steps equal to 10% of the total training steps was adopted. To monitor model performance, evaluation was performed at the end of each epoch, and logging occurred every 10 steps to track loss and training progress. All models were trained using mixed-precision (*FP16*) to accelerate computation and reduce memory usage. The *predict_with_generate* parameter was enabled to facilitate text generation-based tasks, such as QA. After the models were fine-tuned on the QA training set, they were evaluated on the test set. According to the experimental results, the best-performing model in terms of QA capability was *BERTurk*, achieving an F1-score of 0.8144, an EM of 0.6351, and a BLEU score of 0.4035. Meanwhile, *DistilBERT* was found to be the most lightweight model in terms of inference time, with an inference time of 31 milliseconds, while *T5-Small* was the most lightweight in terms of training duration, with a training duration of 3,005 seconds. However, *T5-Small* exhibited much more limited QA capabilities compared to *BERTurk*. The evaluation results of the employed models in terms of the utilized evaluation metrics are given in Table 4. The *BERTurk* model outperformed *DistilBERT*, *XLM-RoBERTa*, *ELECTRA-Turkish*, and *T5-Small* due to its Turkish-specific pretraining, full-sized architecture, and robust Masked Language Model (MLM) approach. Unlike *XLM-RoBERTa* and *DistilBERT*, which are trained on multilingual corpora, *BERTurk* is pre-trained exclusively on Turkish text, allowing it to better capture the language's morphological richness and agglutinative structure. Additionally, compared to *DistilBERT*'s lighter, distilled architecture, the full-sized *BERT* model retains deeper contextual representations, which are crucial for complex QA tasks. While *ELECTRA-Turkish* employs a replacement-based pretraining strategy, its discriminator approach may not generalize as effectively as BERT's MLM for extractive QA tasks, where understanding masked words enhances answer extraction, even though the employed model was specifically proposed for Turkish. Moreover, *T5-Small* follows a Sequence-to-Sequence (Seq2Seq) paradigm, which is more suited for generative tasks rather than extractive QA, further contributing to its lower performance. Finally, *BERTurk* benefits from a tokenizer specifically optimized for Turkish grammar, case sensitivity, and subword structures, ensuring better token alignment and improving answer extraction accuracy. The combination of these factors makes *BERTurk* the most effective model for Turkish QA, outperforming its counterparts. The performance comparison of the employed models, based on F1-Score, EM, and BLEU Score metrics, is illustrated in Fig. 3 to visually highlight the strengths and weaknesses of each model.

We analyzed tokenization and prediction behaviors for agglutinative Turkish words to illustrate how morphological complexity impacts model performance. Turkish relies heavily on suffix stacking (e.g., a single word like "*okullarımızdaki*" ("*in our schools*" in English) combines $root + plural + possession + location + relational\ suffixes$). While *BERTurk*'s Turkish-specific tokenizer preserves semantic coherence by segmenting morphemes contextually, multilingual models like *XLM-RoBERTa* often fragment suffixes into suboptimal units, degrading answer precision. Table 5 demonstrates this contrast using examples from our dataset, correlating with *BERTurk*'s superior performance over *XLM-RoBERTa* across all the evaluation metrics used.

To validate the significance of the observed performance differences between models, we conducted a one-way ANalysis Of Variance (ANOVA) on the F1-scores obtained across five independent runs for each model. The ANOVA test yielded a p-value of $p < 0.01$, indicating that the differences in F1-score across models are statistically significant. Post-hoc Tukey's Honestly Significant Difference (HSD) tests further confirmed that *BERTurk* significantly outperforms all other models ($p < 0.05$), especially compared to lightweight models such as *DistilBERT* and *T5-Small*. Variance analysis also showed that *BERTurk*'s performance is consistent across runs, with a standard deviation of only ± 0.0042 in the F1-score, compared to ± 0.0176 for *XLM-RoBERTa*. These statistical evaluations reinforce the reliability and superiority of *BERTurk* in the context of Turkish QA.

Table 4. Evaluation Results of The Transformer-Based Models Used in The Turkish QA Task, Highlighting Their Training and Inference Efficiency Alongside Core Performance Metrics. All Metrics were Averaged Over Five Independent Runs. F1-Score and EM Assess Answer Overlap and Precision, While BLEU Score Reflects Fluency and Syntactic Similarity. This Comparison Reveals That *BERTurk* Provides the Best Balance of Performance and Moderate Computational Cost, Supporting the Study's Hypothesis That Monolingual Models Fine-Tuned for Turkish Outperform Multilingual or Generative Counterparts in This Domain.

Model	Training Duration (s)	Inference Time (ms)	F1-Score	EM Score	BLEU Score
DistilBERT	3,139	**31**	0.6615	0.4494	0.3051
BERTurk	5,452	46	**0.8144**	**0.6351**	**0.4035**
XLM-RoBERTa	6,563	53	0.7804	0.6020	0.3665
ELECTRA-Turkish	5,196	43	0.8009	0.6281	0.3974
T5-Small	**3,005**	53	0.1207	0.0437	0.0385

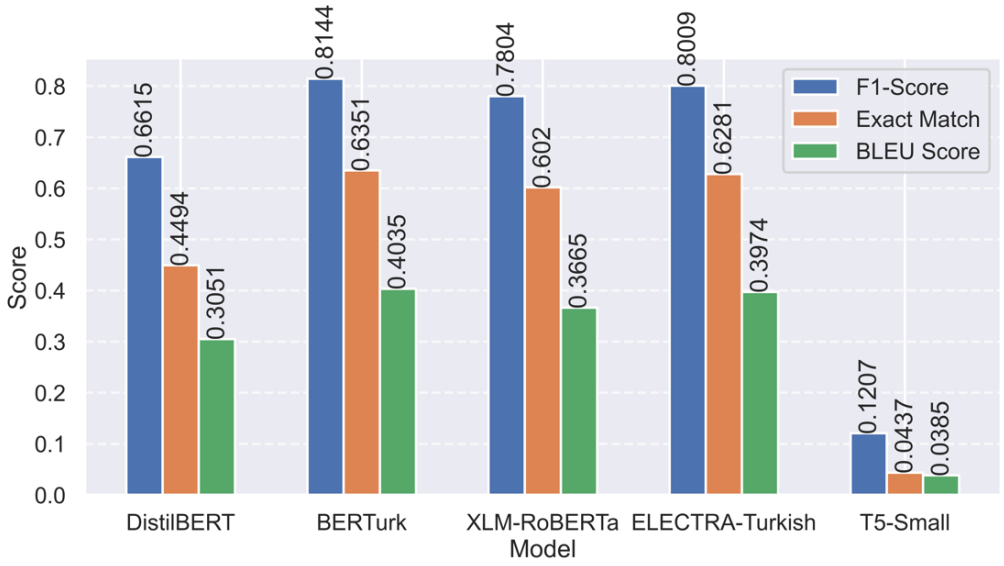


Figure 3. Comparison of the Employed Models Based on the Evaluation Metrics, Namely F1-Score, EM, and BLEU Score. *BERTurk* Demonstrates Superior Performance Across All Metrics, Significantly Outperforming *DistilBERT*, *XLM-RoBERTa*, *ELECTRA-Turkish*, And *T5-Small*. Example Case Showing the Model's Performance on A Long and Contextually Complex Turkish Question. This Visual Supports the Study's Claim That Well-Fine-Tuned LLMs Can Capture Semantic Dependencies in Longer Contexts, Despite the Syntactic Richness of Turkish.

Table 5. Morphological Analysis of Model Performance on Agglutinative Turkish Structures. This Table Compares How *BERTurk* and *XLM-RoBERTa* Tokenize and Process Morphologically Complex Turkish Words, Highlighting the Challenges Posed by Agglutination (e.g., Suffix Stacking). The Examples Demonstrate That *BERTurk*'s Turkish-Specific Tokenization Preserves Semantic Coherence by Segmenting Morphemes Contextually, Whereas *XLM-RoBERTa*'s Multilingual Tokenizer Often Fragments Suffixes into Non-Meaningful Units.

Example	Morphological Breakdown	BERTurk Output	XLM-RoBERTa Output
"Okullarımızdaki kitaplar" (EN: "*Books in our schools*")	*"okul" + "lar" + "ımız" + "da" + "ki"* (EN: "*school*" + *PL* + "*our*" + *LOC* + *REL*)	Correct (context-aware)	Incorrect (fragmented)

The evaluation of training duration and inference time provides crucial insights into the computational efficiency and real-world applicability of the models. *T5-Small* demonstrated the fastest training time at 3,005 seconds, showcasing its lightweight architecture optimized for speed. Conversely, *XLM-RoBERTa* exhibited the longest training duration at 6,563 seconds, likely due to its multilingual corpus and more complex architecture. In terms of inference time, *DistilBERT* outperformed all models with the fastest inference time of 40 milliseconds, aligning with its design for resource-efficient deployments. However, despite its efficiency, *DistilBERT*'s predictive performance was considerably lower compared to *BERT-Turkish*, which achieved the highest evaluation scores but had a slightly longer inference time of 46 milliseconds. This trade-off between speed and accuracy is evident across models. While *ELECTRA-Turkish* offered relatively faster inference (43 milliseconds) and moderate training time, its performance did not match the top-performing models. *T5-Small*, despite its swift training phase, showed slower inference (53 milliseconds) and lower evaluation metrics, suggesting that it is more suitable for generative tasks rather than extractive question-answering. The obtained training and inference times of the employed models are illustrated in Fig. 4, highlighting the trade-offs between computational efficiency and predictive performance across models.

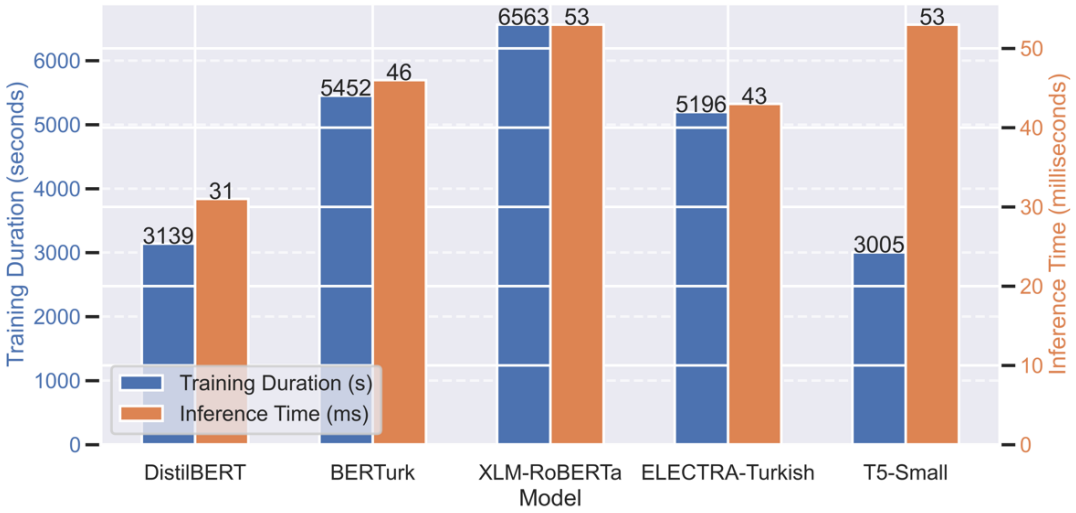


Figure 4. Comparative Analysis of Training Duration and Inference Time Across the Evaluated Transformer-Based Models. The Bar Chart Highlights Efficiency Trade-Offs by Displaying Each Model's Resource Requirements in Terms of Training and Inference, Which Is Critical for Determining Real-World Applicability in Low-Resource or Latency-Sensitive Turkish QA Deployments.

In addition to reporting the training duration and inference time for each model, we also evaluated their practical deployment aspects by assessing memory consumption. Using Python's *tracemalloc* and *psutil* libraries, we measured peak memory usage during inference. The results show that *BERTurk* and *XLM-RoBERTa*, while achieving strong performance in terms of F1 and EM scores, exhibited higher memory consumption (approximately 1 GB of GPU memory). This could pose challenges for deployment in memory-constrained environments, such as on mobile or edge devices. On the other hand, *T5-Small* and *ELECTRA-Turkish* demonstrated significantly lower GPU memory footprints (243 MB and 433 MB, respectively), making them more suitable for lightweight applications, despite their relatively lower performance. These findings underline the trade-off between model accuracy and computational efficiency, providing valuable insights for selecting models based on specific application needs. The bar plot illustrating the GPU memory consumption (in MB) of the employed transformer models during inference is presented in Fig. 5.

Table 6 presents a comparison between the ground truth answers and the answers generated by the fine-tuned *BERTurk* model for the given sample contexts and questions from the test set. Each row in the table contains a context, a corresponding question, the ground truth answer, and the answer generated by the fine-tuned *BERTurk* model. This comparison demonstrates the model's ability to accurately retrieve and generate answers based on the provided contextual information, showcasing its performance in understanding and answering factual questions.

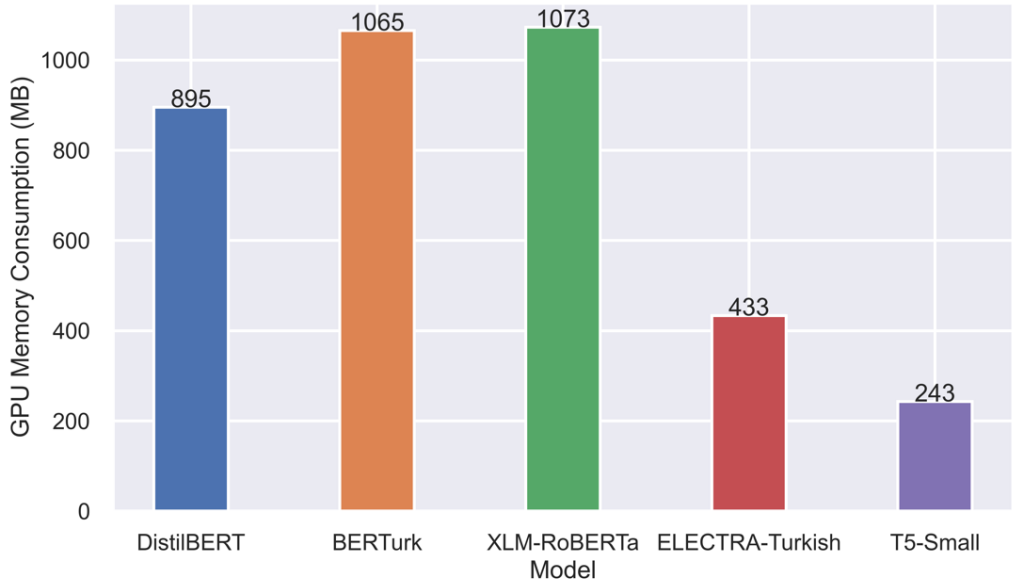


Figure 5. GPU Memory Consumption (In MB) of the Evaluated Transformer Models. The Results Highlight the Variations in Memory Consumption Across the Models, With *BERTurk* and *XLM-RoBERTa* Consuming Significantly More Memory Compared to The Lighter Models, Such as *DistilBERT* and *T5-Small*, Which Are More Suitable for Deployment in Memory-Constrained Environments Like Mobile or Edge Devices.

Table 6. Comparison of Ground Truth and Answer Generated by the Fine-Tuned *BERTurk* for the Given Sample Contexts and Questions from the Test Set (Translated to English and the Original Turkish Text are Given in Parentheses).

Context	**Question**	**Ground Truth**	**Answer Generated by BERTurk**
Ibn Kathir (1301 - 1373) was a Syrian hadith scholar, Quran exegete, and historian. He authored Al-Bidaya wa'l-Nihaya (The Beginning and the End), a seminal work widely regarded as a key reference in the Islamic world. (TR: *İbn Kesîr (1301 - 1373), Suriyeli muhaddis, müfessir ve tarihçi. İslam dünyasında kaynak bir eser olan El Bidaye ve'n Nihaye'yi yazmıştır.*)	What is Ibn Kathir's nationality? (TR: *İbn Kesir'in uyruğu nedir?*)	Syrian (TR: *Suriyeli*)	Syrian (TR: *Suriyeli*)
The structure used as an observatory was built between 1934 and 1936, based on the designs of architect Arif Hikmet Holtay. Architecturally, it is considered part of the rationalist-modernist movement. It is still actively used for the same purpose today. (TR: *Gözlemevi olarak kullanılan yapı, 1934-1936 yılları arasında, mimar Arif Hikmet Holtay'ın çizimlerine göre inşa edilmiştir. Yapı, mimari olarak rasyonel-modernist akım içinde değerlendirilmektedir. Hâlen etkin olarak aynı amaçla kullanılmaktadır.*)	In which years was the observatory built? (TR: *Gözlemevi hangi yıllar arasında inşa edilmiştir?*)	1934-1936	1934-1936
The Treaty of Vasvar is a peace treaty. It was signed on August 18, 1618, between the Ottoman Empire and Poland. The treaty was signed in the city of Vasvar. (TR: *Vasvar Antlaşması bir barış antlaşmasıdır. Vasvar Antlaşması 18 Ağustos 1618 tarihinde imzalanmıştır. Vasvar Antlaşması, Osmanlı Devleti ile Lehistan arasında imzalanmıştır.Vasvar Antlaşması Vasvar kentinde imzalanmıştır.*)	The Treaty of Vasvar was signed between the Ottoman Empire and which state? (TR: *Vasvar Antlaşması, Osmanlı Devleti ile hangi devlet arasında imzalanmıştır?*)	Poland (TR: *Lehistan*)	Poland (TR: *Lehistan*)

Context	Question	Ground Truth	Answer Generated by BERTurk
Samarqand died in 1222 during the Mongol invasion in the city of Herat, Afghanistan. Although little is known about his life, he was a prolific medical writer and an interpreter of medical ideas.	In which country did Semerkandi lose his life?	Afghanistan	Afghanistan
(TR: *Semerkandi, 1222 yılında Moğal saldırısı sırasında Afganistan'ın Herat şehrinde öldü. Hayatının az kısmı bilinmesine rağmen o, üretken tıbbi yazar ve tıbbi fikirlerin yorumcusuydu.*)	(TR: *Semerkandi hayatını hangi ülkede kaybetmiştir?*)	(TR: *Afganistan*)	(TR: *Afganistan*)
The Treaty of Vasvar is a peace treaty. It was signed on August 18, 1618, between the Ottoman Empire and Poland. The Treaty of Vasvar was signed in the city of Vasvar.	Where was the Treaty of Vasvar signed?	In the city of Vasvar	In the city of Vasvar
(TR: *Vasvar Antlaşması bir barış antlaşmasıdır. Vasvar Antlaşması 18 Ağustos 1618 tarihinde imzalanmıştır. Vasvar Antlaşması, Osmanlı Devleti ile Lehistan arasında imzalanmıştır.Vasvar Antlaşması Vasvar kentinde imzalanmıştır.*)	(TR: *Vasvar Antlaşması nerede imzalanmıştır?*)	(TR: *Vasvar kentinde*)	(TR: *Vasvar kentinde*)

To provide a more fine-grained analysis of the models' behaviors, we categorized the test questions into semantic types as follows: *Date*, *Definition*, *Location*, *Numeric*, *Person*, and *Other*. Table 7 presents a comparative evaluation of each model's EM and BLEU scores across these question types. This breakdown allows for a deeper understanding of the specific strengths and weaknesses of each model, particularly in relation to their ability to handle factual, numerical, or descriptive content. As shown in Table 7, *BERTurk* performs relatively well across all categories, while *T5-Small* struggles especially with entity- and number-based queries.

Table 7. Performance Comparison of the Five Transformer Models—*BERTurk*, *DistilBERT*, *ELECTRA*, *T5-Small*, and *XLM-RoBERTa*—Based on Question Type. The Results Are Reported in Terms of EM And BLEU Score for Each Semantic Category: *Date*, *Definition*, *Location*, *Numeric*, *Person*, And *Other*. This Categorization Enables the Evaluation of Model Effectiveness in Handling Different Forms of Factual and Descriptive Information.

	EM					BLEU Score				
Question Type	***BERTurk***	***DistilBERT***	***ELECTRA-Turkish***	***T5-Small***	***XLM-RoBERTa***	***BERTurk***	***DistilBERT***	***ELECTRA-Turkish***	***T5-Small***	***XLM-RoBERTa***
Date	**0.581**	0.393	0.579	0.018	0.541	**0.248**	0.181	0.262	0.025	0.240
Definition	**0.421**	0.168	0.404	0.017	0.472	**0.354**	0.166	0.319	0.033	0.343
Location	**0.490**	0.303	0.485	0.019	0.545	0.290	0.193	**0.300**	0.034	0.313
Numeric	0.288	0.208	**0.296**	0.024	**0.296**	**0.086**	0.082	0.081	0.025	0.062
Person	0.567	0.286	0.607	0.006	**0.632**	0.347	0.225	0.358	0.045	**0.373**
Other	0.397	0.209	**0.440**	0.015	0.430	**0.338**	0.212	0.324	0.031	0.333

Error Analysis

We conducted a detailed analysis of its incorrect predictions on the test set to better understand the failure modes of the fine-tuned *BERTurk* model. From the error cases, several recurring patterns emerged:

- *Surface Form Mismatches.* Many predictions were semantically correct but formatted differently (e.g., "*1258*" vs. "*1258 yılında*" [EN: "*In the year of 1258*"]). These indicate that the model understands the context but adds temporal or locational suffixes common in Turkish, resulting in technically mismatched spans.
- *Entity Confusion.* Confusion between similar historical figures was observed (e.g., "*Orhan Gazi*" vs. "*Osman Bey*"), especially when both were mentioned in the same context. This points to limitations in entity disambiguation.
- *Lexical Variants & Transliteration.* Errors stem from the presence of abbreviations and orthographic variations, especially for named entities.
- *Scope Errors in Long Contexts.* In multi-sentence contexts, the model occasionally selected the wrong sub-span that partially included the correct information.

These findings suggest that while the model captures the semantic neighborhood of the correct answers quite well, it struggles with token span exactness, morphological variants, and entity resolution in crowded contexts.

Web GUI of the Turkish QA System

To facilitate real-time interaction with the developed Turkish QA model, a web-based application was implemented using *Streamlit* ("Streamlit: A Faster Way to Build and Share Data Apps," 2025), a lightweight and efficient open-source framework for deploying ML models. This application provides an interactive graphical user interface (GUI) that enables users to input a textual context and a corresponding question, allowing the system to extract and present the most relevant answer. The backend employs the best-performing model, namely *BERTurk*. The model processes the input by first applying WordPiece tokenization, ensuring compatibility with the transformer architecture. The tokenized text is then fed into the model, which predicts the start and end indices of the most probable answer span within the given context. The extracted tokens are subsequently reconstructed into human-readable text and displayed in the interface. If no valid answer is found, an appropriate message is returned to inform the user.

The *Streamlit*-based web UI was designed to be intuitive and computationally efficient. The interface consists of two primary input fields—one for entering the context paragraph and another for posing a question—as well as a "*Get Answer*" button that triggers the inference process. Upon submission, the system tokenizes the input, performs inference using the transformer model, and displays the extracted answer in real time. To optimize performance, *Streamlit*'s internal caching mechanism was employed to ensure that the model is loaded only once per session, significantly reducing inference time. The backend processing follows a modular structure, consisting of preprocessing, inference, and post-processing modules. The preprocessing module tokenizes and encodes the input, the inference module computes the most likely answer span, and the post-processing module reconstructs the extracted tokens into a coherent answer. The screenshot in Fig. 6 illustrates the developed interactive web GUI of the proposed Turkish QA system, where users can input a context and question to retrieve an answer from the trained model.

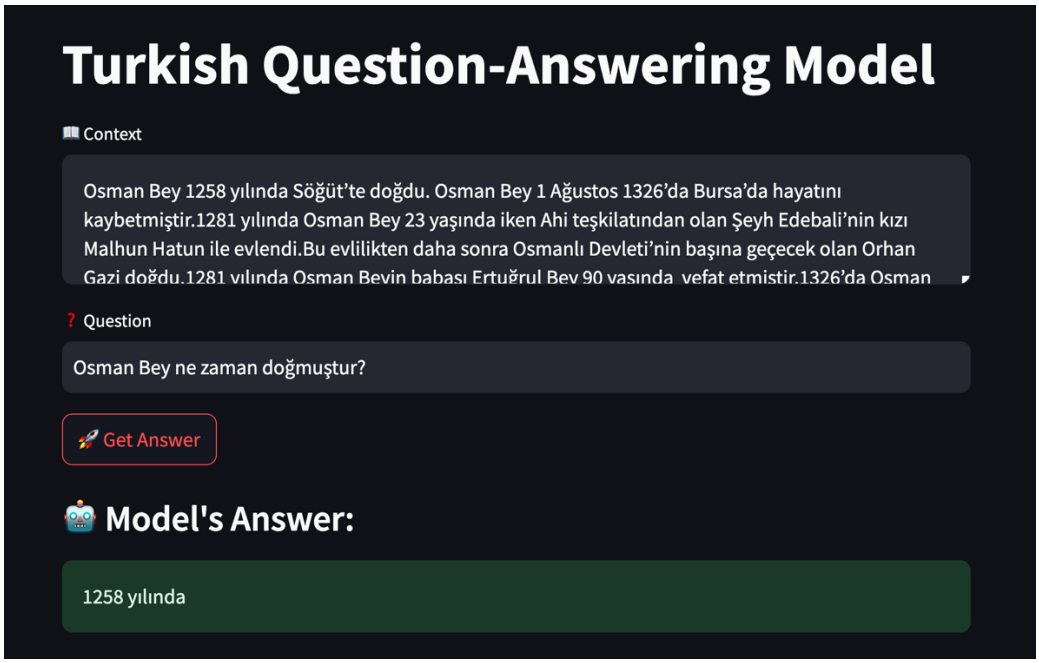


Figure 6. Screenshot Of the Developed *Streamlit*-Based Web Interface for The Proposed Turkish QA System. This Interactive GUI Enables Real-Time Evaluation by Allowing Users to Input a Context and A Question, And Instantly Receive the Model's Extracted Answer. It Highlights the Practical Applicability and User-Friendliness of The System, Facilitating Broader Accessibility and Deployment for Native Turkish Speakers.

Threats to Validity and Limitations

Despite the strong performance of the evaluated transformer models and the methodological rigor applied in this study, several limitations and potential threats to validity exist:

- *Dataset Dependency*. The findings are based on a single Turkish QA dataset (Soygazi et al., 2021). Although it is a gold-standard dataset, the generalizability of results to other Turkish QA datasets or domains (e.g., biomedical or legal texts) remains unverified.
- *Computational Constraints.* Due to hardware limitations, large-scale hyperparameter tuning or multi-fold cross-validation was not feasible. Therefore, the models were evaluated using a fixed training-testing split provided by the dataset.
- *Reproducibility*. Although efforts were made to ensure reproducibility (e.g., fixed random seeds, shared code), slight variations may still occur due to non-deterministic operations in deep learning frameworks.

CONCLUSION

LLM chatbots have become one of the most commonly used – if not the most – ways for people to acquire knowledge on any topic they wish to learn about. This widespread adoption is driven by their ability to provide instant, context-aware responses tailored to individual queries. As a result, they are increasingly integrated into educational platforms, professional environments, and customer support systems. It is safe to say that they have significantly transformed the way people interact with software in their daily activities. Many applications now offer built-in LLM support, either by integrating their models or leveraging existing ones. There are many studies investigating the effectiveness of LLMs in English QA; however, when it comes to Turkish, the number of studies is very limited, and the existing ones are not comprehensive. To address this limitation, we proposed this study as a comprehensive evaluation of several state-of-the-art Transformer-based LLMs on a gold-standard Turkish QA dataset, aiming to address the underexplored performance of these models in low-resource and morphologically rich languages. The experimental results demonstrated that the *BERTurk* model, which is specifically pre-trained on Turkish text, outperformed other models, including multilingual and distilled variants, in terms of F1-score, EM, and BLEU score despite slightly higher training and inference costs. This superior performance can be attributed to its Turkish-specific pre-training, full-sized architecture, and robust MLM approach, which enable it to better capture the morphological richness and agglutinative structure of Turkish. In contrast, models like *XLM-RoBERTa* and *DistilBERT*, while efficient, showed limitations in handling the nuances of Turkish due to their multilingual training and lighter architectures. The study also highlighted the trade-offs between model performance and computational efficiency, showing that while *DistilBERT* and *T5-Small* offer faster inference and training times along with lower memory consumption, they do so at the expense of reduced accuracy. These findings underscore the importance of developing and fine-tuning language-specific models for low-resource languages to achieve optimal performance in NLP tasks. To support reproducibility and encourage further research, all code used in this study has been made publicly available at: https://github.com/talhakabakus/turkish-qa-transformers.

This study has demonstrated that pre-trained transformer models can be effectively employed for Turkish QA tasks. However, there are several promising directions for future research. First, expanding the availability of high-quality, diverse datasets—particularly from specialized domains such as healthcare, law, and education—will be essential for evaluating the generalizability of QA models across various real-world contexts. Additionally, developing advanced pre-training techniques tailored to the unique morphological and syntactic characteristics of Turkish and other underrepresented languages can further enhance the effectiveness of these models. Future work may also involve extending the current benchmark by incorporating multilingual and cross-lingual QA models, experimenting with zero-shot and few-shot learning settings, and integrating hybrid neural-symbolic reasoning to improve model interpretability. Exploring lightweight, resource-efficient transformer architectures is another important direction, especially for deployment in low-resource or mobile environments. To address some of the limitations identified in this study, future research could incorporate broader datasets, more robust validation strategies such as k-fold cross-validation, and extensive hyperparameter optimization. Finally, leveraging alternative tokenization strategies and applying data augmentation techniques suited to agglutinative languages like Turkish could yield further performance gains. These advancements will be crucial not only for improving QA systems' accuracy and efficiency but also for ensuring their applicability in diverse linguistic and cultural contexts.

REFERENCES

Bilgin, M., Bozdemir, M., and Demir, E. (2024). Performance Analysis of Large Language Models on Turkish Question-Answer Texts. *Proceedings of the 2024 Electrical-Electronics and Biomedical Engineering Conference (ELECO 2024)*, 1–5. Bursa, Türkiye: IEEE. https://doi.org/10.1109/ELECO64362.2024.10847201

Bonov, P. (2025). DeepSeek climbs to top spot of the App Store, beats ChatGPT in the process. Retrieved February6, 2025, from GSMArena website: https://www.gsmarena.com/deepseek_climbs_to_top_spot_of_the_app_store_beats_chatgpt_in_the_process-news-66286.php

Celebi, E., Gunel, B., and Sen, B. (2011). Automatic Question Answering for Turkish with Pattern Parsing. *Proceedings of the 2011 International Symposium on INnovations in Intelligent SysTems and Applications*, 389–393. Istanbul, Türkiye: IEEE. https://doi.org/10.1109/INISTA.2011.5946098

Clark, K., Luong, M. T., Le, Q. V., and Manning, C. D. (2020). ELECTRA: Pre-training Text Encoders as Discriminators Rather Than Generators. *Proceedings of the 8th International Conference on Learning Representations (ICLR 2020)*, 1–18. Online.

Conneau, A., Khandelwal, K., Goyal, N., Chaudhary, V., Wenzek, G., Guzmán, F., … Stoyanov, V. (2020). Unsupervised Cross-lingual Representation Learning at Scale. *Proceedings of the 58th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics*, 8440–8451. Online: ACL. https://doi.org/10.18653/v1/2020.acl-main.747

Datasets. (2025). Retrieved April 7, 2025, from Hugging Face website: https://huggingface.co/docs/datasets/en/index

Derici, C., Çelik, K., Kutbay, E., Aydın, Y., Güngör, T., Özgür, A., and Kartal, G. (2015). Question Analysis for a Closed Domain Question Answering System. *Proceedings of the 16th International Conference Computational Linguistics and Intelligent Text Processing (CICLing 2015)*, *9042*. Cairo, Egypt: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-18117-2_35

Devlin, J., Chang, M. W., Lee, K., and Toutanova, K. (2019). BERT: Pre-training of Deep Bidirectional Transformers for Language Understanding. *Proceedings of the 2019 Conference of the North American Chapter of the Association for Computational Linguistics: Human Language Technologies (NAACL HLT 2019)*, *1*. Minneapolis, Minnesota, USA: ACL.

Evaluate. (2025). Retrieved April 9, 2025, from Hugging Face website: https://huggingface.co/docs/evaluate/index

Hu, K. (2023). ChatGPT sets record for fastest-growing user base - analyst note. Retrieved February 13, 2025, from Reuters website: https://www.reuters.com/technology/chatgpt-sets-record-fastest-growing-user-base-analyst-note-2023-02-01/

Hunter, J. D. (2007). Matplotlib: A 2D Graphics Environment. *Computing in Science and Engineering*, *9*(3), 90–95. https://doi.org/10.1109/MCSE.2007.55

Kotstein, S., and Decker, C. (2024). RESTBERTa: a Transformer-based question answering approach for semantic search in Web API documentation. *Cluster Computing*, *27*(4). https://doi.org/10.1007/s10586-023-04237-x

Kuligowska, K., and Kowalczuk, B. (2021). Pseudo-labeling with transformers for improving Question Answering systems. *Procedia Computer Science*, *192*, 1162–1169. https://doi.org/10.1016/J.PROCS.2021.08.119

Liu, Y., Ott, M., Goyal, N., Du, J., Joshi, M., Chen, D., … Allen, P. G. (2019). RoBERTa: A Robustly Optimized BERT Pretraining Approach. *ArXiv*, *1907.11692*, 1–13.

Loshchilov, I., and Hutter, F. (2019). Decoupled Weight Decay Regularization. *Proceedings of the 7th International Conference on Learning Representations (ICLR 2019)*, 1–19. New Orleans, LA, USA.

Luo, K., Lin, F., Luo, X., and Zhu, K. Q. (2018). Knowledge base question answering via encoding of complex query graphs. *Proceedings of the 2018 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing, EMNLP 2018*, 2185–2194. https://doi.org/10.18653/v1/d18-1242

MDZ Digital Library team. (2024a). dbmdz/bert-base-turkish-cased. Retrieved January 21, 2025, from Hugging Face website: https://huggingface.co/dbmdz/bert-base-turkish-cased

MDZ Digital Library team. (2024b). dbmdz/electra-base-turkish-cased-discriminator. Retrieved January 17, 2025, from Hugging Face website: https://huggingface.co/dbmdz/electra-base-turkish-cased-discriminator

Mehta, I. (2025). DeepSeek reaches No. 1 on US Play Store | TechCrunch. Retrieved February 6, 2025, from TechCrunch website: https://techcrunch.com/2025/01/28/deepseek-reaches-no-1-on-us-play-store/

Papineni, K., Roukos, S., Ward, T., and Zhu, W. (2002). BLEU: a Method for Automatic Evaluation of Machine Translation. *Proceedings of the 40th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics (ACL)*, 311–318. Philadelphia, Pennsylvania, USA: ACL.

Paszke, A., Gross, S., Massa, F., Lerer, A., Bradbury, J., Chanan, G., … Chintala, S. (2019). PyTorch: An Imperative Style, High-Performance Deep Learning Library. *Proceedings of the Thirty-Third Conference on Neural Information Processing Systems (NIPS 2019)*, 8026–8037. Vancouver, BC, Canada.

Pedregosa, F., Varoquaux, G., Gramfort, A., Michel, V., Thirion, B., Grisel, O., … Duchesnay, É. (2011). Scikit-learn: Machine Learning in Python. *Journal of Machine Learning Research*, *12*, 2825–2830.

Raffel, C., Shazeer, N., Roberts, A., Lee, K., Narang, S., Matena, M., … Liu, P. J. (2020). Exploring the Limits of Transfer Learning with a Unified Text-to-Text Transformer. *Journal of Machine Learning Research*, *21*, 1–67.

Sanh, V., Debut, L., Chaumond, J., and Wolf, T. (2019). DistilBERT, a distilled version of BERT: smaller, faster, cheaper and lighter. *Proceedings of the 5th Workshop on Energy Efficient Machine Learning and Cognitive Computing (NeurIPS 2019)*, 1–5. Vancouver, BC, Canada.

Soygazi, F., Ciftci, O., Kok, U., and Cengiz, S. (2021). THQuAD: Turkish Historic Question Answering Dataset for Reading Comprehension. *Proceedings of the 6th International Conference on Computer Science and Engineering (UBMK 2021)*. Ankara, Türkiye: IEEE. https://doi.org/10.1109/UBMK52708.2021.9559013

Streamlit: A faster way to build and share data apps. (2025). Retrieved March 2, 2025, from Snowflake Inc. website: https://streamlit.io

The pandas development team. (2020). pandas: Python Data Analysis Library. Retrieved January 7, 2024, from https://pandas.pydata.org

Vazrala, S., and Khatoon Mohammed, T. (2025). RBTM: A Hybrid gradient Regression-Based transformer model for biomedical question answering. *Biomedical Signal Processing and Control*, *102*, 107325. https://doi.org/10.1016/J.BSPC.2024.107325

Waskom, M. L. (2021). seaborn: statistical data visualization. *Journal of Open Source Software*, *6*(60), 1–4. https://doi.org/10.21105/joss.03021

Wolf, T., Debut, L., Sanh, V., Chaumond, J., and ... (2020). Transformers: State-of-the-art Natural Language Processing. *Proceedings of the 2020 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing: System Demonstrations*, *1910.03771*, 38–45. Online: ACL.

Xu, K., Reddy, S., Feng, Y., Huang, S., and Zhao, D. (2016). Question answering on freebase via relation extraction and textual evidence. *Proceedings of the 54th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics (ACL 2016)*, *4*, 2326–2336. Berlin, Germany: ACL. https://doi.org/10.18653/v1/p16-1220

Xue, X., Zhang, J., and Chen, Y. (2024). Question-answering framework for building codes using fine-tuned and distilled pre-trained transformer models. *Automation in Construction*, *168*, 105730. https://doi.org/10.1016/J.AUTCON.2024.105730

Yu, M., Yin, W., Hasan, K. S., dos Santos, C., Xiang, B., and Zhou, B. (2017). Improved neural relation detection for knowledge base question answering. *Proceedings of the 55th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics, Proceedings of the Conference (ACL 2017)*, *1*, 571–581. Vancouver, Canada: ACL. https://doi.org/10.18653/v1/P17-1053

Zhu, S., Cheng, X., and Su, S. (2020). Knowledge-based question answering by tree-to-sequence learning. *Neurocomputing*, *372*, 64–72. https://doi.org/10.1016/j.neucom.2019.09.003

KSÜ Mühendislik Bilimleri Dergisi, 28(2), 2025
Araştırma Makalesi

KSU J Eng Sci, 28(2), 2025
Research Article

Kahramanmaras Sutcu Imam University
Journal of Engineering Sciences

Geliş Tarihi : 06.03.2025
Kabul Tarihi :23.05.2025

Received Date : 06.03.2025
Accepted Date : 23.05.2025

KENEVİR/PAMUK KARIŞIMLI ÖRME KUMAŞLARIN PERFORMANS VE BİYOBOZUNURLUK VE ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

INVESTIGATION OF PERFORMANCE AND BIODEGRADABILITY PROPERTIES OF HEMP AND COTTON BLENDED KNITTED FABRICS

Hatice Kübra KAYNAK[1*] (ORCID: 0000-0001-6548-3398)
Kübra ÖZŞAHİN [2] (ORCID: 0000-0001-6130-5404)

[1] Gaziantep Üniversitesi, Tekstil Mühendisliği Bölümü, Gaziantep, Türkiye
[2]MEM Tekstil San. ve Tic. A.Ş Ar-Ge Merkezi, Kahramanmaraş, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Hatice Kübra KAYNAK, tuluce@gantep.edu.tr

ÖZET

Bu çalışmada, farklı oranlarda üretilmiş kenevir/pamuk lif karışımlı ipliklerden üretilen örme kumaşların performans ve biyobozunurluk özelliklerinin araştırılması amaçlanmıştır. Bu kapsamda; %100 pamuk, %90 pamuk-%10 kenevir, %80 pamuk-%20 kenevir ve %70 pamuk-%30 kenevir karışımlı iplikler üretilmiştir. Elde edilen ipliklerden örme kumaşlar üretilerek boyanmıştır. Üretilen kumaşlarda kenevir oranının kumaş performans özelliklerine etkilerinin araştırılması amacıyla hava geçirgenliği, patlama mukavemeti ve boncuklanma dayanımı incelenmiş ve biyobozunurluk davranışlarının incelenmesi amacıyla, 15 günlük ve 90 günlük iki farklı sürede toprağa gömme işlemi sonrası kumaş görünümü değerlendirilmiştir. Çalışma sonucunda; kenevir katkı oranının artmasının iplik kalite ve mukavemet özelliklerini kötüleştirdiği belirlenmiştir. Diğer yandan, kenevir katkı oranının artmasıyla ilmek yoğunluğu değerlerinde azalma ve buna bağlı olarak hava geçirgenliği değerlerinde artış ve patlama mukavemeti değerlerinde düşüş saptanmıştır. İlaveten kenevir katkı oranının artmasıyla boncuklanma dayanımı değerlerinde düşük seviyede azalma görülmüştür. 15 günlük gömme süresi sonunda kenevir katkılı tüm kumaşların, %100 pamuklu kumaşa oldukça iyi seviyede biyobozunurluk sağladığı gözlemlenmiştir. 90 günlük gömme süresi sonunda ise tüm kumaşların tamamen bozunduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Kenevir, pamuk, sürdürülebilirlik, örme kumaş, biyobozunurluk

ABSTRACT

In this study, it is aimed to investigate the performance and biodegradability properties of knitted fabrics produced from hemp/cotton fiber blended yarns with different blend ratios. In this context; 100% cotton, 90% cotton-10% hemp, 80% cotton-20% hemp and 70% cotton-30% hemp blended yarns were produced. Knitted fabrics were produced from the obtained yarns and the fabric samples were dyed. In order to investigate the effects of the hemp fiber ratio on the fabric performance properties; air permeability, bursting strength and pilling resistance were examined, and in order to examine the biodegradability behavior, the fabric appearance was evaluated after burial in soil for two different periods of 15 and 90 days. As a result of the study, it is determined that increasing the hemp content deteriorated the yarn quality and strength properties. On the other hand, with the increase in the hemp content, a decrease in the loop density values and accordingly an increase in the air permeability values and a decrease in the bursting strength values were detected. In addition, a slight decrease was observed in the pilling resistance values with the increase in the hemp content. At the end of the 15-day burial period, it is observed that all hemp content fabrics provided a very good level of biodegradability in comparison to 100% cotton fabric. At the end of the 90-day burial, it is observed that all fabrics were completely degraded.

ToCite: KAYNAK, H. K.., & ÖZŞAHİN, K., (2025). KENEVİR/PAMUK KARIŞIMLI ÖRME KUMAŞLARIN PERFORMANS VE BİYOBOZUNURLUK VE ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 28(2), 994-1006

Keywords: Hemp, cotton, sustainability, knitted fabric, biodegradability

GİRİŞ

Kenevir, birçok farklı alanda kullanılan çok önemli bir endüstriyel bitkidir. Kenevirin tohum kısmı kabuk kırma yoluyla gıda malzemesi veya un olarak değerlendirilirken, tohumundan presleme yoluyla yağ elde edilmektedir. Elde edilen yağın, gıda maddeleri, biyoyakıt, boya ve kozmetikte kullanım alanları yaygındır. Posasından ise hayvan yemi, bira veya protein tozu gibi gıda maddesi yapılmaktadır. Sap kısmının kabuğu soyularak lif kısmı ayrılmaktadır. Lif kısmının kalitesine göre kumaş, tekstil ürünleri, panel üretimi, selüloz, kâğıt gibi ürünlerde ham madde olarak kullanılmaktadır. Kenevir sapından lif ayrıldıktan sonra kalan kısım ise hayvan yemi, kompost, hayvan altlığı ya da inşaat sektöründe harç malzemesi gibi birçok alanda değerlendirilmektedir. Çiçek kısmı ise daha çok ilaç ve kozmetik sanayinde, posası ise balık yemi, gübre ve hayvan altlığı olarak kullanılabilmektedir. Kenevir liflerinin güçlü ve sert lif yapısı, cam lifine benzer bir sertliğe sahiptir ve bu nedenle kenevir lifleri kompozit yapılarda takviye malzemesi olarak da kullanılabilmektedir (Thomsen vd., 2006; Chen vd.. 2007; Shahzad, 2012; Liu vd., 2016; ORAN, 2019; Manaia vd., 2019; Başer ve Bozoğlu, 2020; Demirbek ve Oktav Bulut, 2021).

2018 yılında dünya geneli elyaf üretimi yaklaşık 111 milyon ton olarak kayda geçerken, doğal lifler bunun 32 milyon tonluk kısmını kapsamaktadır. Kenevir ise 70.000 tonluk üretime sahiptir. Çin şu anda kenevir ürünlerinin ana üreticisi ve ABD'nin ana tedarikçisidir. ABD ise en büyük küresel ithalatçı olarak Çin'den tekstil ürünleri, Kanada'dan gıda ve tohum içeren kenevir ürünleri, Avrupa'dan ise sanayi ürünleri almaktadır. ABD'nin kenevir endüstriyel ürünleri için 2017 yılı toplam satışı 820 milyon ABD dolarıdır ve bunun 190 milyon dolarını tekstil ürünleri oluşturmaktadır. (Muzyczek, 2020). Diğer yandan tekstilin de içerisinde olduğu küresel endüstriyel kenevir pazar büyüklüğünün 2025 yılına kadar 10,6 milyar ABD dolarına ulaşması beklenmektedir (ORAN, 2019).

Gün geçtikçe önemi artan kenevir lifinin iplik üretiminde kullanıma uygun hale getirilmesini sağlamak amacıyla lif formunda uygulanan çeşitli kimyasal ve mekanik işlemleri içeren çalışmalar literatürde mevcuttur. Kenevir lifinin yapısındaki pektinin, alkali ile kaynatma işlemi ile tamamen giderildiği ve asidik yıkama ile giderilemediği tespit edilmiştir. Lignin giderilmesinde ise alkali kaynatmanın etkili olduğu bildirilmiştir (Wang vd., 2003). Diğer yandan, kenevir lif yapısından lignin ve pektin uzaklaştırılmasının uzun süreli enzimatik işlemle etkili bir şekilde sağlandığı görülmüştür. İlaveten, ince ve kısa lif yapısının enzimatik işlem süresinin uzatılmasıyla sağlanabildiği ve taraklama ile lif inceliğinin ve uzunluğunun daha da azaldığı belirtmiştir (Sedelnik, 2004). Kenevir liflerine uygulanan enzimatik işlemle alkali işleme göre daha düşük lif inceliği elde edildiği, bu sebeple daha düşük mukavemetli lifler elde edildiği görülmüştür (Dreyer vd., 2002). Kenevir liflerine uygulanan ağartma işleminde sıcaklık ve süre artışı ile selülozik olmayan madde miktarının daha fazla uzaklaştığı ve lif yumuşaklığının arttığı gözlemlenmiştir. Enzimatik işlem görmüş numunelerde daha çok mukavemet kaybı olduğunu, ağartma içeren işlemlerde daha çok madde uzaklaştığı, kısa lif iplikçiliğine uygun mukavemet elde edildiği ve liflerin daha kolay bireysel hale getirilebildiği tespit edilmiştir (Ali vd., 2015). Suda çürütme yöntemi ile elde edilmiş kenevir liflerine oda sıcaklığında ve kaynatarak, gerilimsiz/gerilimli şekilde NaOH uygulanması sonucunda hemiselüloz ve lignin gibi maddelerin giderilebildiği bildirilmiştir. İşlem süresi, NaOH konsantrasyonu ve işlem sıcaklığının arttırılmasıyla bu maddelerin uzaklaşma miktarını arttırdığını gözlemlenmiştir (Kostic vd., 2008). Kenevir lifine uygulanan alkali, asetil ve silan işlemlerinin etkileri incelendiğinde, alkali işlemdeki NaOH konsantrayonun artışı ile lignin ve hemiselüloz oranının azaldığı, silanlama işlemiyle hemiselüloz ve selülozun arttığı tespit edilmiştir (Kabir vd., 2013). Kozlowski ve arkadaşları kenevir liflerine açma-kısaltma gibi mekanik işlemler ve farklı enzimatik işlemlerle pamuğa benzer özellikler sağlamaya yönelik yaptıkları çalışmada, kenevir-pamuk içerikli rotor ipliklerinin üretilebilirliğini değerlendirmişlerdir. Çalışma kapsamında, elde edilen liflerle 40 tex ve 50 tex iplik doğrusal yoğunluğunda, en fazla %50 kenevir içeriği ile, daha fazla büküm verilerek rotor ipliği üretilebileceği belirtmişlerdir (Kozlowski vd., 2013).

Diğer yandan, literatürde kenevir lifinin farklı lif çeşitleri ile karışımlarından üretilen ipliklerin özelliklerinin incelendiği çalışmalar da mevcuttur. Mikrogözenekli poliester ve kenevir lif karışımlı iplik üretiminde, iplik yapısında kenevir lif oranı arttıkça mukavemetin düştüğü, iplik yapısında %30 oranında ve %20 oranında kenevir lifi bulunduğunda liflerin iplik merkezinde yer aldığı ve bükümün etkisi ile mukavemete katkı sağladığı bildirilmiştir. Karışımdaki kenevir lif oranının %40 ve üzerine çıkarılmasıyla ise iplik dışına yerleşen kenevir liflerinin bireysel yüksek mukavemetlerinin iplik mukavemetine katkı sağlayamadığı görülmüştür. Yapıdaki poliester oranın artışıyla

ipliğin daha düzgün yapıya sahip olduğu ve kopma uzamasının arttığı görülmüştür. İplik düzgünsüzlüğünün kenevir uzunluk dağılımına bağlı olduğu en iyi düzgünsüzlük verilerinin %30 kenevir lifi içeren ipliklerde elde edildiği belirtilmiştir (Zhang vd., 2014). %100 pamuklu ve %70/%30 pamuk kenevir karışımlı ring ipliklerle merkezde T400 ve elastan bulunan ve dual-core iplikler için, kenevir karışımlı ipliklerin, düzgünsüzlük, hata indeksi ve tüylülük değerlerinin daha fazla olduğu, kopma mukavemetinin daha düşük olduğu ve buna karşın kopma uzamalarının daha yüksek olduğu tespit edilmiştir (Avcı Ertek vd., 2019). Kenevir karışımlı özlü ipliklerde kenevir lif oranı artışı ile ince yer, kalın yer ve neps hatasının arttığı ve iplik tüylülüğüne kenevir lif oranının anlamlı etkisi olmadığı görülmüştür. Diğer yandan, iplikteki kenevir lif oranı artışıyla mukavemetin azaldığını, merkezdeki filament özlerin mukavemete az da olsa olumlu katkısı olduğu tespit edilmiştir (Avcı Ertek ve Demiryürek, 2022). Kenevir karışımlı konvansiyonel ring ipliği, tek özlü ve çift özlü ring iplikler için, ipliğe öz ilavesinin düzgünsüzlüğü değiştirmediği ve kalın yer, ince yer ve neps hatalarının çift özlü ipliklerde daha çok olduğu, hataların merkeze likra ve likra+T400 eklenmesiyle daha da arttığı, kenevir içeren ipliklerin hatalarının daha yüksek olduğu görülmüştür. Bu ipliklerde, iplik tüylülüğü değerlendirildiğinde, çift özlü ipliklerde merkeze likra ve likra + T400 eklenmesinin tüylülüğün etkilenmediğini gözlemlenmiştir (Okyay vd., 2023). Kasar, kotonize, degumming işlemleri uygulanmış kenevir lifleriyle, farklı iplik numaralarında üretilen %20/%80 kenevir/pamuk karışımlı open-end ve ring ipliklerin, %20/%80 keten/pamuk karışımlı ipliklerle karşılaştırıldığı çalışmada, farklı işlemler görmüş kenevir lifleriyle (kasar, kotonize, degumming) üretilen open-end ipliklerin, keten karışımlı ipliklere göre düzgünsüzlük, iplik hataları bakımından üstün özellikler gösterdiği, tüylülük ve mukavemet özellikleri açısından ise benzer özellikler sergilediği tespit edilmiştir. Keten ve kenevir karışımlı ring iplikleri karşılaştırıldığında ise ipliklerin mukavemet ve uzama, düzgünsüzlük, ince yer, kalın yer, tüylülük özellikleri yönünden benzer özellikler gösterdiği ve kenevir lifi içerikli ipliklerin neps bakımından daha iyi olduğu belirtilmiştir (Ibrıkçı vd., 2020). Kenevir lifi ile pamuk, viskon, lyocell liflerinin farklı karışım oranlarında üretilen ring ipliklerinde, karışımlardaki kenevir oranının artışıyla iplik mukavemetinin ve uzamasının düştüğü, iplik düzgünsüzlüğünün, hatalarının ve tüylülüğünün arttığı görülmüştür (Satıl vd., 2020). Kenevir ve keten liflerinden üretilmiş ipliklerin sıvı emme, kuruma, mukavemet ve elektriksel iletkenlik özelliklerinin incelendiği çalışmada, kaynatma ve ağartma işlemi görmüş şeritlerden, yaş eğirme tekniği ile üretilen keten ve kenevir ipliklerin sıvı emme kapasitesinin daha yüksek olduğu belirtilmiştir. Keten ve kenevir iplikler için ıslak mukavemet değerlerinin kuru mukavemet değerlerinden çok daha yüksek olduğu tespit edilmiştir (Mustata ve Mustata, 2013).

Kenevir katkılı kumaşların farklı yapısal özelliklerini ve performanslarını araştıran çalışmalar incelendiğinde, %30 kenevir %70 tencel lifi içeren ring, sirospun ve air vortex iplikler içerisinden, vortex ipliklerden elde edilen kumaşların sıkıştırılabilirliğinin yüksek olduğu, eğilme rijitliğinin ring ve sirospun ipliklerle elde edilen kumaşlara göre düşük olduğu, vortex iplikle oluşturulan kumaşların kayma deformasyonunun daha az olduğu ve dolayısıyla daha yüksek boyutsal stabilite sağladığı saptanmıştır. Vortex iplik üretim sistemiyle kenevir lifi karışımlı, esnek, yumuşak, daha iyi boyutsal stabilite sağlayan kumaşlar üretilebileceği bildirilmiştir (Kim ve Kim, 2018). %100 pamuk, %95/%15 pamuk/kenevir, %85/%15 pamuk/kenevir karışımlı ipliklerde üretilen kumaşlarda kopma mukavemetinin, kenevir içeriğinin artmasıyla azaldığı görülmüştür. Kumaşlarda, kenevir oranın artışının su buharı geçirgenliğini azaltıcı etki yaptığı saptanmıştır. Kumaşta yapıya kenevir eklenmesinin ısıl direncin artmasını sağladığı belirtilmiştir (Kertmen ve Yıldırım, 2022). Tama ve diğerleri; kenevir liflerinden el tezgahında üretilen Rize iline özgü geleneksel bir kumaş olan Feretiko'nun ince yapılı, hava geçirgenliği yüksek ve 0,011 m^2K/W ısıl direnç değerine sahip olduğunu ve Feretiko kumaştan üretilen gömleğin toplam ısıl direnç değerinin 0,032 m^2K/W olduğunu tespit etmişlerdir (Tama vd., 2020). Keten, kenevir, keten/kenevir lifleri içeren kumaşlardan en iyi yalıtım sağlayan kumaşın %100 kenevir içerikli kumaş olduğu, kenevir ve kenevir karışımlı kumaşların UV koruma faktörünün daha yüksek olduğu ve kenevir ve kenevir karışımlı kumaşlarla diğer kumaşlara göre nispeten daha fazla radyasyon yalıtımı sağlandığı gözlemlenmiştir (Parlakyiğit, 2019). %50/%50 kenevir/tencel karışımlı iplikten üretilen bezayağı dokuma kumaşın; 80 saat UV ışığına maruz kaldıktan sonra UV dayanımın yüksek olduğu ve çeşitli mikroorganizmalara karşı antibakteriyel özellik sergilediği belirlenmiştir (Bozan vd., 2020). %25/75% karışım oranında kenevir/pamuk, kenevir/polyester, kenevir/tencel karışımlı ring ipliklerden üretilen örme kumaşlarda kenevir lifinin UV emici özelliğinden dolayı iyi seviyede UV direnci gösterdiği tespit edilmiştir. Bu çalışmada, boncuklanma dayanımı bakımından en iyi özelliği kenevir/pamuk içerikli örme kumaşın gösterdiği ve tüm kumaşların hava geçirgenliği nem yönetimi değerlerinin birbirine yakın olduğu belirtilmiştir. İlaveten, kenevir içerikli kumaşların antibakteriyel özelliklerinin 20 yıkama sonrası iyi derecede olduğunu tespit etmişlerdir (Korkmaz vd., 2022). Viskon filament ve tekstüre poliamidin öz bileşeni olarak ve kenevir lifinin manto olarak kullanıldığı bir çalışmada kenevir lifi yapısındaki doğal pigment ve ligninden dolayı UV koruyuculuğunun iyi seviyede olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca, iplik yapısına tekstüre filament ipliği katılmasıyla oluşan kütlesel yoğunluğun UV ışınlarını

bloklayıcı görev gördüğü sonucuna varılmıştır (Stankoviç vd., 2017). Kenevir liflerinden üretilen ipliklerin örme kumaşların konfor özelliklerini etkisini inceleyen çalışmada, 50 tex %100 kenevir lifinden elde edilmiş ipliği ikiye katlayarak ve çift iplik besleyerek aynı koşullarda üretilen düz örme kumaşlarda katlı iplikle üretilen kumaşta iplikler arası boşluğun daha fazla olması dolayısıyla hava geçirgenliğinin, bağıl su buharı geçirgenliğinin daha yüksek olduğu ancak ısıl direnç bakımından farklılık olmadığı tespit edilmiştir. Katlı iplikle üretilen kumaşların, daha yumuşak olduğu, bu kumaşların esneme bakımından da daha iyi sonuçlar verdiği belirlenmiştir. Çift iplik beslenen örme kumaşların ise kuvvet uygulaması sonucu daha iyi şekilde eski hallerine döndüğü ve bu kumaşların yüzey pürüzlülüğünün ve sürtünme katsayısının çift katlı iplikle üretilen kumaşlara göre daha yüksek olduğu tespit edilmiştir (Stankoviç ve Bizjak, 2014).

Bazı araştırmacılar ise kenevir içerikli kumaşlara uygulanan yaş işlemlerin kumaş yapısal özelliklerine ve performanslarına etkilerine ilişkin çalışmalar yürütmüşlerdir. Kenevir/pamuk/polyester karışımlı örme kumaşlarda alkali ön işlemle kenevir liflerinin amorf bölgelerinin arttırıldığını, K/S değerlerinin normal şartta boyanan pamuk seviyelerine geldiğini, alkali işlem eklenmiş boyama ile alkali ön işlem görmüş ve görmemiş konvansiyonel boyamadan daha iyi K/S değerleri elde edilebildiği bildirilmiştir (Zeng ve Liu, 2014). Kenevir esaslı dokuma kumaşlara uygulanan pektinaz enzimli ön işleminin NaOH ile yapılan işleme göre daha etkili hidrofilite sağladığı, hidrofilleştirme işlemi sonrası H2O2 ile ağartılan kumaşların en yüksek hidrofilitiye sahip olduğu görülmüştür (Şahinbaşkan, 2019). Enzimatik bitim işlemi sonucunda, %100 kenevir dokuma kumaşlarda, kopma mukavemetin azaldığını, işlem süresi artışıyla bu azalmanın daha çok olduğunu ve bitim işlemi gören kumaşların daha çok nem tuttuğunu belirtmişlerdir (Buschle- Diller vd., 1999). Kenevir karışımlı dokuma kumaşlarda kenevir lifinin kristalinitesinin amonyak işleminden sonra düştüğü, amonyağın selüloz moleküler zincirini bozarak amorf bölgeler oluşturduğu, işlemle liflerin şiştiği kumaştaki iplik arasındaki boşluğun azaldığı ve kumaş örtme faktörünün %4,9-6,5 oranında arttığı gözlemlenmiştir. Sıvı amonyak işleminin kumaşın nem yönetim özelliklerini değiştirdiği, ıslanma hızının işlemle arttığını ve amonyaklı işlem gören numunede aynı sürede daha büyük alana sıvı yayıldığı tespit edilmiştir. Toplam nem yönetim kapasitesi değerlendirildiğinde; sıvı amonyakla yapılan işlemin kenevir içerikli kumaşların sıvı yönetim özelliklerini iyileştirdiği tespit edilmiştir (Lee ve Ji, 2016). Amonyaklı yaş işlem etkisini inceleyen bir başka çalışmada, amonyakla yaş işlem uygulanan kumaşların gerilme rezilyansının amonyaklı işlemle arttığı gözlenmiş ve uygulanan amonyaklı işlemle kumaşlarda eğilme rijitliğinin azaldığı, kumaşların daha yumuşak ve dökümlü hale geldi saptanmıştır (Ji ve Lee, 2016). Farklı hacimsel oranlardaki kitosan ve epoksiden modifiye edilmiş silikon yağı ile muamele etkisiyle liflerin birbirinden daha çok ayrıldığı görülmüştür. Kenevir liflerindeki kristalin bölgelerin işlem sonucu %62,9'dan %77,1'e çıktığı ve uygulanan kitosan/modifiye silikon yağı işlemlerinin yapıdan yabancı maddelerin uzaklaşmasına neden olduğu ve kristalin-amorf bölgedeki yapısal değişikliklere bağlı olarak kumaşların kopma mukavemeti ve uzamasının azaldığı görülmüştür. İşlem görmüş kumaşların eğilme rijitliğinin azaldığı, kitosanla işlem görmüş numunelerin beyazlığının azaldığı, modifiye silikon yağı ile lifler üzerinde oluşan membran tabakası ile beyazlığın arttığı tespit edilmiştir. Yalnızca kitosan uygulanmış numunelerin kuru/ıslak sürtme haslıklarının işlemsiz numunelere göre artış gösterdiği, kitosan/modifiye silikon yağı ile işlem gören numunelerin en yüksek haslığa sahip olduğu, 30 yıkama sonrası renk haslığının işlem görmemiş numunelerden daha yüksek olduğu belirlenmiştir (Zhang ve Zhang, 2010). Hwang ve Ji, sıvı amonyak ile yaş işlem sonrası kumaşlarda daha hızlı buruşma geri dönüşümü ve daha düşük çekme oranları sağladığı tespit edilmiştir. Yaş işlem uygulanmasının sıvı emme hızını arttırdığı, aynı durumun kuruma hızı için de geçerli olduğu bildirilmiştir. UVA ve UVB koruma özelliği açısından, yaş işlem sonrası kumaşların hepsinin koruyuculuğunun arttığı görülmüştür. Amonyaklı yaş işlemle hem liflerde şişme meydana geldiği hem de liflerin fibrillerine ayrıldığı gözlemlenmiştir (Hwang ve Ji, 2012).

Literatürde kenevir elyafı üzerine yapılan çalışmalar incelendiğinde, doğa dostu özelliklere sahip olması nedeniyle kenevir içerikli tekstil ürünlerinin birçok çalışmaya konu olduğu görülmektedir. Ancak literatürdeki çalışmalar kenevir karışımlı tekstil ürünlerinin üretilmesindeki güçlüklerin giderilmesi, farklı liflerle karışımlarının iplik ve kumaş performansı üzerindeki etkilerinin incelenmesi ve iplik ve kumaş performanslarının iyileştirilmesi konularına odaklanmıştır. Literatürde birçok deneysel çalışma yürütülmüş olmasına rağmen, kenevir içerikli tekstil ürünlerinin faydalı kullanım ömrü sonunda bertaraf edilmesi durumunda toprak ortamında biyolojik olarak bozunma performansı incelenmemiştir. Doğal esaslı olması, yetiştirilmesi esnasında az seviyede sulama gerektirmesi, toprağa ve atmosfere sürdürülebilirlik açısından fayda sağlamasının yanı sıra faydalı kullanım ömrünü tamamlaması sonrasında doğada bırakacağı etki ve atık miktarı da kenevir lifinin sürdürülebiliklik performansı açısından incelenmesi gereken önemli bir özelliğidir. Bu nedenle, bu çalışmada literatürden farklı olarak, biyobozunurluk özelliği sebebiyle önemi gün

geçtikçe artan kenevir lifinin pamuk ile farklı oranlarda karıştırılmasıyla üretilen ipliklerin ve performans özelliklerinin incelenmesinin yanı sıra elde edilen örme kumaşların biyobozunurluk davranışı incelenmiştir.

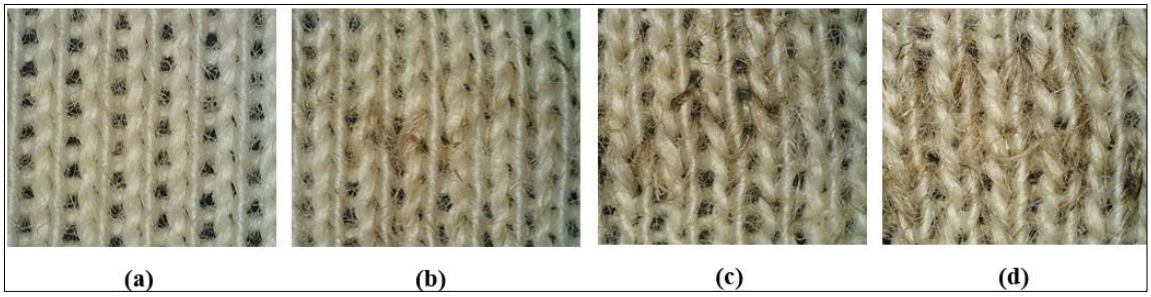
MATERYAL METOT

Bu çalışmada; kenevir lifinin iplik kalite özelliklerine ve kumaş performans özelliklerine etkilerini incelemek amacıyla, ithal kotonize kenevir lifi ile yöre pamuğu kullanılmış ve kullanılan liflere ait özellikler Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Kullanılan Liflerin Özellikleri

	Pamuk	**Kenevir**
Elyaf İnceliği, dtex	1,7	41
Uzunluk, mm	29,2	70
Mukavemet, cN/dtex	3,3	4,7

Çalışma kapsamında %90 pamuk - % 10 kenevir, %80 pamuk - %20 kenevir ve %70 pamuk - % 30 kenevir ve %100 pamuk iplik numuneleri üretilmiştir. Üretilmesi planlanan iplikler için, kenevir ve pamuk elyafı harman hallaç dairesinde tarak hattının homojen beslemesi amacıyla dikey açıcıya beslenmiştir. Sonrasında, tarak makinesinden geçen karışım 2 pasaj cer işleminden geçirilmiş ve fitil makinesine beslenmiştir. Daha sonra ring iplik eğirme sisteminde Ne 20/1 iplik numarasında iplikler elde edilmiştir. Üretilen ipliklerin düzgünsüzlüğü ve iplik hataları Uster Tester 4 cihazı ile her bir iplik tipinden 5 adet bobin alınmak suretiyle 500 m/dak test hızında ölçülmüştür. İpliklerin kopma mukavemeti ve uzaması özellikleri Uster Tensojet cihazı ile her bir iplik tipinden 5 adet bobin alınarak ölçülmüştür. Çalışma kapsamında üretilen iplikler kullanılarak 32 inç çapında ve 22 fein makine inceliğine sahip yuvarlak örme makinesinde 20 devir/dak hızda ve 3,3 mm ilmek iplik uzunluğunda süprem kumaşlar üretilmiştir. Numune kumaşların yüzey görünümleri 100X büyütme oranında ışık mikroskobu ile incelenmiş ve elde edilen mikroskop görünümleri Şekil 1'de verilmiştir.



Şekil 1. Kumaş yüzey görünümleri (100X), **(a)** %100 pamuk, **(b)** %90 pamuk-%10 kenevir, **(c)** %80 pamuk-%20 kenevir, **(d)** %70 pamuk-%30 kenevir

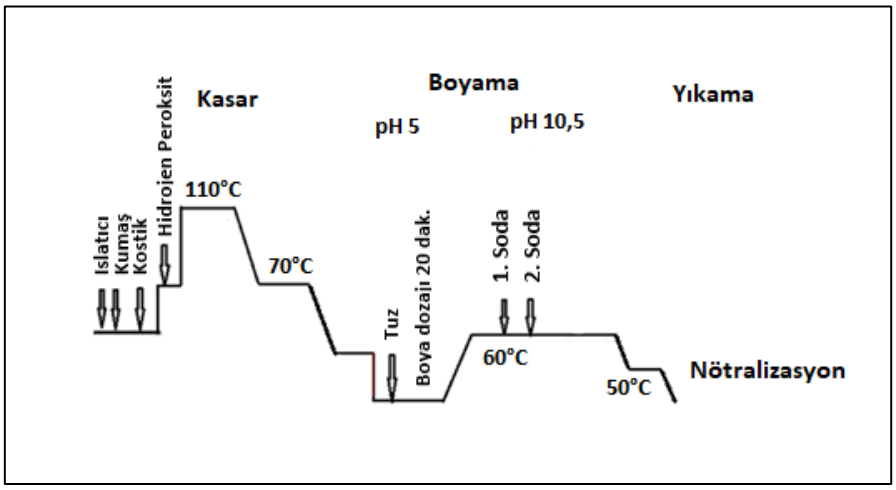
Üretimi gerçekleştirilen numune kumaşlara endüstriyel ölçekli makinelerde öncelikle ağartma ve takiben reaktif boyama prosesi uygulanmıştır. Uygulanan boyama reçetesi Tablo 2'de ve boyama grafiği Şekil 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Boyama Reçetesi

Kimyasal Madde	**Miktar**
Tuz (Katı)	**25** g
Sarı (Sunfix Yellow SPD)	% 0,246
Kırmızı (Sunfix Red SPD)	% 0,083
Mavi (Setazol Blue PLF)	% 0,09
Soda	2 g

Test ve ölçümlerden önce tüm kumaş numuneleri TS EN ISO 139'a göre şartlandırılmıştır. Kumaşlara uygulanan test ve ölçümler, 20±2℃ sıcaklık ve %65±4 bağıl nem standart atmosferinde gerçekleştirilmiştir. Kumaş yapısal parametreleri olarak; kumaş gramajı, ilmek yoğunluğu, ilmek iplik uzunluğu ve kumaş kalınlığı özellikleri sırasıyla TS EN 12127, TS EN 14971, TS EN 14970 ve TS 7128 EN ISO 5084 standartlarına göre belirlenmiş ve Tablo 3'te verilmiştir.

Elde edilen kumaşların hava geçirgenlik özellikleri TS 391 EN ISO 9237 standardına göre, SDL Atlas marka dijital hava geçirgenlik test cihazı ile 100 Pa basınç farkı değerinde ve 20 cm² test alanında her bir kumaş tipinden 10 ölçüm alınmak suretiyle belirlenmiştir. Patlama mukavemeti testi, TS EN ISO 13938-2'ye uygun olarak, JAMES HEAL marka dijital pnömatik patlama mukavemeti test cihazı ile her bir kumaş tipinden 5 ölçüm alınarak yapılmıştır. Boncuklanma direnci TS EN ISO 12945-2'ye uygun olarak, JAMES HEAL marka Martindale test cihazı ile her bir kumaş tipinden 3 kumaş numunesi kullanılarak test edilmiştir. Numunelerin boncuklanma direnci değerlendirmesi, Martindale test cihazının 2000 devri sonrasında numunelerin görünümlerinin, ışık kabininde D65 gün ışığı altında ASTM standart görünümleriyle karşılaştırılmasıyla değerlendirilmiştir.



Şekil 2. Numune Kumaşların Boyama Grafiği

Tablo 3. Boyalı Kumaşların Yapısal Parametreleri

	Kumaş gramajı (g/m²)	İlmek yoğunluğu (ilmek/cm²)	Kalınlık (mm)	İlmek iplik uzunluğu (mm)
%100 Pamuk	182	176	0,45	3,3
%90-%10 Pamuk-Kenevir	170	160	0,49	
%80-%20 Pamuk-Kenevir	160	165	0,49	
%70-%30 Pamuk-Kenevir	145	150	0,48	

Çalışmada kenevir elyafın biyobozunurluk davranışı, TS EN ISO 11721-1 standardına göre toprağa gömme yöntemi uygulanarak belirlenmiştir. Gömme işlemi öncesinde kullanılan toprağın su muhtevası ve su tutma kapasitesi aynı standarda göre belirlenmiştir. Standartta belirtildiği şekilde iyi seviyede mikrobiyal etkinlik için, toprağa su tutma kapasitesinin %60'ı oranında sulama sağlanmıştır. Bu amaçla gömme işlemi boyunca kumaş gömülmüş saksıların ağırlık değişimleri dikkate alınarak uygulanması gereken su miktarı tespit edilmiş ve su püskürtülerek toprağın nem içeriği sabit tutulmuştur. Kumaş numuneleri 10x40 cm boyutlarında hazırlanmış ve 7500 ml hacme sahip saksılarda toprağa gömme deneyi uygulanmıştır. Kumaş numunelerinin topraktan çıkarma ve yıkama esnasında hasar görmesini engellemek amacıyla kumaşlar sentetik monofilamentten üretilmiş file cep içerisine yerleştirilmiştir. Gömme işlemi 15 gün ve 90 gün gömme sürelerinde gerçekleştirilmiştir. Tamamlanan gömme süreleri sonrasında numuneler topraktan çıkarılmış, üzerindeki kirliliğin giderilmesi amacıyla musluk suyu ile yıkanmış ve oda sıcaklığında kurumaya bırakılmıştır. Kumaşların biyobozunurluk özelliğinin tespiti görsel gözlem yoluyla değerlendirilmiştir.

BULGULAR ve TARTIŞMA

İplik Kalite ve Mukavemet Sonuçları

Çalışma kapsamında, öncelikle kenevir lif karışım oranının iplik kalite ve mukavemet özelliklerine etkilerini incelemek amacıyla ipliklerin; düzgünsüzlük, ince-kalın yer, neps sayısı, kopma mukavemeti ve uzaması özellikleri incelenmiş ve elde edilen değerler Tablo 4'te verilmiştir.

Test değerleri incelendiğinde iplik kesitindeki kenevir oranı arttıkça iplikte, düzgünsüzlük, ince-kalın yer ve neps değerlerinde artış olduğu görülmüştür. Pamuk lifi inceliği sayesinde kalın kenevir liflerine göre iyi seviyede

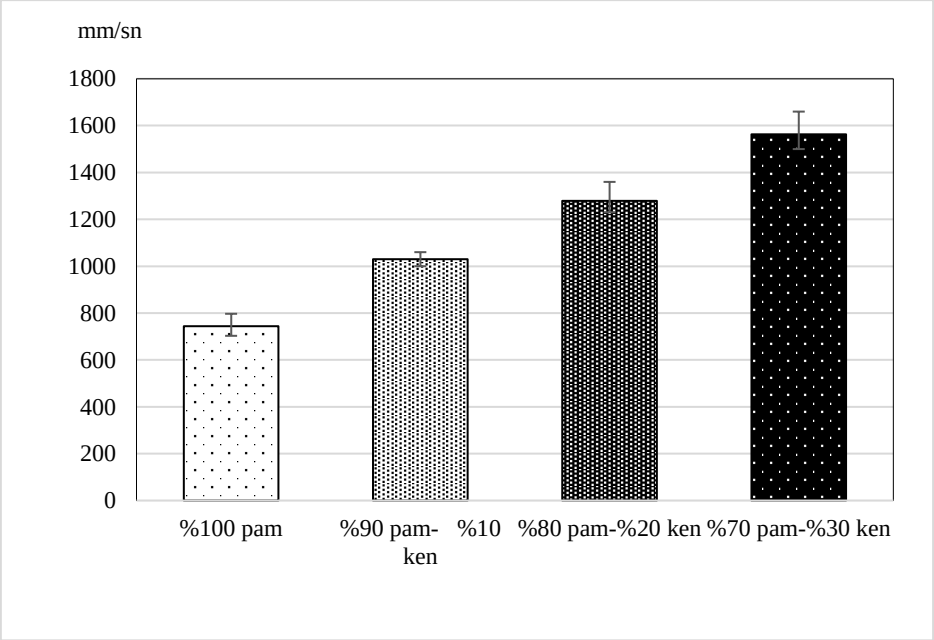
eğirilebilirliğe sahiptir. Bu iki elyaf çeşidinin harmanlanması sonucunda, kalın ve kaba kenevir lifi ile daha ince yapıdaki pamuk liflerinin adhezyonu zorlaşmaktadır. Kalın kenevir lifinin eğilme dayanımının yüksek olması ring eğirme sisteminde paralelleştirilen lif demetinin burulmasını zorlaştırmaktadır. Bu durum iplik eksenine düzgün bir şekilde konumlandırılamayan kalın lifler sebebiyle iplik yapısı içerisinde kütlesel varyasyonun ve dolayısıyla düzgünsüzlük ve iplik hatalarının artmasına yol açmaktadır. Diğer yandan hem mukavemet hem de uzama değerlerinde %10 kenevir katkısında en yüksek değerler elde edilmiş ve %20 üzerinde kenevir katkısı iplik kopma mukavemeti ve uzamasında düşüşe neden olmuştur. Karışımdaki kenevir elyaf oranının %20'den fazla olmasıyla birlikte mukavemeti yüksek kenevir lifinin iplik mukavemetine katkı sağlayamadığı görülmektedir. Bu durumun, ipliğe dahil olamayan kenevir lifinin yüksek mukavemetine rağmen iplik mukavemetine katkı sağlayamadığı görülmüştür.

Tablo 4. İpliklerin Kalite ve Mukavemet Değerleri

	CVm	İnce yer sayısı (-50%/km)	Kalın yer sayısı (+50%/km)	Neps (+200%/km)	Mukavemet (cN/tex)	Uzama (%)
%100 pamuk	10,41	0	6	10	14,36	4,89
%90 -%10 pamuk kenevir	18,05	6,9	991	1383	19,15	6,03
%80 -%20 pamuk kenevir	23,21	134,4	2151	3294	15,94	5,37
%70 -%30 Pamuk kenevir	27,37	993,8	3198	5578	12,35	4,45

Hava Geçirgenliği

Hava geçirgenliği, kumaşın her iki yüzü arasında ölçülen basınç farkının sabit tutulduğu şartlarda kumaştan geçen havanın akış hızı olarak tanımlanır. Diğer bir ifadeyle, hava geçirgenliği değerinin yüksek olması havanın kumaştan ne kadar kolay geçebileceğini belirler ve kumaşın konforuna dair nefes alabilirliğinin bir göstergesi olarak değerlendirilmektedir. Çalışma kapsamında üretilen numune kumaşlara uygulanan hava geçirgenliği testinin sonuçları Şekil 3'te verilmiştir.



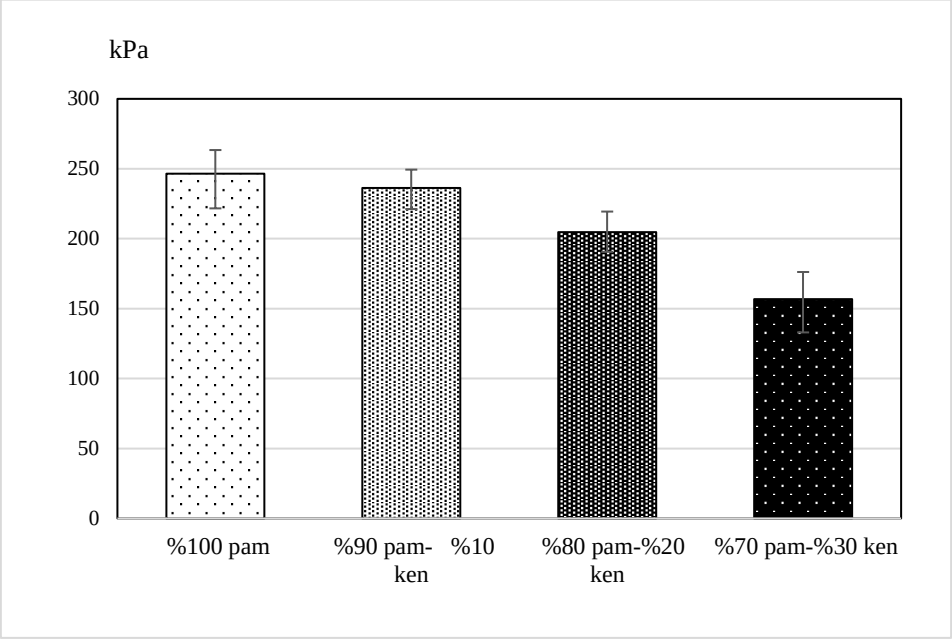
Şekil 3. Kumaşların Hava Geçirgenliği Değerleri

Çalışmada en yüksek hava geçirgenliği değeri %30 kenevir lifi ilave edilen kumaşta görülmüş, en düşük hava geçirgenliği değeri ise %100 pamuklu kumaşta görülmüştür. Diğer yandan kenevir elyaf oranı arttıkça hava geçirgenliği değerlerinde de düzenli bir artış görülmüştür. Kalın yapıdaki kenevir elyafın iplik yapısına katılmasıyla, birbiri ile eğirilebilirlik açısından yakın özelliklere sahip olmayan iki elyaf türü iplik içerisinde de birbiri üzerine

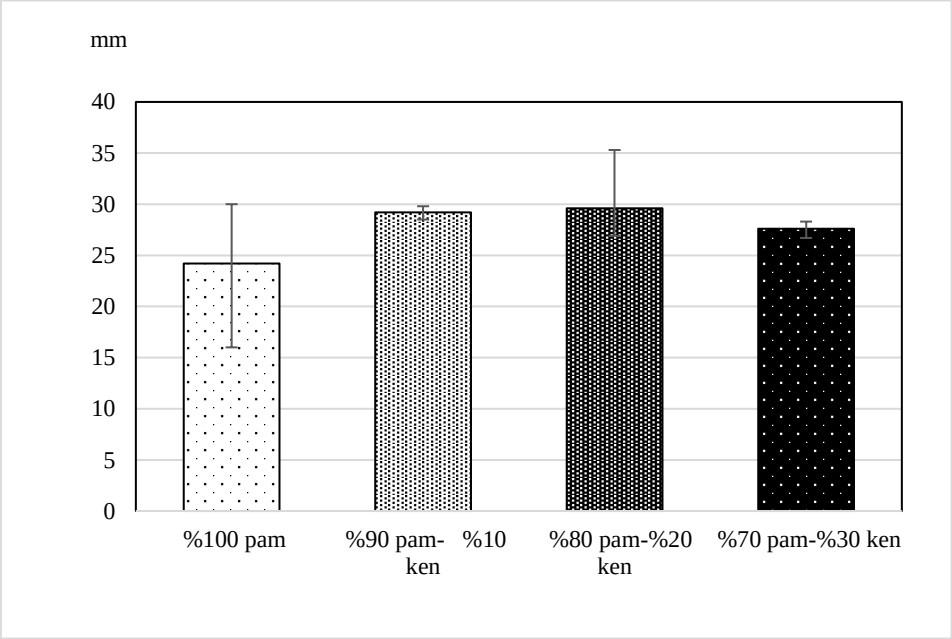
kolaylıkla tutunamayan bir yapı oluşturur. Bu düzensizlik iplik içerisinde boşluklara sahip bir yapı meydana getirmektedir. İplik yapısındaki boşlukların artması havanın geçebileceği lifler arası boşluklar oluşturur. Diğer yandan kenevir elyaf içeriğinin artmasıyla ince ve kalın yer hatası da artmaktadır. Bu durum kenevir içeriği fazla ipliklerdeki ince yer sayısından dolayı bu ipliklerden üretilen kumaşların iplikler arasında daha fazla boşluğa sahip olmasına sebep olmaktadır. İplikler arası boşlukların fazla olması artan kumaş gözenekliliği sebebiyle hava geçirgenliğini arttırmaktadır. Diğer yandan boyalı kumaşlara ait yapısal özellikler incelendiğinde, ilmek iplik uzunluğu aynı olacak şekilde üretilen kumaş numunelerinin hava geçirgenliğinde önemli bir etken olan kumaş kalınlığı özelliklerinin çok yakın olduğu ancak diğer bir önemli etken olan ilmek yoğunluğu değerlerinin kenevir karışım oranının artmasıyla belirgin bir şekilde azaldığı görülmektedir. Bu durum da kumaş yapısında kenevir lif içeriğinin artmasıyla boşluk oranının arttığını göstermektedir. Böylelikle, daha yüksek kenevir lifi içeriğine sahip kumaşlar, kumaşta daha iyi hava akışına izin vererek daha fazla hava geçirgenliği sergilemiştir.

Patlama Mukavemeti

Çalışma kapsamında üretilen örme kumaşların patlama mukavemeti ve patlama uzaması değerleri Şekil 4 ve 5'te verilmiştir.



Şekil 4. Kumaşların Patlama Mukavemeti



Şekil 5. Kumaşların Patlama Yüksekliği Değerleri

Patlama mukavemeti sonuçları incelendiğinde; kenevir lif oranının artmasıyla kumaşların patlama mukavemet değerlerinin düzenli olarak düştüğü tespit edilmiştir. Örme kumaş patlama mukavemeti üzerinde en etkili olan faktörler iplik mukavemeti iplik mukavemeti değerleri incelendiğinde %10 kenevir lifi ilavesinin iplik mukavemetinde %100 pamuk ipliğine göre önemli seviyede artış sağladığı görülmektedir. Ancak iplik mukavemetindeki yükselme eğilimi %20 kenevir lifi ilavesinden sonra düşüş eğilimine geçmiştir. Diğer yandan ilmek iplik uzunluğu eşit olacak şekilde üretilen kumaş numunelerinde kenevir lifi katkı oranının artmasıyla birlikte ilmek yoğunluğu değerlerinde düzenli bir düşüş görülmektedir. İlmek yoğunluğundaki düşüş ile birlikte kumaş patlama mukavemeti de aynı şekilde azalma göstermiştir. Birim alandaki tekstil malzemesinin azalmasına bağlı olarak mukavemetin azalması beklenen bir sonuçtur.

Patlama yüksekliği değerleri incelendiğinde iplik kopma uzaması değerleri ile patlama yüksekliği değerlerinin benzer bir eğilim içerisinde olduğu görülmektedir.

Boncuklanma Dayanımı

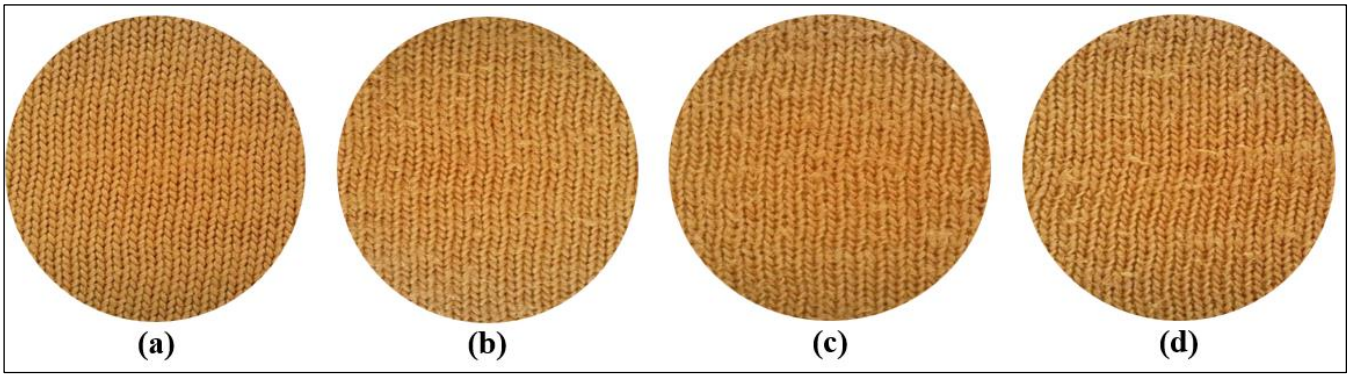
Boncuklanma; nihai üründe eskime olarak algılandığından ürünün faydalı kullanım ömrünü de belirleyen bir performans özelliği olarak değerlendirilmektedir. Çalışma kapsamında üretilen örme kumaş numunelerinin Martindale test cihazının 2000 devri sonrasındaki boncuklanma dayanımı değerlendirmeleri Tablo 5'te ve kumaş numunelerinin boncuklanma dayanımı testi sonrasında fotoğraflanan görünümleri Şekil 6'da verilmiştir.

Tablo 5. Kumaşların Boncuklanma Dayanımı

Karışım oranı	Boncuklanma dayanımı
%100 pamuk	4/5
%90 pamuk- %10 kenevir	4
%80 pamuk-%20 kenevir	3/4
%70 pamuk-%30 kenevir	3/4

Tablo 5 incelendiğinde; kenevir elyafının kumaşa dahil edilmesiyle boncuklanma dayanımının düştüğü görülmektedir. Kumaşların boncuklanma dayanımı; %100 pamuklu kumaşta 4/5 ile en iyi seviyedeki boncuklanma dayanımı değerine yakın olup, kenevir katkı oranının artmasıyla boncuklanma dayanımı değerlerinde düzenli bir düşüş saptanmıştır. Kalın kenevir lifleri iplik yapısına katıldığında ring eğirme sisteminde paralelleştirilmiş lif demetinin büküm alması esnasında eğilme dayanımları yüksek olduğundan iplik eksenine pamuk liflerinde olduğu gibi bir helis formunda ipliği saracak şekilde dahil edilmemektedir. Bu nedenle kalın kenevir liflerinin iplik yapısına dahil edilemeyen lif uçları iplik ekseninden dışarıya doğru çıkmaktadır. Bu durum kumaş yüzeyinde önemli derecede havlanma olarak kendini göstermektedir. Kumaş yüzeyinin boncuklanma dayanımı testi esnasında sürtünmeye maruz

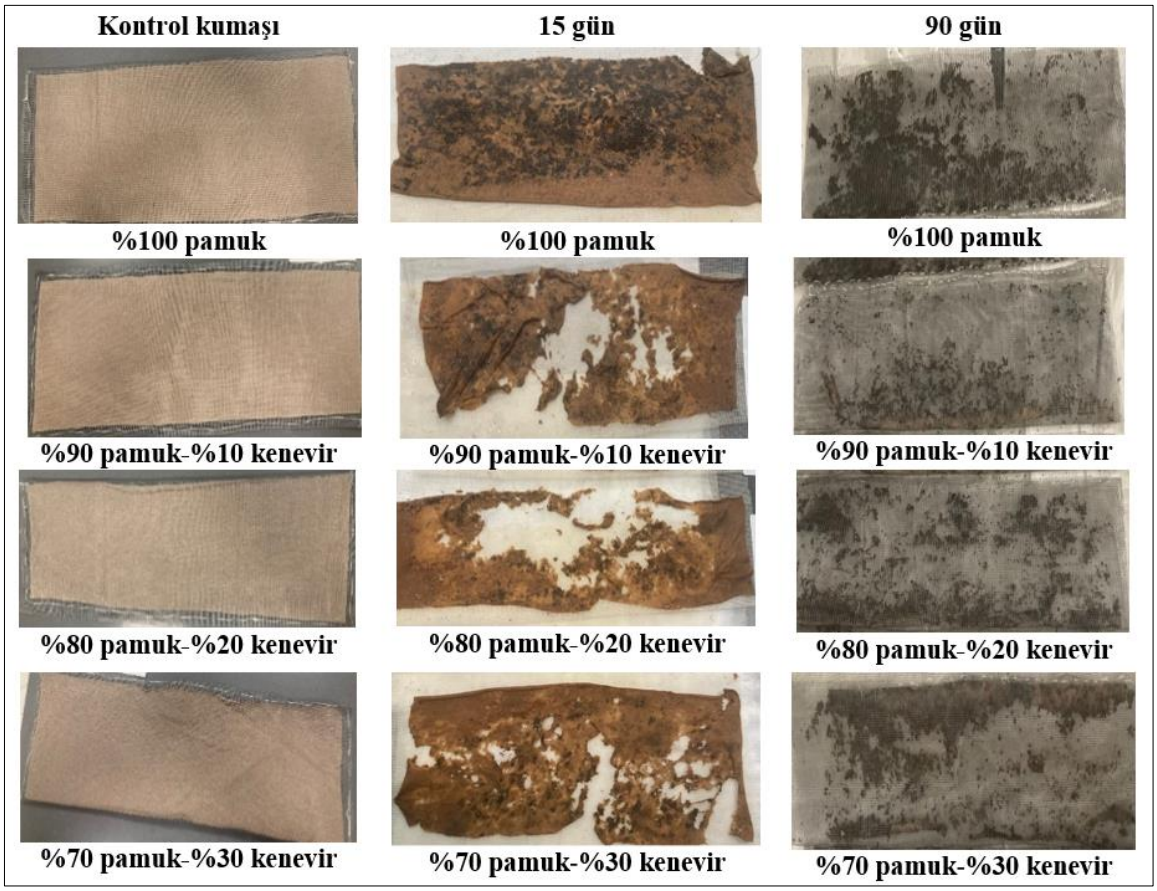
kalmasıyla birlikte bu lif uçları daha belirgin bir şekilde boncuk oluşumuna sebep olmaktadır. Bu şekilde boncuk oluşumu sonrasında da kumaş yüzeyinde bu boncukların tutunmasını sağlayan lifler kenevir lifi olmaktadır. Boncukların kumaş yapısına tutunmasını sağlayan yüksek mukavemetli kenevir lifleri boncuk yapısının koparak uzaklaşmasına engel olmaktadır. Bu durumda boncuk oluşum hızı, boncuk uzaklaşma hızından daha fazla olduğu için kumaşın boncuklanma dayanımı düşmektedir.



Şekil 6. Kumaşların boncuklanma dayanımı testi sonrası yüzey görünümleri **(a)** %100 pamuk, **(b)** %90 pamuk-%10 kenevir, **(c)** %80 pamuk-%20 kenevir, **(d)** %70 pamuk-%30 kenevir

Toprağa Gömme Testi

Kenevir pamuk karışımlı örme kumaşların biyobozunurluk performanslarının değerlendirilmesi amacıyla toprağa gömme testi uygulanmıştır. 15 ve 90 günlük toprağa gömme süreleri sonrasında topraktan çıkarılan numunelerin görünümleri değerlendirilmiştir. Bu değerlendirmeler kapsamında topraktan çıkarılan numunelerin görünümleri fotoğraflanmış ve bu görünümler Şekil 7'de verilmiştir. Numuneler çok ileri seviyede bozunmaya maruz kaldığından, numunelerin yapısal bütünlükleri bozulmuş ve görsel değerlendirme dışında herhangi bir test uygulamak mümkün olmamıştır.



Şekil 7. Kumaşların Toprağa Gömme Sonrasındaki Yüzey Görünümleri

Topraktan çıkarılan numuneler incelendiğinde, sadece 15 günlük sürede gömme işlemi uygulanan numuneler için %100 pamuklu kumaş kontrol numunesinde yapısal bütünlüğün korunduğu görülmektedir. Diğer yandan kenevir karışımlı numunelerin tamamında parçalanma meydana gelmiş ve yapısal bütünlük bozulmuştur. Dolayısıyla 15 gün gibi oldukça kısa bir toprağa gömme süresi için, kumaşın yapısına dahil edilen kenevir lifinin %10 gibi düşük bir seviyede olması durumunda bile oldukça iyi seviyede bozunma sağladığı görülmüştür. Kenevir ilavesinin%20 ve %30 oranlarına çıkarılmasının ise %10 katkı miktarına oranla önemli seviyede bir farklılık yaratmadığı görülmektedir. Diğer yandan, 90 günlük toprağa gömme süresi sonrasında katkılı ve katkısız numunelerin hepsi için numunelerin tamamının bozunduğu görülmektedir.

SONUÇLAR

Doğal lifler, çevresel sürdürülebilirlik yaklaşımları kapsamında biyoesaslı olmalarının yanı sıra biyobozunur nitelikte olmaları sebebiyle tekstil endüstrisinde rağbet görmektedirler. Doğal lifler içerisinde son yıllarda ilgi görmeye başlayan kenevir lifinin iplik ve kumaş üretimi için optimum kullanım oranlarının belirlenmesi ve aynı zamanda kenevir lif katkısının tekstil ürünleri için biyobozunurluk etkisinin belirlenmesi önem arz etmektedir. Yapılan çalışma kapsamında, iplik yapısında kenevir katkı oranının artmasıyla iplik kalite ve mukavemet özelliklerinin kötüleştiği görülmüştür. Ancak yüksek düzgünsüzlük ve düşük mukavemet değerlerine rağmen bu ipliklerden elde edilen örme kumaşların hava geçirgenliği değerlerinde ilmek yoğunluğu değişimine bağlı olarak daha yüksek hava geçirgenliği elde edilmiştir. Diğer yandan ilmek yoğunluğunun düşmesi ile patlama mukavemeti değerleri fark edilir seviyede düşmüştür. Kenevir lif katkısının fazla olduğu ipliklerden üretilecek kumaşlar için ilmek iplik uzunluğunun optimize edilmesiyle istenilen seviyede patlama mukavemeti özellikleri elde edilmesi sağlanabilir. Kenevir katkı oranının artmasıyla boncuklanma dayanımı değerlerinde düşük seviyede azalma görülmüştür. Biyobozunurluk performansı açısından bakıldığında ise 15 gün gibi oldukça kısa bir gömme süresi sonunda kenevir katkısının %100 pamuklu kumaşa göre oldukça iyi seviyede bozunma sağlaması oldukça önemli bir etki olarak değerlendirilmelidir.

KAYNAKLAR

Ali, A., Rahman, M., & Chen, Y. (2015). Cotton Spinning Properties of Chemically Modified Hemp Fibers, *International Journal of Science and Research*, 4(8 August), 1482-1490.

Avcı Ertek, M., Yıldırım, N., & Türksoy, H. G., (2019, Eylül). %70/%30 Pamuk Kenevir Karışımlı Ring ve Dual-Core İpliklerin Fiziksel Özelliklerinin Karşılaştırılmalı Olarak İncelenmesi. Ulusal Çukurova Tekstil Kongresi (pp. 481-486).

Avcı Ertek, M., & Demiryürek O. (2022). Development of sustainable and ecological hybrid yarns. Hemp Fiber in Denim Fabric Production, *Cellulose Chemistry and Technology*, 56 (9-10), 1089-1100. 10.35812/cellulosechemtechnol.2022.56.97

Başer, U., & Bozoğlu, M. (2020). Türkiye'nin Kenevir Politikası ve Piyasasına Bir Bakış. *Tarım Ekonomisi Araştırmaları Dergisi*, 6(2), 127-135.

Bozan, N., Işık, F., & Korkmaz, Y. (2020, Kasım). Kenevir/Tencel Lif Karışımı ile UV Dayanımı ve Antibakteriyal Aktiviteye Sahip Medikal Sektörüne Yönelik Kumaş İpliklerinin Geliştirilmesi. İTÜ Ulusal Tekstil Kongresi ve II Ar-Ge Günü, Akademi Sanayi Buluşması (pp. 100-101).

Buschle- Diller, G., Fanter C., & Loth F. (1999). Structural changes in hemp fibers as a result of enzymatic hydrolysis with mixed enzyme systems, *Textile Research Journal*, 69(4), 244-251. https://doi.org/10.1177/004051759906900403.

Chen, Y., Sun, L., Negulescu, I., Wu, Q., & Henderson, G. (2007). Comparative Study of Hemp Fiber for Nonwoven Composites, *Journal of Industrial Hemp*, *12*(1), 27–45. https://doi.org/10.1300/J237v12n01_04.

Demirbek, D., & Oktav Bulut, M. (2021). Kenevir Liflerinin Eldesi, Özellikleri ve Kompozit Uygulama Alanları. *Bartın University International Journal of Natural and Applied Sciences,* 4(2), 176-191.

Dreyer J., Müssig, J., Kaschke, N., Ibenthal, W.O., & Haring, H. (2002). Comparison of Enzymatically separated hemp and nettle fiber to chemically separated and steam exploded hemp fibre, *Journal of Industrial Hemp*, 7(1), 43-59, 2002. https://doi.org/10.1300/J237v07n01_05

Hwang M. S., & Ji D. S. (2012). The Effects of yarn number and liquid ammonia treatment on the physical properties of hemp woven fabrics, *Fibers and Polymers*, 13(10), 1335-1340. 10.1007/s12221-012-1335-x.

Ibrıkçı, A., Oruç, A., & Tarakçı A. (2020, Kasım). Sürdürülebilir Tekstil için Kenevir Elyafından Farklı İplik Yapılarının Geliştirilmesi. İTÜ Ulusal Tekstil Kongresi ve II. Ar-Ge Günü, Akademi Sanayi Buluşması (pp. 67-69).

Ji, D. S., & Lee, J. J. (2016). Mechanical properties and hand evaluation of hemp woven fabrics treated with liquid ammonia, *Fibers and Polymers*, 17(1), 143-150. 10.1007/s12221-016-5597-6.

Kabir, M. M., Wang H., Lau, K. T., & Cardona, F. (2013). Effects of chemical treatments on hemp fibre structure, *Applied Surface Science*, 276, 13-23. https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2013.02.086.

Kenevir Yetiştiriciliği. (2019). https://www.oran.org.tr/images/dosyalar/201903181349100.pdf Erişim 05.01.2025

Kertmen, N., & Yıldırım, N. (2022). Farklı Karışım Oranlarında Kenevir Kullanımının ve İplik Numarasının İplik ve Kumaş Özelliklerine Etkisi, *Dokuz Eylül Ünv. Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 24(72), 763-772. https://doi.org/10.21205/deufmd.2022247207

Kim, H. A., & Kim, S. J. (2018). Hand and Wear Comfort of Knitted Fabrics Made of Hemp/Tencel Yarns Applicable to Garment, *Fibers and Polymers*, 19(7), 1539-1547. DOI 10.1007/s12221-018-8275-z

Korkmaz, Y., Okyay, N., & Işık F. (2020, Haziran). Karbon Ayakizi Düşük olan Kenevir Lif Kullanılarak Geliştirilen Yuvarlak Örme Kumaşların İplik ve Kumaş Performanslarının İncelenmesi. International Symposium in Advanced Engineering Technologies ISADET (pp. 1-6).

Kostic, M., Pejic, B., & Skundric, P. (2008). Quality of chemically modified hemp fibers, *Bioresource Technology*, 99, 94-99. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2006.11.050

Kozlowski, R., Czaplick, Z., Zareba, S., & Mankowski, J. (2013). Rotor Cotton Yarns with the Content of Enzymatically Modifical Hemp Fibers, *Journal of Natural Fibers*, 10(1), 1- 13. https://doi.org/10.1080/15440478.2012.738062.

Lee, J. J., & Ji, D. S. (2017). Evaluation of liquid moisture management properties on hemp woven fabrics treated with liquid ammonia, *Textile Research Journal*, 87(14), 1752-1764. https://doi.org/10.1177/0040517516659374.

Liu, M. (2016). Pretreatment of hemp fibers for utilization in strong biocomposite materials. PhD thesis. Technical University of Denmark, Denmark.

Manaia, J.P., Manaia, A.T., &Rodriges, L. (2019). Industrial Hemp Fibers: An Overview. *Fibers*, *7*(12), 106, 1-16. https://doi.org/10.3390/fib7120106

Mustata, A., & Mustata F.C. (2013). Moisture Absorption and Desorption in Flax and Hemp Fibres and Yarns, *Fibres & Textile in Eastern Europe*, 21, 3 (99), 26-30.

Muzyczek, M. (2020). The use of flax and hemp for textile applications. In M.Ryszard, & M. Kozlowski (Eds.), The Textile Institute Book Series, Handbook of Natural Fibres (Second Edition) (pp. 147-167). Woodhead Publishing.

Okyay, G., Demiryürek, O., Avcı, M., & Bilgiç, H., (2023). Development and characterization of hemp-containing hybrid yarns for clothing, *Cellulose Chemistry and Technology*, 57(1-2), 193-206. 10.35812/cellulosechemtechnol.2023.57.19

Parlakyiğit, P. (2019, Eylül). Kenevir, Keten ve Keten/Kenevir Karışımlı Kumaşların Isı, UV Radyasyon ve Radyasyon Yalıtım Özelliklerinin Araştırılması. Ulusal Çukurova Tekstil Kongresi (pp. 570-575).

Satıl, Ş., Çelikten E., Özden, K., & Nacarkahya T. (2020, Kasım). Optimization of yarn Quality parametres of hemp fiber blended yarn produced by ring spinning system. The International Conference of Materials and Enginerring Technology TICMET (pp. 402-415).

Sedelnik, N. (2004). Properties of hemp fibre cottonised by biologinal modification of hemp hackling noils, *Fibres & Textiles in Eastern Europe*, 12, 1(45), 58-60.

Shahzad A. (2012). Hemp fiber and its composites – a review, *Journal of Composite Materials*, 46(8), 973-986. doi:10.1177/0021998311413623

Stankoviç, S., Popovic, D., Kocic, A., & Poparic, B. (2017). Ultraviolet Protection Factor of Hemp/Filament Hybrid Yarn Knitted Fabrics, *Tekstilec*, 60(1), 49-57. 10.14502/Tekstilec2017.60.49-57.

Stankovic, S. B., & Bizjak, M. (2014). Effect of Yarn Folding on Comfort Properties of Hemp Knitted Fabrics. *Clothing and Textiles Research Journal*, 32(3), 202-214. https://doi.org/10.1177/0887302X14537114.

Şahinbaşkan, B.Y. (2019). Kenevir Dokuma Kumaşlara Enzimatik Ön İşlemlerinin Etkisi, *International Journal of Adv. Eng. Pure Sci*, 3, 208-213. 10.7240/jeps.508952.

Tama, D., Isler, M., & Abreu, M.J. (2020). Evaluating the Termal Comfort Properties of Rize's Tradinational Hemp Fabric (Ferretiko) Using a Thermal Manikin, *Materials Today: Proceedings*, 31, 197–200. https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.10.063.

Thomsen, A. B., Thygesen, A., Bohn, V., Nielsen, K.V., Pallesen, B., & Jorgensen, M.S. (2006). Effects of chemical–physical pre-treatment processes on hemp fibres for reinforcement of composites and for textiles, *Industrial Crops and Products*, 24, 2, 113-118. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2005.10.003

TS EN ISO 139 Tekstil - Şartlandırma ve deney için standart ortamlar

TS EN 12127 Tekstil-Kumaşlar-Küçük numuneler kullanarak birim alan başına kütlenin tayini

TS EN 14971 Tekstil- Örülmüş kumaşlar- Birim uzunluk ve birim alan başına örgü ilmeği sayısının tayini

TS EN 14970 Tekstil- Örülmüş kumaş- Tek iplikli örme kumaşlarda örgü ilmeği ve iplik doğrusal yoğunluğunun tayini

TS 7128 EN ISO 5084 Tekstil-Tekstil ve tekstil mamullerinin kalınlık tayini

TS 391 EN ISO 9237 Tekstil -Kumaşlarda hava geçirgenliğinin tayini

TS EN ISO 13938-2 Tekstil-Kumaşların patlama özellikleri - Bölüm 2: Patlama mukavemetinin ve patlama gerilmesinin tayini için pnömatik metot

TS EN ISO 12945-2 Tekstil - Kumaşlarda yüzey boncuklanması, tüylenmesi ve matlaşması yatkınlığının tayini - Bölüm 2: Geliştirilmiş Martindale metodu

TS EN ISO 11721-1 Tekstil selüloz içeren tekstillerin mikroorganizmalara karşı dayanıklılığının tayini- Toprağa gömme deneyi

Wang, H. M., Postle, R., Kessler R. W., & Kessler W. (2003). Removing pectin and lignin during chemical processing of hemp for textile applications, *Textile Research Journal*, 73(8), 664-669. https://doi.org/10.1177/004051750307300802.

Zeng, X., & Liu J. (2014). Alkali pre-treament dyeing technology for hemp/cotton/polyester knitted fabric, *Advanced Materials Research*, 915, 916, 871-874. 10.4028/www.scientific.net/AMR.915-916.871.

Zhang, H., & Zhang, L. M. (2010). Improving the dyeing properties and softness of hemp fabric using chitosan and epoxy modified silicone oil, *Journal of The Textile Institute*, 101,9, 849-857. https://doi.org/10.1080/00405000902935015.

Zhang, H., Zhang J., & Gao, Y. (2014). Study on the Relationship Between Blending Ratio and Performance of Hemp/Polyester Yarn, *Journal of Natural Fibers*, 11, 2, 136-143. https://doi.org/10.1080/15440478.2013.861780

KSÜ Mühendislik Bilimleri Dergisi, 28(2), 2025
Araştırma Makalesi

KSU J Eng Sci, 28(2), 2025
Research Article

Kahramanmaras Sutcu Imam University
Journal of Engineering Sciences

Geliş Tarihi : 09.03.2025
Kabul Tarihi :15.04.2025

Received Date : 09.03.2025
Accepted Date : 15.04.2025

NUMERICAL INVESTIGATION OF THERMAL AND STRUCTURAL BEHAVIOR IN INJECTION-MOLDED FEMUR IMPLANTS

ENJEKSİYON KALIPLAMA İLE ÜRETİLEN FEMUR İMPLANTLARININ ISIL VE YAPISAL DAVRANIŞLARININ SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ

Fuat TAN [1*] (ORCID: 0000-0002-4194-5591)
Ahmet Kerem ALKAN [1] (ORCID: 0009-0004-6595-3969)

[1]Balıkesir University, Department of Mechanical Engineering, Balıkesir, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Fuat TAN, fuattan@balikesir.edu.tr

ABSTRACT

The biomedical applications utilized in this research adopt biocompatible engineering polymers instead of the standard Ti-6Al-4V alloy. The use of Polypropylene (PP), Polyoxymethylene (POM), and Polybutylene Terephthalate (PBT) was explored through the process of injection molding in the manufacture of implants. In examining the various polymers, molding flow, volumetric shrinkage, warpage, and mechanical strength were the parameters that were put under consideration. It was found (using the Autodesk Moldflow Insight software) that the deformation in the Z-axis was the largest for POM with 1.134 mm, followed by PP with 1.102 mm and PBT with 0.987 mm, whereas the volumetric shrinkage rates were computed as 18.05, 18.29, and 16.76, respectively. The Ansys Workbench software simulations demonstrated that a maximum axial force of 45 Nm was applied to the femur-implant model, and the maximum equivalent stress was 112.3 MPa for POM, 89.7 MPa for PP, and 104.2 MPa for PBT. The total deformation values were determined to be 1.24 mm for POM, 1.68 mm for PP, and 1.09 mm for PBT. The key results of this research were that PBT is the ideal material with the utmost dimensional stability and minimal warpage and volumetric shrinkage rates, as well as being the one that is mechanically compatible with the bone. The analyses confirmed that PBT thermoplastic is the more favorable choice among the materials for implant-making using the injection molding technique.

Keywords: Injection molding, implant, femur, FEA, warpage, structural analysis

ÖZET

Bu araştırma, biyomedikal uygulamalarında standart Ti-6Al-4V alaşımı yerine biyouyumlu mühendislik polimerlerini kullanma üzerine yapılmıştır. İmplantların üretimi için enjeksiyon kalıplama prosesinde Polipropilen (PP), Polioksimetilen (POM) ve Polibütilen Tereftalat (PBT) kullanımı incelenmiştir. Kalıp içi akış, hacimsel büzülme, çarpılma ve mekanik dayanım dikkate alınan parametrelerdir. (Autodesk Moldflow Insight yazılımı kullanılarak) Z eksenindeki deformasyon için, en büyük deformasyon 1.134 mm ile POM, ardından 1.102 mm ile PP ve 0.987 mm ile PBT iken hacimsel büzülme oranları sırasıyla 18.05, 18.29 ve 16.76 olarak hesaplanmıştır. Ansys Workbench yazılım simülasyonları, femur implant modeline maksimum 45 Nm eksenel kuvvetin uygulandığını ve maksimum eşdeğer gerilmenin POM için 112,3 MPa, PP için 89,7 MPa ve PBT için 104,2 MPa olduğunu göstermektedir. POM için toplam deformasyon değerinin 1,24 mm, PP için 1,68 mm ve PBT için 1,09 mm olduğu belirlenmiştir. Araştırmada, PBT'nin en yüksek boyutsal stabiliteye ve minimum eğrilme ve hacimsel büzülme oranlarına sahip ideal bir malzeme olduğu ve kemikle mekanik olarak uyumlu bir malzeme olduğu temel sonucuna varılmıştır. Analizler, PBT termoplastik malzemenin, enjeksiyon kalıplama tekniği kullanılarak implant yapımı için daha uygun bir seçim olduğunu göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Enjeksiyon kalıpçılık, implant, femur, FEA, çarpılma, yapısal analiz

ToCite: TAN, F., & ALKAN, A. K., (2025). NUMERICAL INVESTIGATION OF THERMAL AND STRUCTURAL BEHAVIOR IN INJECTION-MOLDED FEMUR IMPLANTS. *Kahramanmaras Sutcu Imam University Journal of Engineering Sciences*, 28(2), 1007-1019.

INTRODUCTION

Injection molding is a widely used manufacturing method that is carried out with process parameters selected according to the characteristic properties of thermoplastics (Fu et al., 2020). In injection molding, which is used in many fields, mold design, product warpage, optimal injection points, and the effects of different materials are important research topics. Computer-aided software ensures the most optimal conditions (Nuruzzaman et al., 2016). The use of polymers and polymer composites in biomaterials and within the human body is quite common. They are used in applications such as hip prostheses, bone cement, tissue engineering, polyethylene-based knee prostheses, dental prostheses, and orthopedic prostheses (Shırdar et al., 2019; Bressan et al., 2011; Bıswal et al., 2020; Gumustas et al., 2018; Saad et al., 2018).

Adam and Lih-Sheng produced porous and interconnected foamed structures using PLA and PVOH with salt particles as molds. These materials have the potential to be used as scaffolds in tissue engineering through injection molding (Adam et al., 2010). Surace et al. manufactured a microfilter for biomedical applications using POM material. To ensure fulfillment during production, they optimized process parameters such as melt temperature, injection speed, mold temperature, holding pressure and time, cooling time, and pressure limit (Surace et al., 2016). Chang and Sophia implanted six alginate implants on sheep using the injection molding process. After six months, the implants were removed and compared with the cartilage in the ear. It was determined that proteoglycan and collagen content reached 80% of the natural tissue value. Hydraulic permeability was measured at 74% and 105% (Chang et al., 2003). Tan et al. used the melt blending method to produce micro bone screws with strength and toughness properties. They shaped these screws using the micro-injection molding process with PLLA and PVDF materials (Tan et al., 2024). Zhao et al. developed an injection-molded PMMA coating for pre-coating metal prostheses. During the injection process, water immersion and splitting methods were used to reduce residual stress to 5 MPa (Zhao et al., 2001).

Gogolewski et al. investigated the tissue response and in vivo molecular stability of injection-molded PLA, PHB, and PHB/VA. The degradation of PHB and PHB/VA polymers was lower (15-43%) than that of polylactides six months after implantation. However, materials with higher valerate content (19%, 22%) exhibited greater degradation (Gogolewski et al., 1993). Mi et al. characterized TPU/LA thermoplastics as scaffolds for tissue engineering using microcellular molding. Their study demonstrated that PLA/TPU artificial scaffolds have potential applications in tissue engineering (Mi et al., 2013). Brady et al. examined the moldability of PEG-based hydrogels in injection molding for tissue engineering applications, showing their suitability for biomedical material production (Brady et al., 2023). Oroslany and Kovacs analyzed the injection molding process of a biodegradable implant used for tendon fixation. They conducted finite element simulations using different injection points to compare the thermal properties of the implant (Oroslany et al., 2010). Premalatha et al. designed and installed a hot-runner injection molding machine for biomedical product manufacturing (Premalatha et al.,2024). Azdast et al. introduced the production of biodegradable and biocompatible PLA/nanofibril composite foams using high-pressure foam injection molding and mold opening methods (Azdast et al., 2022). Heidari et al. simulated the injection molding process for three types of PLA-based bone screws. They optimized the process using Design of Experiments (DOE) and structural analysis results to minimize tensile and bending deformations of the screws (Heidari et al., 2017).

Zamani et al. analyzed PLA-based filters using Autodesk Moldflow software. They examined the rheological and thermal properties of the selected polymers (Zamani et al., 2022). Sammoura et al. manufactured microneedles using micro-injection molding. They characterized injection parameters such as compression force, injection volume, holding pressure, and temperature for mass production (Sammoura et al., 2007). Bastos et al. developed and optimized the production of a dual-chamber syringe. The injection molding process was simulated using Moldflow software to determine its feasibility. Additionally, Abaqus and Fluent were used to simulate the mechanical and flow behavior (Bastos et al., 2022, Canbolat et al., 2018, Turkan et al., 2019). Maden and Tüfekçi proposed an alternative implant design for femur bones to reduce stress effects. Using the ANSYS engineering software, they reduced axial force-induced stress in the bone by 38.7% and lateral force-induced stress by 28.3% (Maden et al., 2022). İsaincu et al. utilized the finite element method to assess the effect of fiber orientation in tensile specimens. Using PA66 GF30, they performed in-mold simulations with Moldflow software and determined the fiber orientation tensor. They emphasized the significance of mapping and mesh size for the ANSYS model, considering the anisotropic behavior of the material (İsaincu et al., 2021). Kulkarni et al. developed a fiber-reinforced micromechanical finite element model. They determined the fiber orientation using Moldflow and conducted structural analyses with ANSYS. The Moldflow-ANSYS model successfully generated the load-displacement curve for an injection-molded composite material (Kulkarni et al., 2012). Mao et al. simulated the injection molding process of an automobile rear outer door

panel. After the injection process, they analyzed the mechanical properties of the model using ANSYS and HyperWorks (Mao et al., 2022). In a study (Tan and Alkan., 2024), the production efficiency and quality parameters of piezoelectric pumps manufactured by microinjection were optimized. In another study, the injection molding process parameters were optimized using RSM and GWO methods, and it was determined that RSM was more effective, with a 39.4% increase in tensile modulus achieved through 60% fiber reinforcement (Tan, 2020).

This study uses three PP, POM, and PBT engineering plastics, which are commonly used as an alternative to the less utilized Ti-6Al-4V alloy, for femur implants through the injection molding process and performing mechanical analysis. The tendencies of flow, shrinkage, and warpage exhibited by the materials were determined through Autodesk Moldflow Insight, while their mechanical performance under axial loads was evaluated using the finite element method in ANSYS. The study of the problem by comparing the structural and thermal properties of these biocompatible thermoplastics is conducted so that, in the end, the best material for implant production could be chosen, which could consider both manufacturability and mechanical stability. The study introduces an innovative integration of the injection molding process with simulations and finite element modeling to assess the adequacy of biocompatible thermoplastics for femoral implant usage. Unlike former works that were concentrated on either manufacturing or mechanical aspects, this research quantitatively relates the parameters caused by the process, such as warpage, shrinkage, and cooling behavior, to the ensuing mechanical performance under physiological loads. The presented methodology serves as a basis for the prediction of material choice and the design application of the polymeric orthopedic implants.

MATERIALS AND METHODS

Through careful scrutiny of the literature, the high-level plastics PP, POM, and PBT, which can be used to replace the Ti-6Al-4V titanium alloy, were identified as implant components. The preference for these thermoplastics was due to their lightweight, lower cost, biocompatibility, and excellent mechanical strength and manufacturing efficiency. These thermoplastics were selected from the material database of Moldflow Ultimate Insight software for the performed analyses. The following are their commercial product codes: FUNCSTER XLR3200 (PP), Hostaform C 9021 G (POM), and Valox 260HPR (PBT). Table 1 shows the thermophysical properties of the above materials.

Table 1. Mechanical Properties of Materials

Features	Unit	PP	POM	PBT
Melt density	g/cm^3	0.94523	1.16	1.0432
Melt temperature	C	255	210	250
Solid density	g/cm^3	1.1591	1.4208	1.2585
Mold Surface temperature	C	45	90	60
Elastic modulus (E1)	MPA	5540.62	2300	2600
Elastic modulus (E2)	MPA	3674.26	2300	2600
Possoin's ratio (v12)	-	0.407	0.39	0.4
Possoin's ratio (v23)	-	0.412	0.39	0.4
Shear modulus	MPA	1303.8	825	929
Maximum shear stress	MPA	0.25	0.45	0.4
Maximum shear rate	$1/s$	100000	40000	50000

PP is a highly sought-after engineering plastic because it is lightweight and chemically resistant. Its low viscosity enables easy mold filling; conversely, the high volumetric shrinkage rate must be managed with care and skill. POM is strong and wear-resistant, two strengths that make it a great orthopedic material. But the risk of parting lines should also be considered during the injection process. PBT, for another reason, does have the nice property of being a precision part of good quality, with a low part volume shrinkage of the overall material. This makes it manufactured for precision applications. Viscosity-shear rate graphs, determining the flow properties of the materials, analyzing the filling behaviors in the capillarity process, and the melt properties of the materials for the inside of the cavity filling are of great importance. Therefore, each of the graphics showing the comparison of all three plastics is given (Fig. 1). At the low shear rates, POM has the highest viscosity, and hence it needs more injection pressure in the flow relative to PBT, which has the lowest viscosity and is thus easy to fill. This case provides an advantage to the part in mass production in terms of mold filling time. Because low viscosity reduces the material's resistance to flow, the melt can fill the mold easily and in a short period (Boronat et al., 2009).

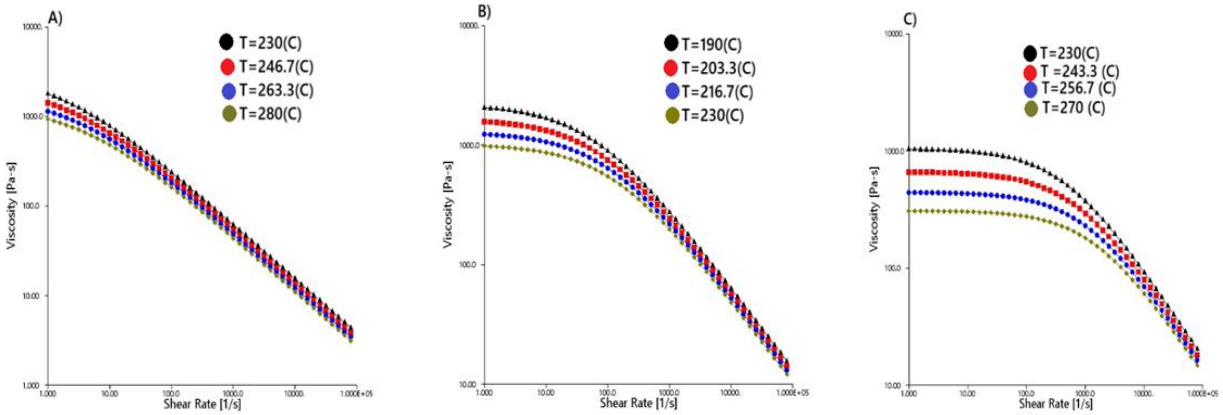


Figure 1. Viscosity vs. Shear Rate of A) PP B) POM C) PBT Materials

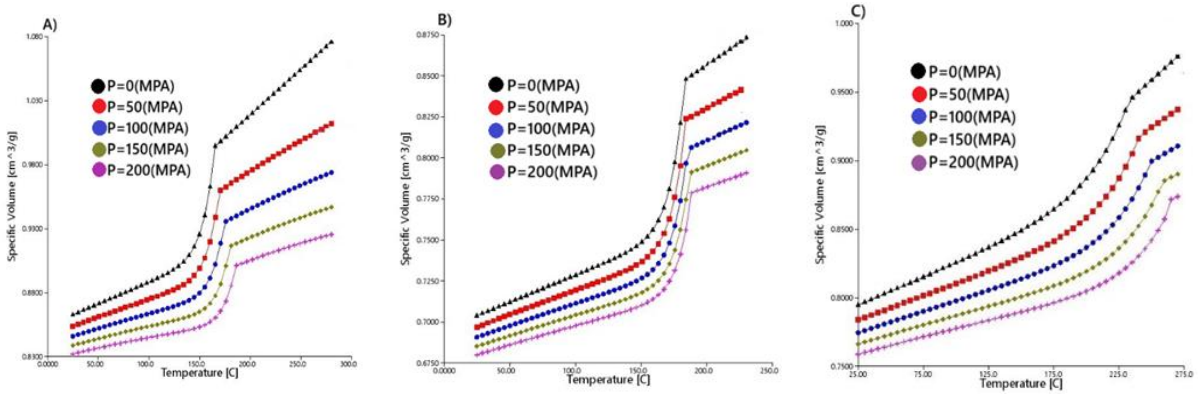


Figure 2. Specific Volume vs. Temperature of A) PP B) POM C) PBT Materials

The following figure comprises the volume-temperature plots of certain materials, which clearly illustrate the dependence of volumetric stability on temperature. These plots are important to know the volumetric shrinkage of the final product (Wang et al., 2020). As depicted in the diagrams, the material's specific volume decreases when the temperature rises while the material is being subjected to high pressure. Consequently, if pressure is kept constant, the temperature increase results in a specific volume increment. PP has the most notable specific volume change with the hotness of the material and is therefore more prone to shrinking under hot conditions, among the materials studied. POM, conversely, is the one that is least influenced by temperature changes, whereas PBT emerges as the material with the lowest thermal expansion because its specific volume is the most stable.

Model

Figure 3 illustrates both the 2D technical drawing and 3D view of the model. The total length of the implant model is 102.27 mm, the wall thickness is 3.45 mm, and the width is 15.86 mm. The model includes six screw holes whose inner diameter is 4.95 mm each.

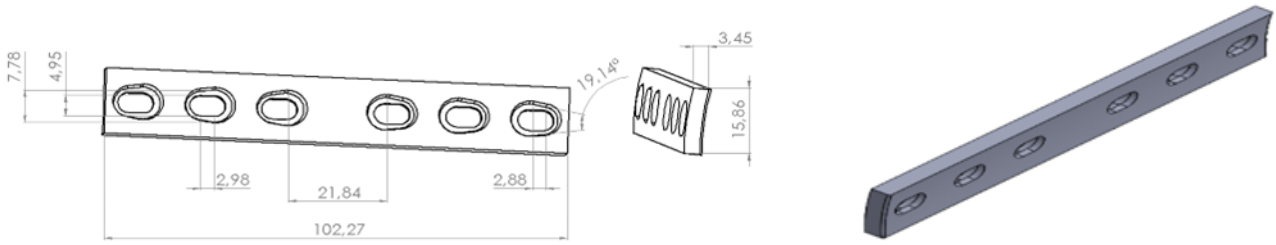


Figure 3. 2D Technical Drawing and 3D View

Mesh

To develop the implant model, the meshing process was used in Moldflow Insight software. The choice of a 3D tetrahedral element type makes it possible to obtain a more accurate representation of the material’s internal volume.

This technique boosts the accuracy of volumetric modeling, and at the same time, it is enriched by a six-layer refinement zone. The mesh structure is mainly 127,489 elements and 24,502 nodes. The aspect ratio, a primary quality measure, was achieved as 2.81 afterward. A mesh model can be viewed in Figure 4.

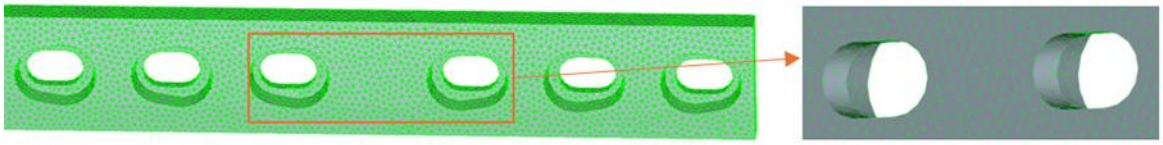


Figure 4. Mesh View

Process Settings

This research tested the simulation of the implant model using the Autodesk Moldflow Insight software filled along with the Fill-Pack-Warpage analysis. The computer-aided manufacturing (CAM) simulation permitted the visualization of POM, PP, and PBT plastic flow in the mold cavity, the cooling rate, the volumetric shrinkage, and the mechanical behavior of the plastics in the process. Based on the result, the CFD analysis was made on a computer with a 12-core AMD64 processor. The fluid behavior was simulated using the Coupled 3D Flow Solver, which ensures a more accurate representation of the viscous behavior of the melt and provides precise injection process simulation. The injection molding machine, which was in the study, is comprised of a spanning injection pressure of the maximum value of 1800 bar and a multiplying force of 70000 kN. Furthermore, the plunger stop intensification ratio was set to 10:1 to maximize the injection conditions.

Fill Analysis

The examination of the fill was the analysis of the injection point's location, the system's flow resistance, and the material's distribution within the mold. The automatic pressure/velocity transition point was found. Material tracking was done through the Level Set method, and flow stability was checked through the Coupled 3D Flow Solver. It was determined that the maximum fill volume and flow rate were the optimum ones to get a uniform mold filling. Concurrently, the filling stage was going on; the maximum fill volume was 4% at each time step. 50 iterations maximum are applied to each step. As the max filling pressure was decided at 4.89 MPa, the computation of total filling time was made in the amount of 1.87 seconds. The maximum speed of the injection machine was assessed in the direction of 5000 cm^3/s. The expressions of the melt temperatures were determined to be 210°C for POM, 255°C for PP, and 250°C for PBT. The mold temperatures were established at 90°C for POM, 45°C for PP, and 60°C for PBT.

The coefficients of heat transfer were established in the following order: 5000 W/m^2K at the filling stage, 2500 W/m^2K in the packing stage, and 1250 W/m^2K in the cooling stage. The analysis further allowed for the identification of the point of automatic pressure/velocity transition. The transition was successfully achieved at an injection pressure level of 4.89 MPa at the fresh fill rate of 99.76%. A system of automatic filling control was implemented, and the process of infusion lasted 1.80 seconds. The nominal flow rate was 2.91 cm^3/s, as was determined. The transition of pressure to velocity occurred at a time of 1.87 seconds with the pressure of 4.89 MPa. The cooling time was set for 20 seconds so the mold could be removed from the part, as the part would be safe.

Pack Analysis

At the packaging stage, the injection pressure was based on the fill pressure-time curve approach. Initially, 80% of the injection pressure was used to fill the mold in 10 seconds and kept at a constant level throughout the process. The total time taken to complete the filler or packing cycle was found to be 31.87 sec. The calculations of the average volumetric shrinkage were done, and the result was that 9.47% is the average volumetric shrinkage of all materials. POM had more volumetric shrinkage than PBT and PP, since the results for the two are 18.05% and 18.29%, respectively. The minimum shrinkage was observed in the case of PBT, with a shrinkage value of 16.76%.

Warpage Analysis

Analysis of the warpage showed that the Z-axis was the most altered. A two-layer aggregation approach was used to obtain a second-order tetrahedron mesh. The analysis method used was an AMG matrix (Automatic Multigrid Solver).

RESULTS

The use of polymers such as POM, PP, and PBT in the injection molding process and their flow behavior, mechanical stability, and production efficiency were the main features of this research. Gate location, warpage, volumetric shrinkage, fill time, cooling time, and clamp force analyses were made considering the in-mold behavior of each material. The study also focused on examining the viscosity, thermal conductivity, and mechanical properties of the mold to determine the flow and solidification process. It was noticed that those flow paths, melt temperatures, and mold temperatures of the materials were likely maximized after the injection parameter optimization, and the processes mentioned above were scrutinized for filling and shrinkage.

Gate Location

The optimization of gate location is essential to the injection molding operations and product fabrication for the regular entrance of the cavity with the filling of it and the minimization of the flow defects. The areas with low flow resistance were considered ideal for the achievement of homogeneous and complete filling. Flow Resistance Indicator and Gating Suitability Simulations, therefore, were the main tools used for the determination of the appropriate positions of the gates. Gate location analysis recognized the gate diameter, flow time, and pressure distribution, with the materials' flow characteristics and viscosity differences as the most relevant ones. The figures of the simulations showed that even though a 2.3 mm gate diameter was used in the POM case to balance flow resistance, there was still some flow resistance encountered. However, a 2.1 mm off-center gate with respect to the midpoint of a PP point accelerator arbor was used for faster filling out the molten resin. Meanwhile, a 2.4 mm gate diameter was also employed for the PBT droplet molding as a measure to suppress the effects of the shrinkage.

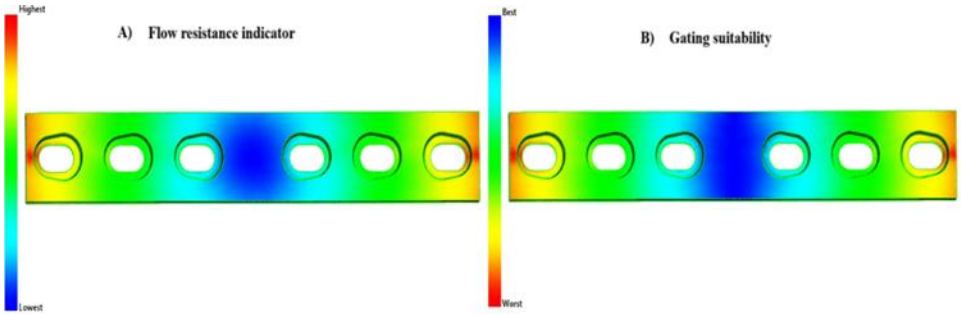


Figure 5. A) Flow Resistance Indicator B) Gating Suitability

Volumetric Shrinkage

Volumetric shrinkage can be described as the volume change that takes place when the melted polymer cools down and hardens within the mold during the injection molding process. The analysis proved that POM and PP reveal major reductions in dimensions, while PBT's decrease is less. The highest values of shrinkage were 18.05% for POM, 18.29% for PP, and 16.76% for PBT. The average values of shrinkage were set as 9.47% for POM, 9.47% for PP, and 7.20% for PBT. Higher shrinkage rates of PP and POM cause the need for longer packing times and a more equal pressure profile to be used in the mold for preservation of the dimensional stability.

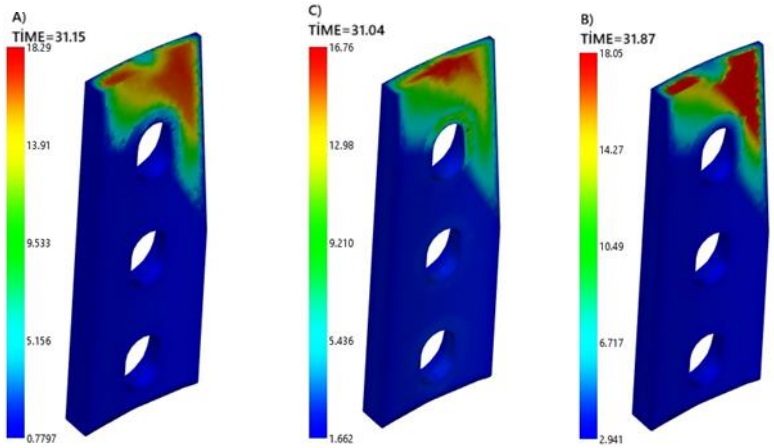


Figure 6. Volumetric Shrinkage: A) PP B) POM C) PBT

In contrast, PBT's lower shrinkage rate results in the fact that a larger part of the deformation is removed after production, and thus, the advantage is dimensional stability. With clamping force being directly proportional to shrinkage, the shrinking factor is also the main player in this case. PBT is the kind of polymer with the minimum level of shrinkage, and hence it assumes the lower clamping force, while POM and PP, with their higher shrinkage will have more stress on the mold. Therefore, the more accurate balancing techniques should be incorporated into the mold design for POM and PP.

Warpage

The warpage analysis was carried out to determine the mechanical stability and dimensional accuracy of the part after the injection molding process. The warpage behavior of POM, PP, and PBT materials was compared, and the maximum displacement values were calculated for different axes.

The identification of the maximum displacement values was made as follows:

- ✓ POM: X: 0.317 mm, Y: 0.252 mm, Z: 1.134 mm
- ✓ PP: X: 0.298 mm, Y: 0.238 mm, Z: 1.102 mm
- ✓ PBT: X: 0.285 mm, Y: 0.221 mm, Z: 0.987 mm

POM was the material causing the alarming warpage, with the maximum Z-axis distance deformation of 1.134 mm, which is a great threat to the dimensional stability of the product. PP had a high level of warpage as well, which was similar to POM. On the other hand, PBT had the smallest warpage values, and it was the most dimensionally stable element.

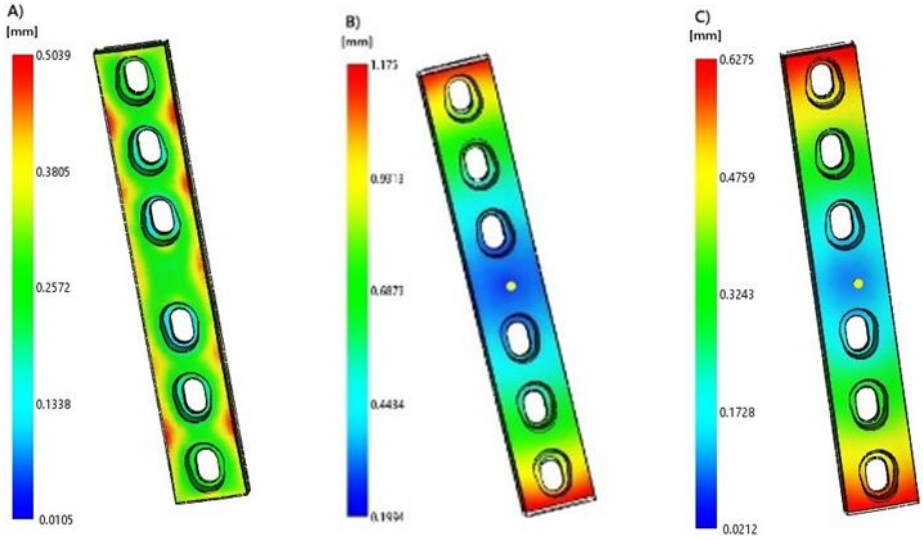


Figure 7. Deflection, All Effects A) PP B) POM C) PBT

Fill Time

The fill-time analysis was conducted to determine the flow rates and filling efficiency of the materials. The simulation revealed flow times of 1.87 s for POM, 1.80 s for PP, and 1.85 s for PBT in the case of filling. PP used to be the least viscous substance, thus using the fastest filling time, whereas POM had the longest fill time because of its high flow resistance. The injection pressures were found to be 4.89 MPa for POM, 4.45 MPa for PP, and 4.73 MPa for PBT. The excessive viscosity of POM has led to the flow resistance increase, which in turn causes a greater pressure requirement. On the contrary, with its low viscosity, PP had the lowest injection pressure needed to finish the filling process more efficiently.

Clamp Force

A study found out the force that is needed to prevent a mold from opening during the injection process. The clamp force is a function of the injection pressure and flow rate. As per the simulated results, the highest clamp values came out to be 0.2063 tons for POM, 0.1529 tons for PP, and 0.2435 tons for PBT. PBT was found to be the mold surface on which the greatest pressure was exerted on which was the reason for it to have the highest clamp force requirement. Nonetheless, POM had a lower clamp force; therefore, uneven pressure distribution was observed because of its high

viscosity. However, PP, unlike its other competitors, required the lowest clamp force since it has low viscosity, which results in smooth flow, and the mold does not experience much stress.

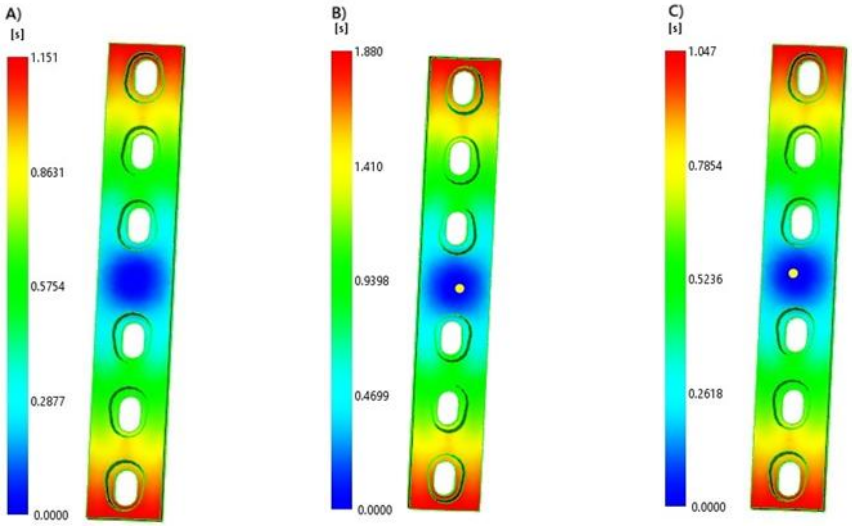


Figure 8. Fill Time Results A) PP B) POM C) PBT

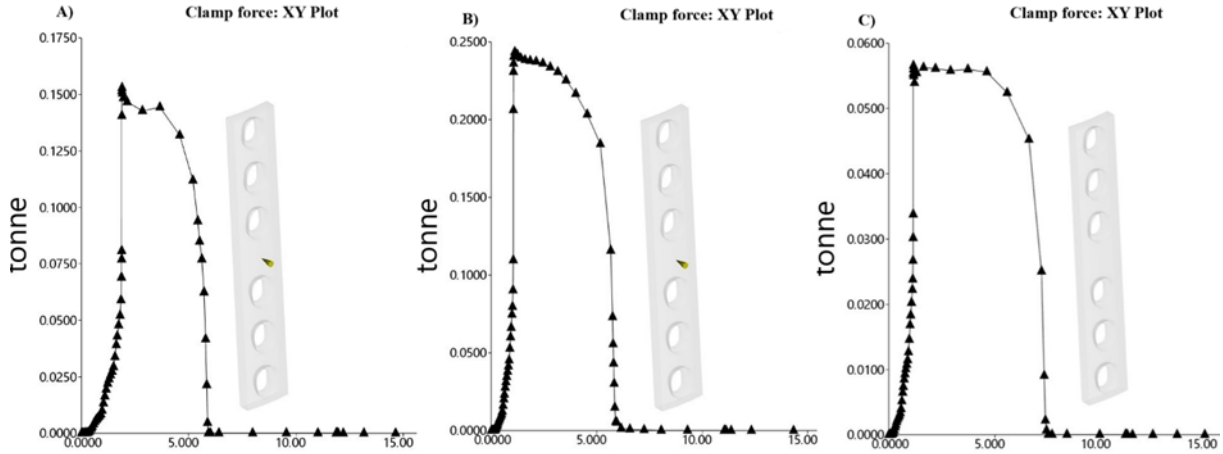


Figure 9. Clamp Force: A) PP B) POM C) PBT

Cooling Time

To investigate and quantify the cooling interval available for the material to get solid inside the mold and then forge stabilization, safely eject it use the situation for cooling-time analysis. The numerical computer simulation results showed that the cooling times totaled 20.3 s, 18.7 s, and 19.5 s (in the case of POM, PP, and PBT, respectively). The reason why PP had the minimum cooling time is that it has the least volume and the highest thermal conductivity. The opposite statement can be made about POM, which means that it needed the most time for cooling, as its crystalline structure is very high. The mold temperatures were stipulated at POM-90°C, PP-45°C, and PBT-60°C. POM's mold, which was set at a higher temperature, thereby the cooling process was protracted, while PP's mold, with a lower temperature, in contrast, allowed a quicker solidifying process. Simultaneously, cooling time is also a major factor that profoundly affects peak volumetric shrinkage and warpage. The outcome of the long-lasting cooling of POM, unlike PP, which had a fast growth of crystals, showed a trend to warpage and a positive effect on the dimensional accuracy, respectively.

STATIC STRUCTURAL ANALYSIS

The study explores the mechanical behavior of the implants made from POM, PP, and PBT, which are produced through the injection molding process using ANSYS Finite Element Analysis (FEA). Simulations were carried out to assess static loads and their effect on bone-implant systems. The strength of the materials was the key parameter

that was used for the assessment of both stress and deformation. To clarify the geometry, the screws were defined as fixed bonds, and the axial load was imposed on the implants to determine the bearing capacity. To ascertain the structural safety of the implants, the distributions of von Mises stress, the maximum value of deformation, and the safety factors were analyzed.

The behavior of the materials under the load was understood through the use of the elastic modulus, the yield strength, and the fracture resistance. The finite element analysis involved the application of an axial torque of 45 Nm for each material according to the stated boundary conditions. The maximum equivalent stress and deformation values were determined. The results of the analysis provided valuable information on the mechanical characteristics of the implants and were helpful in the choice of the most appropriate material for implant design.

Mesh

The horse bone was analyzed. The plate fixation was applied by Ti-6Al-4V screws, and the implants were connected to the femur model. Ansys Workbench was used for the meshing process. The number of nodes in the model was 15,889, and the total number of elements was 29,854; the aspect ratio was 2.81. The boundary inflation with five layers was applied. The mesh density was increased at the location of the implant-bone contact to provide a more even element distribution for better simulation precision.

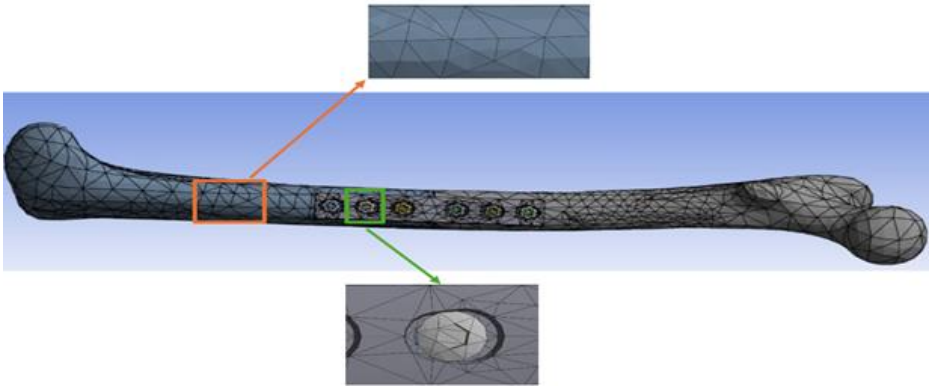


Figure 10. The Meshing Structure of the Femur and Plate Model

Boundary Conditions

Static structural analysis was conducted by considering the implant-femur bone interaction when loading and boundary conditions were defined. The femoral head was stationary, and the applied moment acted on the bone structure. A 15 Nm moment was input to the model. The proximal epiphysis was immobilized, while the distal epiphysis was left free. To elucidate the effect of the moment on the bone-implant system, the load was applied distal from the bone, and the support was located at the femoral head (Maden et al.,2022).

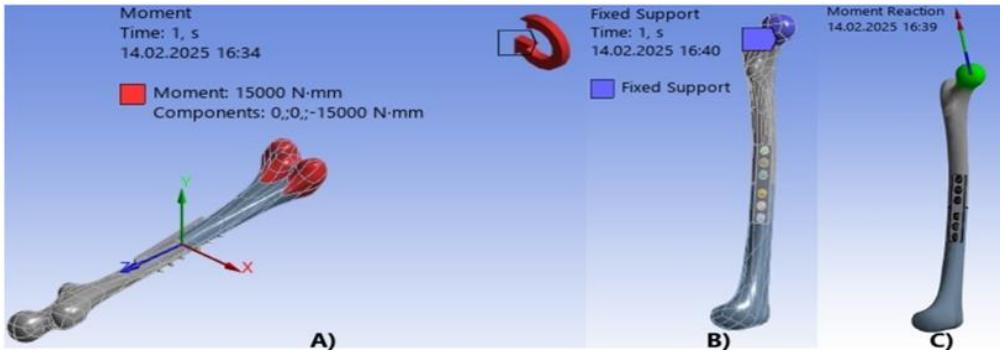


Figure 11. A) Moment B) Fixed Support C) Moment Reaction

By static analysis, the nature of the bending moment will be used instead, and it will be incremented in three stages from 15 Nm to 45 Nm. Each load was assigned a 3-second duration in a linear load increase fashion. "Deformable" type was given to the contact side between bone and implant, and then the pressure distribution in the contact regions was predicted. The friction coefficient between the surface of the implant and the bone was set to 0.3, and the contact conditions were described by using the "Surface to Surface Contact" method. The femur model divided the cortical

and trabecular bone regions. The Young's modulus was given as 17 GPa for the cortical bone and 1 GPa for the trabecular bone. The reason behind this was the accurate emulation of their mechanical properties.

Total Deformation Results

The deformation behavior of POM, PP, and PBT implants under axial load was compared in the simulations conducted in ANSYS. Here, the minimum deformation of the POM implant was 0.099 mm, the maximum was 5.9876 mm, and the average was 0.6358 mm. The minimum deformation of the PP implant was 0.097 mm, the maximum was 5.9449 mm, and the average was 0.6292 mm. The minimum deformation of PBT implant was 0.098 mm, the maximum was 5.9777 mm, and the average was 0.6340 mm. Results show that PP had the lowest average deformation, against which the cases of POM and PBT showed fairly higher values are negligible, although these materials had equal deformation behavior in the case of axial loading.

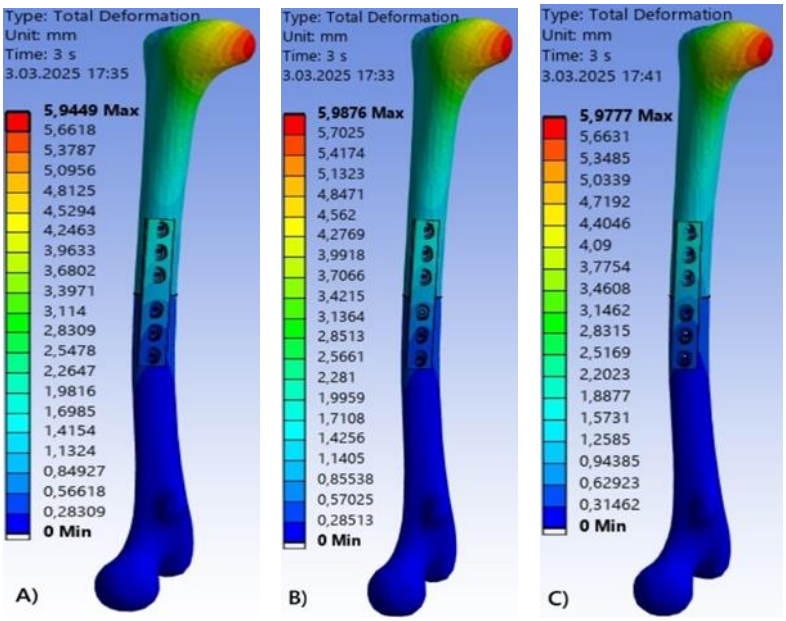


Figure 12. Total Deformation A) PP B) POM C) PBT

The data presents us with the fact that even though all materials have a similar range of deformation, the value of the maximum deformation of the PBT implant is still less than that of the other two materials. According to this evidence, PBT can be seen as a plastic material with high mechanical resistance in loading conditions. Plus, PP had the greatest deformation rates, which means it was the most susceptible to shape changes due to the load. On the other hand, the high strength that comes with POM was not enough to make it more favorable in dimensional stability, as it gave a higher deformation value in comparison with PBT. At the end of this analysis, PBT came off as the best material among the set of options in case the material's mechanical stability is of crucial importance, since it has much lower deformation values. The results suggest that PBT is a highly promising option for injection-molded implants due to its toughness and its good compatibility with bone material.

Equivalent Stress Results

Here, the investigation determined the equivalent (von Mises) stress distributions of POM, PP, and PBT implants. The critical parameters, such as the maximum stress values, such as under load, were analyzed and compared for each material. The examination reports indicate a minimum stress value of 0.00547 MPa for the POM implant and a maximum stress value of 316.36 MPa. The PP implant displayed a minimum stress value of 0.00944 MPa and a maximum stress value of 311.73 MPa. In the case of the PBT implant, the minimum stress value is recorded as 0.00634 MPa, and the maximum stress value is 319.03 MPa. The analysis revealed that the highest stress values were found around the interfacing areas of the implant. Major stresses were most likely found in the areas with the screws at. These data reveal that the screw areas are crucial to the implantation's structural integrity, as they are under heavy loads when in use.

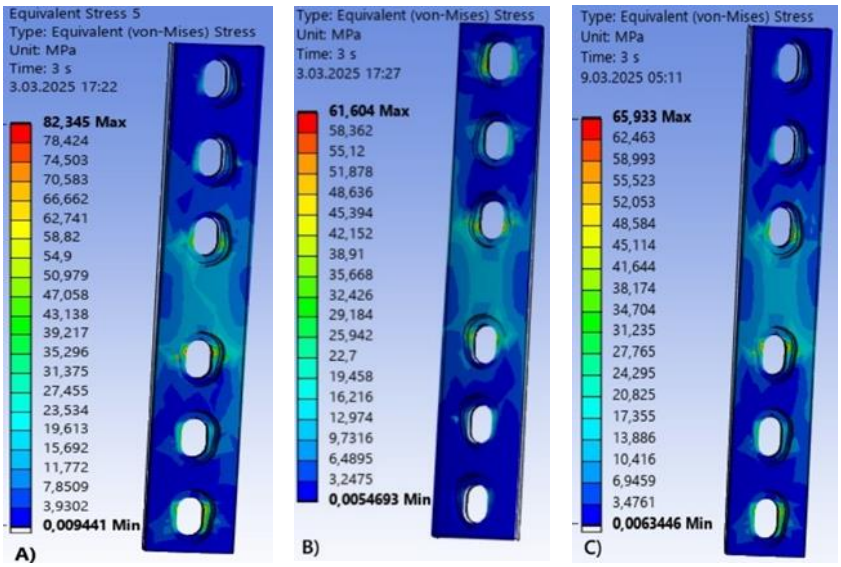


Figure 13. Equivalent Stress A) PP B) POM C) PBT

Global evaluation of the implant appeared to be the best in terms of the maximum stress among all three material options. However, the implementation of the average stress for all the materials showed identical outcomes. Regardless of this, it was noticed that the maximum stress values of POM and PP were lower in comparison to those of PBT. However, in terms of deformation, PBT presented the highest structural stability. In this line, the result showed that PBT was the most cost-effective material for stability and osseoproduction under various loads. However, POM may be more suitable in certain applications if its high resistance is needed based on the implant's design and mechanical specifications.

CONCLUSIONS

This article deals with the study that focused on the structural and thermal characteristics of the femur implants made from the injected molded POM, PP, and PBT. The Moldflow simulations exhibited that PBT had the least warpage (0.987 mm separate to the Z-axis) and volumetric shrinkage (16.76%), and therefore, it was considered the most dimensionally stable material. POM underwent the most deformation, with 18.05% volumetric shrinkage and 1.134 of the warpage, which points to the most malleable material as the one with the most shape changes. Comparatively, PP, because of its low viscosity, had the shortest fill time (1.80 s) and the lowest injection pressure (4.45 MPa). However, PP outperformed PBT in that it shrank and deformed more in comparison. The ANSYS structural analysis, on the other hand, offered that PBT had the smallest total deformation under a 45 Nm load (1.09 mm), and POM (1.24 mm) and PP (1.68 mm) exhibited the largest deformations. On the other hand, the equivalent stress analysis demonstrated that the maximum von Mises stress values were approximately the same for all materials (PBT: 319.03 MPa, POM: 316.36 MPa, PP: 311.73 MPa).

To sum up, the reconstructed femur produced by the injection molding method, which has PBT as its material, is a better alternative. Its poor characteristics are low warpage, low shrinkage, and high mechanical strength. Despite its high strength properties, the high shrinkage and warpage rates of POM necessitate careful process optimization during manufacturing. PP, however, was the most deformed part of all the implants exposed to the load. It is used for non-load-bearing implant applications since the modulus of elasticity of the material is very low. Considering the balance between the manufacturing process and mechanical performance, application, and results, PBT is recommended as the most optimal material for injection-molded femur implants.

In addition to these findings, the present study offers a meaningful contribution by proving the efficiency of combining Moldflow with a finite element-based structural analysis to evaluate the injection-molded biomedical implants. This study enables a precise examination of process-dependent deformation and stress behavior by using different thermal and mechanical simulations, also providing a working framework for implant material selection. The fact that PBT was seen as a good alternative to the usual metallic alloys like Ti-6Al-4V is very important since PBT is better concerning dimensional stability and mechanical compatibility under physiological loads. The other aspect of this study, which states the ability of new thermoplastics to be used in biomedical applications, especially when lightweight structure, biocompatibility, and manufacturing efficiency are factors to be considered, is very

strong. These findings could be used as a reference for studies focused on cost-effective and performance-optimized polymer based implants.

REFERENCES

Azdast, T., Shirinbayan, M., & Rezaei, A. (2022). High-pressure foam injection molding of polylactide/nano-fibril composites with mold opening. In *Polymeric Foams* (pp. 129-139). CRC Press.

Bressan, E., Favero, V., Gardin, C., Ferroni, L., Iacobellis, L., Favero, L., ... & Zavan, B. (2011). Biopolymers for hard and soft engineered tissues: application in odontoiatric and plastic surgery field. *Polymers*, *3*(1), 509-526.

Biswal, T., BadJena, S. K., & Pradhan, D. (2020). Synthesis of polymer composite materials and their biomedical applications. *Materials Today: Proceedings*, *30*, 305-315.

Brady, S. R., Nguyen, H. T., Patel, D. K., & Jones, A. M. (2023). Engineering synthetic poly(ethylene) glycol-based hydrogels compatible with injection molding biofabrication. *Journal of Biomedical Materials Research Part A*, *111*(6), 814-824.

Bastos, L., Rodrigues, P., & Almeida, J. (2022). Design and development of a novel double-chamber syringe concept for venous catheterization. *Medical Engineering & Physics*, *100*, 103757.

Boronat, T., Ferrer, J. M., & Sánchez, J. (2009). Influence of temperature and shear rate on the rheology and processability of reprocessed ABS in injection molding process. *Journal of Materials Processing Technology*, *209*(5), 2735-2745.

Chang, S. C. N., Hansbrough, J. F., Wheeler, E. S., & Wong, V. W. (2003). Tissue engineering of autologous cartilage for craniofacial reconstruction by injection molding. *Plastic and Reconstructive Surgery*, *112*(3), 793-799.

Canbolat A.S., Bademlioglu A.H. & Kaynakli Ö. (2022). Thermohydraulic performance optimization of automobile radiators using statistical approaches. *Journal of Thermal Science and Engineering Applications*, *14(5)*, 051014.

Fu, H., Xu, H., Liu, Y., Yang, Z., Kormakov, S., Wu, D., & Sun, J. (2020). Overview of injection molding technology for processing polymers and their composites. *ES Materials & Manufacturing*, *8*(20), 3-23.

Gumustas, B., & Sismanoglu, S. (2018). Effectiveness of different resin composite materials for repairing noncarious amalgam margin defects. *Journal of Conservative Dentistry and Endodontics*, *21*(6), 627-631.

Gogolewskı, S., Jovanovic, M., Perren, S. M., Dillon, J. G., & Hughes, M. K. (1993). Tissue response and in vivo degradation of selected polyhydroxyacids: Polylactides (PLA), poly(3-hydroxybutyrate) (PHB), and poly(3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalerate) (PHB/VA). *Journal of Biomedical Materials Research*, *27*(9), 1135-1148.

Heıdarı, B. S., Rezvani, S., & Ghanbari, S. (2017). Simulation of mechanical behavior and optimization of simulated injection molding process for PLA-based antibacterial composite and nanocomposite bone screws using central composite design. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, *65*, 160-176.

Isaıncu, A., Yazdanbakhsh, A. H., & Sharifi, H. H. (2021). Numerical investigation on the influence of fiber orientation mapping procedure to the mechanical response of short-fiber reinforced composites using Moldflow, Digimat, and Ansys software. *Materials Today: Proceedings*, *45*, 4304-4309.

Kramschuster, A., & Turng, L.-S. (2010). An injection molding process for manufacturing highly porous and interconnected biodegradable polymer matrices for use as tissue engineering scaffolds. *Journal of Biomedical Materials Research Part B: Applied Biomaterials*, *92*(2), 366-376.

Kulkarnı, A., Patel, R., & Singh, B. (2012). Modeling of short fiber reinforced injection moulded composite. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (p. 012025). IOP Publishing.

Lee, C. S., Kim, S. H., Park, J. H., & Lee, J. H. (2019). Investigation on very high cycle fatigue of PA66-GF30 GFRP based on fiber orientation. *Composites Science and Technology*, *180*, 94-100.

Maden, O., & Tüfekçi, K. (2022). İnsan femurunda eksenel ve yanal darbe yüküne maruz kalan kemik-implant sisteminin analizi. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi, 12*(1), 112-120.

Mao, H., Wang, Y., & Yang, D. (2022). Otomotiv arka kapı panelinin enjeksiyon kalıplama prosesi simülasyonu ve kalıp tasarımı çalışması. *Mekanik Bilim ve Teknoloji Dergisi*, *36*(5), 2331-2344.

Mi, H.-Y., Jing, X., Liu, Y., & Li, Z. (2013). Characterization of thermoplastic polyurethane/polylactic acid (TPU/PLA) tissue engineering scaffolds fabricated by microcellular injection molding. *Materials Science and Engineering: C, 33*(8), 4767-4776.

Nuruzzaman, D. M., Kusaseh, N., Basri, S., Oumer, A. N., & Hamedon, Z. (2016, February). Modeling and flow analysis of pure nylon polymer for injection molding process. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 114, No. 1, p. 012043). IOP Publishing.

Oroszlány, Á., & Kovács, J. G. (2010). Gate type influence on thermal characteristics of injection molded biodegradable interference screws for ACL reconstruction. *International Communications in Heat and Mass Transfer, 37*(7), 766-769.

Premalatha, S., Kumar, R., & Singh, A. (2024). Injection molding hot runner machine. In *2024 International Conference on Power, Energy, Control and Transmission Systems (ICPECTS)* (pp. 1-4). IEEE.

Sammoura, F., Ho, C. M., Lin, L., & Pisano, A. P. (2007). Polymeric microneedle fabrication using a microinjection molding technique. *Microsystem Technologies, 13*, 517-522.

Shirdar, M. R., Farajpour, N., Shahbazian-Yassar, R., & Shokuhfar, T. (2019). Nanocomposite materials in orthopedic applications. *Frontiers of Chemical Science and Engineering*, *13*, 1-13.

Saad, M., Akhtar, S., & Srivastava, S. (2018). Composite polymer in orthopedic implants: A review. *Materials Today: Proceedings*, *5*(9), 20224-20231.

Surace, R., Fassi, I., Previtali, B., & Annoni, M. (2016). Design and fabrication of a polymeric microfilter for medical applications. *Journal of Micro-and Nano-Manufacturing*, *4*(1), 011006.

Tan, F. (2020). Experimental investigation of mechanical properties for injection molded pa66+ pa6i/6t composite using rsm and grey wolf optimization. *El-Cezeri*, *7*(2), 835-847.

Tan, J., Zhang, Y., Liu, W., Wang, X., & Zhou, L. (2024). Fabricating high-performance biomedical PLLA/PVDF blend micro bone screws through in situ structuring of oriented PVDF submicron fibers in microinjection molding. *Composites Part B: Engineering, 281*, 111567.

Tan, F., & Alkan, A. K. (2024). Effect of Cooling Parameters on In-Mold Flow Behavior in the Microinjection Molding of Piezoelectric Pumps. *International Journal of Automotive Science And Technology*, *8*(4), 467-475.

Turkan, B., Canbolat, A.S. & Etemoglu, A.B. (2019). Numerical investigation of multiphase transport model for hot-air drying of food. *Journal of Agricultural Sciences, 25(4),* 518-529.

Wang, J., Liu, Y., Zhang, H., & Chen, L. (2020). Measurement of specific volume of polymers under simulated injection molding processes. *Materials & Design, 196*, 109136.

Zhao, W., Zhang, H., Liu, Y., & Wang, J. (2001). Development of PMMA-precoating metal prostheses via injection molding: Residual stresses. *Journal of Biomedical Materials Research, 58*(4), 456-462.

Zamanı, M. H., Yazdanbakhsh, A. H., & Sharifi, H. H. (2022). Investigation of ventilator's polymeric split filter production with injection molding process using Autodesk Moldflow software.

KSÜ Mühendislik Bilimleri Dergisi, 28(2), 2025
Araştırma Makalesi

KSU J Eng Sci, 28(2), 2025
Research Article

Kahramanmaras Sutcu Imam University
Journal of Engineering Sciences

Geliş Tarihi : 13.03.2025
Kabul Tarihi : 07.05.2025

Received Date : 13.03.2025
Accepted Date : 07.05.2025

İKLİM DEĞİŞİKLİĞİ ETKİSİ ALTINDA KIYI BÖLGELERİNDE AYLIK YAĞIŞ REJİMİ DEĞİŞİMİ VE GELECEK YAĞIŞ-AKIŞ TEPKİSİNİN ARAŞTIRILMASI: RİZE VE ANTALYA ÇALIŞMASI

INVESTIGATION OF MONTHLY PRECIPITATION REGIME CHANGE AND FUTURE RAINFALL-RUNOFF RESPONSE IN COASTAL REGIONS UNDER THE IMPACT OF CLIMATE CHANGE: A STUDY OF RIZE AND ANTALYA

Hasan Törehan BABACAN[1*] (ORCID: 0000-0001-9570-1966)

[1] Amasya Üniversitesi, Ulaştırma Hizmetleri Bölümü, Amasya, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Hasan Törehan BABACAN, hasan.babacan@amasya.edu.tr

ÖZET

Bu çalışma, Rize ve Antalya illerindeki aylık yağış rejimi değişimlerini ve gelecekteki yağış-akış tepkisini iklim değişikliği etkisi altında incelemektedir. Tarihsel yağış verileri ile CMIP5 kapsamında RCP8.5 emisyon senaryosu kullanılarak gelecek projeksiyonları değerlendirilmiştir. Çalışmada, Markov Zinciri yöntemiyle yağış rejimi geçiş matrisleri oluşturulmuş ve Çok Değişkenli Uyarlanabilir Regresyon Eğrileri (MARS), Karar Ağaçları Yöntemi (CART) ve Yapay Sinir Ağları (YSA) modelleri kullanılarak akış tahminleri yapılmıştır. Antalya'da tarihsel dönemde Ocak ayında ortalama 148 mm yağış gözlenirken, GFDL projeksiyonuna göre bu değerin 120 mm'ye düşmesi, HadGEM projeksiyonuna göre ise 160 mm'ye çıkması beklenmektedir. Rize'de tarihsel yıllık ortalama yağış 2300 mm olup, gelecek dönemde GFDL modeline göre %5 azalış, HadGEM modeline göre ise %3 artış tahmin edilmiştir. Akış tahminlerinde, Antalya için en başarılı model MARS (R=0.74, RMSE=36.79), Rize için ise CART (R=0.84, RMSE=1.04) olarak belirlenmiştir. Sonuçlar, iklim değişikliğiyle birlikte her iki şehirde de yağış rejimi geçişlerinin keskinleşeceğini, bu durumun Antalya'da tarımsal faaliyetleri, Rize'de ise heyelan ve taşkın risklerini artıracağını göstermektedir. Çalışma, su yönetimi ve afet planlaması açısından kritik bulgular sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: İklim değişikliği, hidrometeorolojik veri, yağış rejimi değişimi, CMIP5

ABSTRACT

This study examines changes in monthly precipitation regimes and future precipitation-runoff responses in Rize and Antalya under the impact of climate change. Historical precipitation data from 1970 to 2022 and future projections based on the RCP8.5 emission scenario of CMIP5 were analyzed. Markov Chain transition matrices were created to evaluate precipitation regime shifts, while Multivariate Adaptive Regression Splines (MARS), Classification and Regression Tree (CART), and Artificial Neural Networks (YSA) models were used for streamflow predictions. In Antalya, the historical average precipitation in January was 148 mm, while projections indicate a decrease to 120 mm according to the GFDL model and an increase to 160 mm according to the HadGEM model. In Rize, the historical annual average precipitation is 2300 mm, with a projected 5% decrease in the GFDL model and a 3% increase in the HadGEM model. For streamflow prediction, MARS performed best in Antalya (R=0.74, RMSE=36.79), while CART was most accurate in Rize (R=0.84, RMSE=1.04). The results indicate that climate change will lead to more abrupt precipitation regime shifts, increasing agricultural risks in Antalya and landslide and flood risks in Rize. This study provides crucial insights for water management and disaster planning in coastal regions.

Keywords: Climate change, hydro-meteorological data, change of rainfall regime, CMIP5

ToCite: BABACAN, H. T. (2025). İKLİM DEĞİŞİKLİĞİ ETKİSİ ALTINDA KIYI BÖLGELERİNDE AYLIK YAĞIŞ REJİMİ DEĞİŞİMİ VE GELECEK YAĞIŞ-AKIŞ TEPKİSİNİN ARAŞTIRILMASI: RİZE VE ANTALYA ÇALIŞMASI. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 28(2), 1020-1035.

GİRİŞ

Küresel ısınma ve iklim değişikliği son yıllarda olumsuz etkileri daha şiddetli hissedilen ve global ölçekte pek çok felaketin yaşanmasına yol açan önemli araştırma konularıdır. Bu nedenle iklim değişikliği dünyada çok fazla bölgede ekosistemi doğrudan etkileyen önemli bir çevre sorunu olarak gösterilmektedir (Grimm vd., 2013). İnsan faaliyetleri nedeniyle atmosferde artan sera gazı konsantrasyonunun önemli bir etkeni olduğu iklim değişikliği, sıcaklık ve yağış paternlerinde önemli değişikliklere yol açmaktadır (Polson vd., 2016). Değişen yağış ve sıcaklık paternleri su kaynakları, tarımsal faaliyetler, doğal çevredeki biyolojik çeşitlilik gibi kritik konuları etkileyerek, çevresel ve ekonomik sorunlara yol açmaktadır (Etukudoh vd., 2024). Bu sorunların etkileri sosyal sistemlerdeki problemleri beraberinde getirmektedir. Böylece dünyada iklim değişikliğine bağlı gelişen çevresel sorunlar, göç hareketleri, çarpık şehirleşme ve azalan ekonomik faaliyetler gibi giderek kritikleşen sonuçlar oluşturmaktadır (Piguet vd., 2011).

İklim değişikliği pek çok disiplin için önemli araştırma soruları barındırmaktadır. Hidroloji alanında iklim değişikliği araştırmaları, hidrometeorolojik parametrelerdeki zamansal ve mekânsal değişimlerin etkilerinin modellenmesinde yoğunlaşmaktadır (Rind vd., 1992; Mendoza vd., 2016; Dhamodaran ve Lakshmi, 2020). Bu araştırmalarda gözlenmiş hidrometeorolojik veriler ve CMIP verileri gibi çeşitli parametreler kullanılarak geliştirilen projeksiyon verileri kullanılmaktadır (Li vd., 2022). İklim değişikliğinin dünyada pek çok bölgede yağış rejimini etkilediği, buna bağlı olarak bazı bölgelerde kurak zamanların arttığı, bazı bölgelerde ise ani şiddetli yağışların taşkınlara neden olduğu geçmiş araştırmalar ile ortaya konulmuştur (Lu vd., 2025; Sayat vd., 2025; Tam vd., 2025). İklim değişikliğinin hidrolojik proseslere etkisini inceleyen bu araştırmalarda çoğunlukla sıcaklık ve yağış parametreleri esas alınmaktadır (Bhuyan vd., 2018; Kundu vd., 2017; Ali vd., 2025). Sıcaklık ve yağışta yaşanan değişimler doğrudan veya dolaylı olarak pek çok parametre üzerinde istatistiksel olarak anlamlı değişikliklere neden olmaktadır (Lin vd., 2025). Yağış rejimlerindeki değişiklikler akarsu akış rejimlerini değiştirmekte ve bazı bölgelerde yağışlara bağlı gelişen pik akışların gözlenme sıklığını, bazı bölgelerde ise düşük akışların gözlenme sıklığını arttırmakta (Babacan ve Yüksek, 2024), kısa süreli şiddetli yağışlar infiltrasyonu düşürerek su kaynaklarını olumsuz etkilemekte (Koutný vd., 2014), kentleşmiş alanlarda kısa süreli şiddetli yağışlar şehir taşkınlarına yol açmakta (Cheng vd., 2020), kurak dönemlerin ardından gelen yoğun yağışlar erozyon riskini arttırmakta (Zhang vd., 2023; Piacentini vd., 2018), özellikle taşkın zamanı taşınan yoğun sediment su kalitesini olumsuz etkilemekte (Zhang vd., 2022) ve düşük yağış zamanlarında artan su sıcaklığına bağlı olarak suda çözünmüş oksijen miktarı düşüşü sebebiyle sucul yaşam etkilenmektedir (Danladi Bello vd., 2017). Yağışın hidrolojik proseslerde dikkatle incelenmesi gereken bir parametre olduğu geçmiş çalışma bulgularıyla literatürde desteklenmiştir. Ayrıca sıcaklık ortalamalarında yaşanan pozitif anomaliler buharlaşma miktarını arttırmakta ve buna bağlı olarak bir havzadaki su bütçesi etkilenmektedir. Sıcaklık artışı buharlaşmayı arttırarak toprak nem miktarını azaltmakta ve bu durum havzalarda su stresini arttırıcı etki yapmaktadır (Dang vd., 2022). Ayrıca sıcaklıktaki artışlar zararlı böcek ve otların kontrolsüz artmasına ve tarımsal faaliyetlerin zarar görmesine neden olmaktadır (Skendžić vd., 2021). Bu durum göz önüne alındığında bir havzada su yönetimi konularında incelenmesi gereken diğer önemli parametrenin sıcaklık olduğu anlaşılmaktadır.

Doğu Karadeniz Havzası'nda (DKH) bulunan Rize ili ve Antalya Havzası'nda (ANH) bulunan Antalya ili Türkiye'nin en fazla yıllık toplam yağış ortalamasına sahip illeridir. Rize ve Antalya illerinin topografyası şehir taşkınlarının gerçekleşme riskini arttıracak benzer topografik zorluklara sahiptir (Leventeli, 2011; Reis, 2008). Rize ve Antalya'da yüksek eğimli bölgeler ve akarsu yataklarındaki yerleşim bölgeleri taşkından kaynaklı zararların artmasına neden olacaktır (Konrad vd., 2005). Bu durum iki şehirde de yağış rejimi değişiminin bilinmesi hususunun önemini ortaya koymaktadır. Yağış rejimindeki değişiklik, taşkın oluşum süreçlerini incelerken dikkate alınması gereken önemli bir konudur (Bola vd., 2022) Ayrıca aylık ve mevsimlik yağış rejiminin incelenmesi hem taşkın riski açısından bir indikatör olarak kullanılabilecek hem de tarımsal faaliyetlerin sürdürülebilirliği açısından kullanılabilecek değerli bulguları içermektedir. Yağış rejimine bağlı akış değerlerinin gelecekteki durumunun belirlenmesi, sulama sistemleri, erozyon önleme faaliyetleri, sürdürülebilir su yönetim planlamaları gibi temel konularda da bölgelere katkı sağlayacaktır.

Çalışma Türkiye'nin en çok yağış alan kıyı bölgeleri Antalya ve Rize'de iklim değişikliğinin yağış rejimi ve akış dinamiklerine etkisini ayrıntılı biçimde ortaya koymayı amaçlamaktadır. Markov Zinciri (MZ) yöntemi kullanılarak yağış rejimi geçişleri ayrıntılı olarak incelenmiş, Çok Değişkenli Uyarlanabilir Regresyon Eğrileri (MARS), Karar Ağaçları Yöntemi (CART) ve Yapay Sinir Ağları (YSA) gibi yapay zeka ve sezgisel regresyon tabanlı yöntemler kullanılarak akış tahmin modelleri geliştirilmiştir. Farklı iklim projeksiyonlarının (GFDL-ESM2M ve HadGEM2-ES), en çok yağış alan farklı kıyı bölgelerindeki mekansal ve zamansal değişimleri değerlendirilerek bu projeksiyon modellerine karşı bölgesel akış tepkileri incelenmiştir. Böylece iklim değişikliğinin bölgesel hidrolojik riskler

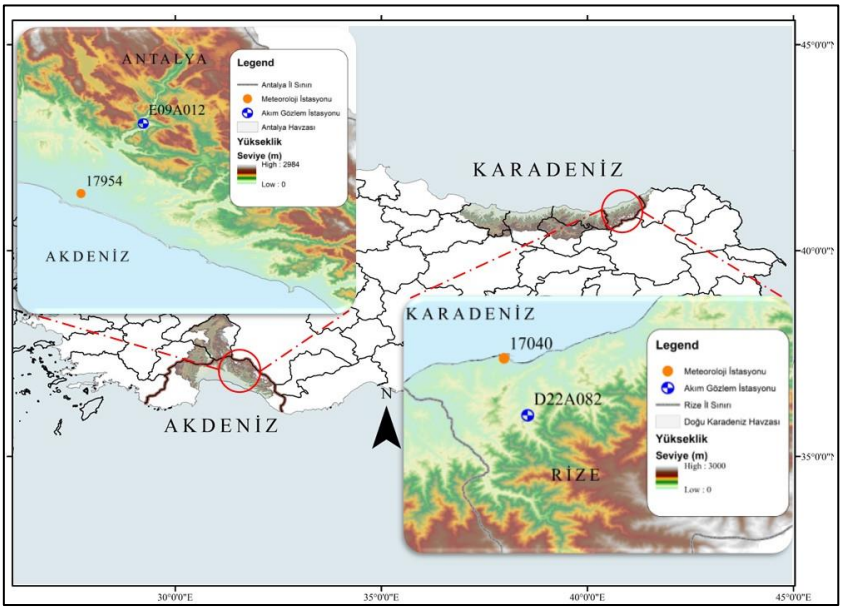
üzerindeki etkisini, gelecek akış modelleri üzerinden daha net bir şekilde inceleme imkanı sağlanmıştır. Çalışma bulguları özellikle kıyı bölgelerinde su yönetim stratejileri ve tarımsal sürdürülebilirlik açısından kritik bilgiler barındırması ve metodolojik olarak bölgelerin kapsamlı değerlendirmesini sağlamış olması nedeniyle literatüre önemli katkılar sunmaktadır.

MATERYAL VE METOT

Çalışma Bölgeleri: Antalya ve Rize

Çalışma kapsamında DKH sınırları içerisinde bulunan Rize ve ANH sınırları içerisinde bulunan Antalya illeri incelenmiştir. Rize ve Antalya illeri farklı iklim özellikleri gösteren illerdir. Antalya Akdeniz tipi iklim özellikleri göstermektedir. Yazları kurak ve düşük yağış ortalamasına, kışları ise yüksek yağış ortalamasına sahiptir. Antalya'da yaz aylarında sıcaklık ortalaması 25-35°C, kış aylarında 10°C'nin üzerinde geçmektedir. Antalya ilinin kuzey kesimlerinde bulunan Toros dağlarının varlığı, bölgede orografik yağışların artmasını ve bölgedeki akış paternlerinin yağışa toleransının yüksek olmasını sağlar (Atalay vd., 2014). Yüzeysel akışın yağışa karşı toleransının yüksek olması, şiddetli yağışların taşkın oluşturma riskini arttırmaktadır. Ayrıca Antalya bölgesi değişken ve kısmen yüksek eğimli bir topografyaya sahip olduğundan, yağışların akışa geçme süresi kısalmakta ve taşkın riskinin arttığı söylenebilmektedir (Demirtaş, 2016). 2023 yılı Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK) verilerine göre Antalya ili 3.251.403 dekar tarım alanı ile Türkiye'nin toplam tarım alanının %1,36'sını karşılamaktadır (URL-1, Erişim Tarihi: 01.02.2025). Antalya bölgesi tarım alanı 2020 yılından itibaren yaklaşık %11'lik bir düşüş göstermiştir. Bu düşüşün nedenleri arasında bölgedeki hızlı kentleşme gösterilebilir. Yılmaz ve Terzi'nin 2020 yılında yaptığı çalışmada Antalya bölgesinin geçmişten günümüze hızlı kentleşmenin etkisi altında olduğu belirtilmiştir (Yılmaz ve Terzi, 2020). Hızlı kentleşme drenaj sistemlerinde yetersizlik, daraltılmış akarsu yatakları gibi problemleri beraberinde getirmektedir. Buna benzer altyapı ve şehirleşme konusundaki aksaklıklar, ani yağışlar sonrasında şehir merkezlerinde ciddi can ve mal kaybı oluşturacak taşkınları beraberinde getirme riskini barındırmaktadır (Du vd., 2020). Bu yönüyle ele alındığında, bölgede öncelikli ekonomik faaliyetler arasında yer alan tarımsal ve turistik faaliyetlerin afetler kaynaklı etkilenmesi hem yerel hem de ulusal anlamda ciddi ekonomik kayıplara yol açacaktır.

Rize DKH sınırları içerisinde bulunan ve yıllık toplam yağış yüksekliği bakımından Türkiye'nin en yüksek yağış alan ilidir. Rize'de uzun dönem gözlemlerine göre ortalama yıllık toplam yağış 2300mm civarındadır. Bölge Karadeniz İklim özelliklerini göstermektedir. Bölge yıl boyunca yağışlıdır. Ortalama sıcaklık kış aylarında 6-9°C, yaz aylarında ise 18-24°C civarındadır. Rize yüksek yamaçları ve dağlık topografik yapısı nedeniyle hidrolojik açıdan zorlu bir bölgedir. Rize'de şiddetli yağışlara bağlı olarak sıklıkla toprak kayması ve taşkın gibi afetler gözlenmektedir (Aktürk ve Hauser, 2021). Rize'de engebeli topografya nedeniyle ekilebilir alanlar oldukça azdır. Bu nedenle Rize'nin tarım alanları, Türkiye'nin toplam tarım alanının %0,23'ünü oluşturmaktadır (URL-1, Erişim Tarihi: 01.02.2025).



Şekil 1. Çalışma Bölgeleri: Antalya ve Rize

Antalya ve Rize illeri farklı coğrafi bölgelerde bulunan illerdir. Antalya ve Rize'nin iklimsel ve hidrolojik dinamikler açısından hem benzer hem de farklı özellikleri bulunmaktadır. Antalya ili Akdeniz iklim özelliklerini göstermektedir, yaz aylarında sıcaklık ortalaması yüksek ve kurak geçiren Antalya ili, Toros dağlarının da etkisiyle kış aylarında yüksek yağış ortalamasına sahiptir. Rize ili ise Karadeniz iklimi etkisi altındadır ve her mevsim yağışlıdır. Antalya ili ve Rize ili topografik olarak benzer hidrolojik zorluklar ile karşı karşıyadır. İki ilde de taşkınlar önemli bir risk faktörü olarak sayılabilmektedir. Bu nedenle çalışma farklı iklim özellikleri etkisi altında, benzer hidrolojik zorluklara sahip iki bölgede gerçekleştirilmiş ve karakteristik iklim özelliklerinin etkisi altında yüzeysel akışa mekânsal iklim değişikliği etkileri değerlendirilmiştir. Çalışma bölgeleri Şekil 1'de gösterilmektedir.

Yağış Sınıflandırması

Yağışın sınıflandırması farklı yağış rejimlerinin belirlenmesi ve yağış rejimleri (RR) arasındaki geçişin ortaya konulması için önemli bir husustur (Yılmaz, 2018). Yağış sınıflandırması yıl içerisinde gözlenen aylık yağış miktarının farklı yöntemler kullanılarak gruplanması esasına dayanmaktadır. Bu çalışmada yağış sınıflandırması aylık toplam yağış değerlerinin ortalaması (P_{ort}) esas alınarak yapılmıştır. Sınıf alt ve üst değerlerinin belirlenmesi için, aylık yağış verilerinin standart sapmalarının ortalaması alınmış ($P_{s\text{-}sapma}$) ve ortalama değer ile kullanılmıştır. Tablo 1'de illere göre yağış sınıflandırma değerleri gösterilmiştir.

Tablo 1. Yağış Rejimi Belirlenmesi İçin Kullanılan Yağış Sınıf Sınırları

Yağış Sınıfı[a]	Durum	Antalya Sınır Değerleri (mm/ay)	Rize Sınır Değerleri (mm/ay)
1	Şiddetli Kuraklık	P=0	P=0
2	Kuraklık	0 < P < 27,70	0 < P < 38,60
3	Ortalama Yağış	27,70 ≤ P < 148	38,60 ≤ P < 116,70
4	Sulak	148 ≤ P < 208,20	116,70 ≤ P < 272,70
5	Aşırı Sulak	P ≥ 208,20	P ≥ 272,70

[a] Sınıfların sınır değerleri en alt sınırdan en üst sınıra doğru sırasıyla; $P_{ort} - 2* P_{s\text{-}sapma}$, $P_{ort} - P_{s\text{-}sapma}$, $P_{ort} + P_{s\text{-}sapma}$ ve $P_{ort} + 2* P_{s\text{-}sapma}$ şeklinde belirlenmiştir. Burada en alt sınırda negatif olan değerler dikkate alınmamıştır.

Kullanılan Veriler

Çalışmada incelenen bölgelerde yağış (P, [mm]), sıcaklık (T, [°C]) ve yüzeysel akış (Q, [m³/s]) verilerinin zamansal ve mekânsal değişimi modellenmiş ve iklim değişikliği etkisi altında değerlendirilmiştir. Yağış rejimindeki değişikliklerin bölgesel su planlaması ve toplumsal önemli etkileri bulunmaktadır (Ouarda vd., 2014). Bu nedenle çalışmada tarihsel gözlem verileri kullanılarak yağış verileri beş farklı sınıfa ayrılmıştır. Bu sınıf değerleri yağış rejiminin izlenmesi amacıyla kullanılmıştır. Referans periyotta istasyonlar için aylık ortalama yağış rejimi değeri elde edilmiştir. Elde edilen bu değerler tahminleyici bir parametre olarak geliştirilen yağış-akış modelinde girdi setinde kullanılmıştır. Gelecek periyotta yüzeysel akış değişiminin incelenmesi amacıyla RCP8.5 emisyon senaryosu etkisi altında GFDL-ESM2M ve HadGEM2-ES modellerinin projeksiyon verileri kullanılmıştır. GFDL modelleri Amerika Birleşik Devletleri tarafından geliştirilen, atmosfer, okyanus kara yüzeyi ve biyolojik süreçleri temsil eden bir model olarak tasarlanmıştır (Liu vd., 2022). HADGEM modeli ise Birleşik Krallık tarafından geliştirilen GFDL modeline ek olarak deniz buzu, karbon döngüsü ve kimyasal süreçleri de dikkate alan bir modeldir (Haywood vd., 2014). Çalışmada seçilen bu iki modelin RCP8.5 senaryosu etkisi altında sıcaklık toleransının yüksek olduğu ortaya konulmuştur (Demircan vd., 2017). RCP8.5 senaryosu atmosferdeki sera gazı konsantrasyonunun 22. yüzyıla kadar sürekli artacağını esas alan senaryo olduğundan bir bölgedeki iklim değişikliği etkileri araştırılırken en elverişsiz koşulların araştırılması için kullanılabilecek bir senaryodur.

Tablo 2. Antalya İçin Kullanılan Tarihsel Gözlem ve Projeksiyon Verilerinin İstatistiksel Özellikleri

Veri Seti[a]	Ortalama	Std. Sapma	Minimum	Medyan	Maksimum	Çarpıklık	Basıklık
TAR[b]-Q	63,24	54,76	0	49,64	301,97	1,13	1,37
TAR-P	87,83	113,49	0	37,65	780,8	1,81	4,01
GFDL[c]-P	40,11	42,7	0	27,25	298,5	1,81	4,45
HADGEM[d]-P	87,43	82,84	0	62,5	642,1	1,68	4,46
TAR-T	19,067	6,442	7,641	18,583	31,155	0,13	-1,36
GFDL-T	13,852	7,865	-0,2	13,55	31,6	0,15	-1,23
HADGEM-T	16,95	8,282	2,4	16,5	33,6	0,21	-1,2

[a]Q [m³/s], P [mm], T [°C], [b]Tarihsel veri seti, [c]GFDL-ESM2M veri seti, [d]HadGEM2-ES veri seti

Böylece araştırma bölgesinde ekstrem sonuçların elde edilmesini kolaylaşacağından araştırma bulguları en olumsuz durumu temsil edebilecektir. Tarihsel gözlem verileri, her çalışma bölgesi için aylık periyotta temin edilmiştir. Çalışmada Antalya analizlerinde kullanılan tarihsel veriler ve projeksiyon verilerine ilişkin istatistiksel detaylar Tablo 2'de, Rize iline ilişkin detaylar Tablo 3'te gösterilmektedir.

Tablo 3. Rize İçin Kullanılan Tarihsel Gözlem ve Projeksiyon Verilerinin İstatistiksel Özellikleri

Veri Seti[a]	Ortalama	Std. Sapma	Minimum	Medyan	Maksimum	Çarpıklık	Basıklık
TAR[b]-Q	3,786	1,949	0,3	3,389	12,615	1,44	3,35
TAR-P	194,66	106,93	8,2	182,3	516	0,71	0,27
GFDL[c]-P	132,92	71,71	0,35	133,34	274,01	-0,07	-1,28
HADGEM[d]-P	168,35	80,25	7	170,54	347,07	0,03	-1,22
TAR-T	15,265	6,645	3,584	14,613	26,797	0,09	-1,37
GFDL-T	12,061	6,56	-2,321	12,122	24,91	-0,09	-1,23
HADGEM-T	15,305	7,296	0,637	15,503	31,552	0,03	-1,22

[a]Q [m³/s], P [mm], T [°C], [b]Tarihsel veri seti, [c]GFDL-ESM2M veri seti, [d]HadGEM2-ES veri seti

Markov Zinciri Yöntemi

Markov Zinciri bir sistem içerisindeki farklı durumların birbiri arasındaki geçişlerinin incelendiği ve modellendiği stokastik bir süreçtir. Bu yöntem sistemin mevcut durumunun bir önceki duruma bağlı olduğu Markov özelliğine dayanmaktadır (Ross, 2014). Bu yöntem sistemin geçmiş durumlarını hatırlamadığını, sadece mevcut durumun geleceği belirlediğini varsaymaktadır. Çalışmada aylık yağış rejimleri arasındaki geçişler incelenmiştir. Ortalama ve standart sapma değerleri kullanılarak belirlenen sınırlara göre 5 farklı rejim belirlenmiştir. Bunlar sırasıyla; Şiddetli Kuraklık (ŞK), Kuraklık (K), Ortalama Yağış (OY), Sulak (S) ve Aşırı Sulak (AS) olarak isimlendirilmiştir. Markov zinciri yöntemi geçiş olasılıklarını belirlemek için geçiş matrisi oluşturmaktadır. Bu matris kare bir matristir. Matrisin boyu durum sayısına eşit olmaktadır (n*n) (Ross, 2014). Geçiş matrisi P=[p_{ij}] olarak gösterilmektedir. Burada p_{ij}, i. durumdan j. duruma geçiş olasılığını göstermektedir. Geçiş olasılıkları Eşitlik 1'deki koşulu sağlamalıdır (Norris, 1997).

$$\sum_{j=0}^{n} p_{ij} = 1 \quad \forall i \tag{1}$$

Buradaki geçiş olasılıkları tarihsel veriler kullanılarak hesaplanmaktadır ve tüm geçiş olasılıkları toplamının 1 (%100) olması beklenmektedir (Norris, 1997). Geçiş olasılıklarının hesaplanması aşamasında her bir durumdan diğer durumlara yapılan geçişler sayılır ve bu sayılar toplam geçiş sayısına bölünerek olasılıklar elde edilir. Bu hesaplama Eşitlik 2'de gösterilmektedir (Norris, 1997). Burada n_{ij} i. durumdan j. duruma geçiş sayısını göstermektedir.

$$p_{ij} = \frac{n_{ij}}{\sum_{k=1}^{n} n_{ik}} \tag{2}$$

TAHMİNLEYİCİ YÖNTEMLER VE MODEL TASARIMI

Çalışmada yağış rejimi değişikliklerine karşılık gelecekteki akış tepkilerinin bulunması amacıyla tahminleyici yöntemler kullanılarak, gelecekteki aylık akış değerleri tahmin edilmiştir. Tahmin modellerinde P, RR ve T aylık verileri tahminleyici, Q aylık verisi ise tahmin edilen parametre olarak kullanılmıştır.

Tahmin modelinin oluşturulması iki aşamada gerçekleştirilmiştir. Bu aşamalardan ilki kalibrasyon ikincisi ise test aşamasıdır. Bu iki aşamada da tarihsel gözlem verileri kullanılmıştır. Kalibrasyon aşamasında gözlem periyodu içerisinde elde edilen veriler kullanılarak tahmin modeli oluşturulmuş olup ilk aşama kontrolü yapılmıştır. Burada performansı yeterli olan modeller ikinci aşama olan test aşamasında daha önce kullanılmamış veriler kullanılarak test edilmiş ve tahmin modeli oluşturulmuştur. Bu aşamadan sonra gelecekteki akış değerlerinin belirlenmesi amacıyla model projeksiyon verileri kullanılarak çalıştırılmış ve gelecekteki değerlerin tahmini yapılmıştır.

Çok Değişkenli Uyarlanabilir Regresyon Eğrileri (MARS)

Çok Değişkenli Uyarlanabilir Regresyon Eğrileri (MARS) yöntemi regresyon esaslı bir tahminleme işlemi gerçekleştirmektedir (Babacan vd., 2024). Modelin temel çalışma prensibinde girdi verilerinden temel fonksiyonlar (TF) üretmek, fonksiyonlardan eğriler elde etmek ve bu eğrileri belirlenen noktalardan kesiştirmek ile başlamaktadır.

Kesiştirme işleminin tamamlanmasının ardından budama işlemi gerçekleştirilmekte ve tahmin fonksiyonu (PF) elde edilmektedir. Modelin tahminleri burada elde edilen tahmin fonksiyonu kullanılarak yapılmaktadır. MARS modeli ile ilgili detaylı bilgiye Friedman (1991), hidrolojik zaman serilerinde kullanımı ile ilgili detaylı bilgiye ise Babacan vd., 2022, Yin vd., 2018 kaynaklarından erişilebilir. Çalışmada geliştirilen MARS tahmin modelinde, tasarımcı tarafından karar verilecek olan önemli parametreler sırasıyla; maxTF, Penalty ve Serbestlik Derecesi (SD) olarak sayılabilir. Bu değerlerin veri setlerine göre uyarlanması konusunda literatürde önerilen bir yöntem olmadığından, bu parametreler sırasıyla [5 75], [0 1] ve [1 2] aralığında deneme-yanılma yöntemiyle belirlenmiştir.

Yapay Sinir Ağları (YSA)

Yapay Sinir Ağları (YSA) belirli bir veri setinde bağımsız değişkenler ile bağımlı değişken arasındaki sayısal ilişkinin modellenmesi amacıyla kullanılan bir yöntemdir. (Humphrey vd., 2016). YSA'nın kullandığı veri seti girdi verileri (bağımsız değişkenler) ve hedef verilerini içermektedir. YSA farklı katmanlar arasında veri aktarımı yaparak genel çalışma prensibini oluşturmaktadır. YSA tarafından oluşturulan genel katmanlar, verilerin dış dünyadan alındığı girdi katmanı, verilerin çeşitli transfer fonksiyonları kullanılarak aktarıldığı gizli katman veya katmanlar ve yine transfer fonksiyonu kullanılarak verinin çıktı olarak oluşturulduğu çıktı katmanı olarak tanımlanabilmektedir. YSA genel olarak eğitim ve test aşamaları ile geliştirilmektedir. Eğitim aşamasında hedef değişkenin belli olduğu bir veri seti kullanılır ve ağın tahmin için kullanacağı katsayılar oluşturulur. Ağın yaptığı tahminlerin hedef değerler ile kıyaslanması sonucu çalışmada kullanılan geri yayılım algoritması gibi algoritmalar çıktıya göre katsayı optimizasyonu yapar ve hatayı minimize edecek şekilde yeni çıktı oluşturur. Bu işlemin tamamlanmasından sonra YSA hedef verilerin kullanılmadığı yeni bir veri setiyle başlatılır ve hedef verileri üretmesi sağlanır. Burada yeterli performans değerine erişen model yapısı belirlenerek gelecek tahminleme işlemlerinde kullanılır. YSA ile ilgili detaylı bilgi Wang vd., 2006, hidrolojik zaman serilerine uygulanması ile ilgili detaylı bilgi Wu ve Chau, 2010 ve Sharma vd., 2022 kaynaklarına bakılabilir. YSA tasarımında önemli olan bazı seçimler tasarımcı tarafından yapılmaktadır. Bu parametreler genel olarak gizli katman sayısı, gizli katmandaki nöron sayısı, transfer fonksiyonu seçimi ve öğrenme algoritması seçimi olarak sayılabilir. Çalışmada YSA tasarımında gizli katman sayısı 1, gizli katman sayısındaki nöron sayısı [1 10], transfer fonksiyonu tanjant sigmoid ve öğrenme algoritması Levenberg-Marquardt olarak belirlenmiştir.

Karar Ağaçları Yöntemi (CART)

Literatürdeki adıyla CART (Classification and Regression Tree) modeli Breiman vd. tarafından 1984 yılında geliştirilen bir yöntemdir (Breiman vd., 1984). Bu yöntem girdi verilerini belirli kurallar çevresinde alt dallara ayırarak sınıflandırma işlemi yapmaktadır. Bu yöntemin kullanılması diğer makine öğrenmesi yöntemlerine benzer şekildedir. CART yönteminde girdi değişkenleri ve hedef değişken bulunmalıdır. Bir karar ağacının oluşturulması en genel haliyle üç aşamadan oluşmaktadır. Bu aşamalar sırasıyla; öznitelik seçimi, ağaç yapısının oluşturulması ve budama olarak sıralanabilir (Farzin vd., 2025). Öznitelik seçimi esnasında Gini katsayısı kullanılarak her bir değişkenin veri kümesini bölme yeteneği değerlendirilir. Belirlenen en iyi öz niteliklere göre dallandırarak ağaç yapısı oluşturulur. Oluşturulan ağaç yapısında aşırı öğrenmeyi engellemek amacıyla budama işlemi gerçekleştirilerek optimum karar ağacı yapısı elde edilmiş olur (Lu vd., 2022).

BULGULAR

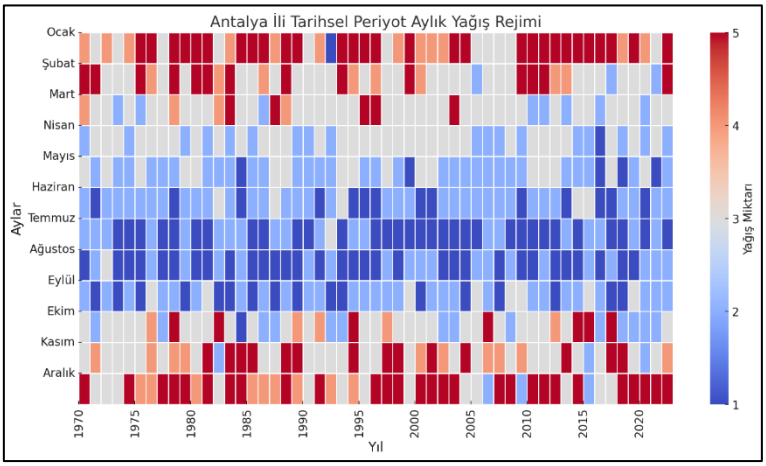
Tarihsel Dönem ve Projeksiyon Dönemi Yağış Rejimi Bulguları

Çalışma kapsamında tarihsel dönemdeki ve gelecek dönemdeki yağış rejiminin değişimini anlamak amacıyla gözlenen yağış verileri kullanılarak Antalya ve Rize için yağış sınıflandırmaları yapılmıştır. Tarihsel yağış verileri kullanılarak 5 farklı yağış sınıfı belirlenmiştir. Yağış sınıfları Tablo 1'de gösterilmiştir. Yağış sınıflandırması farklı yıllarda farklı aylarda gerçekleşen toplam yağış değerlerinin değişimini, yıllık yağış değişimini ve farklı yağış rejimleri arasındaki değişimi için bir gösterge olarak kullanıldığından hidrolojik araştırmalarda önemli bir aşamadır.

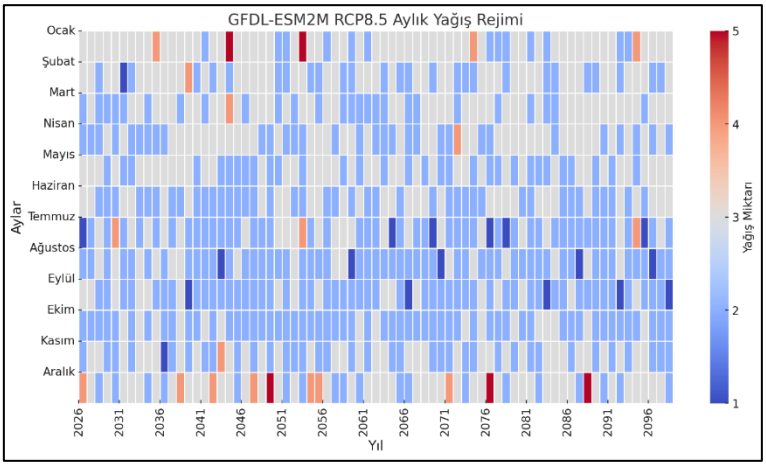
Antalya ili için gerçekleştirilen sınıflandırmada Antalya ilinde tarihsel gözlem periyodu olan 1970-2022 yıllarında aylık yağış rejimi değişimi Şekil 2'de gösterilmektedir. Tarihsel periyotta Antalya bölgesine en çok yağışın Ocak ve Aralık aylarında düştüğü, yaz aylarının ise "Şiddetli Kurak" ve "Kurak" geçtiği görülmektedir. Yoğun yağışlı olan kış aylarında yağış rejiminin genellikle çalışmada belirlenen sınıflandırmaya göre sıralı bir biçimde değiştiği görülmüş ve rejim geçişlerinin keskin olduğu durumların nadir olduğu belirlenmiştir.

Antalya ili karakteristik Akdeniz iklim tipi özelliklerini göstermektedir. Tarihsel dönem çıktıları bölgenin kış aylarında daha yüksek yağış miktarı olduğunu ve yağış rejimi geçişlerinin sulak rejimler arasında olduğunu

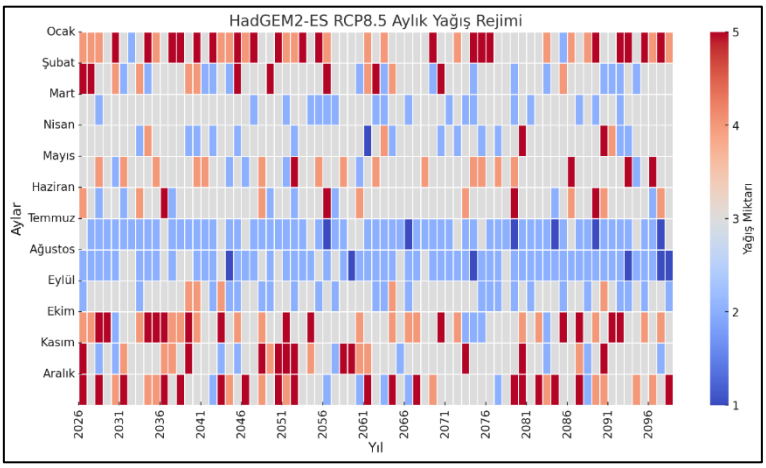
göstermiştir. Bölgede projeksiyon verisi olarak seçilen HadGEM ve GFDL veri setlerine göre yağış rejimi değişimi sırasıyla Şekil 3 ve Şekil 4'te gösterilmiştir.



Şekil 2. Antalya Tarihsel Dönem Aylık Yağış Rejimi Değişimini Gösteren Isı Haritası



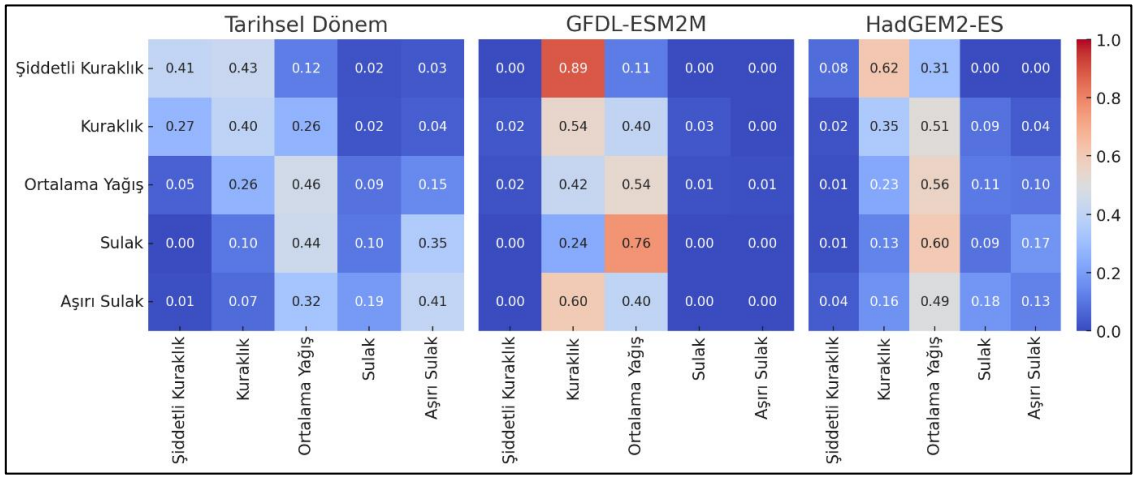
Şekil 3. Antalya GFDL-ESM2M (RCP8.5) Projeksiyon Setine Göre Gelecek Dönem Aylık Yağış Rejimi Değişimini Gösteren Isı Haritası



Şekil 4. Antalya HadGEM2-ES (RCP8.5) Projeksiyon Setine Göre Gelecek Dönem Aylık Yağış Rejimi Değişimini Gösteren Isı Haritası

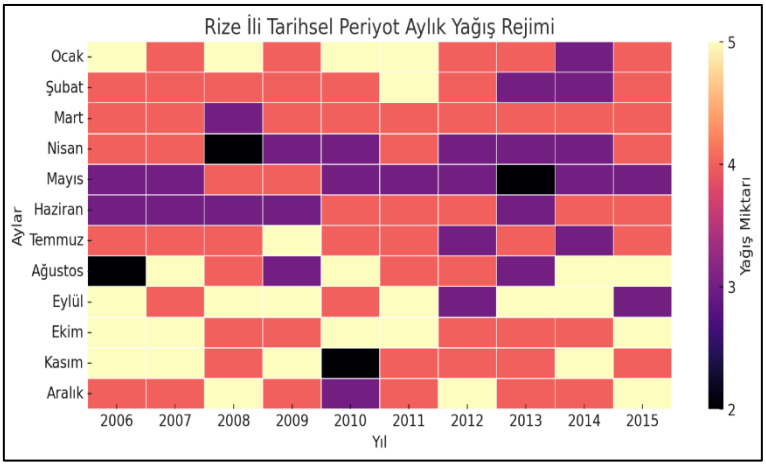
Antalya ili gelecek dönemde farklı veri setlerine göre farklı bulgular elde edilmiştir. GFDL veri seti daha kurak, HadGEM veri seti ise buna göre daha sulak bir görüntü ortaya çıkarmıştır. Her iki projeksiyon veri seti için de yağış rejimleri arasındaki şiddetli geçişler tarihsel döneme göre daha fazla gerçekleşmiştir. Tarihsel dönem ve farklı projeksiyon veri setlerine göre elde edilen gelecek dönem MZ geçiş matrisleri Şekil 5'te gösterilmiştir. Burada

matristeki düşey eksen ve yatay eksenlerin kesişimlerinde görülen sayılar ondalık olarak geçiş ihtimalini göstermektedir.

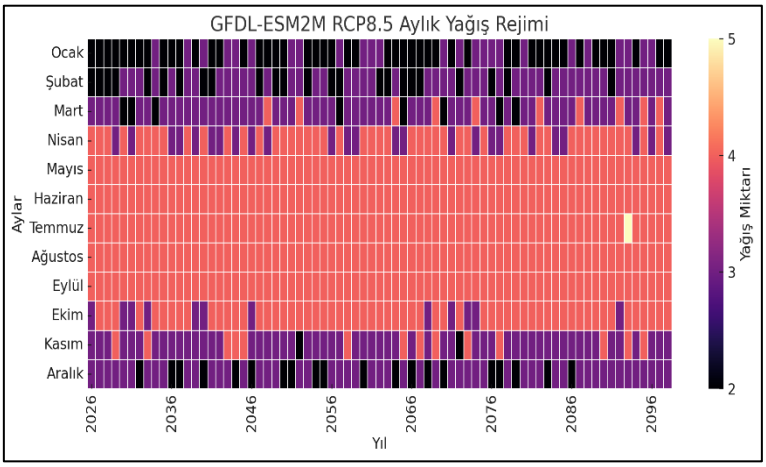


Şekil 5. Antalya Tarihsel Dönem ve Gelecek Dönem Markov Zinciri Geçiş Matrisleri

Rize ili Türkiye'nin en fazla yağış alan bölgesidir. Bu bölgede Karadeniz tipi iklim özelliği göstermesi nedeniyle yıl boyunca sürekli yağış gözlenmektedir. Bölgede tarihsel dönem olan 2006-2015 dönemi boyunca "Şiddetli Sulak" ve "Sulak" yağış rejimlerini sıklıkla yaşamıştır. Bölgede her mevsim yağış gözlense de özellikle Eylül aylarında "Şiddetli Sulak" rejim hakimdir. Tarihsel periyotta gözlenen aylık yağış rejimleri Şekil 6'da gösterilmiştir.

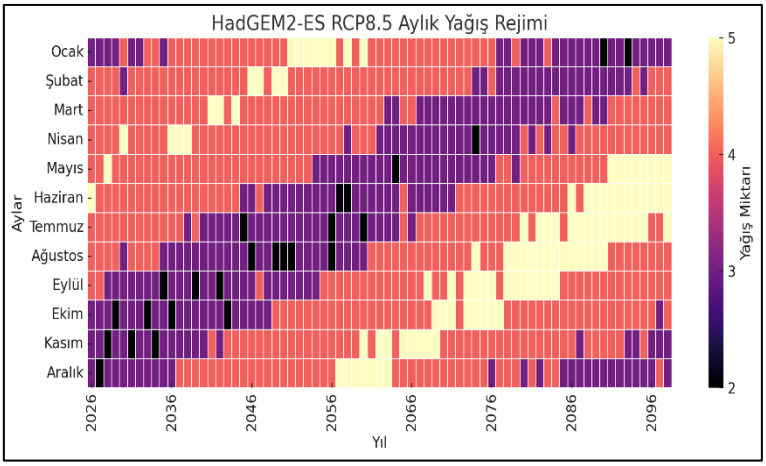


Şekil 6. Rize Tarihsel Dönem Aylık Yağış Rejimi Değişimini Gösteren Isı Haritası



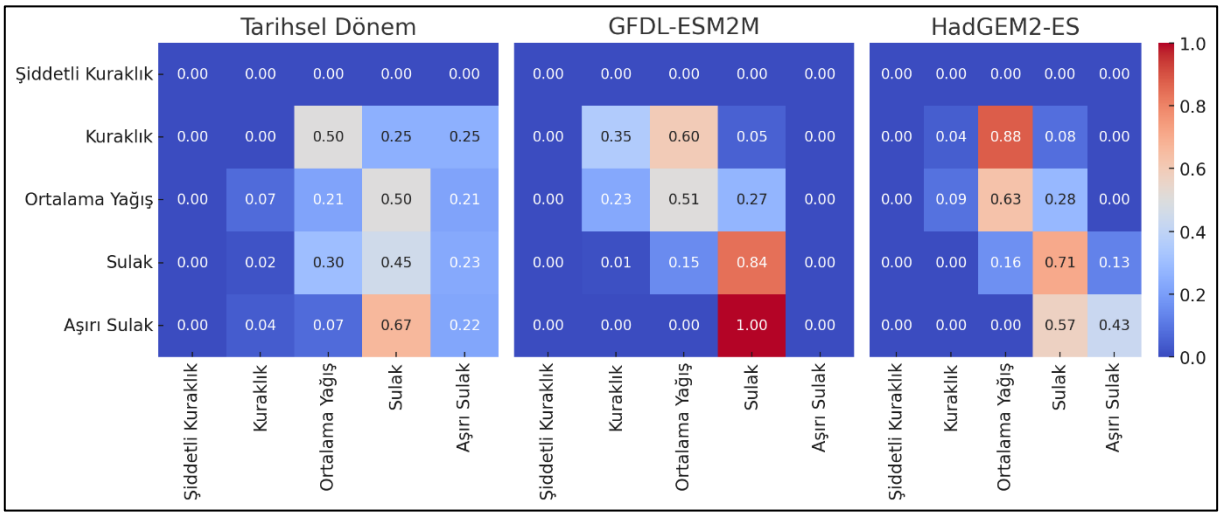
Şekil 7. Rize GFDL-ESM2M (RCP8.5) Projeksiyon Setine Göre Gelecek Dönem Aylık Yağış Rejimi Değişimini Gösteren Isı Haritası

Antalya ili için incelenen iki farklı projeksiyon veri setinin Rize ili için de incelemesi yapılmıştır. Atmosferdeki sera gazı konsantrasyonunun 2100 yılına kadar sürekli artacağını öngörmesi nedeniyle en olumsuz senaryo olan RCP8.5 etkisi altında GFDL-ESM2M ve HadGEM2-ES veri setleri için incelenen yağış rejimi değişimi grafikleri Şekil 7 ve Şekil 8'de görülmektedir.



Şekil 8. Rize HadGEM2-ES (RCP8.5) Projeksiyon Setine Göre Gelecek Dönem Aylık Yağış Rejimi Değişimini Gösteren Isı Haritası

Yağış rejimleri arasındaki geçişin anlaşılmasını kolaylaştıracak olan MZ geçiş matrisi Şekil 9'da görülmektedir. Rize ilinde yağış rejimleri arasındaki geçişlerde sınıfların sıralı bir biçimde geçtiği belirlenmiştir. Tarihsel dönemde yağış rejimleri arasındaki geçişlerin kararsız durumları projeksiyon verilerinde gözlenmemiştir.



Şekil 9. Rize Tarihsel Dönem ve Gelecek Dönem Markov Zinciri Geçiş Matrisleri

En Uygun Tahmin Modelinin Belirlenmesi

Çalışmada incelenen illerde tarihsel veriler kullanılarak aylık akış tahmini yapılmıştır. Aylık akış tahmini yapılması amacıyla hazırlanan girdi setinde Ay, Aylık Yağış Rejimi, Bir Önceki Ayın Yağış Rejimi, Aylık Toplam Yağış ve Aylık Ortalama Sıcaklık verileri yer almıştır. Tahminleyici yöntem seçiminde literatürde yaygın olarak kullanılan korelasyon katsayısı (R) ve Ortalama Hataların Karesinin Karekökü (RMSE) katsayıları kullanılmıştır. Veri setine en uygun tahmin yönteminin belirlenmesi amacıyla YSA, MARS ve CART yöntemleri kullanılarak tahminler yapılmıştır. Tahmin performansı en yüksek olan model kalibrasyonu yapılmış tahmin modeli olarak gelecek akışın tahmin edilmesi amacıyla tekrar çalıştırılmıştır.

En yüksek performans kriterini sağlayan yöntem ile oluşturulmuş modelde, gelecek periyotta karşılaşılması beklenen değerler girdi verisi olarak kullanılmış ve gelecek akış tahmini yapılmıştır. Burada yapılan akış tahminleri yağış rejimi değişiminin, sıcaklık ve toplam yağış değişiminin etkisiyle gelecekteki akış miktarlarını yansıtmaktadır. Tablo 4'te kalibrasyon aşamasında kullanılan tahminleyici yöntemlere göre performans indislerinin değeri gösterilmiştir.

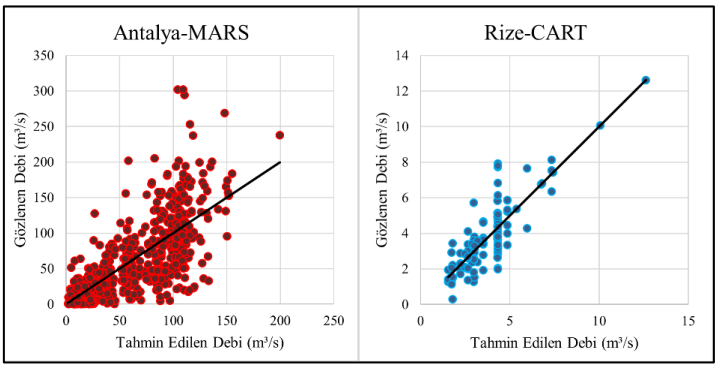
Tablo 4. Çalışma Bölgelerinde Farklı Tahmin Yöntemleriyle Geliştirilen Modellerin Performans İndisleri

Yöntem[a]	Antalya		Rize	
	R	RMSE	R	RMSE
YSA	0,679	42,445	0,692	1,406
MARS	**0,740**	**36,793**	0,523	1,655
CART	0,680	40,190	**0,843**	**1,045**

[a] En iyi modelin geliştirildiği model yapısının sonuçları koyu sembol kullanılarak gösterilmiştir.

Antalya ve Rize ili için en yüksek performans değerine ulaşan yöntemler birbirinden farklı olarak belirlenmiştir. Bu durum, bölgelerdeki Mİ istasyonu ile AGİ arasındaki topografik seviye farklılıkları, kuş uçuşu mesafe gibi doğal etkenlerin ayrıca yağış verilerindeki ani artış ve azalışlara akış verilerindeki tepkinin uyumsuzluğunun bir sonucu olarak değerlendirilebilir. Antalya'da başarılı olan MARS modelinde maxTF 45, Penalty değeri 1 ve SD değeri 1 olarak kullanılmıştır. Burada MARS modeli 45 temel fonksiyon üreterek tahmin fonksiyonu oluşturmuştur. MARS modelinde tahminde kullanılan temel fonksiyonlarda geçme sırasına göre en önemli parametreler ay (%100), Yağış (%34,20), Sıcaklık (%24,70) ve Yağış Rejimi (%17,31) olmuştur. Bu durum her yıl için 1-12 aralığında kullanılarak veri setinde periyodikliğin sağlandığı durumlarda tahmin başarısının artacağını göstermektedir.

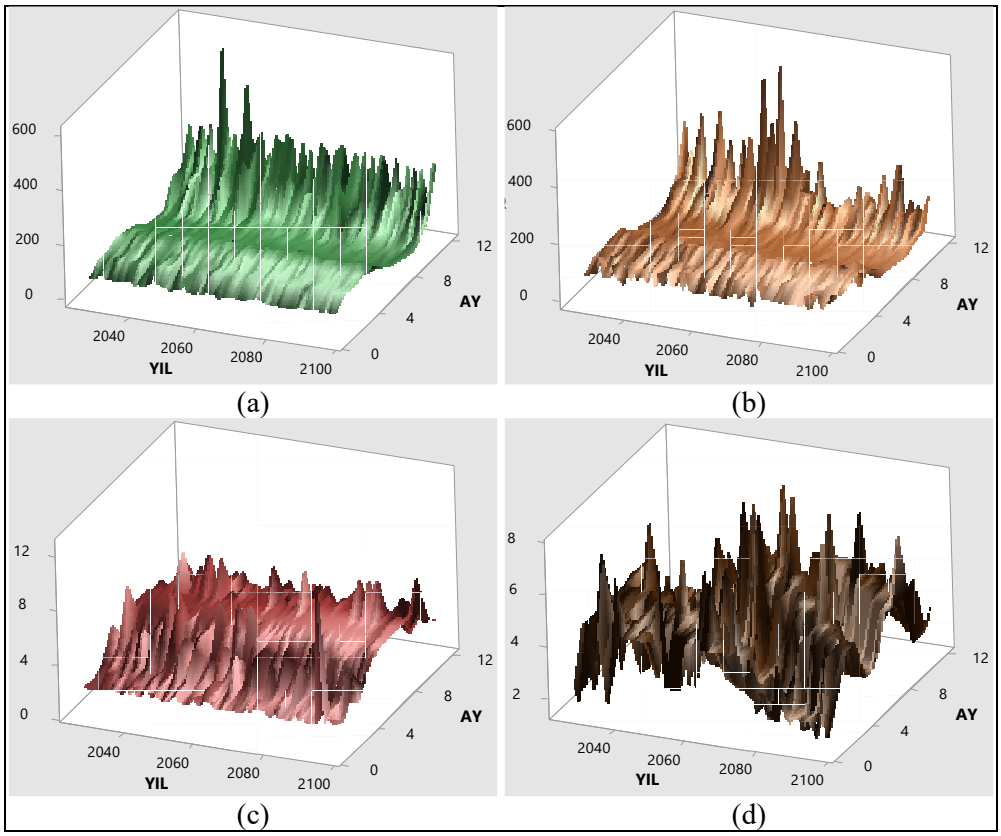
Rize ilinde başarılı olan karar ağacı modeli olan CART olmuştur. CART modelinde kategorik değişken olarak ay veri seti kullanılmıştır. Verilerin ayrı kategorilere ayrılmasında her yıl periyodik tekrar eden bu sabit değerlerin tahmin performansına olumlu katkısı olmuştur. CART modelinde sınıflandırma işlemi Gini Katsayısına göre yapılmıştır. CART modelinde karar ağacı oluştururken eksik verilerin tamamlandığı Surrogate Splits (Vekil Sayısı) 5 olarak belirlenmiştir. Böylece modelin ana bölme değişkeninde eksik verileri tamamlarken en fazla 5 vekil değişken kullanması amaçlanmıştır. CART modeli debi tahmininde modelde bölünme işleminde yaptığı katkıya göre veri seti önemi belirlenmektedir. Önem düzeyi yüksekten düşüğe doğru sırasıyla Yağış (%100), Sıcaklık (%42,46), Yağış Rejimi (%21,98), Ay (%11,57) şeklinde sıralanabilir. Rize'nin topografik yapısının ve istasyonlar arasındaki seviye farklılığının ani değişimlerin akışa yansımaması durumunun karar ağacı modelinin başarılı sonuç üretmesi konusunda etkisi olmuştur. Antalya ve Rize illerinin kalibrasyon dönemi saçılım diyagramları Şekil 10'da görülmektedir.



Şekil 10. Antalya ve Rize Kalibrasyon Dönemi Saçılım Diyagramları

Aylık Ortalama Akış Değişimi Bulguları

Farklı iklim özellikleri gösteren Antalya ve Rize için benzer koşulları taşıyan istasyonlar seçilerek GFDL-ESM2M ve HadGEM2-ES veri setlerinin zamansal ve mekânsal farklılıkları ortaya koyulmuştur. Bu amaçla her iki bölge için tarihsel veriler kullanılarak kalibre edilen tahmin modelleri kullanılarak gelecek aylık ortalama debi değerleri için tahmin yapılmıştır. Tahmin sonuçlarının gösterildiği diyagram Şekil 11'de gösterilmektedir. Tahmin modellerinin sonuçlarının tutarlılığı tarihsel veriler kullanılarak sınanmış ve çalışma alanları için güvenilir sonuçlar ürettiği görülmüştür. Antalya ili yılın belirli dönemlerinde yağış alan ve yaz aylarını kurak geçiren bir bölgedir. MARS modeli ile gerçekleştirilen tahminlerde bölgede yağışın yoğun olduğu aylarla uyumlu değişen debi değerleri görülmektedir. Bölgede özellikle kış aylarındaki yüksek akışlar dikkati çekmektedir. Rize'de yıl boyunca sürekli görülen yağış akış değerlerinin dağılımını etkilemiştir. Farklı projeksiyon veri setlerinden elde edilen akış verileri Rize ili için değişiklik göstermiştir. GFDL-ESM2M veri setine göre yapılan tahminlerde veri dağılımı zamana bağlı olarak düzenli gerçekleşmiş ve pik değerler daha az görülmüştür, HadGEM2-ES veri setine göre yapılan tahminlere göre akış değerlerindeki değişkenlik dikkat çekmektedir. Zamana bağlı olarak debi değerlerinin değişim aralığı daha geniş olmuştur.



Şekil 11. Çalışma Bölgelerine Göre Gelecek Aylık Ortalama Debi Değerlerinin Yıllara Göre Gösterimi (a) GFDL-ESM2M Veri Setine Göre Antalya Tahmini (b) HadGEM2-ES Veri Setine Göre Antalya Tahmini (c) GFDL-ESM2M Veri Setine Göre Rize Tahmini (d) HadGEM2-ES Veri Setine Göre Rize Tahmini

TARTIŞMA

Bu çalışma literatürde kapsamlı bir uygulaması olmayan, çok yönlü bir metodolojik çerçeve içerisinde yürütülmüştür. Rize ve Antalya gibi benzer özellikleri bulunan farklı enlemlerdeki kıyı bölgelerinde hem tarihsel hem de projeksiyon verilerinin dikkate alındığı yağış rejimi geçiş matrisleri MZ yöntemi kullanılarak analiz edilmiştir. Yağış rejimi bulgularının ardından MARS, YSA ve CART gibi tahmin yöntemleri kullanılarak geleceğe yönelik akış modellemeleri gerçekleştirilmiştir. Bu yönüyle çalışma yalnızca mevcut durumu tartışmakla kalmayıp iklim değişikliğinin mekânsal ve zamansal etkilerini tahmin etmeye yönelik uygulamalı ve karşılaştırmalı analizler içermektedir. Farklı enlemlerde bulunan, farklı topografik özelliklere ve iklim tipine sahip olan iki farklı bölgede yapılan çalışmaların karşılaştırmalı şekilde ele alınması projeksiyon modellerinin farklı bölgeler için seçiminde güvenirliğinin test edilmesi açısından literatüre katkı sağlamaktadır. Ayrıca çalışma kapsamında geliştirilen yöntemsel yaklaşım kıyı bölgelerinde su yönetimi konularında referans alınabilecek nitelikte bir model önerisi sunmaktadır.

Yağış sınıflandırmaları farklı yıllarda yağışın dağılımının belirlenmesi, farklı yıllardaki aylık yağış rejimleri arasındaki geçişin belirlenmesi için önemli bir indikatör olmuştur. De Luca vd. tarafından 2024 yılında yapılan araştırma iklim değişikliğinin yağış değerleri üzerinde etkin olduğunu, yağış değerlerinin iklim değişikliğinden etkilendiğini ortaya koymaktadır (De Luca vd., 2024). Yağışın iklim değişikliğine olan toleransı yıllık toplam yağış değeri yüksek olan bölgelerde kritik bir araştırma sorusu oluşturmaktadır. Çalışma bulguları Antalya ve Rize ilinde De Luca vd. tarafından 2024 yılında gerçekleştirilen araştırma bulgularına uygun olarak iklim değişikliğinin yağış rejimleri arasındaki geçişleri etkilediğini ortaya koymaktadır. Bu durum farklı modeller tarafından geliştirilen projeksiyon verilerine göre değişmektedir. Bu durum yapılacak analizlerde veri seti seçiminin çalışma bulgularını etkilediğini göstermiştir.

Antalya ilinde tarihsel dönemde yağış rejimi geçişlerinin çalışmadaki sınıflandırma sırasına uygun olduğu ve bu geçişlerin nadiren sıra atlayarak olduğu görülmektedir. Çalışmada incelenen 1970-2022 yıllarını kapsayan gözlem periyodu boyunca Antalya ilinin yağış rejiminin düzenli olduğu ve bölgenin Akdeniz iklim özelliklerini yansıttığı görülmüştür. Projeksiyon veri setlerinden elde edilen aylık yağış rejimi değişimlerinden elde edilen bulgular aynı

yılları kapsayan dönemlerde, farklı veri setlerine göre farklı sonuçlar elde edilebileceğini göstermektedir. Bu durum veri seti seçiminin önemini vurgulamakta ve Harding vd. tarafından 2012 yılında yapılan araştırma bulgularını desteklemektedir (Harding vd., 2012). Her iki projeksiyon veri setine göre yapılan değerlendirme bölgede gelecekteki yağış miktarında azalış ve buna bağlı kuraklaşma öngörmektedir. Ayrıca bölgede aylık yağış rejimleri arasındaki geçişlerin daha sert olacağını göstermektedir. Bu durum iklim değişikliğinin tarımsal faaliyetler gibi periyodik olarak düzenli su ihtiyacının olduğu sektörlerde uyum stratejilerinin geliştirilmesinin bölge için zorunluluk olduğunu ortaya koymaktadır. Ayrıca Markov Zinciri Matrisi incelendiğinde yağış rejimlerindeki geçişlerin keskinleştiği görülmektedir. Bu gibi keskin geçişlerin kurak rejimden daha sulak rejime geçiş oranının yükselmesi esnasında kurumuş toprak yüzeyinin akış katsayısını arttırarak konsantrasyon süresini kısalttığı ve bu geçiş durumlarında taşkın riskinin yükselmesi durumunun araştırılmasını gerekli kılmaktadır. Knapp vd tarafından 2015 yılında yapılan araştırma bulguları bu durumu desteklemektedir (Knapp vd., 2015).

Rize ili Türkiye'nin en fazla yağış alan bölgesi konumundadır. Bölgede yağış rejimi tarihsel periyotta Karadeniz iklim tipine uygun bir patern sergilemiştir. Bölgede Eylül ayı itibari ile "Aşırı Sulak" yağış rejimi başlamakta ve bölgede genel olarak yağışlar bölge ortalama değerinin üzerinde gerçekleşmektedir. Bölgede çok nadir olarak "Kurak" rejim gözlenmektedir. Bu durum bölgenin taşkın riski barındırdığını ve mevcut durumda su stresi yaşanması durumunun beklenmediğini göstermektedir. İklim modellerinde RCP8.5 emisyon senaryosu en olumsuz durumu yansıtmaktadır. Bölgede RCP8.5 etkisi altında incelenen projeksiyon veri setlerine göre farklı yağış rejimleri tespit edilmiştir. GFDL-ESM2M modeli bölgede Ocak ve Aralık aylarında "Kurak" rejim gözleneceğini ve "Aşırı Sulak" rejimin hemen hemen hiç gözlenmeyeceğini göstermiştir. Bu durum yaşanacak iklim değişikliği etkilerinin, bölgede yıllık toplam yağış miktarında kısmen artışa ve aylık "Aşırı Sulak" geçişlerinde azalmaya neden olacağını ve bölgede aşırı yağışa bağlı erozyon ve heyelan gibi felaketlerin sıklığının artabileceğini göstermektedir. Aşırı yağışların heyelan ve erozyon riskinin artışına neden olduğu Wang vd., tarafından 2025 yılında yapılan araştırma ile ortaya konulmuştur (Wang vd., 2025). HadGEM2-ES veri setinde ise yağış rejimlerinde yıllık olarak bir ötelenme öngörülmüş ve GFDL-ESM2M veri setine göre "Aşırı Sulak" rejimin yaygınlaştığı tespit edilmiştir. Bu model çıktıları bölgede heyelan ve erozyon riskinin yanında taşkın riskinin de yüksek olabileceğini düşündürmüştür. MZ geçiş matrisi Rize ilinde tarihsel periyotta yağış rejimlerindeki geçişlerin daha fazla ihtimalli olduğunu göstermektedir. Projeksiyon verileri ile incelenen gelecek dönemde ise yağış rejimlerindeki geçişlerin genellikle sınıf sıralamasına uyumlu olduğu görülmüştür. Bu durum iklim değişikliği etkisinin yağışlar üzerinde istatistiksel olarak anlamlı etkisini ortaya koymaktadır.

Antalya ve Rize illeri farklı iklim tiplerinin özelliklerini göstermiş olmasına rağmen benzer hidrolojik zorluklar ile karşı karşıya kalmaktadır. Tarihsel dönem analizleri her iki ilin iklim tipine uygun karakteristik yağış rejimi olduğunu göstermiştir. Bölgelerde farklı projeksiyon veri setleri kullanılarak yapılan incelemelere göre bölgelerde iklim değişikliğinin yağışlar üzerinde istatistiksel olarak anlamlı etkisi görülmüştür. Bu etkinin yağış rejimleri arasında keskin geçişlere neden olabileceği ve bu geçişlerin kuraklık durumundan aşırı sulak duruma geçişlerde taşkın riskini arttırması beklenmektedir. Yıl boyunca toplam yağış miktarı daha yüksek olan Rize'de aşırı yağışların ve keskin yağış rejimi geçişlerinin etkisi, topografik engebenin yüksekliğiyle birlikte heyelan riskini arttıracaktır. Antalya'da en önemli ekonomik faaliyet olan tarım üzerinde keskin yağış rejimi geçişlerinin erozyon etkisi göstereceği ve verimli yüzey tabakasına zarar vererek tarımsal üretimi etkilemesi beklenmektedir. Yağış rejimi incelenen iki ilde de projeksiyon veri setinin farklı sonuçlara ulaştırdığı görülmüş olup, iklim ile ilgili yapılacak çalışmalarda tek bir veri seti ile çalışmanın bu anlamda güvenilir olmayacağı görülmüştür.

Antalya ve Rize illerinde farklı yöntemlerin tahminleyici olarak en yüksek performans değerine eriştiği belirlenmiştir. Antalya ili için MARS modeli, Rize ili için CART modeli en yüksek performans değerine erişmiştir. Bölgelerdeki veri dağılımı incelendiğinde bu farklılığın bölgelerdeki farklı topografik yapı kaynaklı olduğu düşünülmektedir. Antalya ili için kıyıda bulunan Mİ'dan AGİ arasındaki kuş uçuşu mesafe yaklaşık 4 km, Rize ilinde kıyıda bulunan Mİ'dan AGİ'ye kadar olan kuş uçuşu mesafe yaklaşık 11 km dolaylarındadır. Bölgelerin topografik yapısı gereği Rize ilinde Mİ ile AGİ arasındaki topografik seviye farkı fazladır. Bu durum Mİ konumunda kaydedilen yağışlara AGİ konumundaki tepkinin gecikmesi ve bazı durumlarda görülmemesi olarak ortaya çıkmıştır. Bu nedenle Rize bölgesindeki tahminlerin, tahmin fonksiyonu oluşturan MARS ve YSA gibi yöntemler ile değil, karar ağacı gibi veri setine göre kuralların oluşturulduğu CART yöntemiyle daha başarılı olduğu görülmüştür.

Gelecek akış tahminlerinden elde edilen sonuçların güvenirliği kalibrasyon aşamasında sınanmış olduğundan tahmin modellerinin sonuçları kabul edilebilir çıktılar oluşturmuştur. Antalya ilinde projeksiyon veri setlerinden elde edilen debi değerleri arasındaki farklılık düşük olarak gözlenmiştir. Ancak Rize'de yapılan tahmin çıktıları iki veri setine

göre yapılan tahmin bulgularının birbirinden farklı değişime sahip olduğunu göstermektedir. Rize ilinde meteorolojik veriler ile akış verilerinin gözlem istasyonları arasındaki kuş uçuşu mesafenin fazla olması, yağış değişikliklerine karşı mekânsal topografik engeller neticesinde hızlı akış tepkisi ölçülmemesi model tutarlılığını etkilemiştir. Antalya bölgesine göre farklı sonuçlar elde edilmesindeki esas nedenin topografik yapı ve yağışa karşı hızlı gelişen akış tepkisi olduğu söylenebilir. Ayrıca indirgenmiş projeksiyon verilerinin Rize gibi yüksek engebeli topografyalarda istatistiksel olarak yaptıkları ön kabuller ve enterpolasyon adımlarının projeksiyon verilerinin tutarlılığını etkilediği düşünülmektedir. Antalya bölgesi Rize'ye göre daha az engebeye sahiptir ve projeksiyon verilerinin birbiri arasındaki tutarlılık projeksiyon verilerindeki mekânsal değişkenliğin topografik etkenlere bağlı olduğu durumunun daha kolay gözlenmesini sağlamaktadır.

SONUÇ

Bu çalışma, iklim değişikliğinin Türkiye'nin en fazla yağış alan kıyı bölgeleri olan Rize ve Antalya'da yağış rejimi ve akış dinamiklerine etkisini ortaya koymaktadır. Sonuçlar, yağış rejimlerinin gelecekte keskin geçişler göstereceğini ve bu durumun su kaynakları yönetimi, tarımsal faaliyetler ve taşkın riskleri açısından kritik sonuçlar doğuracağını göstermektedir. Antalya'da yağış miktarında dalgalanmalar nedeniyle kuraklık ve aşırı yağışlar arasında sert geçişler yaşanması beklenirken, Rize'de yoğun yağışlara bağlı olarak heyelan ve taşkın riskleri artacaktır. Yapay zekâ tabanlı tahmin modelleri, özellikle MARS ve CART yöntemleri, gelecekteki akış rejimlerini başarılı şekilde tahmin etmiştir. Farklı projeksiyon veri setlerinin bölgelerde farklı sonuçlar üretebileceği bu çalışma ile görülmüştür. Ayrıca projeksiyon veri setleri kullanılarak geliştirilen akış tahmin modellerinde AGİ ile Mİ arasındaki mekânsal ve topografik farklılıkların fazla olmasının tahmin performansını önemli ölçüde etkilediği görülmüştür. Bu çalışma farklı projeksiyon verilerinin bölgesel risk analizlerinde ne kadar önemli olduğunu göstermiştir. Bu çalışma, kıyı bölgelerinde iklim değişikliğine bağlı hidrolojik etkilerin anlaşılması ve uyum politikalarının geliştirilmesi açısından önemli bir bilimsel yol haritası sunmaktadır. Sonuçlar hem akademik araştırmalar hem de karar vericiler için gelecekteki su yönetimi stratejilerini şekillendirecek niteliktedir.

KAYNAKLAR

Aktürk, G., & Hauser, S. J. (2021). Detection of disaster-prone vernacular heritage sites at district scale: the case of Fındıklı in Rize, Turkey. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 58, 102238. https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2021.102238

Ali, M. H., Biswas, P., Hassan, M. Q., & Islam, M. A. (2025). Clımate Change and Its Impacts on Hydrologıcal Regımes Over the Bengaldelta. *Results in Engineering*, 103861.

Atalay, I., Efe, R., & Ozturk, M. (2014). Effects of Topography and Climate on the Ecology of Taurus Mountains in the Mediterranean Region of Turkey. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 120, 142-156. https://doi.org/10.1016/J.SBSPRO.2014.02.091.

Babacan, H. T., & Yüksek, Ö. (2024). Investigation of climate change impacts on daily streamflow extremes in Eastern Black Sea Basin, Turkey. *Physics and Chemistry of the Earth*, Parts A/B/C, 134, 103599. https://doi.org/10.1016/j.pce.2024.103599

Babacan, H. T., & Yüksek, Ö. (2024). Investigation of climate change impacts on daily streamflow extremes in Eastern Black Sea Basin, Turkey. *Physics and Chemistry of the Earth*, Parts A/B/C, 134, 103599. https://doi.org/10.1016/j.pce.2024.103599

Babacan, H. T., Yüksek, Ö., & Saka, F. (2022). Yapay zeka ve sezgisel regresyon yöntemlerinin yağış-akış modellemesi için performans değerlendirmesi: Aksu Deresi için bir uygulama. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 11(3), 744-751. https://doi.org/10.28948/ngumuh.1079616

Bartens, A., Shehu, B., & Haberlandt, U. (2024). Flood frequency analysis using mean daily flows vs. instantaneous peak flows. *Hydrology and Earth System Sciences*, 28(7), 1687-1709. https://doi.org/10.5194/hess-28-1687-2024

Bhuyan, M. D. I., Islam, M. M., & Bhuiyan, M. E. K. (2018). A trend analysis of temperature and rainfall to predict climate change for northwestern region of Bangladesh. *American Journal of Climate Change*, 7(2), 115-134.

Bola, G. B., Tshimanga, R. M., Neal, J., Trigg, M. A., Hawker, L., Lukanda, V. M., & Bates, P. (2022). Understanding flood seasonality and flood regime shift in the Congo River Basin. *Hydrological Sciences Journal*, 67(10), 1496-1515. https://doi.org/10.1080/02626667.2022.2083966

Breiman, L., Friedman, J., Olshen, R. A., & Stone, C. J. (2017). Classification and regression trees. Routledge. https://doi.org/10.1201/9781315139470

Cheng, T., Xu, Z., Yang, H., Hong, S., & Leitao, J. P. (2020). Analysis of effect of rainfall patterns on urban flood process by coupled hydrological and hydrodynamic modeling. *Journal of Hydrologic Engineering*, 25(1), 04019061. https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001867

Dang, C., Shao, Z., Huang, X., Qian, J., Cheng, G., Ding, Q., & Fan, Y. (2022). Assessment of the importance of increasing temperature and decreasing soil moisture on global ecosystem productivity using solar-induced chlorophyll fluorescence. *Global Change Biology*, 28, 2066–2080. https://doi.org/10.1111/gcb.16043

Danladi Bello, A.-A., Hashim, N. B., & Mohd Haniffah, M. R. (2017). Predicting Impact of Climate Change on Water Temperature and Dissolved Oxygen in Tropical Rivers. *Climate*, 5(3), 58. https://doi.org/10.3390/cli5030058

De Luca, D. L., Ridolfi, E., Russo, F., Moccia, B., & Napolitano, F. (2024). Climate change effects on rainfall extreme value distribution: the role of skewness. *Journal of Hydrology*, 634, 130958. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.130958

Demircan, M., Gürkan, H., Eskioğlu, O., Arabacı, H., vd. (2017). Climate Change Projections for Turkey: Three Models and Two Scenarios. *Turkish Journal of Water Science and Management*, 1(1), 22-43. https://doi.org/10.31807/tjwsm.297183

Demirtaş, M. (2016). The October 2011 devastating flash flood event of Antalya: triggering mechanisms and quantitative precipitation forecasting. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 142(699), 2336-2346. https://doi.org/10.1002/qj.2827

Dhamodaran, S., & Lakshmi, M. (2020). Comparative analysis of spatial interpolation with climatic changes using inverse distance method. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 12, 6725-6734. https://doi.org/10.1007/s12652-022-04128-w.

Du, J., Wu, X., Wang, Z., Li, J., & Chen, X. (2020). Reservoir-Induced Hydrological Alterations Using Ecologically Related Hydrologic Metrics: Case Study in the Beijiang River, China. *Water*. https://doi.org/10.3390/w12072008.

Farzin, S., Anaraki, M. V., Kadkhodazadeh, M., & Morshed-Bozorgdel, A. (2025). Novel methodology for prediction of missing values in River flow based on convolution neural networks: Principles and application in Iran country. *Physics and Chemistry of the Earth*, Parts A/B/C, 103875. https://doi.org/10.1016/j.pce.2025.103875

Filho, G., Coelho, V., Freitas, E., Xuan, Y., & Almeida, C. (2020). An improved rainfall-threshold approach for robust prediction and warning of flood and flash flood hazards. *Natural Hazards*, 105, 2409 - 2429. https://doi.org/10.1007/s11069-020-04405-x.

Friedman, J. H. (1991). Multivariate adaptive regression splines. *The annals of statistics*, 19(1), 1-67.

Grimm, N., Chapin, S., Bierwagen, B., Gonzalez, P., Groffman, P., Luo, Y., Melton, F., Nadelhoffer, K., Pairis, A., Raymond, P., Schimel, J., & Williamson, C. (2013). The impacts of climate change on ecosystem structure and function. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 11, 474-482. https://doi.org/10.1890/120282.

Harding, B. L., Wood, A. W., & Prairie, J. R. (2012). The implications of climate change scenario selection for future streamflow projection in the Upper Colorado River Basin. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16(11), 3989-4007. https://doi.org/10.5194/hess-16-3989-2012

Haywood, J. M., Jones, A., & Jones, G. S. (2014). The impact of volcanic eruptions in the period 2000–2013 on global mean temperature trends evaluated in the HadGEM2-ES climate model. *Atmospheric Science Letters*, 15(2), 92-96. https://doi.org/10.1002/asl2.471.

Humphrey, G. B., Gibbs, M. S., Dandy, G. C., & Maier, H. R. (2016). A hybrid approach to monthly streamflow forecasting: integrating hydrological model outputs into a Bayesian artificial neural network. *Journal of Hydrology*, 540, 623-640. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.06.026

Knapp, A. K., Hoover, D. L., Wilcox, K. R., Avolio, M. L., Koerner, S. E., La Pierre, K. J., ... & Smith, M. D. (2015). Characterizing differences in precipitation regimes of extreme wet and dry years: implications for climate change experiments. *Global change biology*, 21(7), 2624-2633. https://doi.org/10.1111/gcb.12888

Konrad, C. P., Booth, D. B., & Burges, S. J. (2005). Effects of urban development in the Puget Lowland, Washington, on interannual streamflow patterns: Consequences for channel form and streambed disturbance. *Water resources research*, 41(7). https://doi.org/10.1029/2005WR004097

Koutný, L., Skoupil, J., & Veselý, D. (2014). Physical Characteristics Affecting the Infiltration of High Intensity Rainfall into a Soil Profile. *Soil & Water Research*, 9(3).

Kundu, S., Khare, D., & Mondal, A. (2017). Interrelationship of rainfall, temperature and reference evapotranspiration trends and their net response to the climate change in Central India. *Theoretical and Applied Climatology*, 130, 879-900.

Leventeli, Y. (2011). Potential Human Impact on Coastal Area, Antalya—*Turkey. Journal of Coastal Research*, (61), 403-407. https://doi.org/10.2112/SI61-001.48

Li, X., Tan, L., Li, Y., Qi, J., Feng, P., Li, B., ... & Chen, Y. (2022). Effects of global climate change on the hydrological cycle and crop growth under heavily irrigated management–A comparison between CMIP5 and CMIP6. *Computers and Electronics in Agriculture*, 202, 107408.

Lin, L., Lonla, P. Y., Vijayakumar, J., Khan, M. K., Di Emidio, G., Krekelbergh, N., ... & Cornelis, W. (2025). Soil surface properties and infiltration response to crust forming of a sandy loam and silt loam. *Soil and Tillage Research*, 248, 106440.

Liu, Y., Jia, Z., Ma, X., Wang, Y., Guan, R., Guan, Z., Gu, Y., & Zhao, W. (2022). Analysis of Drought Characteristics Projections for the Tibetan Plateau Based on the GFDL-ESM2M Climate Model. *Remote Sensing*, 14(20), 5084. https://doi.org/10.3390/rs14205084.

Lu, J., Jia, L., Menenti, M., Zheng, C., Hu, G., & Ji, D. (2025). The impacts of drought on water availability: spatial and temporal analysis in the Belt and Road region (2001–2020). *International Journal of Digital Earth*, 18(1), 2449706.

Mendoza, P., Clark, M., Mizukami, N., Gutmann, E., Arnold, J., Brekke, L., & Rajagopalan, B. (2016). How do hydrologic modeling decisions affect the portrayal of climate change impacts?. *Hydrological Processes*, 30, 1071 - 1095. https://doi.org/10.1002/hyp.10684.

Norris, J.R., (1997). Markov Chains. Cambridge: Cambridge University Press (Cambridge Series in Statistical and Probabilistic Mathematics). ISBN 9780511810633, https://doi.org/10.1017/CBO9780511810633

Ouarda, T. B., Charron, C., Kumar, K. N., Marpu, P. R., Ghedira, H., Molini, A., & Khayal, I. (2014). Evolution of the rainfall regime in the United Arab Emirates. *Journal of Hydrology*, 514, 258-270. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.04.032

Piacentini, T., Galli, A., Marsala, V., & Miccadei, E. (2018). Analysis of soil erosion induced by heavy rainfall: A case study from the NE Abruzzo Hills Area in Central Italy. *Water*, 10(10), 1314. https://doi.org/10.3390/w10101314

Piguet, E., Pécoud, A., & De Guchteneire, P. (2011). Migration and climate change: An overview. *Refugee Survey Quarterly*, 30(3), 1-23.

Polson, D., Hegerl, G., & Solomon, S. (2016). Precipitation sensitivity to warming estimated from long island records. *Environmental Research Letters*, 11. https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/7/074024.

Reis, S. (2008). Analyzing land use/land cover changes using remote sensing and GIS in Rize, North-East Turkey. *Sensors*, 8(10), 6188-6202. https://doi.org/10.3390/s8106188

Rind, D., Rosenzweig, C., Rosenzweig, C., Goldberg, R., & Goldberg, R. (1992). Modelling the hydrological cycle in assessments of climate change. *Nature*, 358, 119-122. https://doi.org/10.1038/358119A0.

Ross, S., (2014) Introduction to Probability Models (Eleventh Edition), Academic Press, Pages 183-276, ISBN 9780124079489, https://doi.org/10.1016/B978-0-12-407948-9.00004-9.

Sayat, A., Lyazzat, M., Elmira, T., Gaukhar, B., & Gulsara, M. (2025). Assessment of the impacts of climate change on drought intensity and frequency using SPI and SPEI in the Southern Pre-Balkash region, Kazakhstan. *Watershed Ecology and the Environment*, 7, 11-22.

Sharma, P., Singh, S., & Sharma, S. D. (2022). Artificial neural network approach for hydrologic river flow time series forecasting. *Agricultural Research*, 11(3), 465-476. https://doi.org/10.1007/s40003-021-00585-5

Skendžić, S., Zovko, M., Živković, I. P., Lešić, V., & Lemić, D. (2021). The Impact of Climate Change on Agricultural Insect Pests. *Insects*, 12(5), 440. https://doi.org/10.3390/insects12050440

Tam, T. H., Abdul Rahman, M. Z., Harun, S., Shahid, S., Try, S., Jamal, M. H., ... & Abdul Wahab, Y. F. (2025). Flood hazard assessment using design rainfall under climate change scenarios in the Kelantan River Basin, Malaysia. *International Journal of Disaster Resilience in the Built Environment*, 16(1), 1-19.

URL-1: https://data.tuik.gov.tr/Kategori/GetKategori?p=tarim-111 Erişim Tarihi: 01.02.2025

Wang, J., Yang, X., Tao, Z., & Shen, F. (2025). Failure characteristics and instability mechanism of the Hengshanbei catastrophic high-locality landslide in Guangdong, China. *Natural Hazards*, 1-21. https://doi.org/10.1007/s11069-025-07158-7

Wang, W., Van Gelder, P. H., Vrijling, J. K., & Ma, J. (2006). Forecasting daily streamflow using hybrid ANN models. *Journal of Hydrology*, 324(1-4), 383-399. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.09.032

Wu, C. L., & Chau, K. W. (2010). Data-driven models for monthly streamflow time series prediction. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 23(8), 1350-1367. https://doi.org/10.1016/j.engappai.2010.04.003

Y. Lu, T. Ye and J. Zheng, (2022). Decision Tree Algorithm in Machine Learning, IEEE International Conference on Advances in Electrical Engineering and Computer Applications (AEECA), Dalian, China, 2022, pp. 1014-1017, doi: 10.1109/AEECA55500.2022.9918857.

Yılmaz, E. (2018). Türkiye'de aylık yağış eğilimleri, yağış kaymaları ve yağış Eğilim Rejimleri (1971-2010)(Monthly Precipitation Trends, Precipitation Temporal Shifts and Precipitation Trends Regimes in Turkey (1971–2010)). *Journal of Human Sciences*, 15(4), 2066-2091. https://doi.org/10.14687/jhs.v15i4.5479

Yılmaz, M., & Terzi, F. (2020). Characteristics of spatio-temporal urban growth patterns due to the driving forces of urbanization: The Coastal City of Antalya, Turkey. *International Review for Spatial Planning and Sustainable Development*, 8(3), 16-33. https://doi.org/10.14246/irspsd.8.3_16

Yin, Z., Feng, Q., Wen, X., Deo, R. C., Yang, L., Si, J., & He, Z. (2018). Design and evaluation of SVR, MARS and M5Tree models for 1, 2 and 3-day lead time forecasting of river flow data in a semiarid mountainous catchment. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 32, 2457-2476. https://doi.org/10.1007/s00477-018-1585-2

Zhang, H., Liu, G., Zhao, C., Zhang, L., Zhang, Q., Fu, H., & Cao, S. (2023). Loess erosion change modeling during heavy rainfall. *International Journal of Sediment Research*, 38(1), 24-32. https://doi.org/10.1016/j.ijsrc.2022.08.004

Zhang, P., Sun, W., Xiao, P., Yao, W., & Liu, G. (2022). Driving Factors of Heavy Rainfall Causing Flash Floods in the Middle Reaches of the Yellow River: A Case Study in the Wuding River Basin, China. *Sustainability*, 14(13), 8004. https://doi.org/10.3390/su14138004

KSÜ Mühendislik Bilimleri Dergisi, 28(2), 2025
Araştırma Makalesi

KSU J Eng Sci, 28(2), 2025
Research Article

Kahramanmaras Sutcu Imam University
Journal of Engineering Sciences

Geliş Tarihi : 18.03.2025
Kabul Tarihi :30.05.2025

Received Date : 18.03.2025
Accepted Date : 30.05.2025

SOĞUKTA ŞEKİL VERİLMİŞ ÇELİK GÖVDE DELİKLİ KESİTLERİN BURKULMA KAPASİTELERİNİN FARKLI YAKLAŞIMLARLA İNCELENMESİ

BUCKLING CAPACITY OF COLD-FORMED STEEL SECTIONS WITH WEB HOLES USING DIFFERENT APPROACHES

Ramazan ORUÇ[1] (ORCID: 0000-0002-1650-4145)

[1] Aksaray Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Aksaray, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Ramazan Oruç, ramazanoruc@aksaray.edu.tr

ÖZET

Bu çalışma, gövde delikli soğukta şekil verilmiş çelik kesitlerin eğilme etkisi altındaki burkulma davranışını incelemektedir. Delikli kesitler, elektrik, su ve havalandırma sistemleri için gerekli boşlukları sağlamak amacıyla yapısal uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak bu delikler, kesitin mekanik özelliklerini ve burkulma davranışını önemli ölçüde etkilemektedir. Bu kapsamda, delik yüksekliği, delik uzunluğu ve kesit yüksekliği gibi değişkenler dikkate alınarak, CUFSM programı kullanılarak deliksiz ve delikli kesitler için elastik burkulma analizleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca, farklı yaklaşımların lokal ve distorsiyonel burkulma kapasitelerini tahmin etmedeki etkinliği karşılaştırılmıştır. Elde edilen sonuçlar, delik yüksekliği ve delik uzunluğunun burkulma kapasitesi üzerinde önemli bir etkisi olduğunu göstermektedir. Özellikle delik uzunluğunun 80 mm'yi aşması durumunda, lokal burkulma kapasitesinin arttığı, ancak distorsiyonel burkulma kapasitesinin azaldığı belirlenmiştir. Ayrıca, farklı yöntemlerin karşılaştırılması sonucunda, Moen ve Schafer tarafından geliştirilen yaklaşımının standart hesaplamalarla benzer sonuçlar verdiği, buna karşın bazı diğer yöntemlerin lokal burkulma kapasitesini yüksek, distorsiyonel burkulma kapasitesini ise düşük tahmin ettiği tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: CUFSM, elastik burkulma analizi, hesaplama yöntemleri, soğukta şekil verilmiş çelik.

ABSTRACT

This study examines the buckling behavior of cold-formed steel sections with web holes under bending. Perforated sections are widely used in structural applications to accommodate openings for electrical, plumbing, and ventilation systems. However, these holes significantly affect the section's mechanical properties and buckling behavior. Elastic buckling analyses were conducted for both perforated and non-perforated sections using CUFSM, considering variables such as hole height, hole length, and section height. Additionally, the effectiveness of different approaches in predicting local and distortional buckling capacities was compared. The results indicate that hole height and hole length significantly influence buckling capacity. In particular, when the hole length exceeds 80 mm, local buckling capacity increases, while distortional buckling capacity decreases. Furthermore, comparison of different methods revealed that the approach developed by Moen and Scahfer produced results similar to standart approaches, whereas some other methods tended to overestimate the local buckling capacity and underestimate the distortional buckling capacity.

Keywords: CUFSM, Elastic buckling analysis, calculation methods, cold-formed steel.

ToCite: ORUÇ, R., (2025). SOĞUKTA ŞEKİL VERİLMİŞ ÇELİK GÖVDE DELİKLİ KESİTLERİN BURKULMA KAPASİTELERİNİN FARKLI YAKLAŞIMLARLA İNCELENMESİ. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 28(2), 1036-1048.

GİRİŞ

Soğukta şekil verilmiş çelik kesitler hafiflikleri, yüksek mukavemet/ağırlık oranları ve esnek üretim süreçleri nedeniyle modern mühendislik uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu kesitler özellikle depolama sistemleri, endüstriyel yapılar, prefabrik yapılar ve hafif çelik çerçeve sistemleri gibi birçok alanda tercih edilmektedir. Ancak, bu kesitlerin ince cidarlı olması ve karmaşık kesit geometrileri burkulma davranışlarını önemli ölçüde etkilemekte ve tasarım sürecinde dikkate alınması gerekmektedir. Soğukta şekil verilmiş çelik kesitlerde burkulma global, lokal, distorsiyonel ve bu burkulma modlarının birbiri ile etkileşimi şeklinde olabilmektedir.

Yapısal verimliliği artırmak ve malzeme kullanımını optimize etmek amacıyla soğukta şekil verilmiş çelik delikli kesitler kullanılmaktadır. Bu kesitler özellikle elektrik, su ve havalandırma sistemleri için gerekli açıklıkların sağlanmasında büyük avantajlar sunmaktadır. Kesitlerde yer alan bu delikler gövde veya başlık bölgesinde bulunabilmekte ve geometrileri itibariyle de dikdörtgen, kare ve dairesel formlarda olabilmektedir. Öte yandan, kesitlerde açılan delikler kesitin mekanik özelliklerini ve burkulma davranışını etkilemektedir. Delikler kesitin efektif alanını azaltmasıyla birlikte kesitin burkulma modlarını ve kritik burkulma yüklerini değiştirebilmektedir (Moen & Shafer, 2006; Moen & Schafer, 2008; Grey & Moen, 2011). AISI S100 standardına göre, deliklerin kesit davranışı üzerindeki etkilerine dair bazı temel kurallar benimsenmiştir. Buna göre, dikdörtgen veya uzunlamasına delikler, kare ve dairesel deliklere kıyasla lokal burkulma dayanımını daha fazla azaltmakta; gövde delikleri ise distorsiyonel burkulma dayanımını her zaman olumsuz yönde etkilemektedir. Ayrıca, deliklerin global burkulma kapasitesini daima azalttığı ve eleman boyunca delik sayısı arttıkça yapısal dayanımın da orantılı olarak azaldığı kabul edilmektedir. Ayrıca, AISI S100, AS/NZS 4600 ve Eurocode EN 1993-1-3 gibi standartlar, soğukta şekil verilmiş çelik kesitlerin lokal, distorsiyonel ve global burkulma kapasitelerinin hesaplanması için yöntemler sunmaktadır. Ancak delikli kesitlerin burkulma kapasiteleri için AISI S100 ve AS/NZS 4600 standartları tarafından çözüm yöntemleri sunulurken Eurocode EN 1993-1-3 standardında böyle bir çözüm yöntemi mevcut değildir.

Soğukta şekil verilmiş delikli elemanların burkulma davranışının incelenmesi birçok araştırmacının ilgisini çekmiş ve günümüzde ise halen araştırmacılar tarafından etraflıca araştırılmaya devam etmektedir. Literatürde soğukta şekil verilmiş delikli elemanlar ile ilgili yapılan deneysel, nümerik ve analitik çalışmalar mevcuttur. (Moen & Schafer, 2009), delikli kolon ve kirişlerde elastik kritik global, lokal ve distorsiyonel burkulma yüklerinin hesaplanabilmesi için basitleştirilmiş bir yöntem sunmuştur. (Moen & Schafer, 2010), gövde delikli kiriş elemanlarda global, lokal ve distorsiyonel burkulma şekilleri için kritik elastik burkulma momentlerinin hesaplanmasına yönelik yaklaşımlar dikkate alınmıştır. (Yu, 2012), dairesel delikli plakaların ve C kesitli elemanların stabilitesini sonlu elemanlar yöntemiyle analiz etmiştir. (Moen et. al., 2013) tarafından yapılan çalışmada gövdesinde dikdörtgen delik bulunan soğukta şekil verilmiş C kesitli eğilme elemanlarının davranışını incelemek için deneysel çalışma yürütülmüştür. (Wang & Young, 2015) gövdesi dairesel delikli yapma kesitlerin (build-up) eğilme davranışının incelenmesi amaçlanmış ve deneysel çalışmalar yürütülerek DSM yöntemi için öneriler sunulmuştur ardından (Wang & Young, 2017) bu çalışmayı parametrik analizlerle desteklemiştir. (Yuan et. al., 2017) gövdesi dairesel delikli C kesitlerin distorsiyonel burkulma davranışlarının incelenmesi için nümerik ve analitik çalışmalar gerçekleştirilmiştir. (Zhao et. al., 2019) gövde delikli C kesitlerin eğilme davranışını deneysel ve nümerik olarak araştırmıştır. (Pham et. al., 2020) tarafından yürütülen çalışma ile gövdesi dikdörtgen ve kanallı delikli C kesitlerin kesme yükü etkisinin incelenmesi deneysel olarak gerçekleştirilmiştir. (Chen et. al, 2020), takviyeli gövde deliklerinin C kesitlerin moment taşıma kapasitesine etkisini değerlendirirken, Chen et al. (2021) bu incelemeyi sırt sırta bağlanmış yapma C kesitler için genişletmiştir. (Fang et. al., 2021) tarafından yapılan çalışmada eksenel yük altındaki gövde delikli C kesitlerin performansının incelenmesi için derin öğrenme (deep learning) tabanlı metodoloji geliştirilmiştir. (Yu et. al., 2022) tarafından yapılan çalışma ile dairesel gövde boşluğu bulunan kiriş elemanlarda kritik başlık ve gövde distorsiyonel burkulma gerilmesinin hesaplanması için analitik çözümleri kapsamaktadır. (Dai et. al., 2022), makine öğrenmesi (machine learning) kullanarak eğilme etkisindeki gövde delikli C kesitlerin moment kapasitesini belirlemeye yönelik bir model geliştirmiştir. (Wang et. al., 2022), gövde delikli eğilme elemanlarının kesme davranışının incelenmesi deneysel ve nümerik olarak gerçekleştirilmiştir. (Qin et. al., 2023) ise delikler arası mesafe, boşluk konumu ve delik geometrisi gibi parametreleri dikkate alarak, bu elemanların distorsiyonel burkulma yüklerini analitik olarak belirlemiştir. (Wang et. al., 2024) yapılan çalışmada eğilme ve kesme etkisi altındaki soğukta şekil verilmiş çelik elemanlarda takviyeli gövde deliklerin etkisinin incelenmesi deneysel ve nümerik olarak gerçekleştirilmiştir. (Chandramohan et. al. 2024) tarafından yapılan çalışmada uzunlamasına gövde deliklerin kesme kapasitesine olan etkisinin incelenmesi için nümerik çalışma gerçekleştirilmiştir. (Chandramohan et. al. 2025) tarafından yapılan çalışma, eğilme etkisi altındaki C kesitlere takviyesiz ve takviyeli uzunlamasına gövde deliklerinin etkisinin incelenmesi deneysel ve nümerik olarak gerçekleştirilerek DSM tasarım denklemlerine önerileri kapsamaktadır.

(Oruç, 2025) tarafından yapılan çalışmada, gövde delikli C kesitlerin eğilme etkisi altındaki davranışlarının incelenmesi için deneysel ve nümerik çalışmalar gerçekleştirilmiş ve DSM tasarım denklemlerine lokal burkulma kapasitesinin belirlenebilmesi için denklemler önerilmiştir.

Bu çalışmanın amacı, gövdesinde delik bulunan soğukta şekil verilmiş çelik kesitlerin eğilme etkisi altındaki burkulma davranışlarını incelemek ve farklı hesaplama yaklaşımlarının bu kesitlerin burkulma kapasitesini tahmin etmedeki etkinliğini değerlendirmektir. Çalışma kapsamında delik yüksekliği, delik uzunluğu ve kesit yüksekliği gibi parametreler dikkate alınarak, CUFSM (Constrained and Unconstrained Finite Strip Method) programı aracılığıyla delikli ve deliksiz kesitler için elastik burkulma analizleri gerçekleştirilmiştir. Soğukta şekil verilmiş çelik kesitlerin burkulma davranışının doğru bir şekilde analiz edilebilmesi ve bu kesitlerin güvenli bir şekilde tasarlanabilmesi amacıyla, çeşitli standartlar ve araştırmacılar tarafından farklı hesaplama yaklaşımları geliştirilmiştir. Bu yaklaşımlar, kesitlerin lokal ve distorsiyonel burkulma kapasitelerinin belirlenmesine yönelik farklı formüller sunmaktadır. Çalışmada bu yöntemler kullanılarak elde edilen lokal ve distorsiyonel burkulma kapasitesi karşılaştırılarak değerlendirilmiştir.

MATERYAL VE YÖNTEM

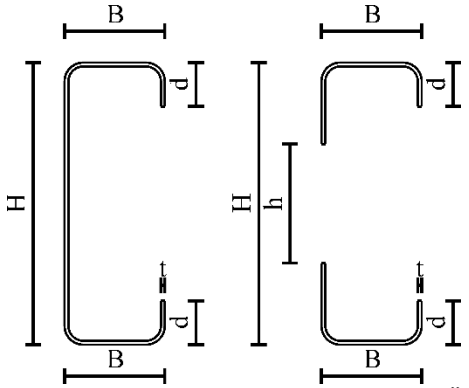
Bu çalışmada, eğilme etkisi altındaki gövde delikli soğukta şekil verilmiş çelik kesitlerin burkulma davranışını ve burkulma kapasitesini analiz etmek için farklı yaklaşımlar dikkate alınmıştır. Bu bölümde, kullanılan kesitlerin özellikleri, analiz yöntemi ve hesaplama yaklaşımları verilmiştir.

Deliksiz ve Delikli Elemanların Özellikleri

Çalışmada kullanılan soğukta şekil verilmiş çelik kesitler deliksiz ve delikli olmak üzere iki farklı durumda incelenmiştir. Deliksiz ve delikli elemanların isimlendirilmesi Şekil 1'de kesit özellikleri ise Şekil 2'de verilmiştir. Deliksiz elemanların kesit ölçüleri Tablo 1'de verilmiştir. Delikli kirişlerde ise delik yüksekliği ve delik uzunluğu değişkenleri dikkate alınmıştır. Delik boyutları Tablo 2'de verilmiştir. Burada delik yüksekliği 0.1H ile 0.9H arasında değişiklik gösterirken her bir delik yüksekliği için 10, 20, 40, 80, 160 ve 320 mm delik uzunluğu dikkate alınmıştır.



Şekil 1. Deliksiz Ve Delikli Elemanların İsimlendirilmesi.



Şekil 2. Deliksiz Ve Delikli Elemanların Kesit Özellikleri.

Tablo 1. Eleman Kesit Ölçüleri.

Eleman	Kesit Yüksekliği, H (mm)	Başlık Genişliği, B (mm)	Tırnak Yüksekliği, d (mm)	Kalınlık, t (mm)
C-140-41-13-075-0-0	140	41	13	0.75
C-203-41-13-075-0-0	203	41	13	0.75

Tablo 2. Delik Boyutları.

Delik Yüksekliği, h (mm)	Delik Uzunluğu, L_h (mm)
0.1H	10 20 40 80 160 320
0.2H	10 20 40 80 160 320
.	.
.	.
.	.
0.9H	10 20 40 80 160 320

CUFSM Programı

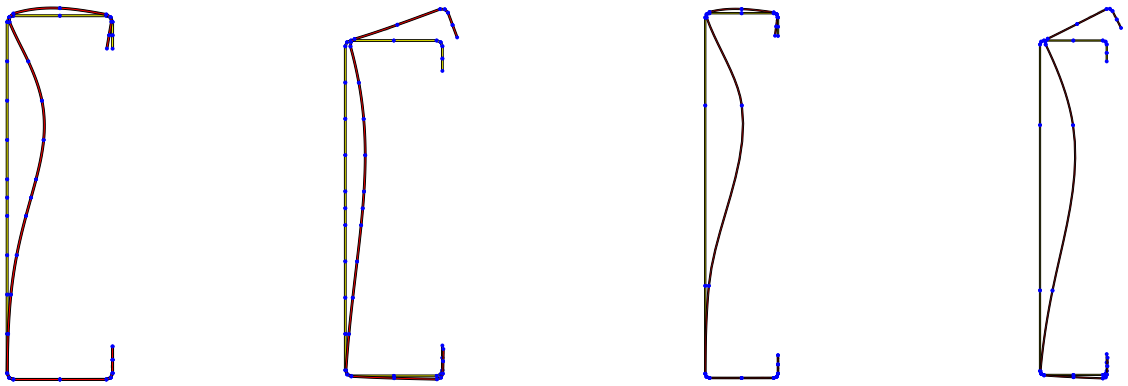
CUFSM (Constrained and Unconstrained Finite Strip Method) soğukta şekil verilmiş çelik kesitlerin burkulma analizlerini gerçekleştirmek için geliştirilen açık kaynak kodlu bir bilgisayar programıdır (Schafer & Adany, 2006; Li & Schafer, 2010; Jin et. al., 2024). CUFSM programı özellikle lokal ve distorsiyonel burkulma modlarının analizi için yaygın olarak kullanılmaktadır. CUFSM kesitlerin elastik burkulma davranışlarını incelemek için sonlu şerit yöntemini (Finite Strip Method) kullanmaktadır. Sonlu şerit yöntemi kesitlerin burkulma modlarını ve bu burkulma modlarına karşılık gelen kritik burkulma yüklerinin belirlenmesine olanak sağlamaktadır. CUFSM programının temel işlevi tanımlanan kesit geometrisinin analizini yaparak kesitin lokal, distorsiyonel ve global burkulma gibi farklı burkulma modlarının ve bu burkulma modlarına karşılık gelen kritik burkulma yüklerinin hesaplanmasını kapsamaktadır.

Çalışmada kullanılan C-140 ve C-203 kesitli elemanların CUFSM programı elastik burkulma analizleri yapılarak lokal ve distorsiyonel burkulma modları elde edilmiş (Şekil 3) ve burkulma modlarına karşılık gelen kritik elastik burkulma moment değerleri ise Şekil 4'te karakteristik burkulma eğrisinde verilmiştir. Karakteristik burkulma eğrisinde düşey eksen M_{cr}/M_y oranını ifade ederken yatay eksen ise burkulma modlarının meydana geldiği yarımdalga boylarını ifade etmektedir. Ayrıca, lokal burkulma modu, kesitin küçük dalga boylarında meydana gelirken distorsiyonel burkulma modu daha büyük dalga boylarında meydana gelmektedir.

CUFSM programında deliksiz kesitlerin yanı sıra delikli kesitlerin de kesit özelliklerinin tanımlanması için kullanılabilmektedir. Bunun için lokal burkulma ve distorsiyonel burkulma modlarının belirlenebilmesi için bir takım prosedürlerin takip edilmesi gerekmektedir (Moen & Schafer, 2008; Moen & Schafer, 2010). Delikli kesitlerde lokal burkulma modlarının elde edilebilmesi için öncelikle delik boyunca sıfır kalınlıklı eleman tanımlanması gerekmektedir (Şekil 5a). Distorsiyonel burkulma modlarının elde edilebilmesi için ise Denklem 15'te verilen azaltılmış kesit kalınlığı hesaplanarak gövde kalınlığı olarak tanımlanması gerekmektedir (Şekil 5b).

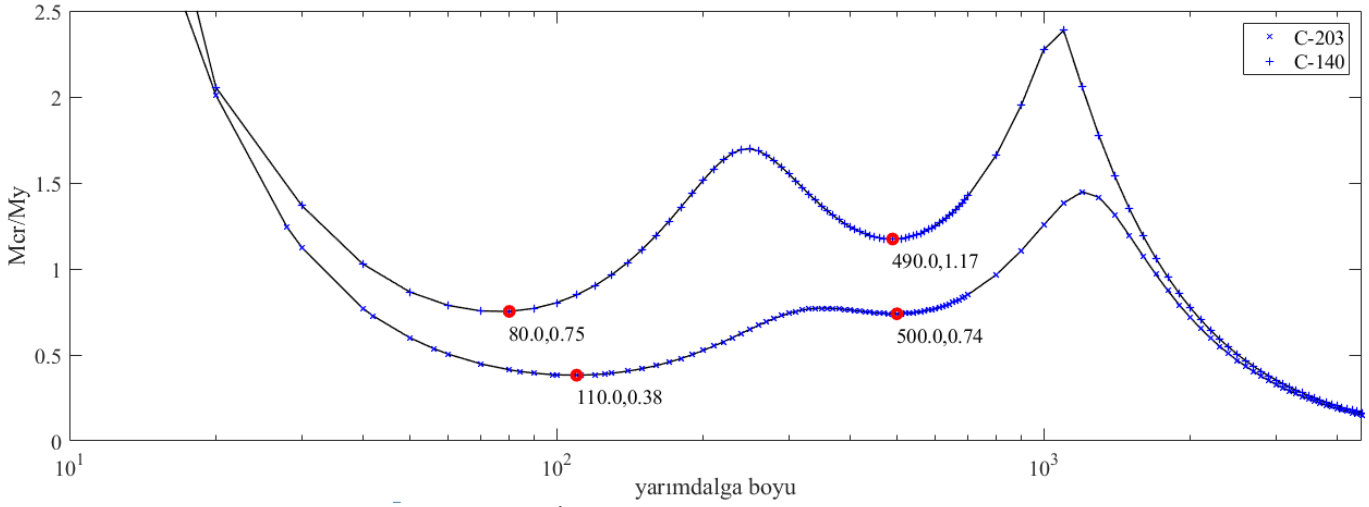
Elastik burkulma analizlerinde kullanılan kesitlerin malzeme özellikleri ise elastisite modülü 203 GPa, poisson oranı 0.3, kayma modülü 78 GPa ve akma gerilmesi 220 MPa olarak dikkate alınmıştır. Ayrıca, elastik burkulma analizlerinde kesitlerin yanal ötelemesinin sınırlandırıldığı kabulü yapılarak yanal burulmalı burkulma davranışı dikkate alınmamıştır. Elastik burkulma analizlerinde kesitler basit mesnetli olarak tanımlanmış ve basit eğilme etkisi dikkate alınmıştır.

Soğukta şekil verilmiş çelik kesitlerin burkulma davranışını analiz etmek ve kesitlerin tasarımı için gerekli hesaplamaları yapmak için çeşitli standartlar ve araştırmacılar tarafından yaklaşımlar geliştirilmiştir. Bu yaklaşımlar kesitlerin lokal ve distorsiyonel burkulma kapasitelerinin belirlenmesi için farklı formüller ve yöntemler önermektedir.

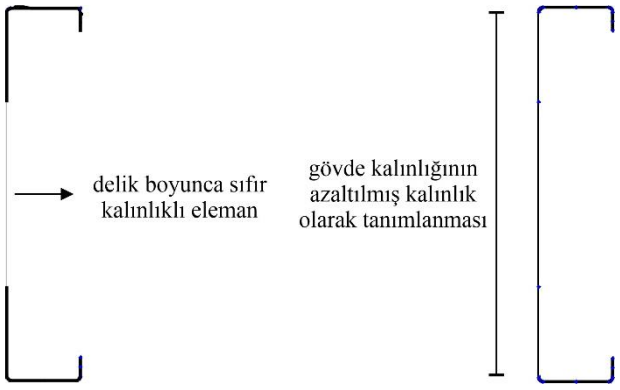


(a) (b) (c) (d)

Şekil 3. CUFSM Elastik Burkulma Analizi Sonucunda **a-b.** C-140 Eleman İçin Sırasıyla Lokal Burkulma Ve Distorsiyonel Burkulma **c-d.** C-203 Eleman İçin Sırasıyla Lokal Burkulma ve Distorsiyonel Burkulma Şekli.



Şekil 4. Deliksiz Kirişler İçin Elde Edilen Karakteristik Burkulma Eğrisi.



(a) (b)

Şekil 5. Net Kesit Özelliklerinin Tanımlanması **a.** Lokal Burkulma **b.** Distorsiyonel Burkulma.

AISI S100 ve AS/NZS 4600 yaklaşımı

Deliksiz kirişlerde lokal burkulma kapasitesinin hesaplanması için;

$\lambda_l \leq 0.776$

$$M_{nl} = M_{ne} \quad (1)$$

$\lambda_l > 0.776$

$$M_{nl} = \left[1 - 0.15\left(\frac{M_{crl}}{M_{ne}}\right)^{0.4}\right]\left(\frac{M_{crl}}{M_{ne}}\right)^{0.4} M_{ne} \quad (2)$$

$$\lambda_l = \sqrt{\frac{M_{ne}}{M_{crl}}} \quad (3)$$

Burada M_{nl} lokal burkulma için nominal moment kapasitesini, M_{ne} akma ve global burkulma için nominal moment kapasitesini, M_{crl} lokal burkulma için kritik elastik moment kapasitesini ve λ_l lokal burkulma için narinlik oranını ifade etmektedir.

Distorsiyonel burkulma kapasitesi için;

$\lambda_d \leq 0.673$

$$M_{nd} = M_y \quad (4)$$

$\lambda_d > 0.673$

$$\mathrm{M_{nd}} = \left[1 - 0.22\left(\frac{\mathrm{M_{crd}}}{\mathrm{M_y}}\right)^{0.5}\right]\left(\frac{\mathrm{M_{crd}}}{\mathrm{M_y}}\right)^{0.5} \mathrm{M_y} \quad (5)$$

$$\lambda_d = \sqrt{\frac{M_y}{M_{crd}}} \quad (6)$$

Burada M_{nd} distorsiyonel burkulma için nominal moment kapasitesini, M_y akma moment kapasitesini, M_{crd} distorsiyonel burkulma için kritik elastik moment kapasitesini ve λ_d distorsiyonel burkulma için narinlik oranını ifade etmektedir.

Delikli kirişlerde lokal burkulma kapasitesi için;

$\lambda_l \leq 0.776$

$$M_{nl} \leq M_{ynet} \quad (7)$$

$\lambda_l > 0.776$

$$M_{nl} = \left[1 - 0.15\left(\frac{M_{crl}}{M_{ne}}\right)^{0.4}\right]\left(\frac{M_{crl}}{M_{ne}}\right)^{0.4} M_{ne} \quad (8)$$

M_{ynet} net kesit için akma moment kapasitesini ifade etmektedir.

Delikli kirişlerde distorsiyonel burkulma kapasitesi için;

$\lambda_d \leq \lambda_{d1}$

$$M_{nd} = M_{ynet} \quad (9)$$

$\lambda_{d1} < \lambda_d \leq \lambda_{d2}$

$$M_{nd} = M_{ynet} - \left(\frac{M_{ynet} - M_{d2}}{\lambda_{d2} - \lambda_{d1}}\right)(\lambda_d - \lambda_{d1}) \leq \left[1 - 0.22\left(\frac{\mathrm{M_{crd}}}{\mathrm{M_y}}\right)^{0.5}\right]\left(\frac{M_{crd}}{M_y}\right)^{0.5} M_y \quad (10)$$

$$\lambda_d = \sqrt{\frac{M_y}{M_{crd}}} \quad (11)$$

$$\lambda_{d1} = 0.673\left(\frac{M_{ynet}}{M_y}\right)^3 \quad (12)$$

$$\lambda_{d2} = 0.673\left[1.7\left(\frac{M_y}{M_{ynet}}\right)^{2.7} - 0.7\right] \quad (13)$$

$$M_{d2} = \left[1 - 0.22\left(\frac{1}{\lambda_{d2}}\right)\right]\left(\frac{1}{\lambda_{d2}}\right)M_y \quad (14)$$

$$t_r = t(1 - \frac{L_h}{L_{crd}})^{\frac{1}{3}} \quad (15)$$

Burada M_{crd} delikli kiriş için kritik elastik distorsiyonel burkulma moment kapasitesini, t_r azaltılmış gövde kalınlığını, L_h delik uzunluğunu ve L_{crd} distorsiyonel burkulmanın oluştuğu yarımdalga boyunu ifade etmektedir.

Moen & Schafer, 2010 yaklaşımı

Lokal burkulma kapasitesinin hesaplanması için önerilen formülde, AISI S100 ve AS/NZS 4600 standart yaklaşımlarından farklı olarak M_{crl} değerinin hesaplanması için aşağıdaki formül önerilmiştir;

$$M_{crl} = min(M_{crlg}, M_{crlh}) \quad (16)$$

Distorsiyonel burkulma kapasitesi için;

$\lambda_d \leq \lambda_{d1}$

$$M_{nd} = M_{ynet} \quad (17)$$

$\lambda_{d1} < \lambda_d \leq \lambda_{d2}$

$$\left[M_{ynet} - \left(\frac{M_{ynet} - M_{d2}}{\lambda_{d2} - \lambda_{d1}}\right)(\lambda_d - \lambda_{d1})\right] \quad (18)$$

$\lambda_d > \lambda_{d2}$

$$\left[\left[1 - 0.22\left(\frac{M_{crd}}{M_y}\right)^{0.6}\right]\left(\frac{M_{crd}}{My}\right)^{0.6} M_y\right] \quad (19)$$

$$\lambda_d = \left(\frac{M_y}{M_{crd}}\right)^{0.5} \quad (20)$$

$$\lambda_{d1} = 0.673\left(\frac{M_{ynet}}{M_y}\right) \quad (21)$$

$$\lambda_{d2} = 0.673\left[1.7\left(\frac{M_y}{M_{ynet}}\right)^{1.7} - 0.7\right] \quad (22)$$

$$M_{d2} = \left[1 - 0.22\left(\frac{1}{\lambda_{d2}}\right)^{0.5}\right]\left(\frac{1}{\lambda_{d2}}\right)^{0.5} M_y \quad (23)$$

Wang & Young, 2017 yaklaşımı

Delikli kirişlerin lokal burkulma kapasitesinin hesaplanması için araştırmacılar tarafından aşağıdaki denklemler önerilmiş ancak distorsiyonel burkulma kapasitesinin hesaplanması için ise denklemler önerilmemiştir.

$\lambda_l \leq 0.936$

$$M_{nl} = M_{ynet} \quad (24)$$

λ_l>0.936

$$M_{nl} = \left[1 - 0.04\left(\frac{M_{crl}}{M_y}\right)^{0.32}\right]\left(\frac{M_{crl}}{M_y}\right)^{0.32} M_y \quad (25)$$

Oruç, 2025 yaklaşımı

Delikli kirişlerin lokal burkulma kapasitesinin hesaplanması için araştırmacı tarafından aşağıdaki denklemler önerilmiş ancak distorsiyonel burkulma kapasitesinin hesaplanması için ise denklemler önerilmemiştir.

λ_l≤0.6

$$M_{nl} = M_{ynet} \quad (26)$$

λ_l>0.6

$$M_{nl} = \left[1 - 0.2\left(\frac{M_{crl}}{M_y}\right)^{0.63}\right]\left(\frac{M_{crl}}{M_y}\right)^{0.63} M_y \quad (27)$$

Chandramohan et. al., 2025 yaklaşımı

Lokal burkulma moment kapasitesinin hesaplanması için;

λ_l≤0.776

$$M_{blp} = M_{be} \leq M_{ynet} \quad (28)$$

λ_l>0.776

$$M_{blp} = \left[1.81 - 0.9\left(\frac{M_{crlh}}{M_{ynet}}\right)^{0.5}\right]\left(\frac{M_{crlh}}{M_{ynet}}\right)^{0.5} M_{ynet} \quad (29)$$

Distorsiyonel burkulma moment kapasitesi için;

λ_d≤0.873

$$M_{bdp} = M_y \leq M_{ynet} \quad (30)$$

λ_l>0.873

$$M_{bdp} = \left[1.2 - 0.99\left(\frac{M_{ynet}}{M_{crdh}}\right)^{0.06}\right] M_{ynet} \quad (31)$$

BULGULAR

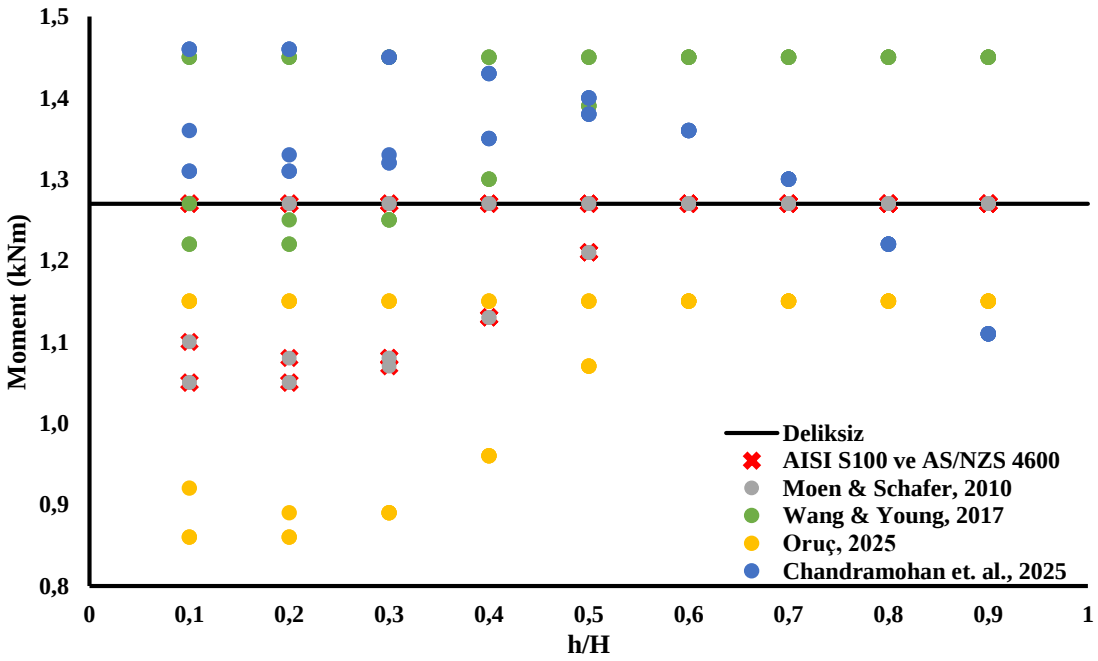
Bu çalışmada, deliksiz ve delikli soğukta şekil verilmiş çelik kesitlerin burkulma davranışı ve burkulma kapasiteleri incelenmiştir. Elastik burkulma analizleri CUFSM programında gerçekleştirilmiş ve farklı yaklaşımların (AISI S100, AS/NZS 4600, Moen & Schafer, Wang & Young, Oruç, Chandramohan et. al.) sonuçları karşılaştırılmıştır. Elde edilen bulgular hem deliksiz hem de delikli kesitlerin burkulma davranışı üzerinde delik boyutlarının ve kesit geometrisinin etkilerini ortaya koymaktadır.

C-140 ve C-203 kesitleri için yapılan elastik burkulma analizlerinde, deliksiz ve delikli kesitlerin lokal ve distorsiyonel burkulma kapasitesi hesaplanmıştır. Delikli kirişlerde, delik yüksekliği (h) ve delik uzunluğu (L_h) parametrelerinin burkulma davranışı üzerine etkileri incelenmiştir. Kesitler için lokal ve distorsiyonel burkulma grafikleri Şekil 6-9'da verilmiştir. Deliksiz kirişlerin burkulma kapasite hesapları AISI S100 ve AS/NZS 4600 standartlarına göre yapılmıştır. C-140 kesitinde lokal burkulma kapasitesi 1.27 kNm ve distorsiyonel burkulma kapasitesi 1.36 kNm olarak hesaplanırken C-203 kesitinde ise sırasıyla 1.69 ve 1.94 kNm olarak hesaplanmıştır.

AISI S100 ve AS/NZS 4600 standartlarına göre hesaplanan kesitlerin moment delik yüksekliğinin delik uzunluğuna oranı (h/L_h) ilişkisi Şekil 10'da verilmiştir. Kesitlerde h/L_h oranının artmasıyla moment kapasitesinin arttığı belirlenmiştir. Ayrıca h/L_h oranının en düşük olduğu durumlarda C-140 ve C-203 kesitlerde moment taşıma kapasitesi deliksiz kiriş moment taşıma kapasitesine göre sırasıyla %17 ve %20 azalmıştır.

C-140 ve C-203 kesitli elemanlarda lokal burkulma kapasitesi incelendiğinde delik uzunluğunun 80'den büyük olduğu durumlarda delik yüksekliğinin artmasıyla moment kapasitesinin arttığı belirlenmiştir. Bu durumun olası sebepleri ise dalgaboyu destek etkisi (wavelength stiffening effect) ve desteksiz şerit etkisi (unstiffened strip effect) olabilmektedir. Dalgaboyu destek etkisi delikli levhalarda, delik olmayan bölgelerde dalga boyunun artması ile kritik burkulma yükünün artması olarak tanımlanabilmektedir. Desteksiz şerit etkisi ise delikli bölgedeki burkulma durumunun desteksiz şerit gibi davranması böylelikle küçük deliklerde daha düşük kritik burkulma yükü elde edilmesi olarak tanımlanabilmektedir (Moen & Schafer, 2006; Moen &Schafer, 2008; Moen, 2009). Distorsiyonel burkulma kapasitesi ise h/H oranının artmasından etkilenmemiştir. Ancak delik uzunluğunun artması distorsiyonel burkulma kapasitesinin azalmasına neden olmuştur.

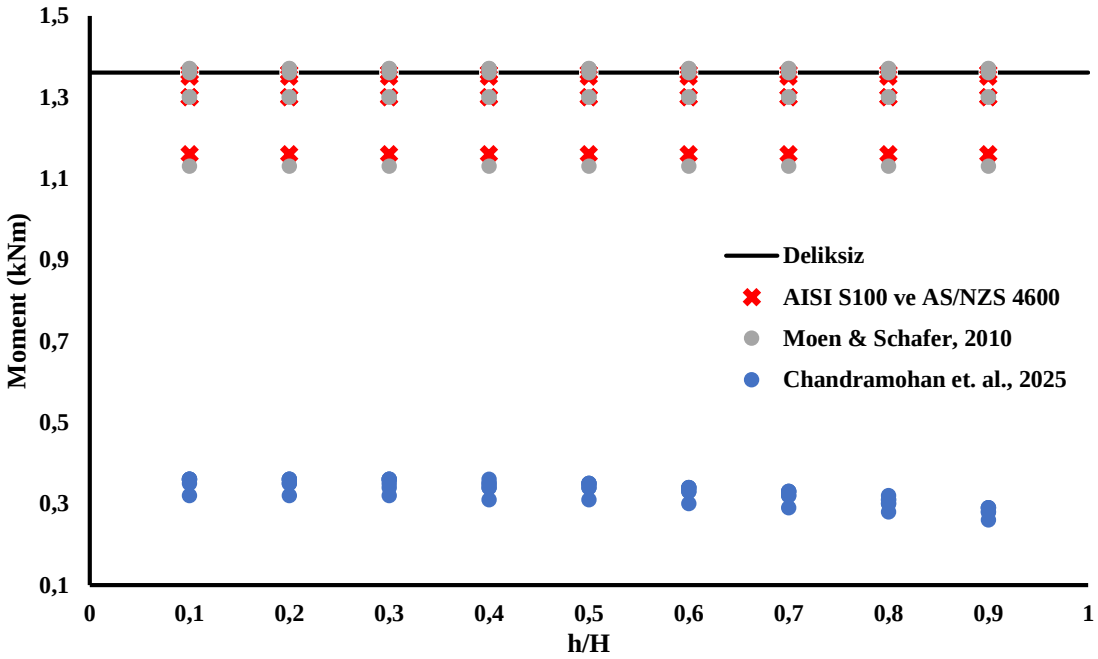
Lokal ve distorsiyonel burkulma kapasitelerinin hesaplanmasında dikkate alınan yaklaşımlar AISI S100 ve AS/NZS 4600 standart hesaplamaları ile karşılaştırıldığında Moen & Schafer, 2010 yaklaşımının lokal ve distorsiyonel burkulma kapasitelerinin hesaplanmasında standart yaklaşımı ile benzer sonuçlar elde edilmiştir. Chandramohan et. al., 2025 tarafından önerilen lokal burkulma denklemleri standart çözümlerine kıyasla daha yüksek sonuçlar öngörmüştür. Ancak distorsiyonel burkulma çözümleri ise oldukça düşük kalmıştır. Öte yandan yalnızca lokal burkulma hesaplama yöntemi önerilen Wang & Young, 2017 ve Oruç, 2025 çalışmalarda, Wang & Young, 2017 hesaplamalarına göre lokal burkulma kapasitesi yaklaşık olarak %15 daha fazla elde edilirken, Oruç, 2025 tarafından önerilen hesaplamalarda yaklaşık olarak %10 daha düşük olarak elde edilmektedir.



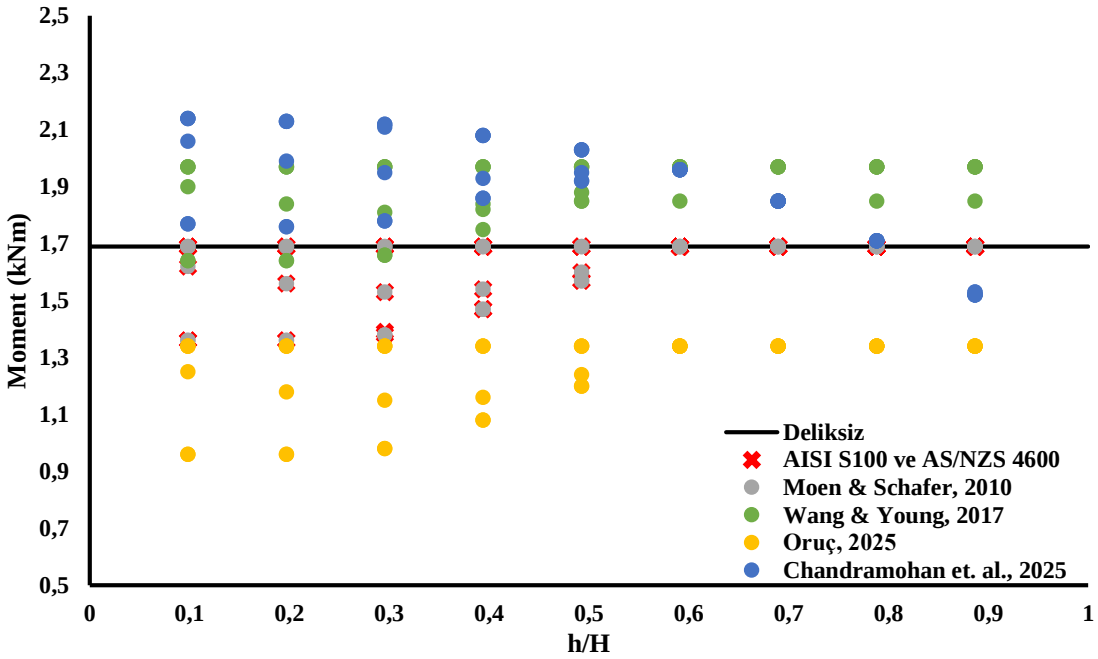
Şekil 6. C-140 Kesiti İçin Lokal Burkulma Kapasitesi.

SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada gövde deliksiz ve delikli soğukta şekil verilmiş çelik kesitlerin burkulma davranışı ve burkulma kapasitelerinin hesaplanmasını için elastik burkulma analizini ve hesaplama yöntemlerinin karşılaştırılmasını kapsamaktadır. Çalışmada değişken olarak delik yüksekliği, delik genişliği ve gövde yüksekliği farklı elemanlar dikkate alınmıştır.



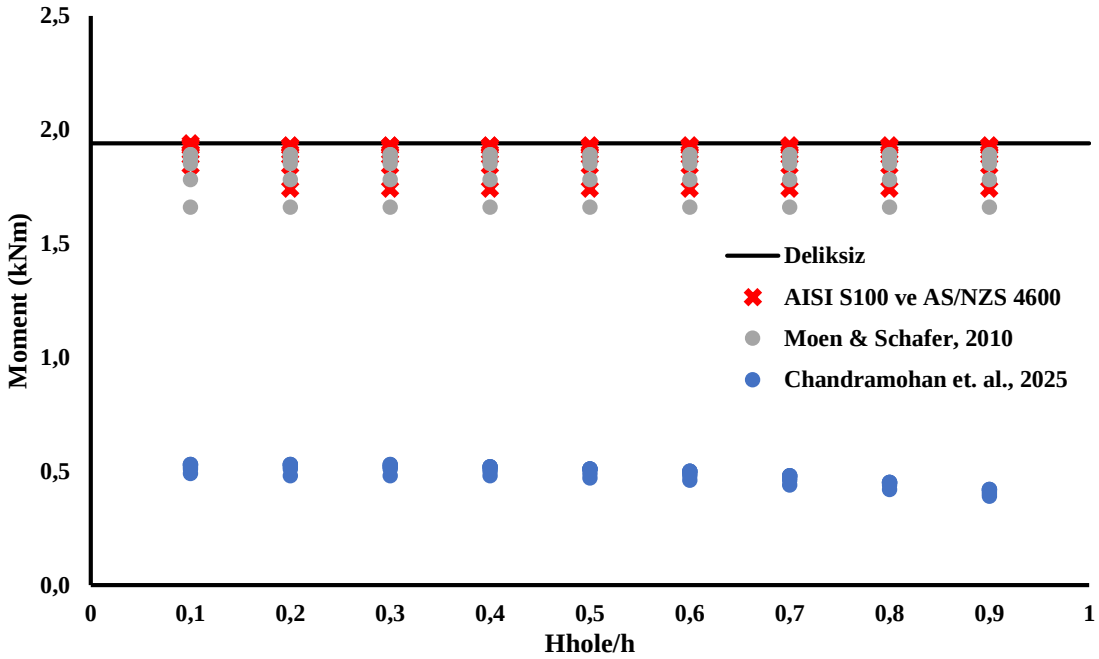
Şekil 7. C-140 Kesiti İçin Distorsiyonel Burkulma Kapasitesi.



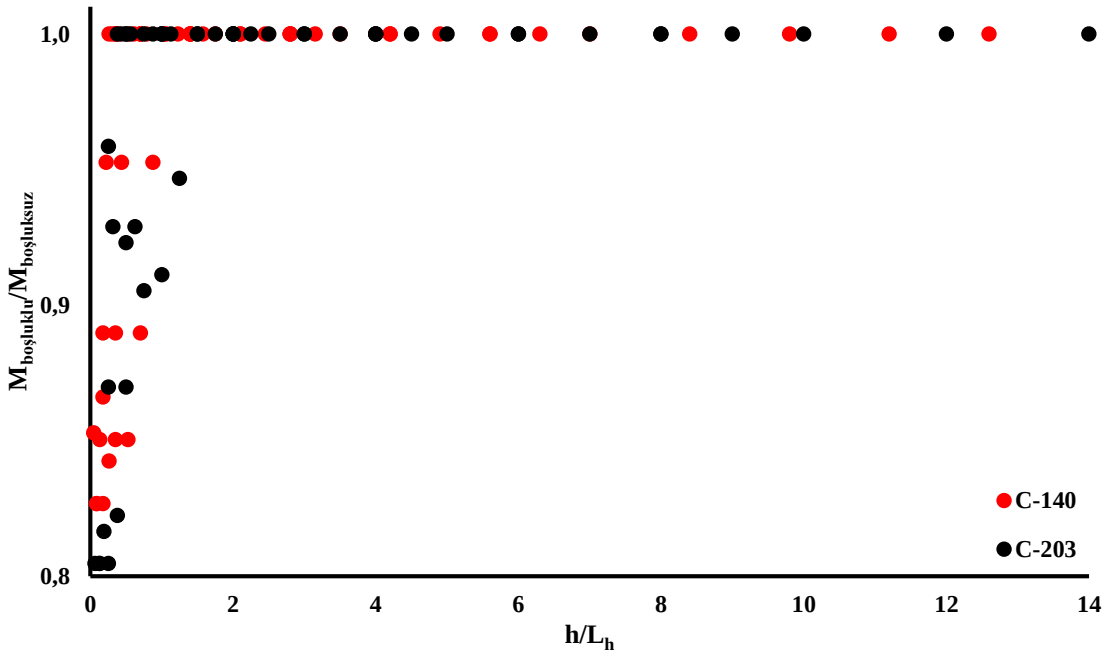
Şekil 8. C-203 Kesiti İçin Lokal Burkulma Kapasitesi.

Delikli kirişlerde delik yüksekliği ve delik uzunluğu değişkenlerinin burkulma kapasitesini etkilediği gözlemlenmiştir. Özellikle delik uzunluğunun 80 mm'den büyük olduğu durumlarda, lokal burkulma kapasitesinin arttığı belirlenmiştir. Kapasitede meydana gelen artış dalgaboyu destek etkisi ve desteksiz şerit etkisi ile açıklanabilmektedir. Bu mekanizmaların kesitlerin tasarlanmasında dikkate alınması önerilmektedir.

Distorsiyonel burkulma kapasitesi ise delik yüksekliğinden etkilenmezken, delik uzunluğunun artmasıyla birlikte azalma eğilimi gösterdiği belirlenmiştir. Kesitlerin tasarımında uzun deliklerin distorsiyonel burkulma kapasitesini düşürdüğü dikkate alınarak bu tür deliklerin kullanıldığı kesitlerde ek takviyeler veya alternatif delik konfigürasyonlarının değerlendirilmesi önerilmektedir.



Şekil 9. C-203 Kesiti İçin Distorsiyonel Burkulma Kapasitesi.



Şekil 10. Kesitlerde Lokal Burkulma Momenti Ve Delik Yüksekliğinin Delik Uzunluğuna Oranı İlişkisi.

Farklı yaklaşımların karşılaştırılması sonucunda, Moen & Schafer denklemlerinin standart hesaplamalarıyla uyumlu olduğu tespit edilmiştir. Chandramohan et. al. tarafından önerilen lokal burkulma denklemleri, standart çözümlere göre daha yüksek sonuçlar öngörmüş ancak distorsiyonel burkulma çözümleri daha düşük kalmıştır. Wang & Young tarafından önerilen lokal burkulma denklemleri ise standart çözümlere göre daha yüksek kalırken Oruç tarafından önerilen denklem ise daha düşük kaldığı tespit edilmiştir.

Gelecekteki çalışmalarda, daha farklı kesit geometrileri ve delik konfigürasyonları üzerinde araştırmalar yapılarak kapsamın genişletilmesi önerilmektedir. Ayrıca, deneysel çalışmalarla elde edilecek verilerin, analitik ve nümerik modeller ile desteklenmesi, tasarım denklemlerinin geliştirilmesine önemli katkılar sağlayacaktır.

KAYNAKLAR

Adany, S., & Schafer, B. W. (2006). Buckling analysis of cold-formed steel members using CUFSM: conventional and constrained finite strip methods. In CCFSS Proceedings of International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures.

AISI S100-16. (2020). Specifications for the cold-formed steel structural members, cold-formed steel design manual. American Iron and Steel Institute (AISI).

Australian/New Zealand Standard (2018). Cold-formed stainless steel structures. Sydney, Australia: Standards Australia (AS/NZS 4600).

Chandramohan, D. L., Roy, K., Fang, Z., & Lim, J. B. (2025). Moment capacity of cold-formed steel channel beams with edge-stiffened and unstiffened elongated web holes. *Thin-Walled Structures*, *206*, 112605. https://doi.org/10.1016/j.tws.2024.112605

Chandramohan, D. L., Roy, K., Fang, Z., Ananthi, G. B. G., & Lim, J. B. (2024). Numerical investigation of cold-formed steel channels with edge-stiffened and unstiffened elongated web holes under shear. *Thin-Walled Structures*, *196*, 111472. https://doi.org/10.1016/j.tws.2023.111472

Chen, B., Roy, K., Fang, Z., Uzzaman, A., Raftery, G., & Lim, J. B. (2021). Moment capacity of back-to-back cold-formed steel channels with edge-stiffened holes, un-stiffened holes, and plain webs. *Engineering Structures*, *235*, 112042. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.112042

Chen, B., Roy, K., Uzzaman, A., & Lim, J. B. (2020). Moment capacity of cold-formed channel beams with edge-stiffened web holes, un-stiffened web holes and plain webs. *Thin-Walled Structures*, *157*, 107070. https://doi.org/10.1016/j.tws.2020.107070

Dai, Y., Roy, K., Fang, Z., Chen, B., Raftery, G. M., & Lim, J. B. (2022). A novel machine learning model to predict the moment capacity of cold-formed steel channel beams with edge-stiffened and un-stiffened web holes. *Journal of Building Engineering*, *53*, 104592. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.104592

Eurocode. (2007). Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-3: General rules - Supplementary rules for coldformed members and sheeting. European Committee for Standardization.

Fang, Z., Roy, K., Chen, B., Sham, C. W., Hajirasouliha, I., & Lim, J. B. (2021). Deep learning-based procedure for structural design of cold-formed steel channel sections with edge-stiffened and un-stiffened holes under axial compression. *Thin-Walled Structures*, *166*, 108076. https://doi.org/10.1016/j.tws.2021.108076

Grey, C. N., & Moen, C. D. (2011, May). Elastic buckling simplified methods for cold-formed columns and beams with edge-stiffened holes. In Proceedings of the Annual Stability Conference Structural Stability Research Council Pittsburgh (pp. 92-103).

Jin, S., Ádány, S., & Schafer, B. W. Constrained Finite Strip Method: kinematic-and force-based approaches. In Proceedings of the Annual Stability Conference Structural Stability Research Council.

Li, Z., & Schafer, B. W. (2010). Buckling analysis of cold-formed steel members with general boundary conditions using CUFSM conventional and constrained finite strip methods. In Twentieth International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures.

Moen, C. D. (2009). Direct strength design of cold-formed steel members with perforations. Phd Thesis. The Johns Hopkins University, Baltimore.

Moen, C. D., & Schafer, B. W. (2008; October). Simplified methods for predicting elastic buckling of cold-formed steel structural members with holes. In Nineteenth International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures.

Moen, C. D., & Schafer, B. W. (2006; October). Impact of holes on the elastic buckling of cold-formed steel columns with application to the direct strength method. In Eighteenth International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures.

Moen, C. D., & Schafer, B. W. (2009). Elastic buckling of cold-formed steel columns and beams with holes. *Engineering Structures*, *31*(12), 2812-2824. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2009.07.007

Moen, C. D., & Schafer, B. W. (2010; November). Extending direct strength design to cold-formed steel beams with holes. In Twentieth International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures.

Moen, C. D., Schudlich, A., & von der Heyden, A. (2013). Experiments on cold-formed steel C-section joists with unstiffened web holes. *Journal of Structural Engineering*, *139*(5), 695-704. https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000652

Oruç, R. (2025, April). Influence of web holes on cold-formed steel beams: Experimental and numerical analysis. *Structures, 74*, 108471. https://doi.org/10.1016/j.istruc.2025.108471

Pham, D. K., Pham, C. H., Pham, S. H., & Hancock, G. J. (2020). Experimental investigation of high strength cold-formed channel sections in shear with rectangular and slotted web openings. *Journal of Constructional Steel Research*, *165*, 105889. https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2019.105889

Qin, J., Guo, X., Liao, L., & Li, G. (2023). Analytical method for distortional buckling load of cold-formed steel members with perforated web under bending moment. *Structures*, *57*, 105189. https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.105189

Wang, L., & Young, B. (2015). Beam tests of cold-formed steel built-up sections with web perforations. *Journal of Constructional Steel Research*, *115*, 18-33. https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2015.08.001

Wang, L., & Young, B. (2017). Design of cold-formed steel built-up sections with web perforations subjected to bending. *Thin-Walled Structures*, *120*, 458-469. https://doi.org/10.1016/j.tws.2017.06.016

Wang, L., Jiang, X., Chen, Z., Luo, C., & Jiang, B. (2024). Effect of hole-edge stiffeners on the behavior of cold-formed steel members with web openings under combined bending and shear. *Structures*, *64*, 106485. https://doi.org/10.1016/j.istruc.2024.106485

Wang, L., Li, J., Luo, C., Cao, X., & Wang, H. (2022). Experimental and numerical study on the shear behavior of web perforated cold-formed steel beams. *Structures, 45*, 2117-2136. https://doi.org/10.1016/j.istruc.2022.10.039

Yu, C. (2012). Cold-formed steel flexural member with edge stiffened holes: Behavior, optimization, and design. *Journal of Constructional Steel Research, 71*, 210-218. https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2011.09.008

Yu, N. T., Kim, B., Huang, X. H., Yuan, W. B., Ye, R., Wu, L., & Le, J. J. (2022). Analytical solution for flange/web distortional buckling of cold-formed steel beams with circular web perforations. *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, *29*(24), 3463-3473. https://doi.org/10.1080/15376494.2021.1902594

Yuan, W. B., Yu, N. T., & Li, L. Y. (2017). Distortional buckling of perforated cold-formed steel channel-section beams with circular holes in web. *International Journal of Mechanical Sciences*, *126*, 255-260. https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2017.04.001

Zhao, J., Sun, K., Yu, C., & Wang, J. (2019). Tests and direct strength design on cold-formed steel channel beams with web holes. *Engineering Structures*, *184*, 434-446. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.01.062

KSÜ Mühendislik Bilimleri Dergisi, 28(2), 2025
Araştırma Makalesi

KSU J Eng Sci, 28(2), 2025
Research Article

Kahramanmaras Sutcu Imam University
Journal of Engineering Sciences

Geliş Tarihi : 20.03.2025
Kabul Tarihi : 22.04.2025

Received Date : 20.03.2025
Accepted Date : 22.04.2025

$Ni_{55}Si_{40}M_5$ (M=Co, Fe, Al) ALAŞIMLARININ ARK ERGİTME YÖNTEMİ İLE ELDE EDİLMESİ VE YAPISAL VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

INVESTIGATION OF STRUCTURAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF $Ni_{55}Si_{40}M_5$ (M=Co, Fe, Al) ALLOYS OBTAINED BY ARC MELTING METHOD

Ömer KARATUTLU[1*] (ORCID: 0000-0003-2391-2443)
Abdullah ŞİŞMAN [2](ORCID: 0000-0001-9898-2556)
Musa GÖĞEBAKAN[3] (ORCID: 0000-0001-5104-2874)

[1] Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Afşin Meslek Yüksek Okulu, Kahramanmaraş, Türkiye
[2] Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Kahramanmaraş, Türkiye
[3] Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Fizik Bölümü, Kahramanmaraş, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Ömer KARATUTLU, okaratutlu@ksu.edu.tr

ÖZET

Nikel esaslı alaşımlar, atmosferin aşındırıcı etkilerine karşı yüksek direnç göstermeleri, yeterli mekanik mukavemet sağlamaları ve yüksek sıcaklıklarda yapısal değişime uğramamaları gibi önemli avantajlara sahiptir. Ancak, nikelin yoğunluğunun nispeten yüksek olması (dNi = 8,9 g/cm³), bu alaşımların kullanım alanlarını sınırlayabilmektedir. Buna karşılık, düşük yoğunluklu silisyum (dSi = 2,33 g/cm³), iyi mekanik özellikleriyle dikkat çekmektedir. Bu nedenle, Ni-Si alaşımlarının özelliklerinin incelenmesi ve endüstriyel uygulamalardaki potansiyelinin araştırılması önem arz etmektedir. Ayrıca, Ni-Si alaşımlarının mikro yapı, mekanik, elektriksel ve termal özellikleri üzerine yapılan çalışmaların sınırlı olduğu görülmektedir. Bu çalışmada, $Ni_{55}Si_{40}M_5$ (M = Co, Fe, Al) alaşımları ark ergitme yöntemiyle üretilmiş ve yapısal, mekanik ve termal özellikleri XRD, SEM, Mikro Vickers ve DTA analizleri kullanılarak incelenmiştir. Yapılan ölçümler sonucunda, en yüksek sertlik değeri $Ni_{55}Si_{40}Co_5$ alaşımı için Hv = 1470 MPa olarak tespit edilmiştir. $Ni_{55}Si_40Fe_5$ alaşımında lamelli yapıların oluşumu gözlemlenirken, $Ni_{55}Si_{40}Al_5$ alaşımında ise AlSi fazı boyunca mikro çatlakların meydana geldiği belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Alaşım, faz, sertlik, mukavemet

ABSTRACT

Nickel-based alloys offer significant advantages such as high resistance to atmospheric corrosion, sufficient mechanical strength, and stability at elevated temperatures without undergoing structural changes. However, the relatively high density of nickel (dNi = 8.9 g/cm³) imposes certain limitations on its application. On the other hand, silicon has a considerably lower density (dSi = 2.33 g/cm³) while also exhibiting favorable mechanical properties, making it a promising alloying element. Therefore, investigating the properties of Ni-Si alloys and assessing their industrial applicability is of great importance. Additionally, there is a limited amount of information in the existing literature regarding the microstructural, mechanical, electrical, and thermal properties of Ni-Si alloys. In this study, $Ni_{55}Si_{40}M_5$ (M = Co, Fe, Al) alloys were produced using the arc melting method, and their mechanical, structural, and thermal properties were characterized through XRD, SEM, micro Vickers hardness testing and DTA. Among the produced alloys, $Ni_{55}Si_{40}Co_5$ exhibited the highest hardness value, with a microhardness of Hv = 1470 MPa. Furthermore, lamellar structures were observed in the $Ni_{55}Si_{40}Fe_5$ alloy, while microcracks were detected along the AlSi phase in the $Ni_{55}Si_{40}Al_5$ alloy.

Keywords: Alloy, phase, hardness, strength

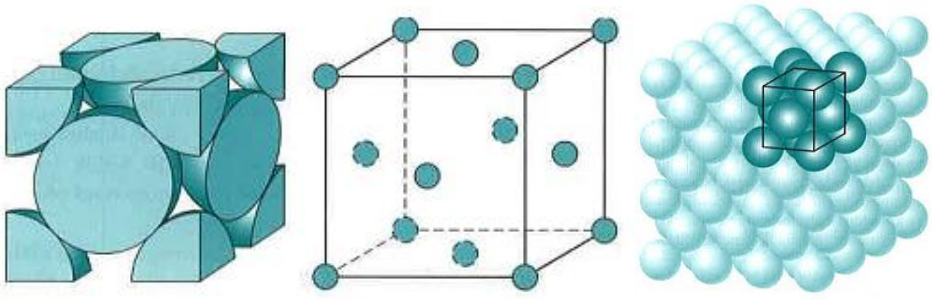
ToCite: KARATUTLU, Ö., ŞİŞMAN, A., & GÖĞEBAKAN, M., (2025). Ni55Si40M5 (M=Co, Fe, Al) ALAŞIMLARININ ARK ERGİTME YÖNTEMİ İLE ELDE EDİLMESİ VE YAPISAL VE MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ, *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 28(2), 1049-1063.

GİRİŞ

Metal ve alaşımlarındaki atomlar, bir düzen içinde dizilmekte olup, metallerin yoğunlukları seramik ve polimerlere kıyasla daha yüksek değerlere sahiptir. Mekanik özellikler açısından, metallerin nispeten yüksek rijitlik ve dayanım seviyelerinin yanı sıra, süneklikleri (kırılmadan önce yüksek oranda şekil değiştirebilme kapasiteleri) ve kırılmaya karşı dirençleri de oldukça yüksektir. Bu üstün özellikler, metallerin yapısal uygulamalarda yaygın olarak kullanılmalarına olanak sağlamaktadır. Metaller, belirli bir atoma bağlı olmayan ve yapının içerisinde serbestçe hareket edebilen çok sayıda elektrona sahiptir. Bu serbest elektronlar, metallerin elektriksel iletkenlik, ısıl iletkenlik ve parlaklık gibi karakteristik özelliklerini doğrudan etkilemektedir. Ayrıca, serbest elektronların hareketliliği, metallerin dövülebilirlik ve şekillendirilebilirlik gibi mekanik özelliklerine de katkı sağlamaktadır. Örneğin, metallerin elektrik ve ısı iletkenlikleri oldukça yüksektir ve görünür ışık altında mat bir görünüm sergilerler. Parlatılmış bir metal yüzeyi ise ayna benzeri bir yansıtıcılık özelliğine sahiptir. Ayrıca, bazı metallere ait (Fe, Co ve Ni) manyetiklik özellikleri, malzeme bilimi ve mühendisliği açısından dikkat çekici bulunmaktadır.

Nikel esaslı alaşımlar, yüksek mekanik dayanım, yüzey düzgünlüğü ve yüksek sıcaklıklarda bile üstün darbe dayanımı gibi öne çıkan özelliklere sahiptir. Silisyum ise yüksek korozyon ve oksidasyon direnci sayesinde, nikel ile bir araya getirildiğinde yeni ve keşfedilmeyi bekleyen özellikler sergileyen alaşımlar oluşturabilmektedir. Fe-Ni-Si alaşımlarında gözlemlenen östenit fazın, şekil hafızası etkisi oluşturduğu belirlenmiştir. Bu durum, Fe-Ni-Si sistemine ait denge faz diyagramının daha iyi anlaşılmasını; demir ve çelik malzemelerin yapısal özelliklerinin geliştirilmesi ve manyetik özelliklerin iyileştirilmesi açısından önemli kılmaktadır. Ancak, Fe, Ni ve Si faz diyagramları ile ilgili literatürdeki veriler yeteri kadar olmayıp, bu konuda yapılan farklı çalışmaların sonuçlarının daha kapsamlı bir şekilde değerlendirilmesine ihtiyaç duyulmaktadır. Son yıllardaki malzeme bilimi alanındaki ilerlemeler kaydedilmiş olmasına rağmen, uygulamaya yönelik daha gelişmiş malzemelerin geliştirilmesi ve malzeme üretiminin çevresel etkilerinin azaltılması gibi teknolojik zorluklar devam etmektedir (Zhangz, 2009).

Ni-Si (Nikel-Silisyum) alaşımları, sahip oldukları üstün fiziksel, kimyasal ve mekanik özellikler nedeniyle çeşitli endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu alaşımlar, özellikle yüksek sıcaklıklarda oksidasyon ve korozyon direnci, iyi termal kararlılık ve belirli fazlarda üstün sertlik özellikleri göstermeleri bakımından dikkat çekicidir. Ni_3Si gibi intermetalik fazların varlığı, bu alaşımların yüksek sıcaklık uygulamalarında boyutsal kararlılık ve mekanik dayanım açısından tercih edilmesini sağlamaktadır. Bu nedenle, Ni-Si alaşımları; türbin kanatları, ısı değiştiricileri, otomotiv motor parçaları, elektronik bileşenler ve özellikle mikroelektronik sanayisinde ince film malzemesi olarak kullanılmaktadır. Ayrıca, bu alaşımların bazı varyantları, yüksek aşınma direnci ve düşük sürtünme katsayısı nedeniyle kaplama teknolojilerinde de değerlendirilmektedir. Ni-Si alaşımlarının bu çok yönlü kullanımı, onların üstün yapısal performansı ile kimyasal stabilitelerinin birleşimi sayesinde mümkün olmaktadır (Zhao vd., 2017). Katı malzemelerin birçok özelliği, kristal yapıları ile doğrudan ilişkilidir ve bu yapılar, atomların, iyonların veya moleküllerin üç boyutlu düzenlenme biçimlerini ifade eder. Metallerde gözlemlenen nispeten basit kristal yapılar, bazı seramik ve polimerlerde oldukça karmaşık formlara ulaşabilmektedir. Yüzey merkezli kristal yapıya sahip malzemelera ait katı küre birim hücreler Şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1. Kristal Kafes Yapıları

Kristal yapılardaki atomsal diziliş ve düzen, bir grup atomdan oluşan küçük bir birimin düzenli olarak tekrarlanmasıyla meydana gelir. Bu bağlamda, kristal yapıları tanımlamak ve incelemek için, yapının tekrarlayan en küçük yapı taşı olan birim hücreler kullanılır. Birim hücreler, kristal yapıların anlaşılabilirliğini ve analizini kolaylaştıran temel unsurlardır. Metallerin büyük bir çoğunluğu, yüzey merkezli kübik (FCC), hacim merkezli kübik (BCC) ve sıkı paketlenmiş hekzagonal (HCP) olmak üzere üç temel kristal yapıda bulunur. Öte yandan, korozyon; metallerin oksitlenme veya diğer kimyasal tepkimeler sonucunda aşınmasına verilen addır. Bazı metaller, korozyona

karşı yüksek direnç gösterirken mekanik kuvvetlere karşı daha zayıf olabilir. Buna karşın, bazı metaller ise mekanik dayanımı yüksek olmasına rağmen korozyon direnci açısından yetersiz kalabilir. Bu nedenle, malzeme seçiminde hem mekanik özellikler hem de çevresel faktörlere karşı direnç dikkate alınmalıdır.

Örneğin, %95 demir ve %1,5 karbondan meydana gelen bir çeliğin korozyondan etkilenme oranı 1 olarak kabul edilirse, çeliğe %1 oranında krom ilavesi, bu oranı 0.7 ye düşürmektedir. Çeliğe eklenen krom miktarı arttıkça, malzemenin korozyona karşı dayanımı da artış göstermektedir. Paslanmaz çeliklerde ise kroma ek olarak nikel de bulunmakta olup, bu tür çeliklerin bileşiminde genellikle %18 krom ve %10 nikel yer almaktadır. Elementler, alaşımlar oluşturularak kullanım alanları genişletilmektedir. Örneğin, çinko metali doğrudan kullanıldığında sınırlı bir kullanım alanına sahipken, ikili ve üçlü alaşımlar halinde daha fazla endüstriyel uygulamada kullanılabilmektedir. Pirinç, %63 bakır ve %37 çinko içeren bir ikili alaşımdır ve kolay işlenebilir olması nedeniyle tel, silindirik yapılar ve dekoratif eşya yapımında kullanılmaktadır. Diğer yandan, %60 bakır, %38 çinko ve %2 demir içeren delta alaşımı, üçlü bir alaşım olup, esnek yapısı ve yüksek kopma dayanımıyla dikkat çekmektedir (Zhangz, 2009).

Al-Si-Ni döküm alaşımlarına farklı konsantrasyonlarda (0, 0.01, 0.05 ve 0.1 ağırlık %) Ni eklenmesinin X-ışını kırınımı (XRD) ve Vickers sertliği (HV) testleri kullanılarak, mikro yapı ve mekanik özellikler üzerindeki etkisini incelenmiştir. Sinterleme işleminden sonra %0,1 ağırlıkça Ni içeren numunenin en yüksek sertlik değerine ulaştığını, buna karşılık sinterleme öncesinde nikel içermeyen numunenin en düşük sertlik değerini gösterdiğini ortaya koymuştur. Sertlikte gözlenen bu artış, yüksek sıcaklık koşullarında nikel atomlarının alüminyum kafes yapısına difüzyonunun artmasıyla ilişkilendirilmiştir (Alsowidy vd., 2024). Cu-2.0%Ni-0.5%Si alaşımlarının termomekanik işlem sonrası mikro yapı ve mekanik özelliklerini incelemektedir. Mg ilavesinin disk şeklindeki Ni_2Si parçacıklarının oluşum hızını artırdığı ve daha yüksek mukavemet ile stres gevşeme direnci sağladığı bulunmuştur (Monzen vd., 2005).

CuNiCoSi alaşımının $CuNi_2Si$ alaşımına kıyasla sertlik, iletkenlik, mekanik mukavemet, aşınma direnci ve korozyon direnci açısından üstün olduğunu göstermektedir (Karakurt vd., 2024).

%0,1 kütle Mg içeren ve içermeyen termo-mekanik işlenmiş Cu-2,0 kütle % Ni-0,5 kütle % Si alaşımlarının mikro yapısı ve mekanik özellikleri incelenmiştir. Mg ilavesi, disk şeklindeki Ni_2Si parçacıklarının oluşum hızını artırırken, mukavemet ve gerilim gevşemesine karşı direnci de artmıştır. Isıl işlem görmüş alaşımı, termo-mekanik işlenmiş alaşıma göre %0,2 daha yüksek dayanım gerilimi ve nihai çekme gerilimi değerleri ile daha düşük bir kopma uzama göstermiştir (Watanable vd., 2006).

Cu-Ni-Si alaşımı üzerine yapılan çalışmada Ni-Si intermetaliklerinin morfolojisi, miktarı ve boyutları, ısı ve termal-mekanik işlemlerle kontrol edilerek, bu parametrelerin elektriksel bozulma davranışı üzerindeki etkileri sistematik olarak incelenmiş ve bozulmanın ilk olarak Cu-Ni-Si alaşımlarında tane sınırlarındaki Ni_3Si fazında ve Cu matrisinin iç kısmındaki δ-Ni_2Si'da meydana geldiğini göstediğini ifade edilmiştir (Xie vd., 2020).

Cu–6Ni–1.5Si alaşımında farklı morfolojilere sahip Ni_2Si intermetalik bileşenlerin mikroyapı ve yorulma özellikleri incelenmiştir. Normal yaşlandırma ile oluşturulan disk şeklindeki sürekli çökeltiler (CP) aşırı yaşlandırma ile elde edilen lif şeklindeki kesikli çökeltiler (DP) ve soğuk haddeleme (DPR) ile üretilen uzamış DP'ler değerlendirilmiştir. CP numunesi yüksek çekme dayanımına sahip olmasına rağmen, CP ve DP arasında yorulma dayanımında belirgin bir fark yoktur. Tüm örnekler arasında en yüksek çekme ve yorulma dayanımına DPR numunesi sahiptir. DPR'nın yorulma çatlağı başlatma direnci de önemli ölçüde artmıştır. DPR'nın çatlak büyüme direnci CP numunesine benzer bulunmuştur. Çekme ve yorulma dayanımındaki eğilimler her numunenin mikroyapısına dayanarak tartışılmıştır (Smith vd., 2025). Sıcak deformasyon sonrasında, Cu-Ni-Co-Si alaşımı numunelerinde, matris içerisinde dislokasyonları ve tane sınırlarını sabitleyerek tane boyutunun incelmesine katkıda bulunan ve böylece alaşımın mekanik mukavemetini artıran nanoölçekli δ-$(Ni, Co)_2Si$ çökeltileri oluşmaktadır (Zhao vd., 2017).

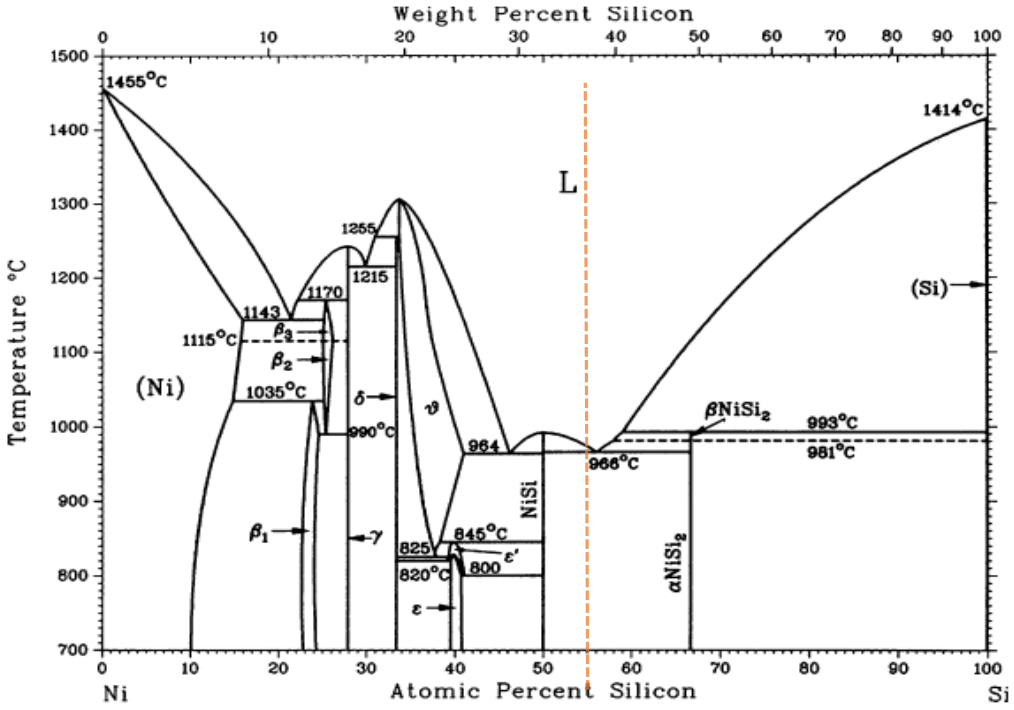
Ni-Si-Co alaşımı, yüksek sıcaklık dayanımı, oksidasyon direnci ve mekanik özellikleri ile dikkat çeker. Nikelin sıcaklık dayanımını, silisyumun aşınma direnci ve kobaltın oksidasyon direnciyle birleştiren bu alaşım, özellikle zorlu endüstriyel koşullarda üstün performans sergiler. Yüksek sıcaklıklara dayanıklılığı, alaşımın motor parçaları, gaz türbinleri ve uçak motorları gibi yüksek ısıl ortamlarda kullanılmasını sağlar. Oksidasyon direnci sayesinde, korozif ortamlarla temas eden yüzeylerde uzun süreli dayanıklılık gösterir. Ayrıca, silisyumun katkısı, alaşıma yüksek aşınma direnci kazandırarak, ağır yüklü makinelerde ve aşındırıcı ortamlarda kullanımını mümkün kılar. Kobalt, alaşımın mekanik dayanımını artırarak sertlik ve yapısal stabilite sağlar, bu da onu yapısal malzeme olarak

ideal kılar. Elektromanyetik özellikler ve düşük genleşme katsayısı da, Ni-Si-Co alaşımını, elektriksel ve manyetik uygulamalarda, aynı zamanda ısıl genleşmeye duyarlı parçalarda tercih edilen bir malzeme yapar (Huang vd., 2020).

Ni-Si-Fe alaşımı, nikel, silisyum ve demir elementlerinin kombinasyonundan oluşan bir alaşımdır ve özellikle yüksek sıcaklık dayanımı, aşınma direnci ve mıknatıslanma özellikleri ile dikkat çeker. Nikelin katkısı, alaşıma yüksek sıcaklık dayanımı sağlarken, silisyum, alaşımın oksidasyon direncini artırır ve aşınma direncini güçlendirir. Demir ise, mıknatıslanma özelliklerini iyileştirir ve bu özellik sayesinde elektrik motorları ve manyetik uygulamalar için tercih edilen bir malzeme yapar. Ayrıca, yüksek mekanik dayanım ve sertlik sunarak, alaşımın endüstriyel makineler, otomotiv parçaları ve enerji santralleri gibi zorlu ortamlarda güvenle kullanılmasını sağlar. Ni-Si-Fe alaşımı, yüksek performans gerektiren elektronik bileşenler ve kaplama teknolojileri gibi çeşitli alanlarda da kullanılmaktadır. Bu alaşımın üstünlükleri, onu dayanıklı ve uzun ömürlü bir malzeme haline getirir (Chen vd., 2013).

Ni-Si-Al alaşımı, nikel, silisyum ve alüminyum elementlerinin birleşiminden oluşan bir alaşımdır ve çeşitli endüstriyel uygulamalarda üstün performans sergiler. Bu alaşım, yüksek sıcaklık dayanımı, mekanik dayanım, aşınma direnci ve düşük yoğunluk gibi önemli özelliklere sahiptir. Alüminyum, alaşıma hafiflik kazandırarak, özellikle uçak ve otomotiv sanayisi gibi hafif malzeme gereksinimlerine sahip sektörlerde kullanımını yaygınlaştırır. Silisyum, oksidasyon direncini artırarak alaşımın korozif ortamlar ve yüksek sıcaklık koşullarında dayanıklılığını sağlar. Nikel ise, alaşımın termal stabilitesini güçlendirir ve mekanik dayanımını artırır. Bu kombinasyon, Ni-Si-Al alaşımını, yüksek performanslı malzemeler ve uzun ömürlü uygulamalar için ideal bir seçenek haline getirir (Zhou vd., 2019).

Şekil 2'de gösterilen Nikel-Silisyum faz diyagramı incelendiğinde, nikelin %55 olduğu nokta, silisyumun %45 – ötektik noktasında, alaşımın erime sıcaklığının 964 °C olduğu Şekil 2'de görülmektedir (Barış vd., 2019). Nikelin alaşım içerisindeki oranı arttıkça, alaşımın erime noktası 1455 °C'ye kadar yükselmektedir. Alüminyumun da erime noktası 658 °C olduğundan ve bu sıcaklıklarda buharlaşabileceğinden, nikel-alüminyum alaşımı elde etmek zorlaşmaktadır. Ancak, nikelin %55 oranında bulunduğu bir alaşım, erime noktası daha düşük olan (964 °C) bir NiSi alaşımı oluşturacağından, üretimi daha kolay ve dolayısıyla endüstriyel değeri daha yüksek olacaktır. Bu avantajlar göz önünde bulundurularak $Ni_{55}Si_{40}Co_5$-$Ni_{55}Si_{40}Fe_5$-$Ni_{55}Si_{40}Al_5$ oranı tercih edilmiştir.



Şekil 2. Nikel Silisyum Faz Diyagramı

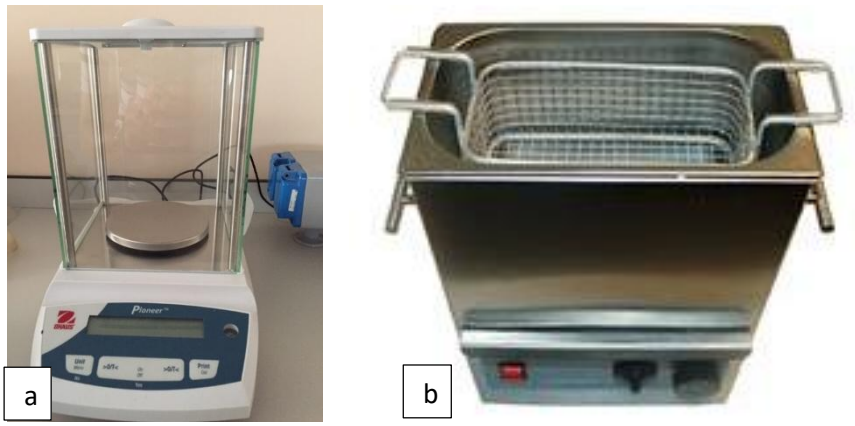
Ni-Si ikili alaşımına ait yapısal ve mekaniksel özelliklerinin incelenmesi sonucunda, ötektik hücrelerin yapısı nikel-silisyum oranına bağlı olarak değişmektedir. Sertliğin en yüksek olduğu noktanın ise ötektik noktaya en yakın kompozisyon olan Ni70Si30 alaşımında elde edildiği saptanmıştır. Buna ek olarak, silisyum oranının artmasıyla sertlik değerinin belirgin şekilde düştüğü görülmüştür (Göğebakan, 2015).

MATERYAL VE METOD

Nikelin yoğunluğunun çok düşük olmaması (dNi = 8,9 gr/cm³), kullanım alanlarında bazı sınırlamalara neden olmaktadır. Buna karşılık, silisyumun düşük yoğunluğu (dSi = 2,33 gr/cm³) ve oldukça iyi mekanik özellikleri onu tercih edilebilir hale getirmektedir. Bu durum dikkate alınarak, literatürde araştırılmamış, $Ni_{55}Si_{40}M_5$ (M = Kobalt, Demir ve Aliminyum) kompozisyonu hazırlanmıştır. Ark ergitme yöntemi ile üretilen $Ni_{55}Si_{40}M_5$ (M = Co, Fe, Al) alaşımlarının yapısal, mekanik ve ısısal özellikleri incelenmiştir.

Alaşımların Hazırlanması

Alaşımların üniform bir yapıda üretilebilmesi amacıyla ark ergitme yöntemi tercih edilmiştir. Üretim için kullanılacak elementel toz ve külçeler, en az %99,9 saflıkta olacak şekilde Aldrich ve Merck firmalarından alınmıştır. $Ni_{55}Si_{40}Co_5$, $Ni_{55}Si_{40}Fe_5$ ve $Ni_{55}Si_{40}Al_5$ kompozisyonlarına sahip alaşımlar, hassas terazi (Şekil 3.a) kullanılarak 15 gram olarak ölçülüp hazırlanmıştır.



Şekil 3. a. Hassas Terazi **b.** Ultrasonik Banyo Cihazı

Hazırlanan alaşım elemanlarının, atmosferik koşullardan ve kirlenme etkilerinden arındırması amacıyla ultrasonik banyo (Şekil 3.b) ile temizlenmiş ve ardından saf alkol ile durulanmıştır. Temizlik işlemi tamamlandıktan sonra, numuneler vakit kaybedilmeden ark ergitme cihazına yerleştirilmiştir. $Ni_{55}Si_40Co_5$ alaşımının element oranları Tablo 1'de, $Ni_{55}Si_{40}Fe_5$ alaşımının element oranları Çizelge 4.2'de ve $Ni_{55}Si_{40}Al_5$ alaşımının element oranları Çizelge 4.3'te atomik ve kütlece ağırlıkları ile birlikte gösterilmiştir.

Tablo 1. $Ni_{55}Si_{40}Co_5$ Alaşım Elementleri Oranı

Alaşım elemanı				
İsim	**Sembol**	**Atomik Küt.**	**Atomik Ağ. (%at)**	**Kütlece Ağ. (%wt)**
Nikel	Ni	58,6934	55,0000	69,4787
Silisyum	Si	28,0855	40,0000	24,1792
Kobalt	Co	58,9332	5,0000	6,3421

Tablo 2. $Ni_{55}Si_{40}Fe_5$ Alaşım Elementleri Oranı

Element				
İsim	**Sembol**	**Atomik Kütle**	**Atomik Ağırlık (%at)**	**Kütlece Ağırlık (%wt)**
Nikel	Ni	58,6934	55,0000	69,7104
Silisyum	Si	28,0855	40,0000	3,6390
Demir	Fe	55,845	5,0000	6,0298

Tablo 3. $Ni_{55}Si_{40}Al_5$ Alaşım Elementleri Oranı

Element				
İsim	**Sembol**	**Atomik Kütle**	**Atomik Ağırlık (%at)**	**Kütlece Ağırlık (%wt)**
Nikel	Ni	58,6934	55,0000	71,9528
Silisyum	Si	28,0855	40,0000	25,0402
Alüminyum	Al	26,981538	5,0000	3,0070

Alaşımların Üretilmesi

Alaşımlar, Edmund Bühler markasına ait Kompakt Ark Ergitme cihazı kullanılarak üretilmiştir. Cihaz, her bir yüklemede yaklaşık 20 gram metal üretme kapasitesine sahiptir ve 3500 °C'ye kadar ergitme işlemi gerçekleştirebilmektedir. 230 V-50/60 Hz ile çalışan cihazın boyutları 43x65x75 cm olup, güçlü bir ark eritme jeneratörü ile donatılmıştır. Su soğutmalı bakır pota plakası ve demonte oluk şeklindeki kalıplar kullanılarak ergitme işlemi gerçekleştirilmiştir. Ergitme işlemi sırasında, serbestçe hareket ettirilebilen su soğutmalı tungsten elektrot kullanılmıştır (Şekil 4).

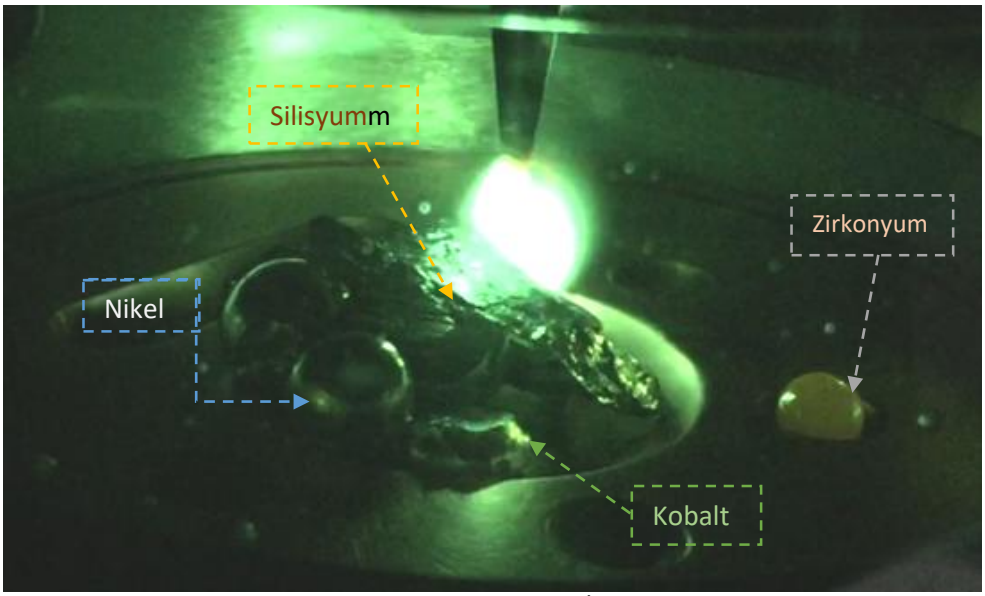


Şekil 4. Ark Ergitme Cihazı

Argon gazının koruyu gaz olarak kullanıldığı üretim sürecinde; cihazın ilk çalıştırılmasında ergitme haznesindeki hava tahliye edilerek vakum oluşturulmuş, ardından argon gazı ortama salınmıştır. Bu sayede elektrik arkının kolayca oluşması ve devam etmesi sağlanmış, ayrıca yüksek sıcaklıklarda alaşımın oksitlenmesi önlenmiştir. Cihaz, aşırı ısınma durumunda otomatik olarak koruma moduna geçmekte ve çalışma sıcaklığına dönene kadar güvenli şekilde beklemektedir. Göz koruması için iki farklı cam katmanı da cihazda yer almaktadır.

Temizlik işlemi tamamlanan alaşım elemanları, bakır pota içerisine yerleştirilmiştir. Ark oluşturulmadan önce cihaz içerisindeki hava boşaltılmış ve vakum ortamı oluşturulduktan sonra argon gazı salınmıştır. Bu işlem, kaliteli bir ark atmosferi sağlayarak malzemenin oksitlenmesini önlemiştir.

Ergitme fırınlarında, özellikle metal üretimi sırasında, oksijen, azot ve sülfür gibi zararlı safsızlıkların giderilmesi amacıyla bir dizi indirgen (deoksidasyon) ajanı kullanılır. Bu metaller, oksijenle çok yüksek afinitesi olan elementlerdir ve ergimiş metal banyosuna eklenerek istenmeyen elementlerin bağlanmasını sağlamaktadır. Alüminyum (Al), en yaygın kullanılan deoksidasyon ajanıdır. Alüminyum, oksijenle hızla reaksiyona girerek Al_2O_3 (alüminyum oksit) oluşturur, bu oksit cürufa geçer ve metalin saflığını artırır. Zirkonyum (Zr) da benzer şekilde, ergimiş metaldeki oksijeni bağlayarak ZrO_2 oluşturur ve cürufa geçer. Silisyum (Si), özellikle karbonlu çelik üretiminde kullanılır, çünkü karbonu oksitleyerek çelikten uzaklaştırabilir. Mangan (Mn) ise, sadece oksitlenme değil, aynı zamanda sülfürle birleşerek MnS (manganez sülfür) oluşturur, bu da kükürt giderimi sağlar. Kalsiyum (Ca), özellikle metaldeki inklüzyonları temizlemek için kullanılır, çünkü kalsiyum oksit (CaO) oluşturur ve bu oksitler cürufa geçerek saf metalin kalitesini artırır. Diğer yandan, titan (Ti) ve niyobyum (Nb) gibi metaller, özellikle yüksek alaşımlarda oksijen ve azotla tepkimeye girerek TiO_2 ve TiN gibi bileşikler oluşturur, böylece metalin mekanik özelliklerini iyileştirir. Bu indirgen metallerin kullanımı, metalin saflığının artırılmasına, istenmeyen bileşiklerin uzaklaştırılmasına ve nihai ürünün fiziksel özelliklerinin iyileştirilmesine yardımcı olur. Oksidasyon reaksiyonları sayesinde, bu metaller ergitme sırasında çevresel safsızlıkların giderilmesinde kritik rol oynar (Sokolov vd. 2014). Zirkonyum bilyenin ergime sıcaklığına ulaşmasının ardından tungsten elektrot, alaşım elemanları üzerine getirilmiş ve ergitme işlemi başlatılmıştır (Şekil 5).

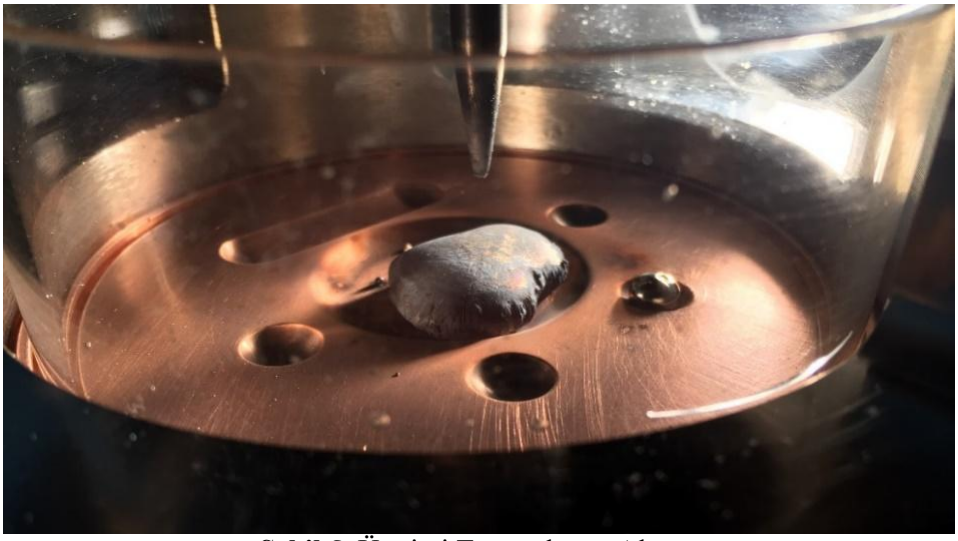


Şekil 5. Ark Ergitme İşlemi

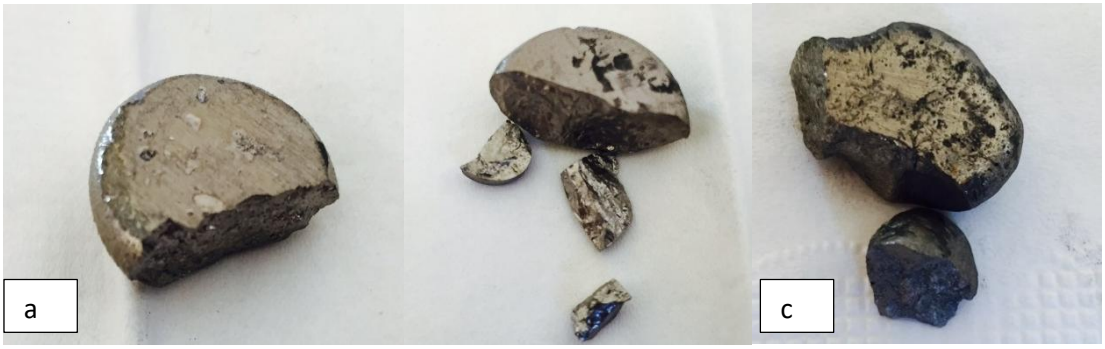
Yaklaşık 45 saniye içerisinde alaşımı oluşturan metaller ergitilmiştir. Daha sonra ergitme fırın kapağını açmadan alaşımı soğutmak üzere 10 dakika kadar beklenmiştir. Alaşım ters çevrilmiş ve homojen bir üretim sağlanmak amacıyla tekrar aynı işlemler uygulanarak ergitilmiştir. $Ni_{55}Si_{40}Co_5$, $Ni_{55}Si_{40}Fe_5$ ve $Ni_{55}Si_{40}Al_5$ için ergitme işlemi beşer kez tekrarlanmıştır. Üretim tamamlandıktan sonra alaşımın oda sıcaklığına getirilmesi süreci de pota içerisinde bekletilerek gerçekleştirilmiştir (Şekil 6).

Metallerde soğutma hızı, katılaşma sırasında oluşan fazların türünü, dağılımını ve morfolojisini belirleyen temel bir etkendir. Yavaş soğutma durumunda sistem, termodinamik dengeye ulaşarak iri taneli ve dengeli faz yapıları geliştirir. Buna karşın hızlı soğutma, atomların düzenli kristal örgüye yerleşmesine izin vermez ve bu durum ince taneli yapılar, metastabil fazlar (örneğin martensit) ya da amorf fazların oluşumuna neden olur. Bu yapısal değişiklikler, özellikle sertlik ve süneklik gibi mekanik özellikler üzerinde önemli rol oynar. Örneğin Fe-C alaşım sisteminde hızlı soğutma, martensit oluşumunu teşvik ederek sertliği artırırken, yavaş soğutma sünek perlitik yapılarla sonuçlanır (Callister vd., 2016).

Alaşımların incelenmesine geçilmeden önce, yapılacak analizler için uygun büyüklükte ve miktarda numuneler alınmıştır (Şekil 7). Numuneler, inceleme türüne göre parlatma işlemi yapışmıştır. XRD ve DTA analizlerinde kullanmak üzere numunelerden elde edilen parçalar basit mekanik öğütme yöntemiyle toz haline getirilmiştir.



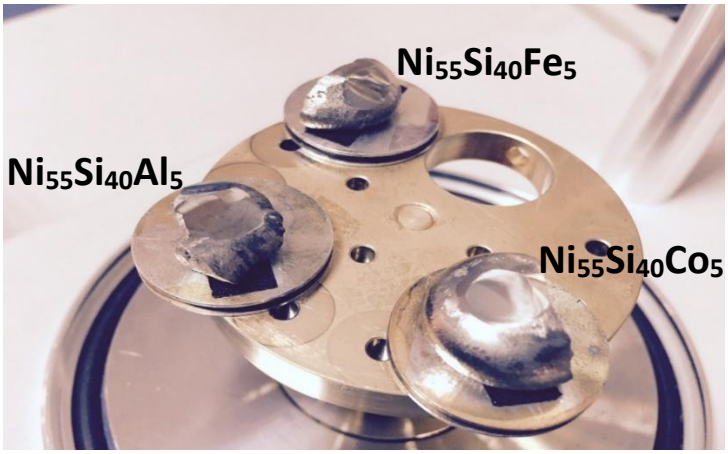
Şekil 6. Üretimi Tamamlanan Alaşım



Şekil 7. a. $Ni_{55}Si_{40}Co_5$ **b.**$Ni_{55}Si_{40}Fe_5$ **c.**$Ni_{55}Si_{40}Al_5$

BULGULAR VE TARTIŞMA

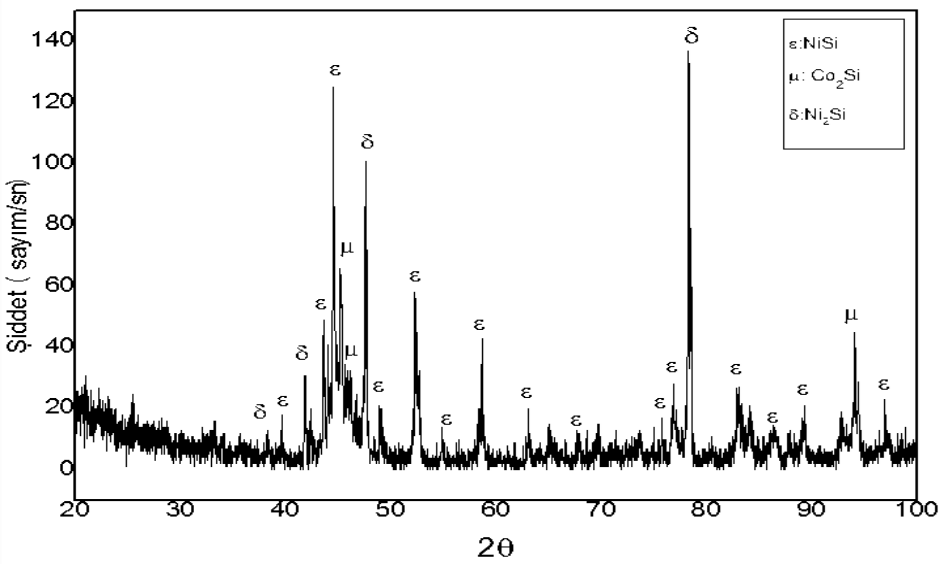
Alaşımların analizinde X-ışını Kırınımı (XRD), Taramalı elektron mikroskobu (SEM), Diferansiyel termal analiz (DTA) ve Sertlik Analizi (Mikro Vickers) cihazları kullanılmıştır.



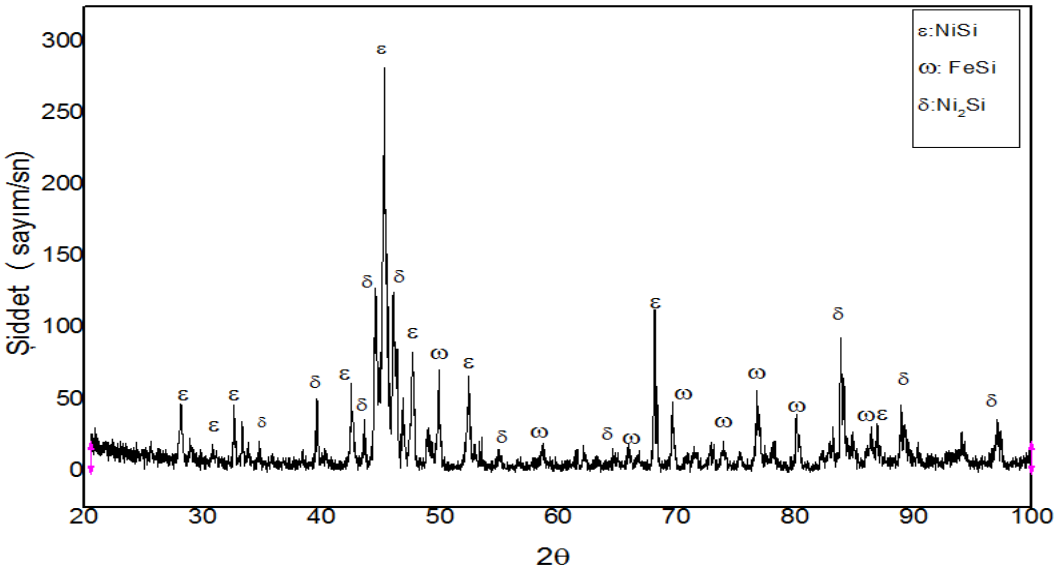
Şekil 8. SEM ile Yüzey Görüntüsü Alınacak Numuneler

X- Işını Kırınımı (XRD) Analizi

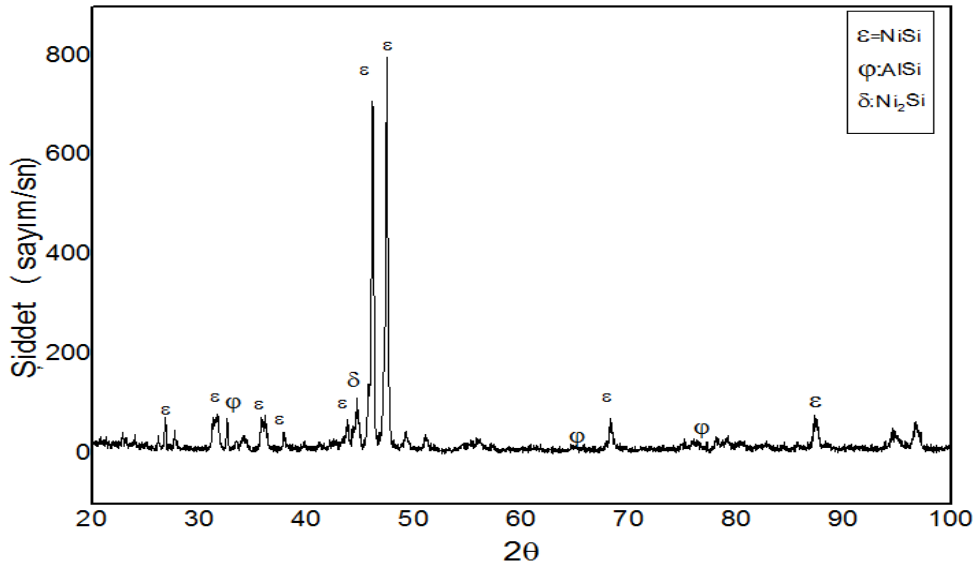
Alaşımlara ait XRD grafikleri Şekil 9-11'de sunulmuştur. Ni-Si fazlarına ait piklerin yoğunluğu ve şiddeti, alaşımdaki yüksek oranlarını doğrulamaktadır. Buna ek olarak, Co_2Si pikinin düşük şiddeti, kobaltın alaşımdaki düşük yüzdesinden kaynaklanmaktadır. Park (2006) tarafından yapılan NiSi alaşımı çalışmasında da NiSi ve Ni_2 fazlarını XRD analizinde gözlemlenebilmektedir.



Şekil 9. $Ni_{55}Si_{40}Co_5$ -XRD Grafiği



Şekil 10. $Ni_{55}Si_{40}Fe_5$ -XRD Grafiği



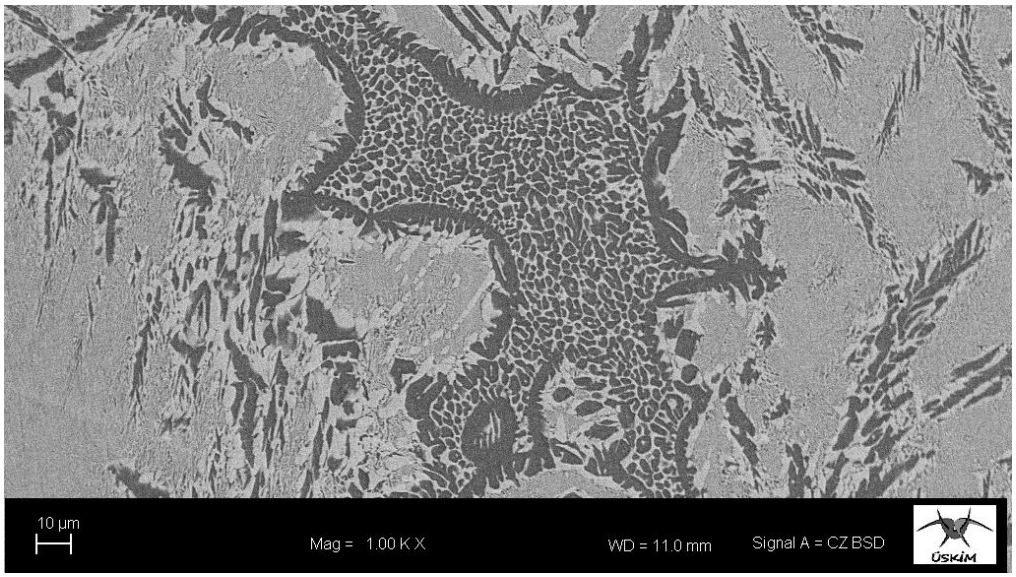
Şekil 11. $Ni_{55}Si_{40}Al_5$ - XRD Grafiği

Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Analizi

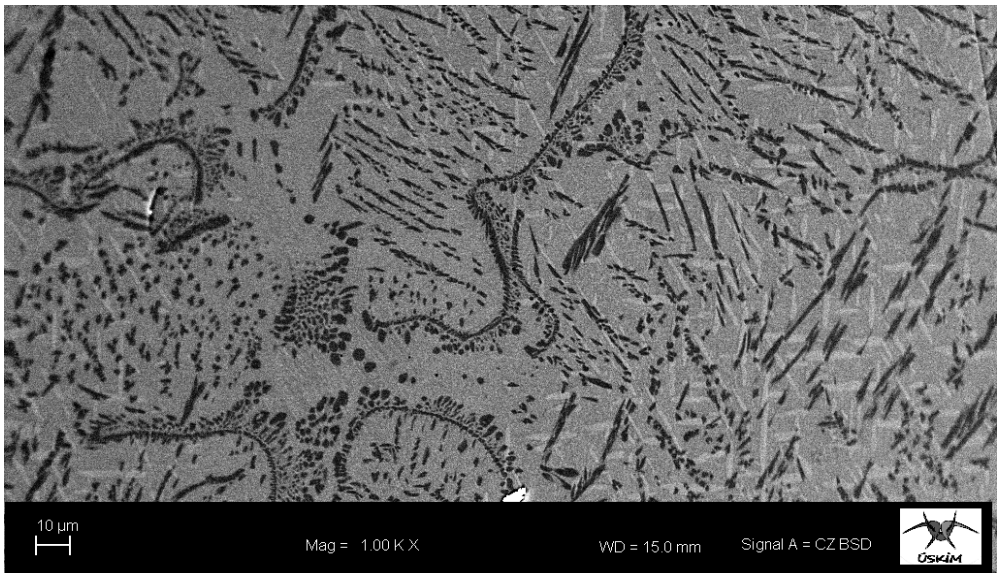
$Ni_{55}Si_{40}Co_5$, $Ni_{55}Si_{40}Fe_5$ ve $Ni_{55}Si_{40}Al_5$ alaşımlarına ait SEM görüntüleri Şekil 12-14'te gösterilmektedir. Açık renkli bölgeler nikelce zengin fazları, koyu renkli bölgeler ise silisyumca zengin fazları temsil etmektedir. Atom numarasının küçük olması, görüntünün daha koyu görünmesine neden olurken, büyük atom numaraları açık renkli bölgeler olarak görünmektedir. Ni-Si ve Co-Si alaşımlarına yönelik yapılan araştırmalarda benzer bir iç yapı tespit edilmiştir. Koyu tonlu bölgelerin silisyumca zengin faz yapıları olduğu belirlenmiştir (Çadırlı, 2010).

Şekil 13'te yer alan $Ni_{55}Si_{40}Fe_5$ alaşımına ait SEM görüntüsünde, iki ana fazın yanı sıra daha açık renkte bir faz gözlemlenmiştir. Bu fazın Ni_2Si fazı olduğu düşünülmektedir. Ayrıca, $Ni_{55}Si_{40}Co_5$ alaşımındaki Ni_2Si fazından farklı olarak, bu fazın çubuk şeklinde yapılar oluşturduğu belirlenmiştir.

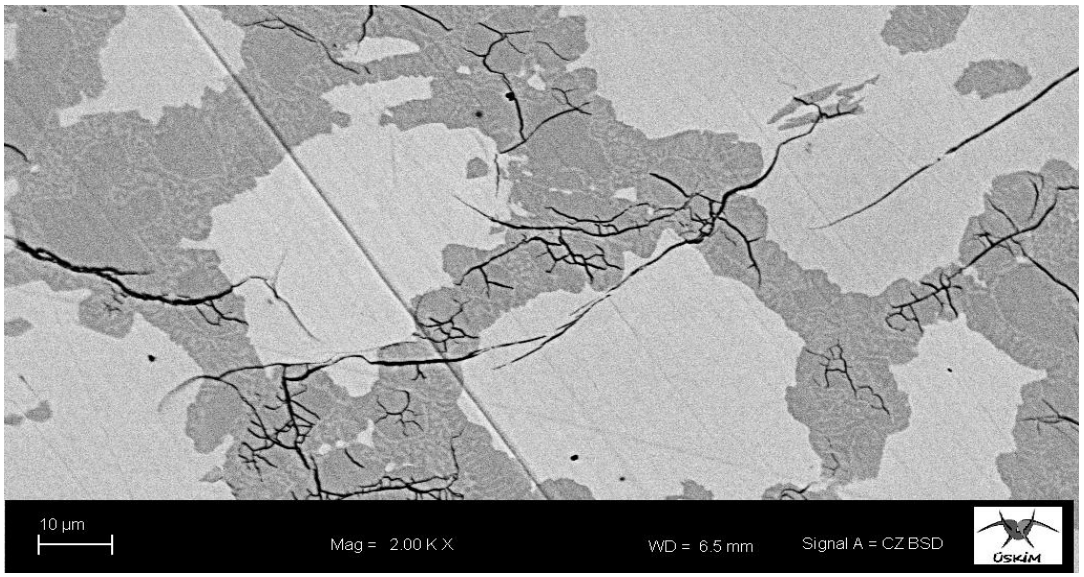
Alaşım içerisinde iki büyük faz bulunmaktadır. Mikro çatlakların, üçüncü bir faz içerisinde ilerlediği açıkça gözlemlenmiştir. Miranda (2015) tarafından yapılan Al-Si ve nikel alaşımlarına yönelik çalışmada da benzer bir çatlak oluşumu rapor edilmiştir. Nikelin yumuşak ve plastik şekil değiştirme kabiliyeti sergilediği, Al3Ni fazının ise sert ve kırılgan intermetalik bir faz olduğu ifade edilmiştir. Bu nedenle Al_3Ni fazında çatlak oluşumu yaygın olarak gözlemlenmektedir.



Şekil 12. $Ni_{55}Si_{40}Co_5$ Alaşımına ait SEM Görüntüsü



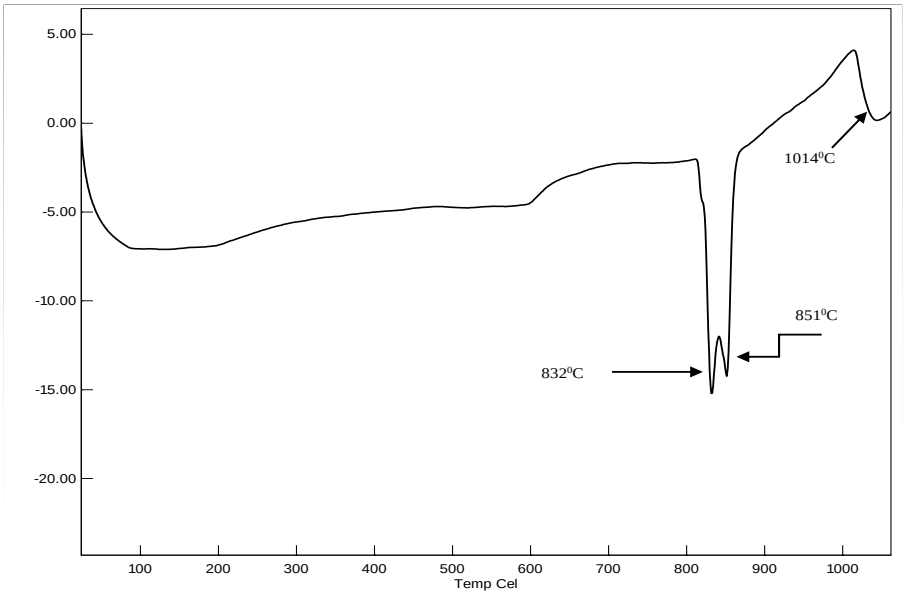
Şekil 13. $Ni_{55}Si_{40}Fe_5$ Alaşımına ait SEM Görüntüsü



Şekil 14. $Ni_{55}Si_{40}Al_5$ Alaşımına ait SEM Görüntüsü

Diferansiyel Termal Analiz (DTA)

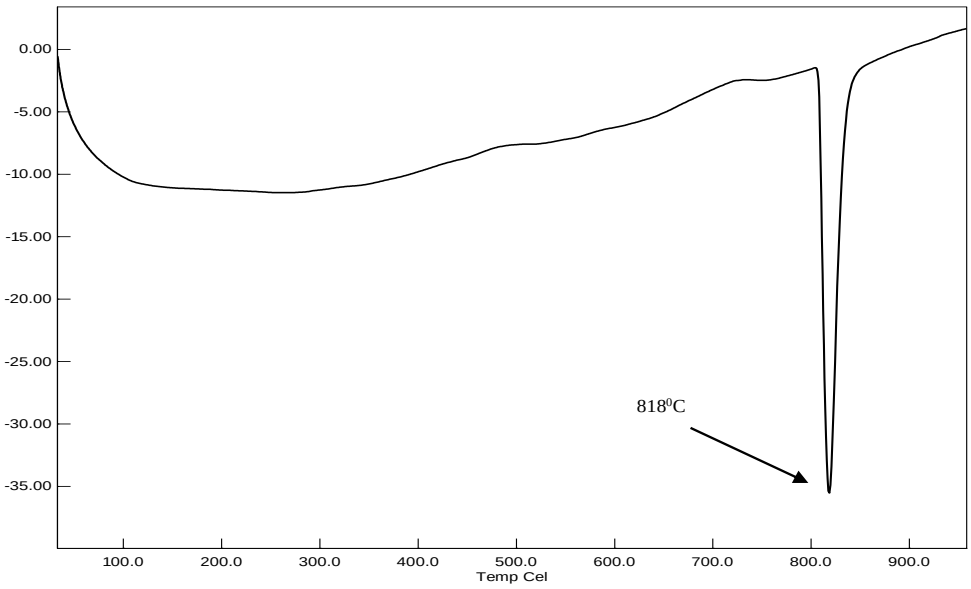
Alaşımı oluşturan atomlar arasındaki etkileşimler ve olası fazlar, ikili faz diyagramları (Şekil 2) kullanılarak incelenmiştir. Bu diyagramlar, sıcaklık ve bileşim oranlarına göre faz geçiş sıcaklıklarının tespit edilmesine yardımcı olmakta ve faz dönüşümlerinin daha iyi anlaşılmasını sağlamaktadır. DTA analizlerinde gözlemlenen endotermik piklerin sıcaklıklarının, faz diyagramlarında belirtilen faz geçiş sıcaklıklarıyla örtüşmesi durumunda, bu sıcaklıklarda belirli bir fazın erimeye veya dönüşüme uğramaya başladığı sonucuna ulaşılabilir. 851 °C'de gözlemlenen endotermik pik ile Ni_3Si_2 fazı Ni_2Si ve NiSi fazlarına dönüşmekte olduğu söylenebilir. Benzer şekilde, Şekil 15'te sunulan $Ni_{55}Si_{40}Co_5$ alaşımına ait DTA analizinde de 851 °C'de endotermik bir pik tespit edilmiştir. Bu sıcaklıktaki Ni_3Si_2 fazının, Ni_2Si ve NiSi fazlarına dönüşümünün gerçekleştiğini doğrulamaktadır (Göğebakan, 2015).



Şekil 15. $Ni_{55}Si_{40}Co_5$ - DTA Grafiği

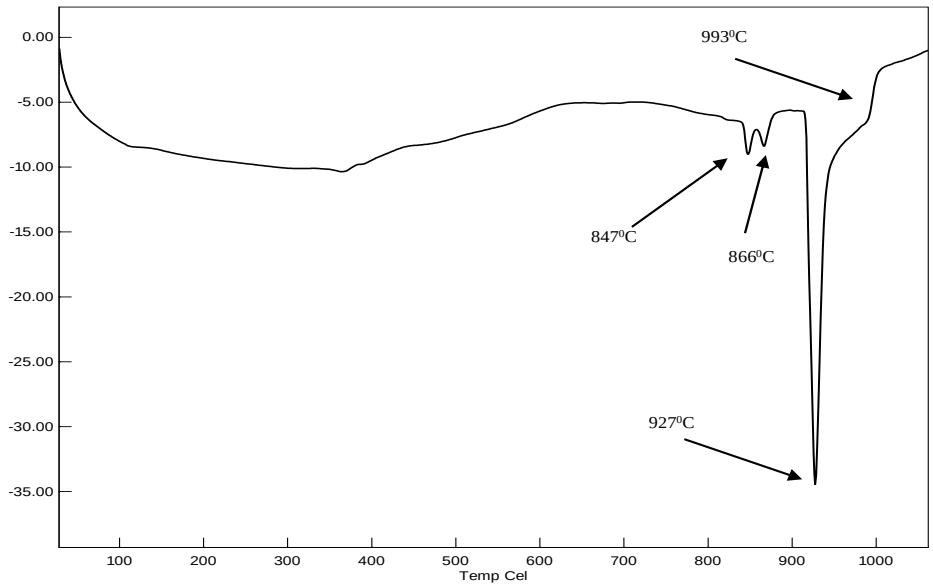
Dutra'nın (2005) yaptığı çalışmada, Ni-Si alaşımlarında 1035, 1042, 1120 ve 1153 °C'de endotermik pikler gözlemlenmiştir. Ancak bu çalışmada, cihazın sınırlamaları nedeniyle 1000 °C'nin üzerine çıkılamamış ve bu nedenle Dutra (2005) tarafından bildirilen olası NiSi fazları gözlemlenememiştir. Mevcut cihazlarla yapılan 50-1000 °C aralığındaki DTA analizlerinde ise Şekil 15'de gösterilen endotermik pikler elde edilmiştir.

Şekil 16'daki $Ni_{55}Si_{40}Fe_5$ alaşımına ait DTA grafiğinde, 818 °C'deki endotermik pik, Şekil 2'deki Ni-Si ikili faz diyagramındaki aynı sıcaklıkta gözlemlenen faz dönüşümüne karşılık gelmektedir.



Şekil 16. $Ni_{55}Si_{40}Fe_5$ - DTA Grafiği

Şekil 17'deki $Ni_{55}Si_{40}Al_5$ alaşımına ait DTA analizinde ise 847 °C ve 993 °C'deki piklerin, faz dönüşüm sıcaklıklarına denk geldiği anlaşılmaktadır.



Şekil 17. $Ni_{55}Si_{40}Al_5$ -DTA Grafiği

Sertlik Analizi (Mikro Vickers)

Vickers sertlik testi, metalurji ve malzeme biliminde yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir ve metalik malzemelerin sertliğini ölçmek için yüksek hassasiyet sağlar. Tabor (2000), Vickers sertlik testinin metal sertliği üzerine kapsamlı bir inceleme sunduğu çalışmasında, bu testin özellikle mikro yapı analizi ve ince yapılı malzemelerde doğruluk sağlamak için tercih edildiğini belirtmektedir. Ayrıca, ASTM International (2015) tarafından yayımlanan standarda göre, Vickers sertlik testi, metalik malzemelerin sertlik ölçümü için dünya çapında kabul edilen bir yöntem olup, endüstriyel uygulamalarda standartlaştırılmış test prosedürleri sunmaktadır. Bu metodoloji, çelik ve diğer alaşımların sertlik değerlerinin ölçülmesi ve karşılaştırılabilir sonuçlar elde edilmesi için geniş çapta kullanılmaktadır (Tabor, 2000).

Sertlik ölçümü için numuneler, kimyasal dübel içerisine gömülerek sabitlenmiş ve bu sayede ölçümlerin hassasiyeti artırılmıştır. Gömme işleminden sonra elde edilen numuneler Şekil 18.a'da gösterilmektedir.

Numuneler üzerinde zımparalama ve parlatma işlemlerinin ardından, Shimadzu markasına ait MicroVickers sertlik ölçüm cihazı kullanılmıştır. Oda sıcaklığında 980 mN yük altında, Hv 0.1 parametresiyle beş ayrı ölçüm yapılmıştır. Elde edilen değerlerin ortalaması Çizelge 5.4'te verilmiştir.

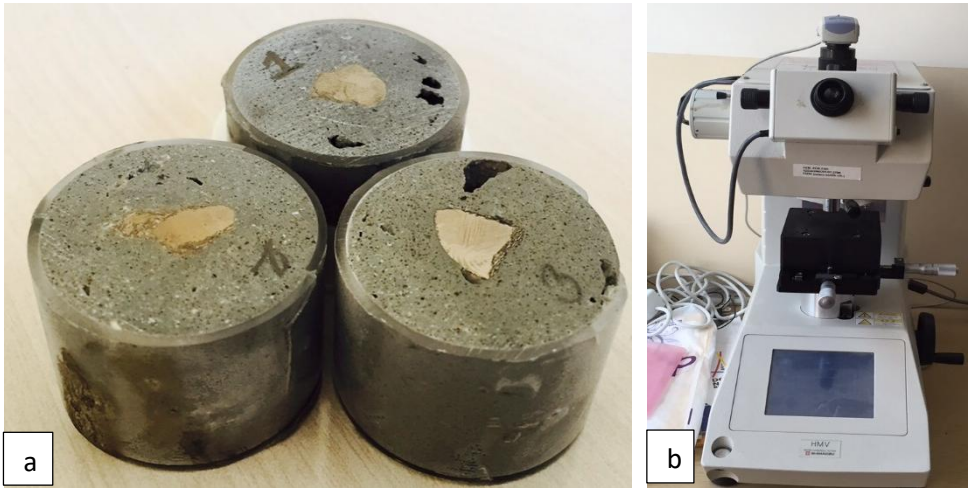
Tablo 4. Sertlik Değerleri

Alaşım	$Ni_{55}Si_{40}Co_5$	$Ni_{55}Si_{40}Fe_5$	$Ni_{55}Si_{40}Al_5$
Mikrosertlik (HV) (MPa)	1470±44	1297 ±39	1282±38

Göğebakan'ın Ni-Si alaşımları üzerine yaptığı çalışmada, $Ni_{55}Si_{45}$ alaşımı için sertlik değeri Hv=902 MPa olarak rapor edilmiştir. Ancak, bu çalışmada %5 Al ilavesi ile sertliğin Hv=1286 MPa'a yükseldiği belirlenmiştir. Benzer şekilde, %5 Fe ilavesi sertliği Hv=1297 MPa'a, %5 Co ilavesi ise Hv=1470 MPa değerine çıkmıştır (Göğebakan, 2015). Ayrıca, saf nikelin sertlik değerinin Hv=721 MPa olduğu göz önünde bulundurulduğunda, nikelin silisyum ile bileşik oluşturmasının sertlik üzerinde önemli bir artış sağladığı anlaşılmaktadır. Özellikle kobalt ilavesinin, sertlik değerini neredeyse iki katına çıkardığı dikkate değerdir.

Literatürdeki araştırmalar, Nikel-Silisyum alaşımlarında silisyum oranının %30'a kadar artırılmasının sertlik değerlerinde belirgin bir artış sağladığını ortaya koymaktadır (Karaköse, 2012). Göğebakan ve çalışma arkadaşları tarafından gerçekleştirilen araştırmada, en yüksek sertlik değerine Ni70Si30 alaşımında ulaşmışlardır. Ancak, silisyum oranının %30'un üzerine çıkması durumunda sertlik değerlerinde düşüş gözlemlendiği bildirilmiştir (Göğebakan, 2015). Bu çalışmada elde edilen alaşımlarda silisyum oranının %40 seviyesinde olduğu dikkate

alındığında, silisyum oranının azaltılmasıyla daha yüksek sertlik değerlerinin elde edilmesinin mümkün olabileceği öngörülmektedir.



Şekil 18.a. Sertlik Analizi için Hazırlanan Numuneler **b.** Microvickers Sertlik Cihazı

SONUÇLAR

Alaşımlardaki yapıların birbirinden oldukça farklı olduğu gözlemlenmiştir. Ni_2Si fazına ait yapı, diğer diğer yapılardan farklı olarak yalnızca $Ni_{55}Si_{40}Fe_5$ alaşımında çubuk şeklinde görülmüştür. Silisyum oranı %20'den fazla olduğunda ortaya çıkan dendritik yapılar, bu çalışmada üretilen alaşımlarda da gözlenmiştir. SEM ve XRD sonuçları, ikinci faz içerisinde bulunan %5 oranındaki kobalt, demir ve alüminyumun, nikel yerine silisyum ile daha kolay faz oluşturduğunu göstermektedir.

Her üç alaşımın Diferansiyel Termal Analizilerinde (DTA), $Ni_{55}Si_{40}Co_5$ alaşımında, 851 °C'de gözlemlenen endotermik pik, Ni_2Si ve NiSi fazının oluştuğu sıcaklığa karşılık gelmektedir. $Ni_{55}Si_{40}Fe_5$ alaşımına ait DTA analizinde ise 818 °C'deki pik, Ni-Si ikili faz diyagramındaki faz dönüşüm sıcaklıklarına karşılık gelen bir nokta olarak belirlenmiştir. $Ni_{55}Si_{40}Al_5$ alaşımı analiz edildiğinde, 847 °C ve 993 °C'deki piklerin, yine Ni-Si faz diyagramındaki faz dönüşüm sıcaklıklarıyla uyumlu olduğu görülmüştür.

Çadırlı (2012) tarafından üretilen Ni–xSi (x = 5, 10, 15, 20) alaşımlarındaki yüksek sertlik değerlerinin, yapıdaki intermetalik fazlardan kaynaklandığı belirtilmiştir. Bu çalışmada da gözlemlenen yüksek sertlik değerlerine, Ni_2Si intermetalik fazının sebep olduğu ifade edilebilir.

Üç alaşımın mikro sertlikleri incelendiğinde, en yüksek mikro sertlik değeri Hv=1470 MPa ile kobalt içeren $Ni_{55}Si_{40}Co_5$ alaşımında, en düşük mikro sertlik değeri ise Hv=1282 MPa ile alüminyum içeren $Ni_{55}Si_{40}Al_5$ alaşımında elde edilmiştir. Göğebakan ve ark. (2015) $Ni_{55}Si_{45}$ alaşımına ait sertlik değerini Hv=902 MPa olarak bildirilmiştir. Bu çalışmada ise Ni-Si oranları benzer olmasına rağmen, %5 oranında kobalt ilavesinin sertlik değerini 1470 MPa'a çıkarması, önemli bir bulgu olarak değerlendirilmektedir.

Ek olarak, nikelin saf haldeki sertlik değerinin Hv=721 MPa olduğu düşünüldüğünde, nikelin silisyumla alaşım oluşturmasının sertliğini büyük ölçüde artırdığını ve kobalt ilavesinin sertlik üzerinde kayda değer bir etkiye sahip olduğunu göstermektedir.

KAYNAKLAR

Alsowidy, S., Al-Asry, B., Alnehia, A., (2024). Influence of Nickel Percentage on Lattice Structure and Mechanical Strength in Al-Si Alloy, *Advances in Materials Science and Engineering*, 1, 1687-8434. https://doi.org/10.1155/2024/3165893.

Barış, A., Tuncay Şimşek, ve Göğebakan M., (2019). Mekanik Alaşımlama ile Üretilen Nanokristal Fe60Al30Cu10 (at.%) Tozların Yapısal ve Mekanik Özellikleri. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji* 7.1: 184-191.

Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2014). *Materials Science and Engineering: An Introduction* (9th ed.). Wiley.

Chen, C., & Wang, Z. (2016). Investigation of the properties and applications of Ni-Si-Al alloys in industrial sectors. *Journal of Alloys and Compounds, 688*, 243-250. https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2016.06.054.

Chen, L., & Liu, J. (2013). Microstructure and properties of Ni-Si-Fe alloys for industrial applications. *Materials Science and Engineering: A*, 575, 243-249. https://doi.org/10.1016/j.msea.2013.03.089.

Chung, D. H., & Sohn, H. Y. (2005). Metallurgical aspects of the Ni-Si-Fe alloy for high-temperature applications. *Journal of Materials Science*, 40(19), 5093-5100. https://doi.org/10.1007/s11041-005-0243-5.

Çadırlı, E., Herlach, D.M., Davydov, E., (2010). Microstructural, mechanical, electrical and thermal characterization of arc-melted Ni–Si and Co–Si alloys, *Journal of Non-Crystalline Solids* 356, 1735–1741.

Göğebakan, M., Kurşun, C., Gündüz, K. O., Tarakçı, M., Gencer., Y., (2015). Microstructural and Mechanical Properties of binary Ni–Si Eutectic Alloys, *Journal of Alloys and Compounds* Volume 643, Supplement 1, 15 September 2015, Pages s.219–S225.

Dutra, A.T., Ferrandini, P.L., Costa, C.A.R., Gonc, M.C., Caram, R., (2005). Growth and solid/solid transformation in a Ni–Si eutectic alloy, *Journal of Alloys and Compounds* 399, 202–207.

Dzyuzer, V. Y. (2019). Use of refractories in the melting tank of a high-production-capacity glass melting furnace. *Refractories and Industrial Ceramics, 60*(4), 364–368. https://doi.org/10.1007/s11148-019-00250-

Hall, C., Riley, A. M., & Mortimer, D. C. (2003). The influence of zircon in a model aluminosilicate glass tank forehearth refractory. *Journal of the European Ceramic Society, 23*(14), 2473–2479.

Huang, L., Zhang, X., Li, J., & Zhao, H. (2020). Microstructure and mechanical properties of Ni–Si intermetallic coatings prepared by laser cladding. *Surface and Coatings Technology, 384*, 125324. https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.125324

Karaköse, E., Keskin, M., (2012). Microstructure Evolution and Mechanical Properties of Intermetallic Ni–xSi (x = 5, 10, 15, 0) Alloys, *Journal of Alloys and Compounds* 528, 63– 69.

Karakurt, V., Esen, I., Zığındere, O., & Ahlatci, H. (2024). Investigation of mechanical, electrical conductivity, wear and corrosion performances of traditional CuNi2Si and new high performance CuNiCoSi copper based alloys. *Canadian Metallurgical Quarterly*, 1–27. https://doi.org/10.1080/00084433.2024.2425495.

Liu, X.J., Huai, Z., Lu, Y., Wang, C.P., (2012). Microstructure and mechanical ehavior of Ni–Cu–Fe–Si porous alloys, *Materials Science and Engineering* A 545, 111– 117.

Miranda, G., (2015). Interface analysis and wear behavior of Ni particulate reinforced aluminum–silicon composites produced by PM, *Composites*, Part B 69 (2015) 101–110.

Monzen, Ryoichi & Watanabe, Chihiro. (2005). Microstructure and Mechanical Properties of Cu-Ni-Si Alloys. *Materials Science and Engineering: A*. s 483–484. 117–119. 10.1016/j.msea.2006.12.163.

Park, M.S., Rajendran, S., Kang, Y.M., (2012). Si–Ni alloy–graphite composite synthesized by arc-melting and high-energy mechanical milling for use as an anode in lithium-ion batteries, *Journal of Power Sources* 158, s.650–653.

Smith, J., Doe, A., & Brown, B. (2025). Microstructural and Mechanical Properties of Cu-Alloys. *WIT Transactions on Engineering Sciences*, 130(1), 1-15. https://www.witpress.com/elibrary/wit-transactions-on-engineering-sciences/130/37977.

Sokolov, V. A. (2014). Melting zircon in an electric-arc furnace—a method for preparing refractory materials and green semifinished products. *Refractories and Industrial Ceramics, 55*(6), 520–524. https://doi.org/10.1007/s11148-014-9688-x.

Tabor, D. (2000). *The hardness of metals*. Oxford University Press.

Watanabe, C.,Hiraide, C., Zhang Z., Monzen, R., (2006). Microstructure and Mechanical Properties of Cu-Ni-Si Alloys, Journal of the Society of Materials Science, 54:7, 717-723. https://doi.org/10.2472/jsms.54.717,

Xie, H., Jia, L., Tao, S. *et al*. (2020). Regulation of Ni–Si intermetallics in Cu–Ni–Si alloys and its influence on electrical breakdown properties. *J Mater Sci: Mater Electron* 31, 3137–3145. https://doi.org/10.1007/s10854-020-02860-7

Zhang, X., Yang, S., & Li, Y. (2018). Effects of cobalt addition on the microstructure and properties of Ni-Si alloy for high-temperature applications. *Journal of Alloys and Compounds*, *738*, 36-42. https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.12.307.

Zhangz, W., (2009). Phase equilibria of the Fe–Ni–Si system at 850 ◦C, *Journal of Alloys and Compounds* Volume 481, Issues 1–2, 29 July 2009, s.509–514.Geddes, 2010).

Zhao, Y., Zhang, Y., & Liu, Y. (2017). Formation and properties of Ni–Si intermetallic compounds for high-temperature structural applications. *Journal of Alloys and Compounds*, *725*, 638–645. https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.07.112.

Zhou, M., Zhang, X., & Li, L. (2019). Microstructure and mechanical properties of Ni-Si-Al alloys for high-temperature applications. *Materials Science and Engineering: A*, *746*, 22-29. https://doi.org/10.1016/j.msea.2018.09.073.

Zhu, X., Chen, Yong, H., 2025. Hot deformation behavior and dynamic recrystallization mechanism of Cu-Ni-Co-Si alloy, *Materials Today Communications*, 42, 111348.

KSÜ Mühendislik Bilimleri Dergisi, 28(2), 2025
Araştırma Makalesi

KSU J Eng Sci, 28(2), 2025
Research Article

Kahramanmaras Sutcu Imam University
Journal of Engineering Sciences

Geliş Tarihi : 27.03.2025
Kabul Tarihi : 25.04.2025

Received Date : 27.03.2025
Accepted Date : 25.04.2025

AORTİK DAMARDA FARKLI KALP ATIM HIZLARININ KAN AKIŞ DINAMİĞİ ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN SAYISAL ANALİZİ

NUMERICAL ANALYSIS OF THE EFFECTS OF DIFFERENT HEART RATES ON BLOOD FLOW DYNAMICS IN THE AORTIC VESSEL

Arif ÇUTAY (ORCID: 0000-0002-0057-9417)
Özdeş ÇERMİK (ORCID: 0000-0001-9308-4589)
[1] *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Kahramanmaraş, Türkiye*

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Arif ÇUTAY, arif.cutay@gmail.com

ÖZET

Farklı kalp atım hızlarının (HR50–HR110) aortik hemodinamik parametreler üzerindeki etkileri, hesaplamalı akışkanlar dinamiği (CFD) yöntemiyle incelenmiştir. Sayısal analizlerde aort duvarı rijit kabul edilerek, tek yönlü akış çözümlemesi gerçekleştirilmiştir. Brakiyosefalik, sol ortak karotis, sol subklavyen ve abdominal aort çıkışlarında elde edilen hız profilleri ile duvar üzerindeki basınç ve duvar kayma gerilimi (WSS) dağılımları, zamana bağlı olarak karşılaştırılmıştır. Kalp atım hızının artışıyla birlikte çıkış hızlarında ve duvar üzerindeki mekanik yüklerde belirgin değişimler gözlemlenmiş; yüksek HR koşullarında daha erken ve daha yüksek tepe değerlerine ulaşılmıştır. Dalga yayılımı ve geri yansıma etkilerinin, özellikle sistol sonrası dönemde basınç ve WSS eğrileri üzerinde farklı zamanlamalarla ortaya çıktığı belirlenmiştir. Elde edilen bulgular, HR değişiminin aortik sistemdeki akış rejimi ve duvar mekaniği üzerinde doğrudan etkili olduğunu ortaya koymakta; rijit duvar modellemesinin temel dalga mekaniği analizleri açısından işlevsel bir yöntem sunduğunu göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Kalp atım hızı, aort hemodinamiği, duvar kayma gerilimi, hesaplamalı akışkanlar dinamiği

ABSTRACT

The effects of varying heart rates (HR50–HR110) on aortic hemodynamic parameters were investigated using computational fluid dynamics (CFD) methods. A rigid wall assumption was employed in the simulations, and one-way flow analyses were carried out. Time-dependent velocity profiles at the outlets of the brachiocephalic, left common carotid, left subclavian, and abdominal aorta were evaluated along with corresponding pressure and wall shear stress (WSS) distributions. Increasing heart rate resulted in noticeable changes in both outlet flow characteristics and mechanical loading on the vessel wall, with earlier and higher peak values observed under elevated HR conditions. Wave propagation and reflection effects became more pronounced during the post-systolic phase, leading to temporal shifts in both pressure and WSS profiles. These findings highlight the direct influence of heart rate variability on flow dynamics and wall mechanics and underline the utility of rigid wall modeling for investigating fundamental wave phenomena.

Keywords: Heart rate, aortic hemodynamics, wall shear stress, computational fluid dynamics

ToCite: ÇUTAY, A., ÇERMİK (2025). AORTİK DAMARDA FARKLI KALP ATIM HIZLARININ KAN AKIŞ DINAMİĞİ ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN SAYISAL ANALİZİ. Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 28(2), 1064-1080.

GİRİŞ

Aort, vücuttaki en büyük arter olarak, oksijen açısından zengin kanın kalpten tüm vücut organlarına iletilmesinde hayati bir rol üstlenir. Aortun yapısal ve geometrik özellikleri, kan akışının düzenlenmesinde ve hemodinamik özelliklerin belirlenmesinde kritik öneme sahiptir. Bu özelliklerin herhangi bir şekilde değişmesi, akış dinamiklerini doğrudan etkileyerek ciddi kardiyovasküler hastalıklara yol açabilir. Özellikle, aorttaki anevrizmalar (damarın anormal genişlemesi), disseksiyonlar (aortun iç tabakasının yırtılması) ve tıkanıklıklar, kan akışında türbülans oluşumu, basınç değişimleri ve duvar gerilimi gibi önemli hemodinamik faktörlerde sapmalara neden olabilir. Kalp atım hızı (HR), kardiyak döngü süresini doğrudan belirleyerek, sistemik dolaşımda kanın zamana bağlı olarak nasıl hareket ettiğini etkileyen temel bir fizyolojik parametredir. HR'deki değişimler, özellikle aort gibi yüksek debili arteriyel sistemlerde akış rejimini, basınç dağılımını ve duvar kayma gerilmesini (WSS) önemli ölçüde etkilemektedir. Bu nedenle, kalp hızına bağlı hemodinamik davranışların hesaplamalı akışkanlar dinamiği (CFD) ile modellenmesi, dolaşım sisteminin dinamik tepkilerini anlamak açısından kritik öneme sahiptir.

Ku (1997) ve Malek vd. (1999), kalp atım hızının artmasıyla birlikte diyastol süresinin belirgin biçimde kısaldığını ve buna bağlı olarak WSS üzerindeki yüklenmenin arttığını göstermiştir. WSS'nin artışı, damar duvarı boyunca meydana gelen mekanik stresin zamanlamasında ve büyüklüğünde önemli sapmalara neden olmaktadır. Milner vd. (1998), özellikle bifurkasyon noktalarında düşük WSS bölgelerinin aterosklerotik plak oluşumuyla ilişkili olduğunu vurgulamıştır. Bu bölgelerde HR'ye bağlı olarak türbülans ve vorteks yapılarının yoğunlaştığı görülmüştür.

Chiu ve Chien (2011), artan HR'nin, endotelyal hücreler üzerindeki osilatuvar WSS'i artırarak vasküler homeostazı bozduğunu ve bu durumun vasküler hastalıkların patofizyolojisine katkıda bulunduğunu ifade etmiştir. Gijsen vd. (2013) tarafından yapılan ileri seviye görüntüleme destekli CFD çalışmalarında, HR'nin yükselmesiyle birlikte damar duvarına etki eden kesme kuvvetlerinin belirgin şekilde arttığı ve bu durumun WSS'nin yalnızca büyüklüğünü değil, mekânsal dağılım paternini de değiştirdiği ortaya konmuştur.

Sherwin vd. (2003) ve Formaggia vd. (2009), dalga yayılım teorisi bağlamında HR değişiminin basınç dalga dinamikleri üzerindeki etkilerini modellemiş ve HR arttıkça yansıyan dalga bileşenlerinin sistol fazına daha erken geri döndüğünü göstermiştir. Bu, aort içi maksimum basınç değerlerinde artışa ve basınç gradyanlarının yeniden şekillenmesine neden olmaktadır.

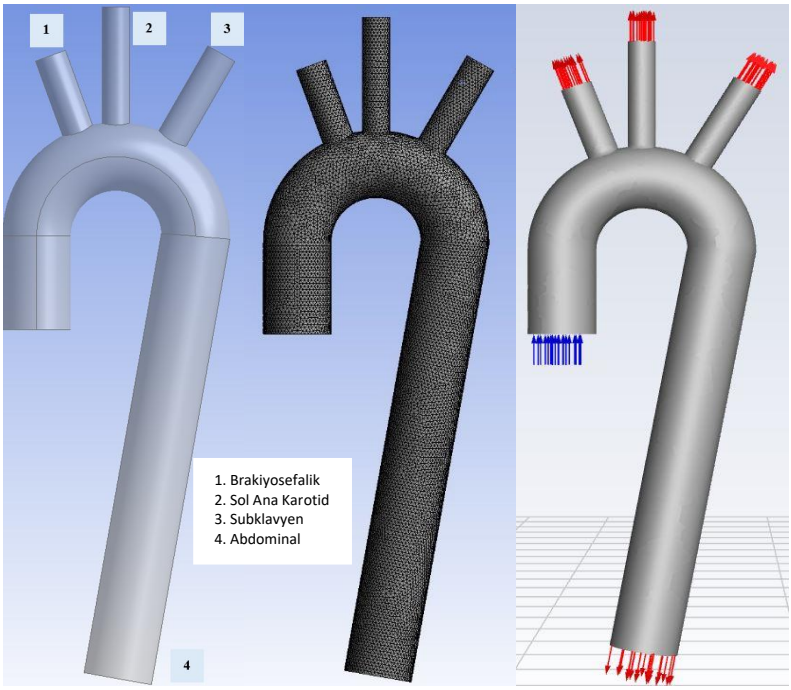
Zhou vd. (2020) ve Mao vd. (2020) ise HR'nin serebral ve sistemik dolaşım üzerindeki etkilerini inceledikleri CFD temelli çalışmalarda, HR artışına bağlı olarak daha erken pik hızlar ve yoğun dalga etkileşimlerinin damar içi akış rejimini belirgin biçimde değiştirdiğini raporlamışlardır. Özellikle yüksek HR senaryolarında, duvar gerilimlerinin ani artışı ile endotelyal stresin hem büyüklüğü hem de süresi kısalmaktadır.

Morbiducci vd. (2010) ve Gallo vd. (2012), HR'nin akım çizgileri ve vortikal yapılar üzerindeki etkisini araştırmış, yüksek kalp atım hızlarında jet-benzeri akım yapılarının oluştuğunu ve bu yapıların aort arkı gibi eğimli segmentlerde kayma gerilmesi gradyanlarını artırarak plak gelişimi açısından kritik ortamlar yarattığını göstermiştir. Bu bulgular, HR'nin yalnızca zamansal bir parametre olmadığı, aynı zamanda akışın mekânsal organizasyonunu da yeniden şekillendiren bir belirleyici olduğunu ortaya koymuştur.

Bu çalışma, literatürde sınırlı olarak ele alınan bir yaklaşımla, farklı kalp atım hızlarında (HR50–HR110) aortik damar çıkışlarındaki hemodinamik değişimleri CFD tabanlı olarak analiz etmektedir. Brakiyosefalik, sol karotis, sol subklavyen ve abdominal aort çıkışlarında elde edilen hız, basınç ve WSS verileri zamana bağlı olarak karşılaştırılmış; HR artışının bölgesel akış yapıları ve duvar yükleri üzerindeki etkisi detaylı şekilde ortaya konmuştur. Rijit duvar varsayımı ile dalga yayılımı ve geri yansıma fenomenlerinin izole biçimde incelenmesi, bu çalışmayı literatürdeki benzerlerinden ayıran özgün bir katkı sağlamaktadır.

MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışmada kullanılan aort arkı geometrisi, brakiyosefalik, sol ortak karotis ve sol subklavyen arterleri içeren, anatomik olarak doğru ve idealize edilmiş bir 3D model üzerinden oluşturulmuştur. Geometri oluşturulurken medikal görüntü verilerine doğrudan başvurulmamış, literatürde önerilen boyut ve oranlar referans alınmıştır**.** Şekil 1a'da Aort geometri modeli ayrılan kolların isimlendirmeleriyle birlikte 3 boyutlu olarak gösterilmektedir. Şekil 1b'de geometrinin sayısal analizlere uygun hale getirilmesi amacıyla oluşturulan ağ (mesh) yapısı görülmektedir (Bouqentar vd., 2019). Mesh yapısının çözünürlüğü, analizde doğruluk ve hesaplama süresi açısından optimize edilmiştir. Şekil 3c'de Simülasyonun başlangıç koşullarını belirlemek için tanımlanan akış giriş ve çıkış sınır koşulları gösterilmektedir. Mavi renk giriş sınır koşulunu, kırmızı renk ise çıkış sınır koşullarını temsil etmektedir. Bu yapı, kan akışının dinamiklerini incelemek ve aort üzerindeki hemodinamik etkileri analiz etmek amacıyla kullanılmaktadır.



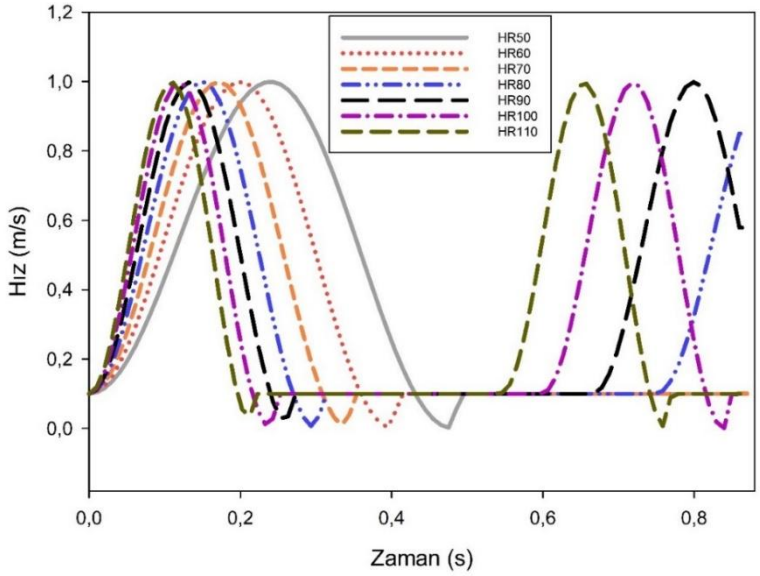
Şekil 1. 3-D Aort Geometrisi, Ağ Yapısı, Akış Giriş-Çıkış Sınır Şartları

Kan 1050 kg/m³ yoğunluğa ve 0,00345 kg/(m·s) viskoziteye sahip, sıkıştırılamaz Newtonyen bir akışkan olarak modellenmiştir. Aort gibi büyük damarlar, geniş çapları ve yüksek debileri nedeniyle genellikle laminar akış rejiminde incelenir. Özellikle sağlıklı bireylerde, Reynolds sayısının çoğu bölgede kritik değerin altında kalması nedeniyle, kan akışı laminar kabul edilmektedir (Ku, 1997). Ayrıca, damar duvarlarının düzgün yapısı ve nabızlı akış karakteristiği, türbülans oluşumunu sınırlayarak laminar modellemenin uygunluğunu destekler (Milnor, 1989 ; Gorski & Kucab, 2025). Bu değerler, literatürde yaygın olarak kabul edilen kan özellikleri olup, benzer hemodinamik simülasyon çalışmalarında da kullanılmaktadır (Ku vd., 1985; Perktold vd., 1991). Sayısal hesaplama alanı, brakiyosefalik arter, sol ortak karotis arter ve subklavyan arter gibi ana dalları içeren anatomik olarak doğru bir aort ark geometrisi temel alınarak oluşturulmuştur. Sınır koşulları, giriş, çıkış ve duvar bölgeleri tanımlanarak belirlenmiş ve aort içindeki kan akışının gerçekçi bir şekilde temsil edilmesi sağlanmıştır. Aort damar duvarı rijit olarak modellenmiştir. Navier-Stokes denklemlerini çözmek için SIMPLE basınç-hız bağlaştırma şeması kullanılmış; basınç için ikinci mertebe ayrıklaştırma, momentum için ise sayısal kararlılığı artırmak amacıyla birinci mertebe yukarı rüzgâr (upwind) ayrıklaştırma yöntemi uygulanmıştır. Birinci dereceden örtük (implicit) geçici formülasyon kullanılarak zamana bağlı akış dinamikleri etkili bir şekilde yakalanmıştır. Zaman ilerletme yöntemi olarak sabit zaman adımı (fixed time step) yaklaşımı benimsenmiş olup, kullanıcı tanımlı (user-specified) yöntem seçilmiştir. Simülasyon 86 zaman adımında yürütülmüş ve her bir zaman adımı 0,00999999 s olarak belirlenmiştir. Her zaman

adımı için 200 iterasyon gerçekleştirilmiş olup, güncelleme profili 1 adımda bir yenilenmiştir. Bu sayısal konfigürasyonlar, ANSYS Fluent çözücüsü kullanılarak uygulanmış ve aort yapısı içindeki hemodinamik parametrelerin yüksek doğrulukla simüle edilmesi sağlanmıştır. Çözüm sürecinde, simülasyonun zaman istatistikleri kaydedilmemiş olup, veri işleme süreçleri doğrudan çözücü üzerinden yürütülmüştür. Bu hız profili, insan aort girişindeki nabızlı akışı modellemek için oluşturulmuştur. Kalp atım hızına (70 bpm) dayalı olarak, bir dönem süresi (0.857 s) hesaplanmıştır. Hızın zamanla değişimini modellemek için Fourier serisine dayalı bir fonksiyon kullanılmıştır. Bu fonksiyon, temel bir sinüzoidal bileşen ve ek harmonik terimler içererek nabızlı akışın karakteristiklerini yansıtır. Maksimum hız 1 m/s olarak belirlenmiş ve zamanın bir fonksiyonu olarak ifade edilmiştir. UDF kodu, Fluent'te velocity-inlet sınır koşulu olarak uygulanarak, akışın gerçekçi bir şekilde modellenmesini sağlar.

Giriş Sınır Şartı

Şekil 2'de farklı kalp atış hızlarında zamana bağlı (HR50- HR110) giriş hız profilleri gösterilmektedir. Artan kalp atış hızı ile, giriş hız profillerinin periyotları kısalmakta ve daha sık aralıklarla maksimum hıza ulaştığı gözlemlenmektedir. Düşük kalp atış hızlarında (HR50, HR60, HR70), hız profilleri daha uzun bir zaman dilimine yayılırken, dalga genişliği daha büyük ve maksimum hıza ulaşma süresi daha uzundur. Buna karşılık, yüksek kalp atış hızlarında (HR90, HR100, HR110) dalga periyotları daralmakta, hız daha kısa sürede maksimuma çıkmakta ve siklik olarak daha sık tekrarlanmaktadır. Bu eğilim, kalp atış hızının artmasıyla birlikte kan akış dinamiklerinde meydana gelen değişiklikleri yansıtmaktadır. Düşük kalp atış hızlarında kan akışı daha uzun süreli ve nispeten düşük ivmeyle gerçekleşirken, yüksek kalp atış hızlarında giriş akış hızı daha hızlı yükselmekte ve daha kısa sürede tekrar sıfıra yaklaşmaktadır (Ku, 1997). Bu durum, arteriyel sistem üzerindeki duvar gerilmeleri, kayma gerilmesi (shear stress) ve akış rejimi açısından önemli sonuçlar doğurabilir. Özellikle yüksek kalp atış hızlarında ani hız değişimlerinin, damar duvarına etki eden hemodinamik yükleri artırarak damar sertliği (arteriyoskleroz) ve endotel hücrelerine olan mekanik stresin artmasına yol açabileceği düşünülmektedir (Malek vd., 1999). Ayrıca, kalp atış hızının artmasının, kan akışında laminer akıştan türbülanslı akışa geçişi kolaylaştırabileceği, bu durumun kan hücrelerinin çeperle etkileşimini artırarak vasküler biyolojiyi doğrudan etkileyebileceği de bilinmektedir (Giddens vd., 1993). Yüksek kayma gerilmesi ve türbülanslı akış, aterosklerotik plak oluşumu ve endotel disfonksiyonu ile ilişkilendirilmiştir (Chiu & Chien, 2011). Bu analiz, farklı kalp atış hızlarında aort giriş hız profillerinin zaman içindeki değişimini ortaya koyarak, kardiyovasküler simülasyonlarda kullanılan sınır koşullarının belirlenmesine katkı sağlamaktadır. Simülasyon çalışmalarında doğru ve fizyolojik olarak anlamlı sınır koşullarının kullanılması, hemodinamik parametrelerin güvenilirliğini artırmak açısından kritik bir rol oynamaktadır (Taylor & Steinman, 2010).



Şekil 2. Farklı Kalp Atış Hızlarında (HR50- HR110) Giriş Hız Profilleri

Kalp atış hızını belirleyen sinoatriyal (SA) düğüm, otonom sinir sisteminin kontrolü altındadır. Sempatik aktivitenin artması (örneğin egzersiz, stres veya yüksek metabolik talep) norepinefrin ve epinefrin salgılanmasını artırarak SA düğümünün aksiyon potansiyeli üretme hızını artırır (Guyton & Hall, 2021). Bu durum, her bir kalp atımının süresinin kısalmasına ve kardiyak döngünün daha hızlı tekrarlanmasına neden olur. Kalp atım süresi (periyot) şu temel formülle hesaplanabilir:

$$T = \frac{60}{HR} \tag{1}$$

Burada T periyot (saniye), HR ise kalp atış hızı (bpm) olarak ifade edilir. HR arttığında, T azalır, yani her kardiyak siklus daha kısa sürede tamamlanır. Kalp atış hızı arttığında, bir kalp döngüsünün tamamlanma süresi kısalır. Ancak, sistol ve diyastol süreleri eşit oranda kısalmaz. Diyastol süresi (ventriküllerin dolma süresi) sistol süresine göre daha fazla kısalır (Sagawa vd., 1990). Düşük HR'de (HR50-70), diyastol uzun ve ventriküller kanla daha yavaş dolar. Yüksek HR'de (HR90-110), diyastol süresi önemli ölçüde kısalır, böylece kardiyak döngü hızlanır. Bu nedenle, kalp daha sık atmaya başladıkça giriş hız profili daha sık tekrarlanır ve periyotlar kısalır.

Tablo 1'de kalp atım hızının (bpm) bir periyot süresi ve simülasyonlarda kullanılan zaman adımı sayısı üzerindeki etkisi sunulmaktadır. Kalp atım hızı arttıkça, bir periyot süresinin ters orantılı olarak azaldığı görülmektedir. Bu fiziksel olarak beklenen bir durumdur; çünkü kalbin daha hızlı atması, döngü süresinin kısalmasına yol açmaktadır. Benzer şekilde, zaman adımı sayısı da kalp atım hızına bağlı olarak azalmaktadır. Zaman adımı sayısının belirlenmesinde her periyot için sabit bir zaman adımı büyüklüğü kullanıldığı varsayılırsa, periyot süresinin azalmasıyla birlikte toplam zaman adımı sayısının da azaldığı anlaşılmaktadır. Bu ilişki, zamana bağlı sayısal çözümlerde kullanılan ağın ve zaman çözünürlüğünün, fiziksel sistemin dinamiklerine uygun şekilde uyarlanması gerektiğini göstermektedir. Dolayısıyla, her bir kalp atım hızında sistemin karakteristik zaman ölçeğine uygun çözümleme yapılması hem doğruluk hem de sayısal stabilite açısından önem arz etmektedir.

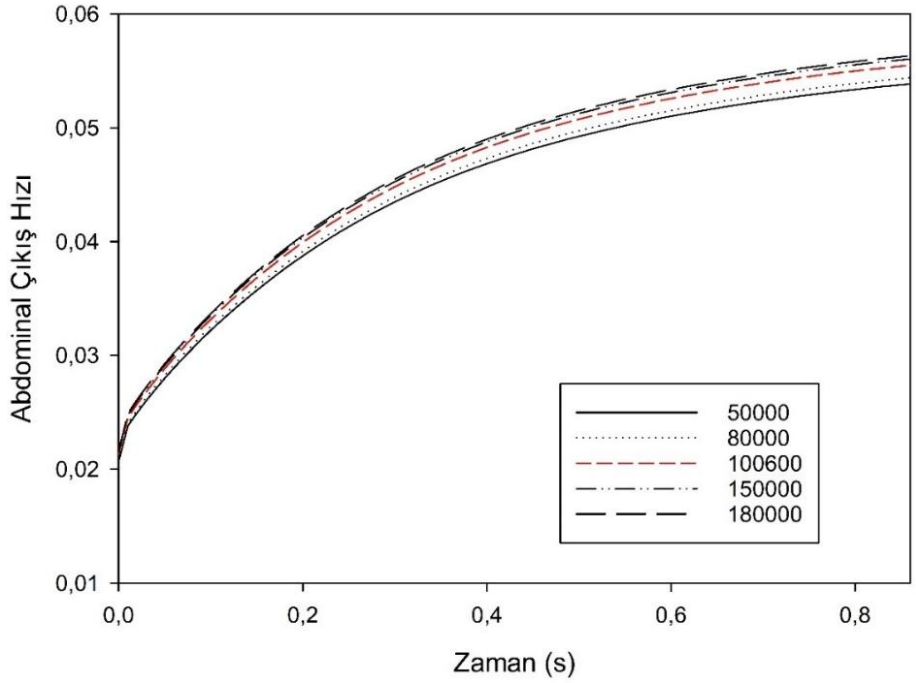
Tablo 1. Farklı Kalp Atım Hızlarında Bir Periyot Süresi Ve Bu Periyoda Karşılık Gelen Zaman Adımları

Kalp Atım Hızı (bpm)	Bir Periyot(s)	Zaman adımı sayısı
HR50	1,2	120
HR60	1	100
HR70	0,857	86
HR80	0,750	75
HR90	0,667	67
HR100	0,6	60
HR110	0,545	55

Çözüm Ağından Bağımsızlık

Şekil 3'te, kalp atım hızı 70 bpm (HR70) koşullarında farklı sayısal ağ çözünürlüklerinin abdominal çıkış hızına etkisi karşılaştırmalı olarak sunulmaktadır. Zaman ekseni boyunca elde edilen veriler incelendiğinde, tüm ağ yoğunluklarında çıkış hızının zamanla artış gösterdiği ve belirli bir süre sonunda durağan bir eğilime yaklaştığı gözlemlenmektedir. Çalışmada, ağ eleman sayısı 50.000, 80.000, 100.600, 150.000 ve 180.000 olarak kademeli biçimde artırılmış; her çözümde elde edilen hız profilleri değerlendirilmiştir. Elde edilen sonuçlar, düşük eleman sayılarında hesaplama duyarlılığının sınırlı olabileceğini, ağ çözünürlüğü arttıkça sonuçların daha kararlı bir yapıya yöneldiğini göstermektedir. Özellikle 100.600 eleman ve üzeri çözümlemelerde eğrilerin birbirine yakınsadığı ve çözümün göreli olarak daha tutarlı olduğu dikkat çekmektedir. Bu durum, çözüm ağının inceltilmesinin sayısal doğruluk üzerinde belirli bir etkisi olabileceğini göstermektedir. Bununla birlikte, çözüm süresi de göz önüne

alındığında, 100.600 eleman seviyesinin çözüm kararlılığı açısından optimum bir değer olduğu tespit edilmiştir. Bu sebeple tüm analizler bu eleman sayısında gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3. HR70 Koşulunda Farklı Ağ Eleman Sayılarının Abdominal Çıkış Hızına Etkisi

ARAŞTIRMA BULGULARI

Bu bölümde, farklı kalp atım hızlarına (HR50–HR110) karşılık gelen koşullarda elde edilen sayısal simülasyon sonuçları analiz edilmiştir. Rijit duvar varsayımı altında gerçekleştirilen hesaplamalı akışkanlar dinamiği (CFD) çözümlemeleri doğrultusunda, aortik dallarda meydana gelen hız dağılımları, duvar üzerindeki basınç değişimleri ve kayma gerilimi profilleri zamana bağlı olarak değerlendirilmiş; bu parametrelerin hem birbirleriyle hem de HR değişkeniyle olan ilişkileri detaylı şekilde irdelenmiştir.

,

Hız Profilleri

Şekil 4'te aort damar çıkışlarındaki hız profilleri zamana bağlı olarak farklı kalp hızlarında gösterilmektedir. Brakiyosefalik arter çıkış hız profilleri incelendiğinde, tüm HR senaryolarında (HR90–HR110), erken sistolik fazda belirgin bir hız pikine ulaşıldığı gözlemlenmektedir. HR arttıkça bu piklerin hem büyüklüğü artmakta hem de oluşum zamanı ileriye (zaman ekseninde sola) kaymaktadır. Özellikle HR110'da sistol fazı daha kısa sürede tamamlanmakta ve yüksek ivmelenmeye bağlı olarak çıkış hızında keskin bir artış izlenmektedir. Düşük HR'lerde (HR50–HR60), pik değer daha geç oluşmakta ve diyastol süresi daha uzun olduğundan akış daha yavaş azalmaktadır. Brakiyosefalik arterin büyük çapı ve düşük periferik direnci nedeniyle sistol sırasında daha yüksek debi taleplerini karşılaması, yüksek HR senaryolarında burada belirgin bir akış yoğunlaşmasına neden olarak, dalga yansıması etkilerinin daha fazla hissedilmesine de yol açar.

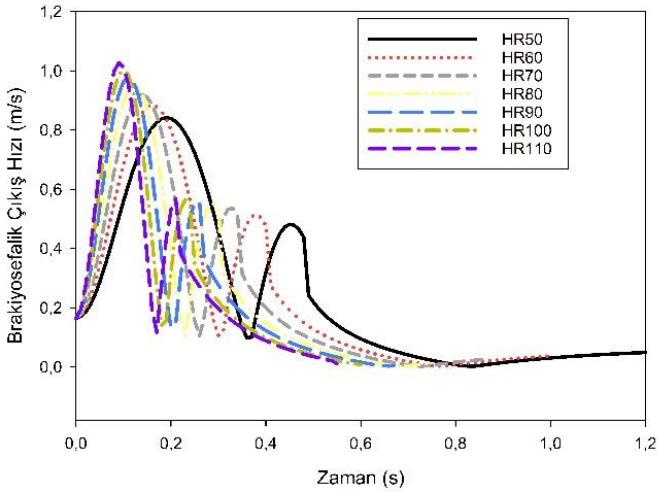
Bu çalışmada farklı kalp atım hızlarında (HR50–HR110) elde edilen çıkış hız profillerinin aortik dallar arasında belirgin farklılıklar göstermesi, damarların anatomik konumu, çapı, bifurkasyon açısı, vasküler direnç profili ve sistemik dağılımdaki fonksiyonel rolü gibi çok sayıda faktörün bir sonucudur. Brakiyosefalik, sol ana karotis, subklavyen ve abdominal aort çıkışlarında gözlemlenen karakteristik hız eğrileri, bu damarların kalpten çıkan kanı hangi dokulara yönlendirdiğiyle doğrudan ilişkilidir. Örneğin brakiyosefalik arter hem sağ kol hem de sağ serebral hemisfere kan taşır; bu nedenle daha geniş çap ve düşük periferik direnç kombinasyonu nedeniyle sistolik fazda ani

ve yüksek debi ihtiyacını yansıtır. Bu durum, ilgili arterde yüksek tepe hızlarına ve belirgin çıkış profillerine neden olur. Sol karotis arter, doğrudan beyin dolaşımına katıldığı için daha sabit ve kontrol edilen bir akış eğrisi sergiler. Özellikle serebral dolaşımda, basınç ve hız dalgalanmaları nörovasküler dengeyi bozabileceğinden, beyin autoregülasyonu bu bölgede akımın stabil kalmasını sağlar (Zhou vd., 2020). Subklavyen arter ise üst ekstremitelere yöneldiğinden, periferik direnç değerleri yüksektir ve çıkış hızları genellikle daha kısa süreli, yüksek gradyanlı bir eğilim gösterir. Abdominal aort ise distal yerleşimi nedeniyle daha düşük hızlarda ancak geniş hacimli ve zamana yayılmış bir akışla karakterizedir; bu durum, renal ve alt ekstremite perfüzyonu açısından önemlidir.

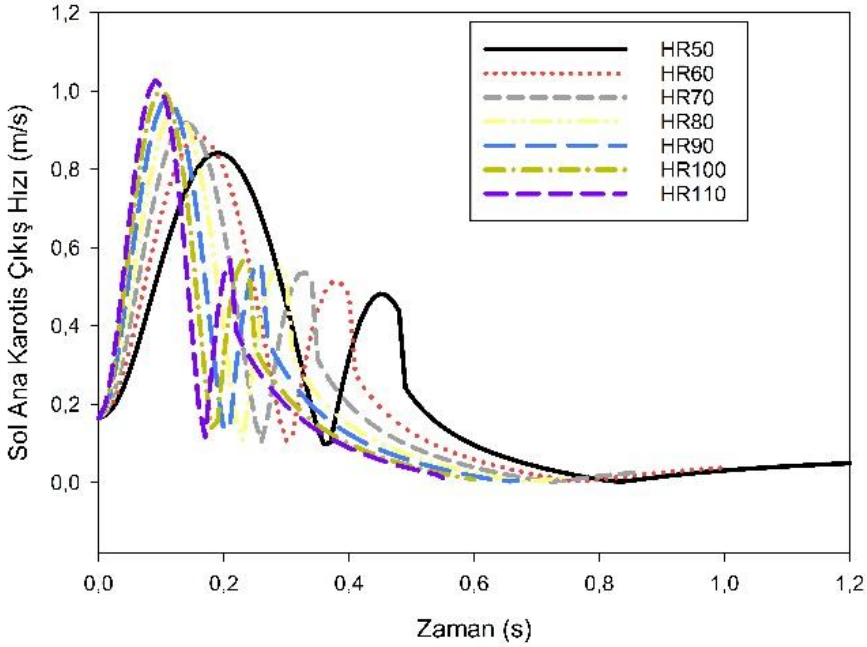
Sol ana karotis arter çıkışındaki hız profilleri, brakiyosefalik arterle kıyaslandığında daha dengeli ve düşük genliklidir. HR arttıkça sistolik tepe noktalarının zaman içinde öne kaydığı, ancak brakiyosefalik arterde olduğu kadar yüksek değerlere ulaşmadığı görülmektedir. Bu durum, karotis arterin serebral dolaşıma doğrudan katılması ve beyin autoregülasyon mekanizmaları nedeniyle daha sabit bir akış rejimiyle karakterize edilmesinden kaynaklanmaktadır. HR110 senaryosunda dahi hız artışı nispeten kontrollüdür ve diyastol fazında akışın daha az osilasyon gösterdiği izlenmektedir. Bu stabilite, nörovasküler dengenin korunmasına yönelik fizyolojik bir adaptasyon olarak değerlendirilebilir.

Subklavyen arter çıkışlarında ise yüksek HR senaryolarında (özellikle HR100 ve HR110) daha keskin ve dar bir hız eğrisi oluştuğu gözlemlenmektedir. Damarın periferik direncinin daha yüksek olması nedeniyle, çıkış hızı daha kısa sürede tepe yaparak hızla düşmektedir. HR'nin artması, bu eğrilerin daha yüksek eğimle inişe geçmesine neden olmakta ve diyastoldeki akış daha erken sönümlenmektedir. HR60–HR80 aralığında ise eğriler daha geniş zaman dilimine yayılmakta ve hız düşüşü daha yavaş gerçekleşmektedir. Subklavyen arterin üst ekstremitelere kan taşıması, sistemik vasküler dirençle bağlantılı olarak bu eğrilerdeki kısa süreli, yüksek gradyanlı yapıların fizyolojik temelini oluşturur.

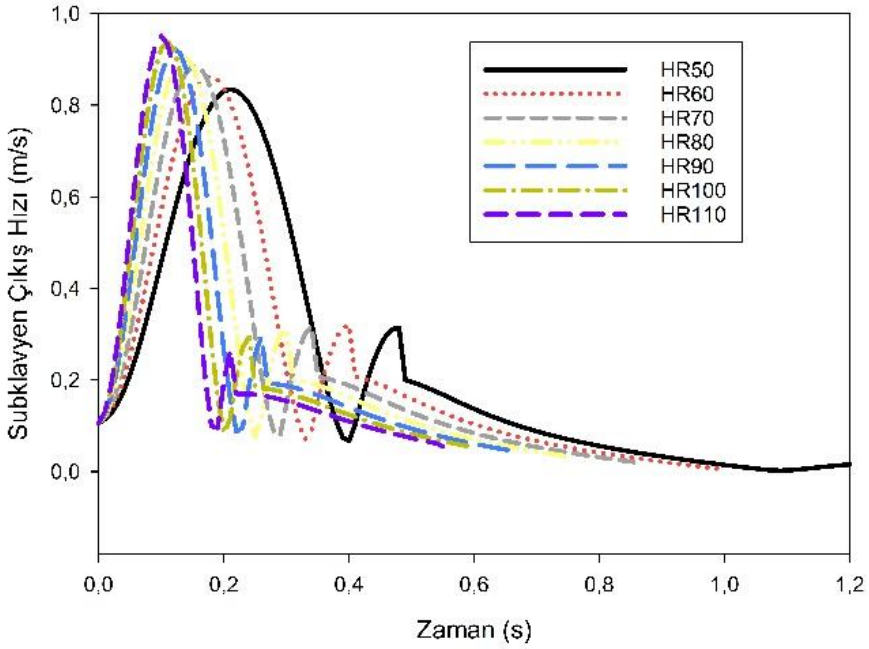
Abdominal aort çıkış hızları, diğer arterlerle karşılaştırıldığında daha yayvan ve düşük genlikli bir karakter sergilemektedir. Özellikle düşük HR senaryolarında (HR50–HR60), akışın daha uzun sürede devam ettiği ve pik hız değerlerinin göreli olarak düşük kaldığı görülmektedir. HR arttıkça sistolik pikler daha erken oluşmakta ancak mutlak değer olarak çok büyük artış göstermemektedir. Bu, distal aort segmentlerinin daha geniş hacimli kan taşıma kapasitesi ve karşılaştığı toplam periferik dirençle ilişkilidir. Ayrıca, HR artışıyla birlikte diyastolik fazda hafif geri akım eğilimlerinin oluştuğu ve bu durumun akış rejiminde kısa süreli düzensizliklere yol açtığı dikkat çekmektedir. Özellikle HR100 ve HR110'da bu dalgalanmaların türbülans eğilimini artırabileceği düşünülmektedir.



a. Brakiyosefalik



b. Sol Ana Karotis

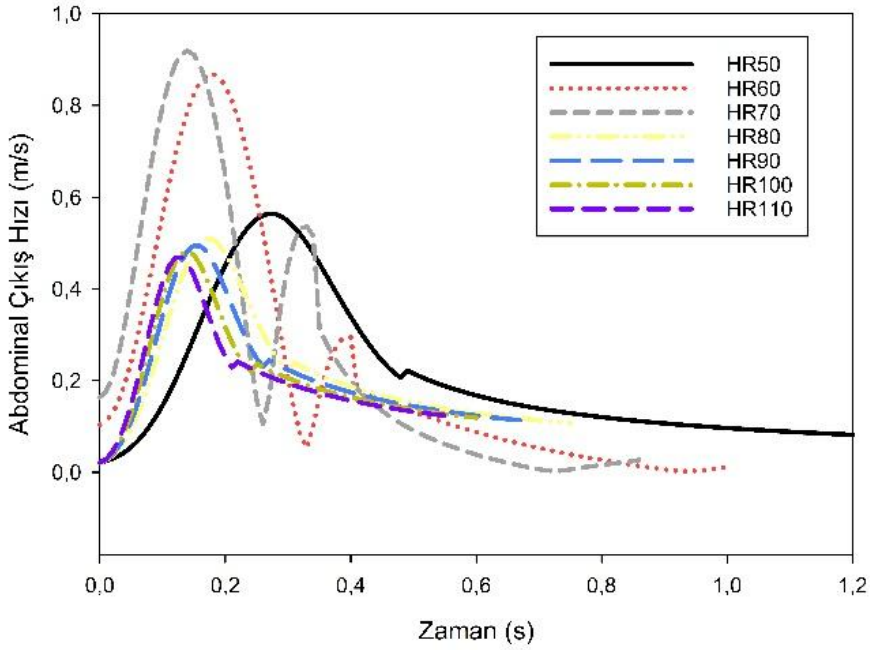


c. Subklavyen

Basınç Ve Duvar Kayma Gerilmesi

Şekil 5'te, kalp atım hızının (HR50–HR110) değişimine bağlı olarak rijit duvar varsayımı altında elde edilen aort duvarı üzerindeki basınç dağılımı, zamana bağlı olarak sunulmuştur. Modellemede aort duvarı rijit (non-deformable) olarak kabul edildiğinden, elde edilen basınç değerleri yalnızca akışkanın momentum değişimi ve dalga yansıması gibi hidrodinamik etkilerden kaynaklanmaktadır. Damar duvarının elastik cevabı model dışı bırakıldığından, basınç eğrisinin şekli ve büyüklüğü, yalnızca kalbin pompalama davranışı, kalp atım hızındaki değişim ve sistem içi dalga yayılım/yansıma dinamikleriyle belirlenmiştir

(Sherwin vd., 2003). Analiz sonuçlarına göre, HR'nin artmasıyla birlikte hem maksimum basınç değerlerinde belirgin bir artış gözlemlenmiş hem de bu tepe değerlerin zamansal olarak daha erken oluştuğu

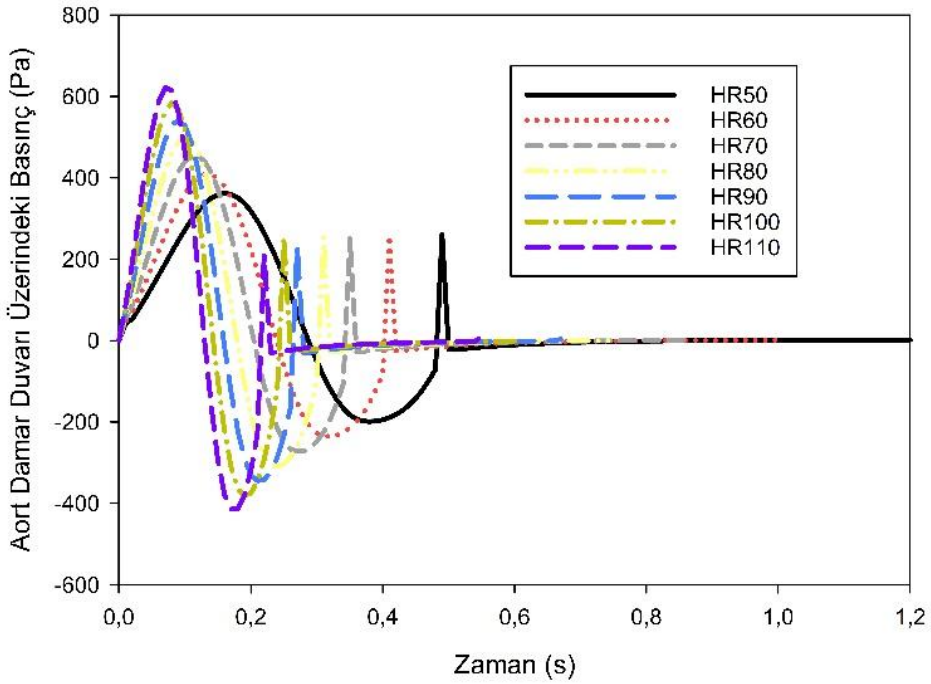


d. Abdominal

Şekil 4. Abdominal Arter Çıkışlarındaki Hız Profillerinin Farklı Kalp Atım Hızlarına Göre Karşılaştırılması

dikkat çekmiştir. Bu fark, HR'nin artmasıyla birlikte sistolik fazın daha kısa sürede tamamlanması ve daha yüksek ivmeli bir akış rejiminin oluşmasıyla ilişkilidir (Formaggia vd., 2009). Dikkat çekici bir diğer bulgu ise, sistol sonrası dönemde oluşan negatif basınç gradyanlarının, HR yükseldikçe daha belirgin hale gelmesidir. Bu negatif gradyanlar, kalbin diyastol fazına geçmesiyle birlikte oluşan akım yavaşlamasının ve periferik direnç nedeniyle geri yansıyan dalga etkisinin sonucudur. Rijit duvar modeli altında, bu yansıyan basınç bileşenleri elastik damarlardaki gibi sönümlenmeden sistemde kalır ve dolayısıyla daha belirgin dalga formları oluşturur (Mynard & Smolich, 2015). Bu yönüyle rijit duvar yaklaşımı, damar elastikiyetinin basınç yanıtı üzerindeki sönümleyici etkisini dışlayarak, dalga yayılımı ve yansıma davranışını izole biçimde analiz etme olanağı sağlar. Sonuç olarak, rijit duvar modeliyle yapılan bu analizde kalp atım hızının aort içi basınç üzerindeki etkisi doğrudan akışkan kaynaklı ivmelenme ve momentum transferi ile açıklanmakta, sistemin elastik cevap vermemesi nedeniyle duvar gerilimi yerine akış kaynaklı dalga mekaniği öne çıkmaktadır. Bu modelleme yaklaşımı, özellikle temel dalga davranışlarını, yansıma fenomenlerini ve pik basınç değişimlerini anlamak için yararlıdır; ancak duvar streslerinin, kompliansın veya mekanik yüklenmenin incelenmesinde sınırlıdır. İleri çalışmalar için FSI (Fluid-Structure Interaction) modellerin tercih edilmesiyle daha fizyolojik doğruluğa sahip basınç-zaman profilleri elde edilebilir (Bazilevs vd., 2013).

Şekil 6'da kalp atım hızının (HR) farklı değerlerinde elde edilen aortik hemodinamik parametrelerden duvar üzerindeki kayma gerilimi (WSS) değerleri zamana bağlı olarak karşılaştırmalı biçimde analiz edilmiştir. Aort duvarındaki basınç, damar cidarına dik yönde uygulanan kuvvetleri temsil ederken; kayma gerilimi, kanın viskozitesi nedeniyle damar duvarı boyunca oluşan tangansiyel kuvveti tanımlar. Bu iki büyüklük, farklı fizyolojik ve patolojik mekanizmaların tetikleyicisi olarak önemli rol oynar. Her iki grafikte de kalp atım hızının artışıyla birlikte sistemin hem zamanlama hem de şiddet bakımından farklı hemodinamik tepkiler verdiği gözlemlenmektedir. HR arttıkça (örneğin HR110), hem basınç hem de kayma gerilimi eğrileri daha erken tepe noktalarına ulaşmakta, eğrilerin daralmasıyla birlikte maksimum yüklenme süresi kısalmaktadır. Bu durum, sistolik fazın daha kısa sürede tamamlanmasıyla ilişkilidir ve akışın daha yüksek ivmeyle damar duvarına çarpması sonucunda ortaya çıkar.

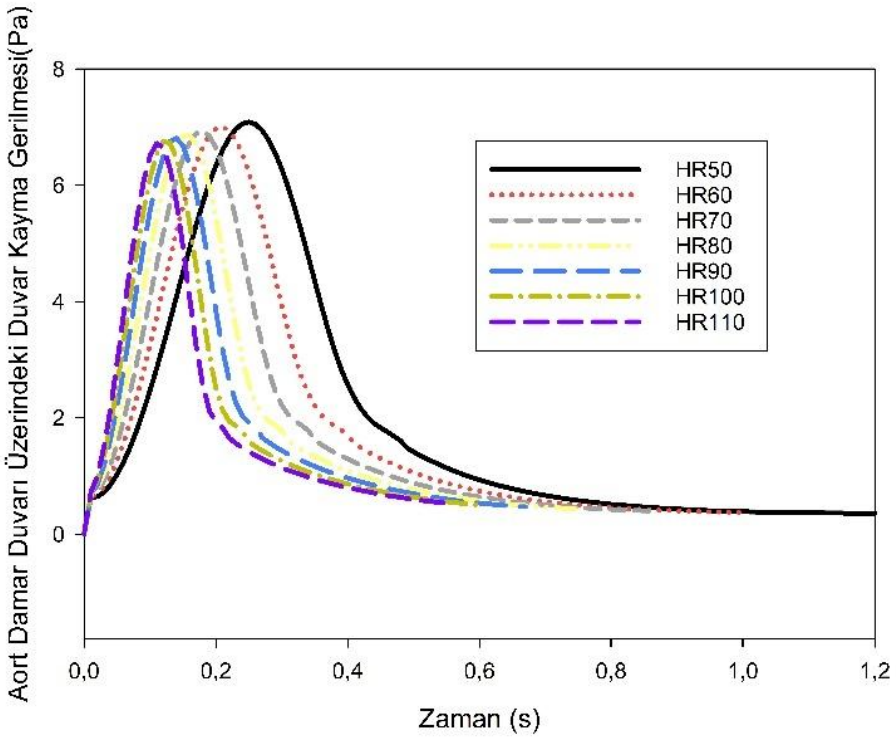


Şekil 5. Farklı Kalp Atım Hızlarına Göre Duvar İç Yüzeyinde Oluşan Basınç Değerlerinin Karşılaştırılması

Özellikle basınç eğrisinde gözlemlenen ikinci negatif fazlar (geri yansıyan dalga etkisi) WSS üzerinde doğrudan bir sönümleme yaratmasa da, duvardaki kayma geriliminin diyastol evresinde daha erken azaldığını göstermektedir. Bununla birlikte, WSS eğrilerinin basınç eğrilerine kıyasla daha kısa ve keskin karakterde olması, bu gerilimin daha çok kanın hız profiline ve viskoz etkilerine bağlı olduğunu göstermektedir (Chiu & Chien, 2011). Yani WSS, akışın duvarla sürtünmesine dayalı bir büyüklük olduğundan, ani hız değişimleri ve pik debiler WSS üzerinde doğrudan etkilidir. Bu nedenle HR'nin artmasıyla birlikte yüksek WSS değerleri daha erken oluşmakta ve hızla düşüş göstermektedir. Örneğin HR110 senaryosunda tepe WSS değeri yaklaşık 6.5–7 Pa'ya ulaşırken, HR50'de bu değer 5 Pa civarındadır. Ancak dikkat çekici bir diğer sonuç, HR90'dan itibaren WSS tepe değerlerinin yakınsamaya başlamasıdır; bu durum, damar içi akışın bir sınır taşıma kapasitesine ulaştığını ve yüksek HR değerlerinde sistemin daha "kompakt" ve sınırlı bir rejimde çalıştığını düşündürmektedir. Bu bulgular birlikte ele alındığında, yüksek HR koşullarında aort duvarının hem normal gerilime (basınca) hem de tangensiyel gerilime (WSS) aynı anda ve kısa sürede maruz kaldığı görülmektedir. Bu da damar duvarı üzerine binen toplam mekanik yükün artması anlamına gelir. Literatürde bu tür akut yüklenme profillerinin, özellikle düşük elastisiteye sahip (rijit) modellerde daha belirgin olduğunu ve endotelyal disfonksiyona neden olabileceğini göstermektedir (Milner vd., 1998; Malek vd., 1999). Ayrıca, düşük WSS bölgelerinin aterosklerotik plak oluşumu için uygun ortamlar olduğu bilinmektedir; bu nedenle diyastolde sıfıra yaklaşan kayma gerilimleri, özellikle yüksek HR senaryolarında, endotel yüzeyinde mekanik stres dengesizliği yaratabilir.

Strok Hacmi Karşılaştırması

Farklı kalp atım hızı (HR) koşullarında elde edilen hız-zaman verilerinin sayısal entegrasyonu yoluyla dört ana damar (brakiyosefalik, sol ana karotis, sol subklavyen ve abdominal aort) çıkışlarında stroke volume (SV) değerleri hesaplanmıştır. Her bir damar için bilinen anatomik kesit alanları ile zaman-hız eğrileri altındaki alanların çarpımıyla akış hacmi (m^3), ardından da mililitre (mL) cinsinden SV elde edilmiştir. Hesaplamalar, yalnızca bir kalp döngüsünü kapsayacak şekilde zaman aralığı filtrelenerek gerçekleştirilmiş; böylece tüm HR değerleri için normalize ve karşılaştırılabilir çıktılar sağlanmıştır. Bu yöntem, CFD (hesaplamalı akışkanlar dinamiği) analizlerinden elde edilen zamana bağlı hız verilerinin fizyolojik parametrelere dönüştürülmesini



Şekil 6. Farklı Kalp Atım Hızlarına Göre Duvar İç Yüzeyinde Oluşan WSS Değerlerinin Karşılaştırılması

olanaklı kılmakta ve sistemin gerçek dolaşıma yakın karakteristiklerini yansıtmasına katkı sunmaktadır. Özellikle HR60 koşulu, bu analizlerin fizyolojik gerçeklikle uyumlu olduğunu gösteren güçlü bir örnektir. İlgili kalp hızı altında yapılan hesaplamalar sonucunda, abdominal aort çıkışında yaklaşık 43 mL, brakiyosefalik arterde 13 mL, sol ortak karotiste 9 mL ve subklavyen arterde 12 mL civarında stroke volume değerleri elde edilmiştir. Bu değerlerin toplamı, bir kalp döngüsünde sistemik dolaşıma aktarılan hacim açısından fizyolojik sınırlar içinde kalmakta ve literatürde bildirilen 60–100 mL aralığıyla (Feigenbaum vd., 2005; Guyton & Hall, 2020) oldukça yüksek uyum göstermektedir. Benzer eğilimler HR50 ve HR70 gibi komşu kalp atım hızlarında da gözlemlenmiş; SV değerleri HR arttıkça azalan bir davranış sergileyerek, daha kısa dolum süresinin stroke volume üzerindeki etkisini doğrulamıştır (Opie, 2004; Sherwood, 2012). Yalnızca bireysel değerlerin değil, HR × SV çarpımıyla elde edilen kardiyak debi (CO) çıktıları da modelin doğruluğunu desteklemektedir. Örneğin HR60 için toplam çıkışların yaklaşık 78 mL olduğu dikkate alındığında, dakikadaki kardiyak debi $60 \times 78 \approx 4.68$ L/dk seviyelerinde hesaplanmaktadır ki bu değer, sağlıklı bireylerde tanımlanan 4.5–6.5 L/dk aralığına oldukça yakındır. Bu doğrultuda hesaplanan değerlerin fizyolojik uygunluğu, hem modelleme sürecinde kullanılan sınır şartlarının hem de sayısal çözümleme yönteminin doğruluğunu ve güvenilirliğini desteklemektedir. Dolayısıyla SV hesaplamalarının sadece teorik bir çıktı değil, aynı zamanda sistemin gerçekçi bir temsilini ortaya koyan geçerli ve güvenilir bir hemodinamik gösterge olduğu söylenebilir.

Tablo 2. Farklı Kalp Atım Hızı (HR) Değerlerinde, Dört Ana Arteriyel Çıkış Noktasında Hesaplanan Stroke Volume (SV) Değerleri (mL Cinsinden)

HR	Abdominal	Brakiosefalik	Sol Karotid	Subklavyen
HR50	60.12	15.13	10.68	14.34
HR60	43.05	13.29	8.96	11.90
HR70	42.80	12.87	8.26	11.15
HR80	42.03	11.59	7.79	10.64
HR90	37.66	10.85	7.09	9.67
HR100	33.67	10.17	6.49	8.90
HR110	30.79	9.65	5.95	8.14

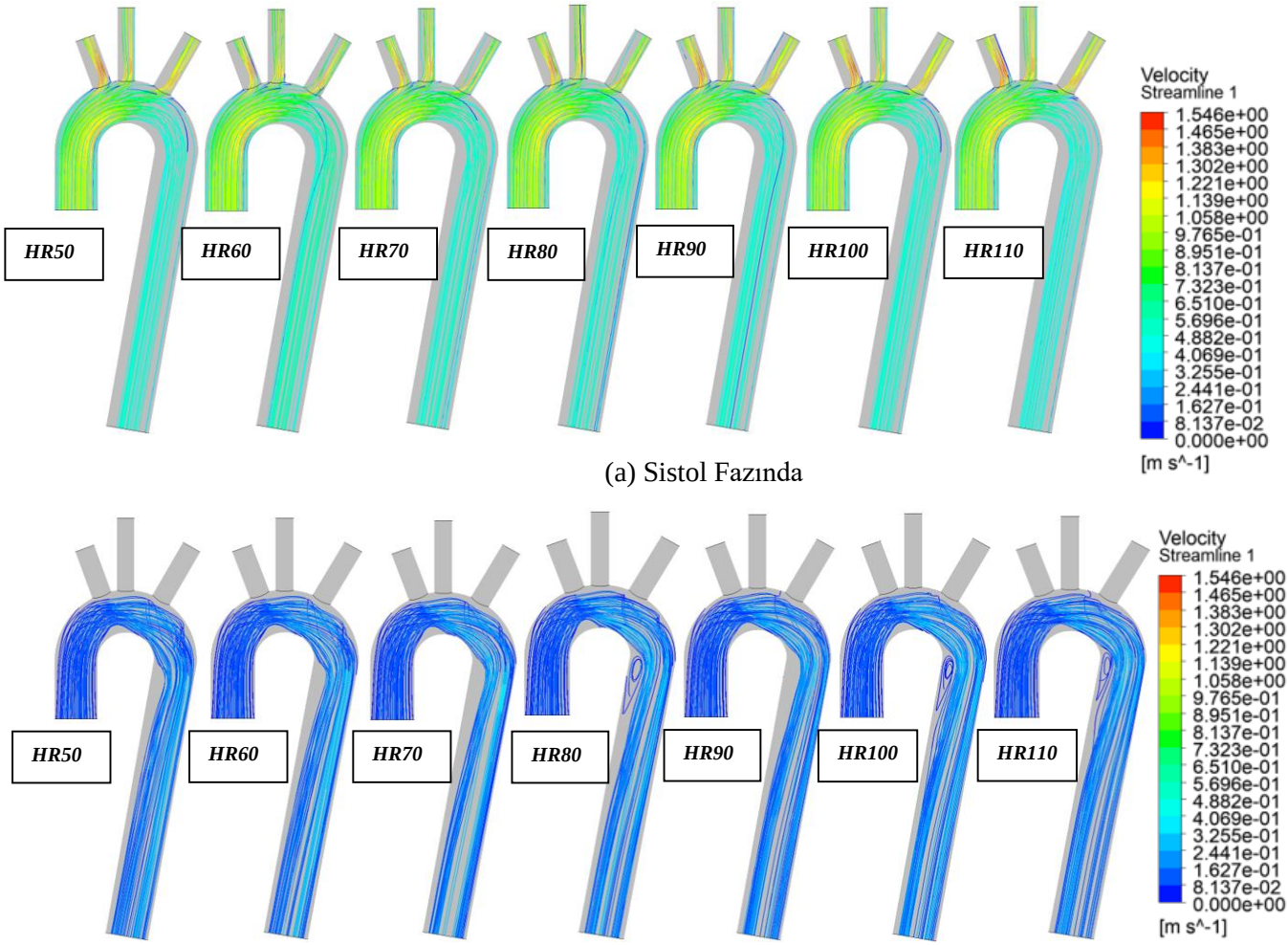
Akım Çizgileri

Aortik geometriye ait kalp atım hızı (HR50–HR110) koşullarında elde edilen akış çizgileri, Şekil 7'de sistol ve diastol fazlarında karşılaştırmalı olarak sunulmaktadır. Bu görseller, kalbin kasılma (sistol) ve gevşeme (diyastol) fazları boyunca büyük damar içindeki akış deseninin zamanla nasıl değiştiğini ortaya koymaktadır. Akış çizgileri, hız büyüklüğüne göre renklendirilmiş olup, kırmızı-turuncu tonlar yüksek hızları, mavi tonlar düşük hızları temsil etmektedir. Sistol fazında (ilk görsel), ventrikülün aktif kasılmasıyla birlikte kalpten çıkan kan büyük bir hızla aorta doğru itilmektedir. Bu fazda elde edilen akış çizgileri dağılımları, yüksek hızların aort arkında yoğunlaştığını ve akımın belirgin şekilde laminer özellikte olduğunu göstermektedir. Özellikle HR arttıkça (HR90 ve üzeri), hızın ve akış çizgilerinin yoğunluğu artmakta, bu da kalbin daha sık kasılarak daha güçlü bir akış ürettiğini göstermektedir. Yüksek HR koşullarında, akış daha dar alanlarda yoğunlaşmakta ve aortik kıvrımda jet benzeri yapıların oluşumu dikkat çekmektedir. Bu durum, aort duvarına uygulanan impulsif yüklerin ve kayma gerilmesi gradyanlarının da artmasına neden olabilir (Mynard & Smolich, 2015; Morbiducci et al., 2010). Diyastol fazında (ikinci görsel) ise, ventrikül gevşemeye başladığında aortik çıkışta ileri akım önemli ölçüde azalmakta ve bazı bölgelerde geri akım (reversal flow) oluşmaktadır. Görselde mavi ağırlıklı ve düşük hızda seyreden çizgiler, bu pasif fazın karakteristiğini yansıtırken; özellikle aort arkının iç kıvrımı ve dallanma bölgelerinde akımın türbülans eğilimli hale geldiği gözlemlenmektedir. Bu tür dönücü ve geri akım yapılarına "vorteks oluşumu" adı verilir ve bu oluşum, hem duvar kayma gerilmesi osilasyonunu artırmakta hem de endotel üzerindeki biyolojik stres faktörlerini tetiklemektedir (Chiu & Chien, 2011; Stone et al., 2003). Özellikle HR arttıkça bu dönücü akımların genişliği ve etkisi de artmakta, bu da hem akışın rejimini hem de damar duvarına iletilen mekanik sinyalleri ciddi biçimde etkilemektedir. Karşılaştırmalı olarak bakıldığında, sistolde akış düzenli, yönlü ve hızlı iken; diyastolde akış hızı belirgin şekilde azalmakta, yönsüzlük artmakta ve türbülans etkileri devreye girmektedir. Bu dinamik farklar, özellikle aort duvarındaki hücrelerin biyomekanik yanıtlarını doğrudan etkileyerek, uzun vadede aterosklerotik değişimlerin yerleştiği bölgeleri belirleyici rol oynayabilir. Örneğin düşük ve osilatuvar WSS ile karakterize edilen diyastol fazı, plak oluşumuna zemin hazırlarken, yüksek hızlı sistolik faz, duvar streslerinin tepe yaptığı bölgelere karşılık gelir (Malek et al., 1999).

Bu görsellerin bütünsel değerlendirmesi, kalp atım hızının yalnızca akış şiddetini değil, aynı zamanda damar içi akışın mekânsal dağılımını ve organizasyonunu da belirgin şekilde etkilediğini ortaya koymaktadır. HR50 gibi düşük frekansta, aort boyunca akış çizgileri daha homojen ve uzun laminer kanallar hâlinde ilerlerken, HR100 ve HR110 gibi yüksek hızlarda bu yapı bozulmakta, çizgiler arasında kıvrılmalar, sıkışmalar ve yön sapmaları belirginleşmektedir. Özellikle HR arttıkça aort arkında yoğunlaşan akım çizgileri, duvarlara yakın bölgelerde kayma gerilmesi gradyanlarının ve vorteks oluşum eğilimlerinin arttığını göstermektedir. Bu durum, kardiyak siklusun temporal parametrelerinin (örneğin sistol süresi ve ivmelenme) damar duvarındaki hemodinamik yükleri nasıl yeniden şekillendirdiğini görsel olarak somutlaştırır. Ayrıca, HR110 gibi uç nokta değerlerde, dallanma noktalarına doğru ilerleyen çizgilerde görülen dağınıklık ve girdapsı hareketler, bu bölgelerin disturbed flow için yapısal olarak daha savunmasız olduğunu göstermektedir. Klinik olarak bu tarz bölgeler, endotel disfonksiyonu, plak birikimi veya damar genişlemesi gibi patolojik süreçlerin başladığı kritik alanlar olarak tanımlanır. Dolayısıyla görseller, yalnızca akış görselleştirmesi sunmakla kalmayıp, aynı zamanda HR değişkenliğinin bölgesel damar sağlığı üzerindeki potansiyel etkilerini değerlendirmeye olanak sağlayan sayısal bir harita görevi görmektedir.

Duvar Kayma Gerilmesi

Şekil 8'de HR50'den HR110'a kadar artan kalp atım hızı koşullarında elde edilen CFD tabanlı WSS dağılımları, aortik geometri üzerindeki zamansal ve bölgesel etkileriyle birlikte karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Duvar kayma gerilmesi, vasküler endotelyal fonksiyonun korunmasında kritik bir rol oynamakta olup, özellikle aterosklerotik plak oluşum bölgelerinin öngörülmesinde önemli bir biyofiziksel parametre olarak kabul edilmektedir (Malek et al., 1999; Chatzizisis et al., 2007). Bu bağlamda, farklı HR koşulları altında WSS dağılımlarındaki değişimin incelenmesi, hemodinamik stresin damarsal patofizyolojideki rolünü anlamada önemli katkı sunmaktadır. Görselde dikkat çeken ilk unsur, HR arttıkça WSS değerlerinin belirgin biçimde artmasıdır. Özellikle HR90'dan itibaren aort arkı ve çıkan



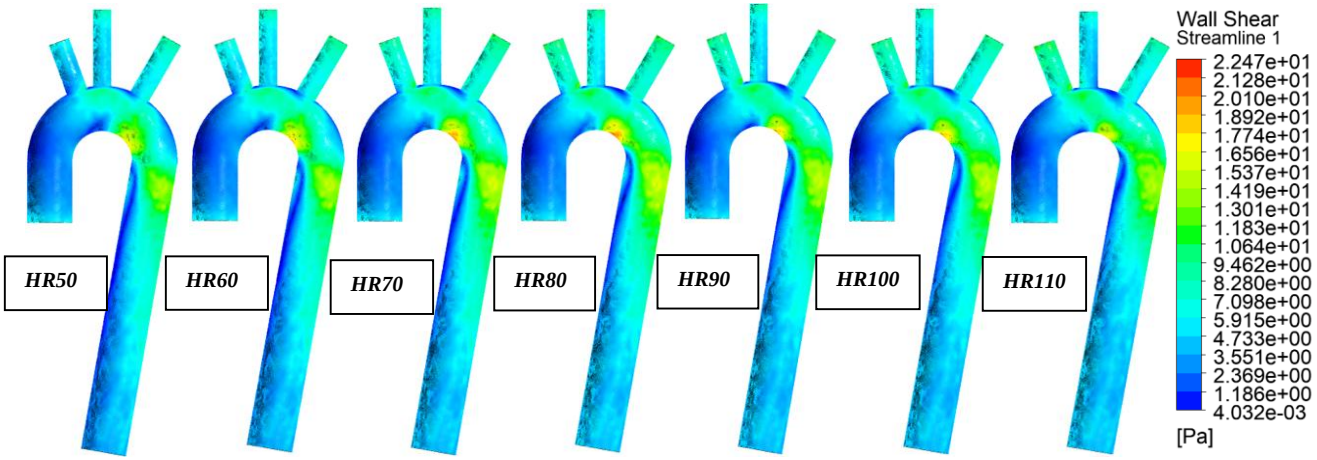
(a) Sistol Fazında

(b) Diastol Fazında

Şekil 7. Farklı Kalp Atım Hızı (HR 50–110) Akım Çizgilerinin İki Farklı Fazda Gösterimi

aort segmentinde, WSS'nin yerel olarak maksimum değerlere ulaştığı, renk skalasındaki sarı ve yeşil tonların artışıyla gözlemlenmektedir. Bu durum, yüksek kalp hızlarında artan atım frekansına bağlı olarak zaman başına uygulanan mekanik yükün artmasıyla ilişkilidir. Aynı zamanda, artan HR ile birlikte akış ivmelenmesinin artması, damar duvarına etki eden kesme kuvvetlerini yoğunlaştırmakta ve bu da WSS'yi doğrudan artırmaktadır (Gijsen et al., 2013). Bu fenomen, özellikle aort arkının iç kıvrımı ve dallanma noktalarında daha belirgin hale gelmekte, çünkü bu bölgelerde hem akış yön değişimi hem de geometri kaynaklı ikincil akımlar (secondary flow) mevcuttur. Düşük HR (örneğin HR50–HR60) koşullarında ise, WSS dağılımının daha homojen ve düşük seviyelerde olduğu, çoğunlukla mavi tonlarda kaldığı gözlemlenmektedir. Bu durum, düşük HR'de daha uzun diyastolik periyotlar ve düşük ortalama akış hızları ile açıklanabilir. Bu tür düşük WSS bölgeleri, literatürde aterosklerotik plak gelişiminin en sık rastlandığı alanlar olarak tanımlanmıştır (Stone et al., 2003; Ku et al., 1985). Dolayısıyla, HR'nin kronik olarak düşük olduğu bireylerde bu tarz bölgelerin endotelyal disfonksiyon açısından daha riskli olabileceği öngörülebilir. İlginç bir şekilde, HR arttıkça sadece WSS'nin büyüklüğü değil, dağılım paterni de değişmektedir. Özellikle HR90 ve üzeri koşullarda, WSS'nin yalnızca belirli segmentlerde artmadığı, aynı zamanda aortik duvar boyunca daha yaygın bir alana yayıldığı gözlenmiştir. Bu yaygınlık, arter duvarı boyunca sürekli değişen akış yönleri ve türbülans etkilerinin artmasıyla açıklanabilir. Bu da kalp hızının sadece WSS düzeyine değil, aynı zamanda mekanik stresin alansal yayılımına da etki ettiğini göstermektedir (Mynard & Smolich, 2015). Sonuç olarak, duvar kayma gerilmesinin HR'ye duyarlı yapısı, bu çalışmada görsel olarak güçlü biçimde ortaya konmuştur. Hem düşük HR'deki düşük ve heterojen WSS bölgeleri, hem de yüksek HR'deki yoğun ve yaygın gerilim alanları, damar duvarı biyolojisinin ritmik

kardiyak aktiviteye ne kadar hassas olduğunu göstermektedir. Bu tür CFD tabanlı analizler, sadece hemodinamik davranışın kantitatif ölçümünü sağlamakla kalmayıp, aynı zamanda damarsal hastalıkların öngörüsüne dair niteliksel ipuçları da sunmaktadır.



Şekil 8. Farklı Kalp Atım Hızı (HR 50–110) Değerlerinde Aortik Geometri Üzerinde Hesaplanan WSS Dağılımları

SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışma kapsamında, farklı kalp atım hızlarının (HR50–HR110) aortik damar çıkışlarındaki hemodinamik davranışlara etkisi CFD yöntemi ile detaylı biçimde analiz edilmiştir. Rijit duvar varsayımı altında gerçekleştirilen bu analizlerde, giriş hız profilleri, çıkış hız dağılımları, basınç eğrileri, WSS ve stroke volume gibi önemli hemodinamik parametreler, zamana bağlı olarak karşılaştırmalı biçimde incelenmiştir. Elde edilen bulgular aşağıda özetlenmiştir:

- Çıkış Hız Dağılımları: Brakiyosefalik, sol ana karotis, sol subklavyen ve abdominal aort çıkışlarında gözlemlenen hız profilleri, damarların anatomik konumu ve direnç özelliklerine bağlı olarak değişiklik göstermiştir. Brakiyosefalik arterde en yüksek hızlar elde edilirken, abdominal aortta daha yaygın ve hacimsel olarak yüksek ama düşük hızlı akış gözlemlenmiştir. Yüksek HR senaryolarında tüm çıkışlarda daha yüksek hızlara ve daha kısa sürede ulaşılan maksimum değerlere rastlanmıştır.

- Basınç Dağılımları: HR artışı ile aort içi maksimum basınç değerlerinde belirgin artış gözlenmiş, bu tepe noktalarının oluşma zamanı daha erken evrelere kaymıştır. Ayrıca, sistol sonrası negatif basınç gradyanları artmış, geri yansıyan dalga etkisi daha görünür hale gelmiştir. Rijit duvar varsayımı nedeniyle bu yansımaların sönümlenmeden sistemde kalması, dalga mekaniğinin analizine imkân sağlamıştır.

- WSS): HR'nin artışıyla birlikte WSS tepe değerlerinde yükselme görülmüş; HR110 senaryosunda 6.5–7 Pa seviyelerine ulaşılmıştır. Bu artış, yüksek debili ve yüksek ivmeli akış rejiminin duvarla olan sürtünme etkisini artırmasıyla açıklanmıştır. Ayrıca, yüksek HR değerlerinde WSS'nin sadece şiddeti değil, mekânsal dağılımı da artmış; duvar boyunca daha yaygın stres alanları oluşmuştur. Düşük HR koşullarında ise, düşük ve heterojen WSS alanları, aterosklerotik değişimlere yatkın bölgeler olarak tanımlanmıştır.

- Stroke Volume (SV) ve Kardiyak Debi (CO): HR'nin artmasıyla birlikte bir kalp döngüsünde aktarılan hacim (SV) azalmış, ancak kalp atım sayısının artışı ile kardiyak debi (CO) fizyolojik sınırlar içinde kalmıştır. Örneğin HR60 koşulunda toplam çıkış hacmi yaklaşık 78 mL olarak hesaplanmış ve bu değer dakikada yaklaşık 4.68 L'lik kardiyak debiye karşılık gelmiştir. Bu bulgular, modelin fizyolojik gerçeklikle yüksek düzeyde uyumlu olduğunu göstermektedir.

- Akım Çizgileri ve Vorteks Yapıları: Sistol fazında akış düzenli ve yönlü iken, diyastol fazında düşük hızlı, geri yönlü ve vorteks içeren karmaşık akış yapıları gözlemlenmiştir. Yüksek HR koşullarında, aort arkında jet-benzeri yapılar ve türbülans eğilimli bölgesel akımlar oluşmuştur. Bu tür yapılar, duvar üzerinde kayma gerilmesi osilasyonunu artırarak endotel disfonksiyonuna neden olabilecek mekanik ortamlar yaratmıştır.

- WSS Dağılım Görselleri: WSS'nin hem büyüklük hem de yaygınlık açısından HR ile arttığı gözlemlenmiş, HR90 ve üzeri değerlerde özellikle aortik kıvrım ve dallanma noktalarında yoğun stres alanları oluşmuştur. Bu durum, kronik yüksek HR durumlarının damarsal patofizyoloji açısından risk taşıdığını ve WSS'nin kardiyovasküler hastalıkların gelişiminde kilit rol oynadığını desteklemektedir.

Genel olarak bu çalışma, kalp atım hızındaki değişimlerin, aortik damar sisteminde hem zamansal hem de bölgesel hemodinamik parametrelerde önemli sapmalara neden olduğunu göstermektedir. Rijit duvar varsayımı altında yapılan analizler, dalga yayılımı, geri yansıma ve WSS dağılımları gibi parametrelerinin izole biçimde incelenmesine olanak sağlamıştır. Damar elastikiyeti etkilerinin daha doğru modellenebilmesi için gelecekteki çalışmalarda FSI (Fluid-Structure Interaction) yöntemlerinin kullanılması önerilmektedir.

KAYNAKLAR

Bazilevs, Y., Hsu, M. C., Zhang, Y., Wang, W., Kvamsdal, T., Hentschel, S., & Isaksen, J. G. (2013). Computational vascular fluid–structure interaction: Methodology and application to cerebral aneurysms. Biomechanics and Modeling in Mechanobiology, 12(5), 925–940. doi: 10.1007/s10237-010-0189-7

Berger, S. A., & Jou, L. D. (2000). Flows in stenotic vessels. Annual Review of Fluid Mechanics, 32(1), 347–382. doi: 10.1146/annurev.fluid.32.1.347

Bouqentar, M. A., Sudres, P., Wei, W., Boufi, M., Behr, M., & Evin, M. (2019). Influence of the aortic morphological changes in aging on aortic flow. Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering, 22(sup1), S415-S417. doi: 10.1080/10255842.2020.1714965

Chatzizisis, Y. S., Coskun, A. U., Jonas, M., Edelman, E. R., Feldman, C. L., & Stone, P. H. (2007). Role of endothelial shear stress in the natural history of coronary atherosclerosis and vascular remodeling. Journal of the American College of Cardiology, 49(25), 2379–2393. doi: 10.1016/j.jacc.2007.02.059

Cheng, Z., Tan, F. P. P., Riga, C. V., Bicknell, C. D., Hamady, M. S., Wood, N. B., & Xu, X. Y. (2010). Analysis of flow patterns in a patient-specific aortic dissection model. Journal of Biomechanical Engineering, 132(5), 051007. doi: 10.1115/1.4000964

Chien, S. (2007). Mechanotransduction and endothelial cell homeostasis: The wisdom of the cell. American Journal of Physiology-Heart and Circulatory Physiology, 292(3), H1209–H1224. DOI: 10.1152/ajpheart.01047.2006

Chiu, J. J., & Chien, S. (2011). Effects of disturbed flow on vascular endothelium: Pathophysiological basis and clinical perspectives. Physiological Reviews, 91(1), 327–387. DOI: 10.1152/physrev.00047.2009

Diallo, C. (2020). Hesaplamalı akışkanlar dinamiği kullanılarak kan pompası tasarımı (Yüksek lisans tezi, Karabük Üniversitesi).

Feigenbaum, H., Armstrong, W. F., & Ryan, T. (2005). Feigenbaum's Echocardiography (6th ed.). Lippincott Williams & Wilkins.

Formaggia, L., Quarteroni, A., & Veneziani, A. (2009). Cardiovascular mathematics: Modeling and simulation of the circulatory system. Springer. DOI: 10.1007/978-88-470-1152-6

Gallo, D., Steinman, D. A., Bijari, P. B., & Morbiducci, U. (2012). Helical flow in carotid bifurcation as surrogate marker of exposure to disturbed shear. Journal of Biomechanics, 45(14), 2398–2404. DOI: 10.1016/j.jbiomech.2012.07.007

Gharib, M., Rambod, E., & Kheradvar, A. (2006). Nature of flow in the cardiovascular system: Flow-induced vibrations and energy efficiency. Progress in Cardiovascular Diseases, 49(3), 161–185. DOI: 10.1016/j.pcad.2006.07.001

Giddens, D. P., Zarins, C. K., & Glagov, S. (1993). The role of fluid mechanics in the localization and detection of atherosclerosis. Journal of Biomechanical Engineering, 115(4B), 588–594. DOI: 10.1115/1.2895530

Gijsen, F. J. H., Wentzel, J. J., Thury, A., Lamers, B., Schuurbiers, J. C. H., Serruys, P. W., & Slager, C. J. (2013). A new imaging technique to assess wall shear stress in vivo. Journal of Biomechanics, 46(14), 2401–2408. DOI: 10.1016/j.jbiomech.2006.12.007

Guyton, A. C., & Hall, J. E. (2020). Tıbbi Fizyoloji (13. Baskı). Nobel Tıp Kitabevi.

Górski, G., & Kucab, K. (2024). Time-dependent simulation of blood flow through an abdominal aorta with iliac arteries. European Biophysics Journal, 53(7), 429-445. DOI: 10.1007/s00249-024-01724-w

He, X., Ku, D. N., & Arand, P. W. (2020). Vortex and wall shear stress analysis in a compliant carotid artery bifurcation model. Annals of Biomedical Engineering, 48(5), 1361–1374. DOI: 10.1115/1.2895710

Kim, H. J., Vignon-Clementel, I. E., Coogan, J. S., Figueroa, C. A., Jansen, K. E., & Taylor, C. A. (2010). Patient-specific modeling of blood flow and pressure in human coronary arteries. Annals of Biomedical Engineering, 38(10), 3195–3209. DOI: 10.1007/s10439-010-0083-6

Ku, D. N. (1985). Blood flow in arteries. Annual Review of Fluid Mechanics, 17, 1–32.

Ku, D. N., Giddens, D. P., Zarins, C. K., & Glagov, S. (1985). Pulsatile flow and atherosclerosis in the human carotid bifurcation. Positive correlation between plaque location and low oscillating shear stress. Arteriosclerosis, 5(3), 293–302. DOI: 10.1161/01.ATV.5.3.293

Ku, D. N. (1997). Blood flow in arteries. Annual Review of Fluid Mechanics, 29(1), 399-434. https://doi.org/10.1146/annurev.fluid.29.1.399

Mao, W., Wang, L., Li, J., & Sun, W. (2020). Computational modeling of hemodynamic alterations in the aorta following transcatheter aortic valve implantation. Journal of Biomechanics, 98, 109469. https://doi.org/10.1001/jama.282.21.2035

Milner, J. S., Moore, J. A., Rutt, B. K., & Steinman, D. A. (1998). Hemodynamics of human carotid artery bifurcations: computational studies with models reconstructed from magnetic resonance imaging of normal subjects. Journal of Vascular Surgery, 28(1), 143–156. https://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2019.109469

Milnor, W. R. (1989). Hemodynamics. Williams & Wilkins.

Morbiducci, U., Ponzini, R., Grigioni, M., & Redaelli, A. (2010). Helical flow as fluid dynamic signature for atherogenesis risk in aortocoronary bypass. Journal of Biomechanics, 43(16), 2870–2877. ttps://doi.org/10.1016/j.jbiomech.2010.06.003

Morbiducci, U., Gallo, D., Massai, D., et al. (2011). Outflow conditions for image-based hemodynamic models of the carotid bifurcation: Implications for indicators of abnormal flow. Journal of Biomechanical Engineering, 133(3), 031002. https://doi.org/10.1115/1.4002889

Mynard, J. P., & Smolich, J. J. (2015). One-dimensional haemodynamic modeling and wave dynamics in the entire adult circulation. Annals of Biomedical Engineering, 43(6), 1443–1460. https://doi.org/10.1007/s10439-015-1313-8

Nichols, W. W., & O'Rourke, M. F. (2005). McDonald's Blood Flow in Arteries: Theoretical, Experimental and Clinical Principles (5th ed.). Oxford University Press.

Nichols, W. W., O'Rourke, M. F., & Vlachopoulos, C. (2011). McDonald's Blood Flow in Arteries: Theoretical, Experimental and Clinical Principles (6th ed.). CRC Press. https://doi.org/10.1201/b11301

Perktold, K., Resch, M., & Peter, R. (1991). Three-dimensional numerical analysis of pulsatile flow and wall shear stress in the carotid artery bifurcation. Journal of Biomechanics, 24(6), 409–420. https://doi.org/10.1016/0021-9290(91)90029-M

Sagawa, K., Maughan, W. L., Suga, H., & Sunagawa, K. (1990). Cardiac Contraction and the Pressure-Volume Relationship. Oxford University Press.

Sherwin, S. J., Formaggia, L., Peiro, J., & Franke, V. (2003). Computational modelling of 1D blood flow with variable mechanical properties and its application to the simulation of wave propagation in the human arterial system. International Journal for Numerical Methods in Fluids, 43(6–7), 673–700. https://doi.org/10.1002/fld.543

Stone, P. H., Coskun, A. U., Yeghiazarians, Y., et al. (2003). Prediction of sites of coronary atherosclerosis progression using endothelial shear stress. Circulation, 108(4), 468–474. https://doi.org/10.1161/01.CIR.0000080894.35274.64

Taylor, C. A., & Draney, M. T. (2004). Experimental and computational methods in cardiovascular fluid mechanics. Annual Review of Fluid Mechanics, 36, 197–231. https://doi.org/10.1146/annurev.fluid.36.050802.121944

Taylor, C. A., & Steinman, D. A. (2010). Image-based modeling of blood flow and vessel wall dynamics: Applications, methods, and future directions. Annals of Biomedical Engineering, 38(3), 1188–1203. https://doi.org/10.1007/s10439-010-9901-0

Xiao, N., Alastruey, J., & Figueroa, C. A. (2014). A systematic comparison between 1-D and 3-D hemodynamics in compliant arterial models. International Journal for Numerical Methods in Biomedical Engineering, 30(2), 204–231. https://doi.org/10.1002/cnm.2598

Zhou, M., Glick, Z. R., Rapoport, B. I., & Kassab, G. S. (2020). Hemodynamic regulation of the cerebral circulation. Frontiers in Physiology, 11, 569554. https://doi.org/10.3389/fphys.2020.569554

Zhou, Z., Qiao, A., & Liu, Y. (2021). Hemodynamic analysis of patient-specific aortic dissection: Evaluation of true-false lumen blood exchange. Biomechanics and Modeling in Mechanobiology, 20(3), 933–946. https://doi.org/10.1007/s10237-020-01395-4.

KSÜ Mühendislik Bilimleri Dergisi, 28(2), 2025
Araştırma Makalesi

KSU J Eng Sci, 28(2), 2025
Research Article

Kahramanmaras Sutcu Imam University
Journal of Engineering Sciences

Geliş Tarihi : 01.04.2025
Kabul Tarihi : 26.05.2025

Received Date : 01.04.2025
Accepted Date : 26.05.2025

YÜKSEK MUKAVEMETLİ BETONARME KOLONLARIN DOĞRUSAL OLMAYAN SONLU ELEMANLAR ANALİZİ

NONLINEAR FINITE ELEMENT ANALYSIS OF HIGH STRENGTH REINFORCED CONCRETE COLUMNS

Kağan SÖĞÜT[1*] (ORCID: 0000-0002-0601-6420)

[1] Kilis 7 Aralık Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Kilis, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Kağan SÖĞÜT, kagan.sogut@kilis.edu.tr

ÖZET

Betonarme etriyeli kolonların eksenel yük taşıma kapasitesi, temel olarak enkesit boyutlarına, betonun basınç dayanımına ve boyuna donatı oranına bağlıdır. Yüksek mukavemetli betonlar hem dayanım hem de durabilite bakımından önemli avantajlar sağlamaktadırlar. Halihazırda, özellikle yüksek mukavemetli betonarme kolonların davranışı tam olarak anlaşılamamış olup literatürde eksiklikler bulunmaktadır. Bu çalışmanın amacı yüksek mukavemetli betonarme kolonların eksenel basınç altındaki davranışını anlamak için sonlu elemanlar modeli geliştirerek parametrik çalışmalar yürütmektir. Bu kapsamda dikkate alınan parametreler; beton basınç dayanımı, boyuna donatı oranı ve enkesit boyutlarıdır. Ayrıca mevcut yönetmelik tahminlerinin değerlendirilmesi de gerçekleştirilmiştir. Beton basınç dayanımının 50 MPa' dan 100 MPa' a çıkarılması durumunda betonarme kolonun eksenel yük taşıma kapasitesinde yaklaşık olarak %69' luk bir artış gözlenmiştir. Boyuna donatı oranının %2'den %5.6'ya çıkarılması durumda betonarme kolon eksenel yük taşıma kapasitesi 1547.8 kN'dan 1862.5 kN'a çıkarak yaklaşık olarak %20 artmıştır. Betonarme kolonlarda enkesit boyutlarının 150 mm'den 450 mm'ye çıkarılması durumunda eksenel yük taşıma kapasitesinde 1547.5 kN' dan 12553.8 kN' a bir artış gözlenmiştir. Son olarak, mevcut yönetmeliklerde betonarme kolonların eksenel yük taşıma kapasitesini hesaplamak üzere kullanılan formülün, kapasiteyi yaklaşık %7 daha düşük tahmin ettiği belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Betonarme, eksenel yük, kolon, sonlu elemanlar.

ABSTRACT

The axial load capacity of reinforced concrete columns with shear links varies depending on cross-sectional dimensions, concrete compressive strength, and longitudinal reinforcement ratio. The behaviour of reinforced concrete columns, especially high-strength ones, is not fully understood, and existing literature has research gaps related to it. The aim of this study is to understand the behaviour of high-strength reinforced concrete columns by developing a finite element model for high-strength reinforced concrete columns and conducting parametric studies. The parameters considered in this study are concrete compressive strength, longitudinal reinforcement ratio, and cross-section dimensions. Moreover, predictions of the current design code were evaluated. When the concrete compressive strength increased from 50 MPa to 100 MPa, an approximately 69% increase in the axial load-carrying capacity of the reinforced concrete column was observed. In the case of increasing the longitudinal reinforcement ratio from 2% to 5.6%, the axial load-carrying capacity of the reinforced concrete column increased by approximately 20%, from 1547.8 kN to 1862.5 kN. An increase in axial load-carrying capacity from 1547.5 kN to 12553.8 kN was observed with increasing the cross-section dimensions from 150 mm to 450 mm. Moreover, the predictions of the current design codes were evaluated, and it was found that they underestimated 7% of the axial load capacity.

Keywords: Axial load, column, finite element, reinforced concrete

ToCite: SÖĞÜT, K. (2025). YÜKSEK MUKAVEMETLİ BETONARME KOLONLARIN DOĞRUSAL OLMAYAN SONLU ELEMANLAR ANALİZİ. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 28(2), 1081-1091.

GİRİŞ

Betonarme kolonlar, yapıların yük taşıma kapasitesini ve stabilitesini sağlayan temel taşıyıcı elemanlardır (ACI Committee 445, 1998; Said vd., 2024). Betonarme etriyeli kolonların eksenel yük taşıma kapasitesi esas olarak enkesit boyutlarına, betonun basınç dayanımına ve boyuna donatı alanına bağlıdır (ACI-318, 2019; TS 500, 2014). Yıllar içerisinde gelişen teknolojiyle birlikte yüksek katlı veya yüksek yüklere maruz kalabilecek yapılarda yüksek mukavemetli beton kullanımı yaygınlaşmıştır (Légeron & Paultre, 2000; Paultre vd., 2009; Aslani & Nejadi, 2012; Awati & Khadiranaikar, 2012; Eid vd., 2019). Bu tür yapılarda, yüksek mukavemetli betonun yalnızca dayanım açısından değil, aynı zamanda durabilite yönünden de sağladığı katkılar, kullanımının önemini artırmıştır (Salah-Eldin vd., 2019). Ancak, özellikle normal dayanıma sahip betonarme kolonlar için geliştirilen tasarım yöntemleri, yüksek dayanımlı betonarme kolonlara doğrudan uygulanamayabilir (Awati & Khadiranaikar, 2012). Bu durum, daha fazla deneysel, nümerik ve analitik çalışma yapılmasının gerekliliğini ortaya koymaktadır. Mevcut literatürde, gerilme-şekil değiştirme ilişkileri, sargılama etkisi ve beton dayanımı gibi davranışı doğrudan etkileyen parametreler incelenmiş olsa da yüksek mukavemetli betonarme kolonların eksenel basınç altındaki davranışlarını inceleyen deneysel, nümerik ve analitik çalışmalar sınırlı kalmıştır (Ibrahim & MacGregor, 1997; Canbay vd., 2006; Awati & Khadiranaikar, 2012; Koksal & Erdogan, 2021). Örneğin, Awati ve Khadiranaikar (2012), yürüttükleri deneysel ve analitik çalışmada, etriye oranındaki artışın yüksek mukavemetli betonarme kolonların hem sünekliğini hem de eksenel yük taşıma kapasitesini artırdığını belirtmişlerdir. Ayrıca, yüksek mukavemetli betonarme kolonların davranışlarının farklılık gösterebileceği ortaya konulmuştur (Awati & Khadiranaikar, 2012). Bunun yanı sıra, yüksek mukavemetli betonarme kolonların sonlu elemanlar yöntemiyle modellenmesi konusu literatürde yeterince ele alınmamıştır. Örneğin, Amirkhani ve Lezgy-Nazargah (2022), Abaqus programını kullanarak normal dayanımlı betonarme kolonların davranışlarını incelemiştir. Tüm bunlar göz önüne alındığında, yüksek mukavemetli betonarme kolonların davranışı hâlen tam olarak anlaşılamamış olup, mevcut yönetmeliklere eklenebilecek bir tasarım formülasyonuna duyulan ihtiyaç devam etmektedir.

Çoğu zaman deneysel çalışmalar yürütmek yüksek maliyetlere neden olmakta ve uzun zaman almaktadır. Oysa, doğrulaması yapılmış bir sonlu elemanlar modeli bu maliyetleri ve süreyi azaltabilir. Bu çalışmanın amacı, yüksek mukavemetli betonarme kolonlar için iki boyutlu sonlu eleman modelleri geliştirerek eksenel yük taşıma kapasitelerini tahmin etmektir. Bu kapsamda, söz konusu kolonlar için iki boyutlu sonlu eleman modelleri oluşturulmuştur. Geliştirilen iki adet model, mevcut literatürde deneysel sonuçları bulunan betonarme kolonlarla doğrulanmış, ardından parametrik çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Parametre olarak, kolon davranışını önemli ölçüde etkileyen beton basınç dayanımı, boyuna donatı oranı ve enkesit boyutları seçilmiştir. Ayrıca, betonarme kolonların eksenel yük taşıma kapasitesinin hesaplanmasında pek çok yönetmelikte kullanılan formülasyon değerlendirilmiş ve ilerideki hesaplamalarda kullanılabilecek bir sonlu eleman modeli önerilmiştir. Bunlara ek olarak, normal dayanımlı betona (30 MPa) sahip betonarme kolonların eksenel yük taşıma kapasiteleri, yönetmelik tahminleri ile sonlu eleman modellerinin tahminleri karşılaştırılarak değerlendirilmiştir. Bu sayede hem normal dayanımlı hem de yüksek dayanımlı betonarme kolonlar için yönetmelik ve sonlu eleman modeli tahminlerinin karşılaştırılması yapılmıştır.

MATERYAL VE METOD

Bu çalışmada, Awati & Khadiranaikar (2012) tarafından test edilen betonarme kolonlar, iki boyutlu doğrusal olmayan sonlu eleman modelinin doğrulanmasında kullanılmıştır. Söz konusu model, VecTor2 programı (Wong vd., 2013) kullanılarak oluşturulmuştur. Detaylar aşağıdaki alt bölümlerde sunulmuştur

Betonarme Kolonlar

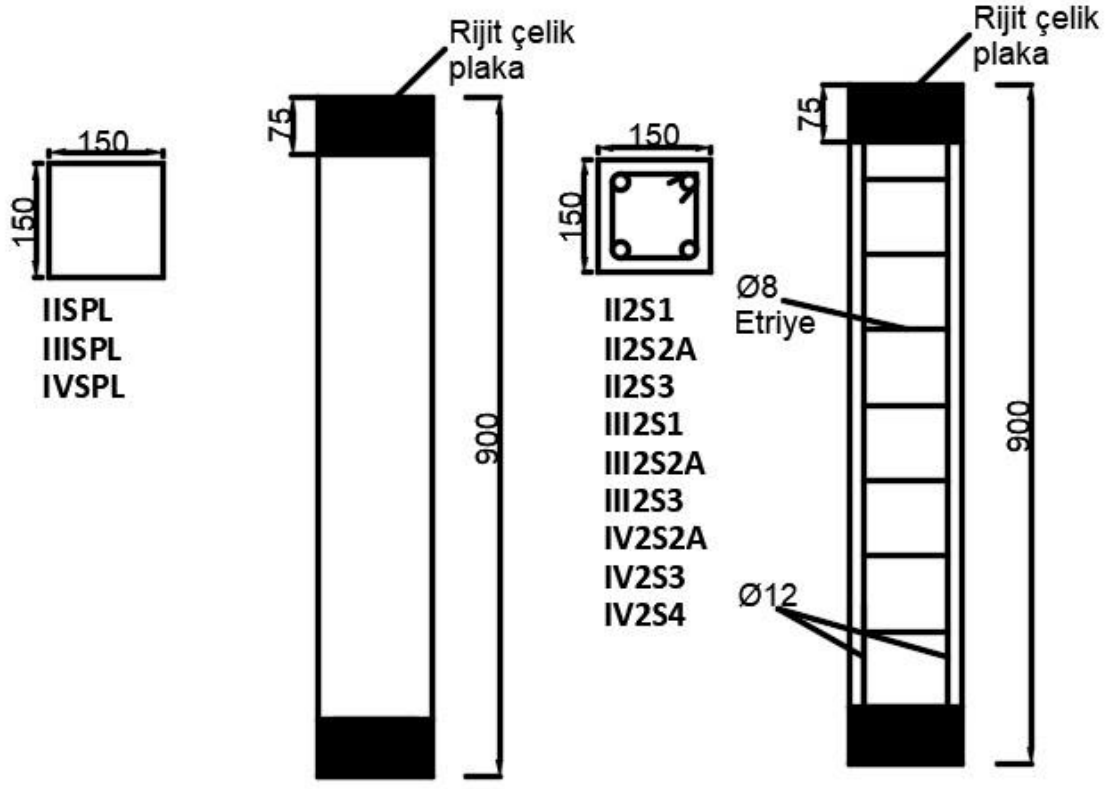
Awati & Khadiranaikar (2012) tarafından test edilen kolonlar iki farklı enkesit boyutuna sahiptir. Birinci grup kolonlar 150×150 milimetre (mm) enkesit boyutlarına sahipken, ikinci grup kolonlar 125×125 mm enkesit boyutlarına sahiptir. Şekil 1'de görüldüğü üzere, birinci ve ikinci grup kolonlar sırasıyla dört adet 12 mm ve dört adet 10 mm boyuna çelik donatılarla donatılmıştır. 8 mm çapında çelik donatılardan oluşturulmuş etriyeler, farklı aralıklarla her iki grup betonarme kolonda kullanılmıştır. Ayrıca, her iki gruptan hem boyuna donatısız hem de etriyesiz olarak test edilen kolonlar Şekil 1'de gösterilmiştir. Etriye aralıkları, kolon isimlendirmelerinin sonunda "S1" bulunan kolonlarda 100 mm, "S2" bulunanlarda 75 mm, "S3" bulunanlarda 50 mm ve "S4" bulunanlarda ise 30 mm olarak tasarlanmıştır (Awati & Khadiranaikar, 2012). Ayrıca, kolon isimlendirmeleri malzeme özellikleri, enkesit boyutları ile boyuna ve enine donatı özelliklerine göre yapılmış olup, Tablo 1 ve Şekil 1'de gösterilmiştir (Awati & Khadiranaikar, 2012). Test edilen betonarme kolonların malzeme özellikleri; f_c (beton silindir basınç dayanımı), $f_{y,l}$ (boyuna donatı akma dayanımı) ve $f_{y,v}$ (etriye donatısı akma dayanımı) Tablo 1'de verilmiştir.

Doğrusal Olmayan Sonlu Elemanlar Modellemesi

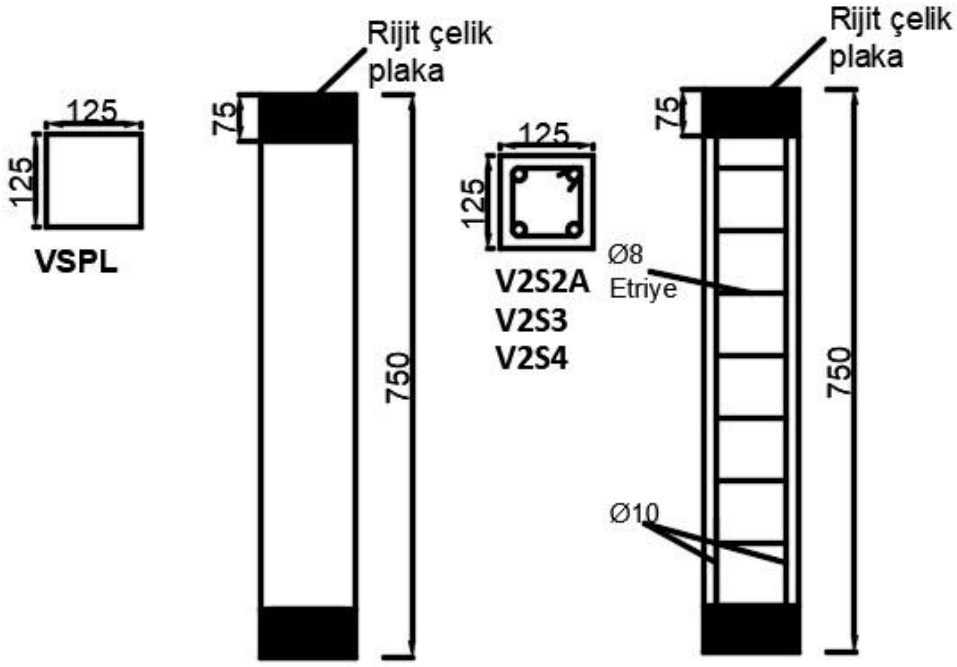
İki boyutlu doğrusal olmayan sonlu eleman modeli, daha önce de belirtildiği üzere, VecTor2 (Wong vd., 2013) programı kullanılarak oluşturulmuştur. Bu program, betonarme yapıların davranışını tahmin etmede daha başarılı sonuçlar veren, Değiştirilmiş Basınç Alanı Teorisi'nin (İng. *Modified Compression Field Theory* – MCFT) (Vecchio & Collins, 1986) gelişmiş bir versiyonu olan Bozulmuş Gerilme Alanı Modeli'ni (İng. *Disturbed Stress Field Model* – DSFM) (Vecchio, 2000) kullanmaktadır. Awati & Khadiranaikar (2012) tarafından deneysel çalışmaları yapılan betonarme kolonlar için iki farklı sonlu eleman modeli oluşturulmuştur. Oluşturulan tipik bir sonlu eleman modeli Şekil 2'de verilmiştir.

Tablo 1. Awati & Khadiranaikar (2012) Tarafından Test Edilen Kolonların Malzeme Özellikleri

Kolon	f_c (MPa)	$f_{y,l}$ (MPa)	$f_{y,v}$ (MPa)
II2S1	61	430	500
II2S2A	62	500	500
II2S3	66	430	500
IISPL	62.8	-	-
III2S1	75.8	430	500
III2S2A	77.58	500	500
III2S3	78	430	500
IIISPL	76.53	-	-
IV2S2A	96	500	500
IV2S3	102	430	500
IV2S4	98	430	500
IVSPL	95	-	-
V2S2A	108	500	500
V2S3	115.6	430	500
V2S4	115.6	430	500
VSPL	115.6	-	-

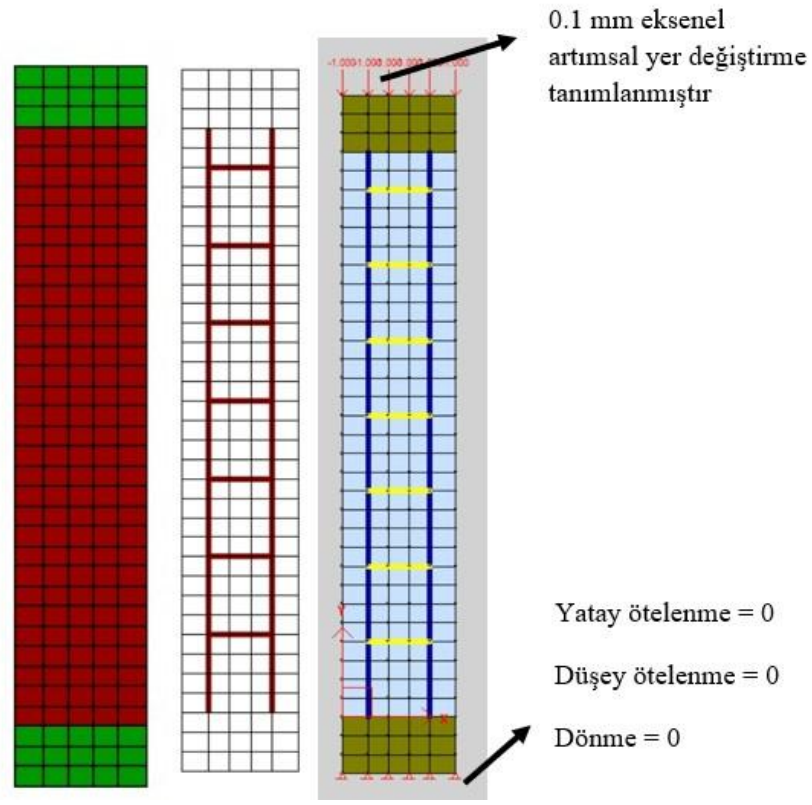


(a)



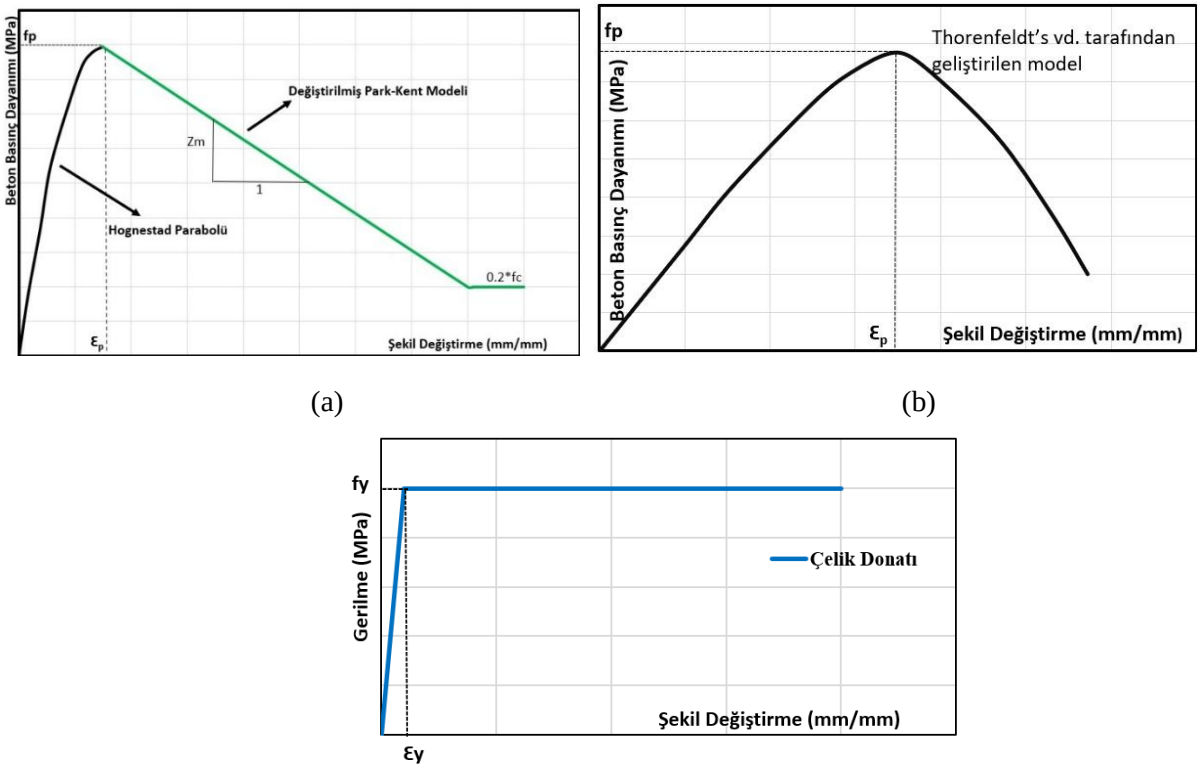
(b)

Şekil 1. Awati & Khadiranaikar (2012) Tarafından Test edilen kolonlar (a) Birinci grup; (b) İkinci grup (Tüm ölçüler milimetre cinsindendir)



Şekil 2. Oluşturulan Sonlu Elemanlar Modeli

Deneyler yalnızca basınç altında betonarme kolonların davranışını incelemek üzere yürütüldüğü için, beton için iki farklı beton modeli düşünülerek iki farklı sonlu elemanlar modeli geliştirilmiştir. Birinci modelde VecTor2 (Wong vd., 2013) programının içinde varsayılan ayarlarda bulunan beton basınç davranış modeli kullanılmıştır. Şekil 3'te gösterildiği gibi bu modelde beton nihai dayanımına ulaşmadan önceki davranışı Hognestad vd. (1955) tarafından geliştirilen parabol ile ve betonun nihai dayanımına ulaştıktan sonraki davranışı ise Değiştirilmiş Park-Kent model (Scott vd., 1982; Wong vd., 2013) ile modellenmiştir. Ayrıca beton basınç azalması program içinde Model A olarak tanımlanan ve Vecchio & Collins (1993) tarafından geliştirilen model kullanılmıştır. Şekil 3 (b)'de görüldüğü üzere ikinci modelde ise betonun basınç davranışı Thorenfeldt's vd. (1987) tarafından geliştirilen model kullanılarak modellenmiştir. Ayrıca beton basınç azalması için ise program içerisinde Model B olarak tanımlanan ve Vecchio & Collins (1993) tarafından geliştirilen model kullanılmıştır. Diğer tüm malzeme modelleri program tarafından varsayılan ayarlı olarak kullanılmıştır. Şekil 3 (c) 'de görüldüğü üzere çelik donatılar için yalnızca akma dayanımları verildiği için elastik tam plastik bir model kullanılmış olup gerilme-birim uzama eğrisi akma dayanımına kadar elastik davranış göstereceği, akma dayanımına ulaştıktan sonra ise tam plastik davranış göstereceği şekilde modellenmiştir. Betonarme kolonlar yalnızca statik eksenel basınç kuvveti altında test edildiği için beton ve çelik arasındaki aderans tam bağlı şekilde modellenmiştir. Bu yaklaşım, çelik donatı ile beton arasındaki aderansın tam bağlı olduğu kabulüne dayanan çalışmalarda da başarıyla uygulanmıştır (Palermo& Vecchio, 2007; Amirkhani & Lezgy-Nazargah, 2022; Dirar et al., 2025). Ayrıca, sonlu elemanlar modelinin doğrulama aşamasında, tam bağlı şekilde yapılan modelleme ile deney sonuçları başarılı bir şekilde tahmin edilmiştir (bkz. Tablo 2). Sonlu elemanlar ağ boyutu her iki yön için de yaklaşık 25 mm olarak oluşturulmuştur. Bu ağ boyutu seçimi daha önce yapılan çalışmalar da uyumludur (Sogut vd., 2021; Dirar vd., 2024; Dirar vd., 2025; Sogut, 2025).



Şekil 3. Malzeme modelleri (a) Birinci sonlu eleman modeli için beton modeli (b) İkinci sonlu eleman modeli için beton modeli (c) Çelik donatı için malzeme modeli

BULGULAR VE TARTIŞMA

Model Tahminleri

Awati & Khadiranaikar (2012) tarafından test edilen ve detayları önceki bölümde verilen betonarme kolonların deneysel sonuçlarının doğrulaması oluşturulan iki adet sonlu elemanlar modeli ile de yapılmıştır. Tablo 2 geliştirilen birinci ve ikinci sonlu eleman modellerinin betonarme kolonların maksimum eksenel yük taşıma kapasitesi tahminlerini (P_{FE1} ve P_{FE2}) göstermektedir. Ayrıca yine Tablo 2' de eksenel yük altında etriyeli betonarme kolonların maksimum yük taşıma kapasitesini teorik olarak hesaplanması sonucu elde edilen $P_{Teo.}$ değerleri de

verilmiştir. Bu teorik hesaplama pek çok yönetmelik tarafından kullanılmakta olup (ACI-318, 2019; TS 500, 2014) aşağıda Formül 1' de verilmiştir.

$$P_{Teo.} = 0.85 * f_{cd} * A_c + A_{st} * f_{yd} \quad (1)$$

Burada f_{cd} beton basınç dayanımını, A_c beton enkesit alanını, A_{st} boyuna donatı alanını ve f_{yd} ise boyuna donatı akma dayanımı göstermektedir.

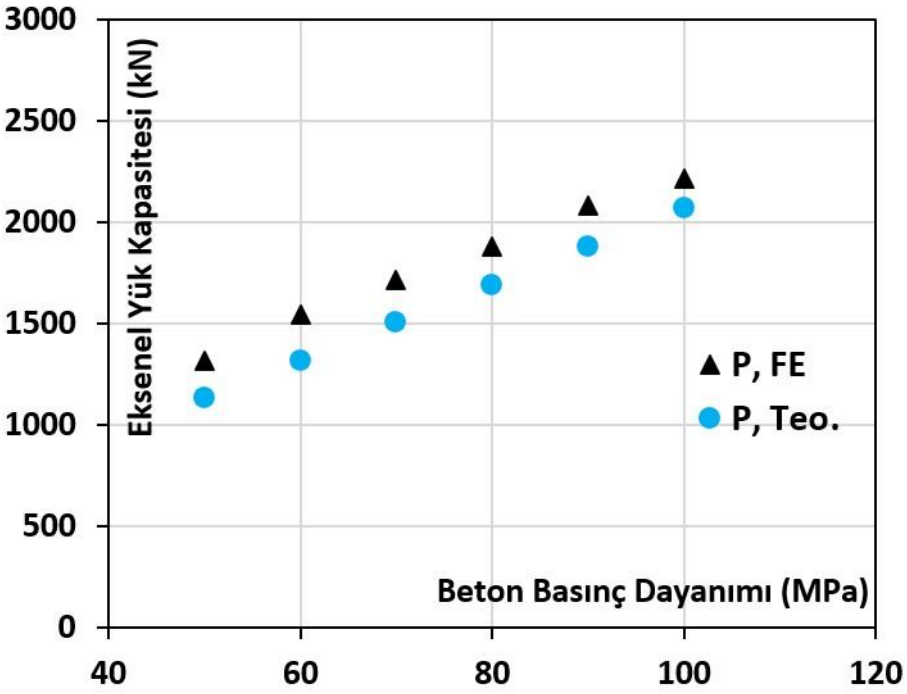
Geliştirilen birinci ve ikinci sonlu elemanlar modeli betonarme kolonların maksimum eksenel yük taşıma kapasitesini sırasıyla %4 ve %1 hata payıyla tahmin etmişlerdir. Ayrıca tahminlerden dolayı oluşan standart sapmalar sırasıyla 0.10 ve 0.09' dur. Betonarme kolonların maksimum eksenel yük taşıma kapasitesi teorik olarak ise %7 hata payı ve 0.09 standart sapma değeriyle hesaplanmıştır. Görüldüğü üzere her iki sonlu elemanlar modeli de teorik hesaplamaya göre daha iyi sonuçlar vermişlerdir. İkinci olarak oluşturulan sonlu elemanlar modeli, %1 hata payıyla deney sonuçlarını en iyi şekilde tahmin etmiştir.

Beton Basınç Dayanımı Etkisi

Geliştirilen sonlu eleman modellerinden ikincisi deney sonuçlarını daha iyi doğruladığı için yapılacak parametrik çalışmalara o modelle devam edilmiştir. Beton basınç dayanımının betonarme kolon eksenel yük kapasitesine olan etkisi farklı beton sınıfları kullanılarak incelenmiştir. Enkesit ölçüleri 150*150 mm olan, dört adet 12 mm boyuna donatıya sahip ve 8 mm etriye 100 mm aralıkla yerleştirilmiş II2S1 kolonuna eş kolonlar üzerinde parametrik çalışma yürütülerek bu etki incelenmiştir. Farklı beton basınç dayanımları yani 50,60,70,80,90 ve 100 MPa incelenmiştir. Şekil 4 beton basınç dayanımın kolon eksenel yük taşıma kapasitesi ile değişimini göstermektedir. Burada hem sonlu elemanlar yoluyla elde edilen sayısal sonuçlar (P_{FE}) hem de Formül 1'de verilen denklemin tahminleri ($P_{Teo.}$) verilmiştir. Grafikten de anlaşılacağı üzere her iki durum için de beton basınç dayanımı arttıkça eksenel yük taşıma kapasitesi artmıştır. Örneğin beton basınç dayanımı 50 MPa' dan 100 MPa çıkarıldığında sonlu elemanlar yöntemiyle nümerik olarak test edilen betonarme kolonun eksenel yük taşıma kapasitesi yaklaşık %69' luk bir artış ile 1314.5 kN' dan 2215.4 kN' a çıkmıştır. Formül 1' de verilen teorik hesaplamalara göre ise betonarme kolon eksenel yük taşıma kapasitesi 1131.4 kN' dan 2068.4 kN'a çıkmıştır. Bu da yaklaşık %83'lük bir artışa denk gelmektedir. Burada ayrıca Formül 1' de verilen teorik betonarme kolon eksenel yük kapasitesi tahminlerinin daha düşük kaldığı görülmektedir.

Tablo 2. Model Tahminleri

Kolon	P, Deneysel (kN)	P, FE1 (kN)	P, FE1 / P, Deneysel.	P, FE2 (kN)	P, FE2 / P,Deneysel	P, Teo. (kN)	P, Teo. / P, Exp.
II2S1	1489.4	1516.4	1.02	1547.8	1.04	1337.5	0.90
II2S2A	1493.9	1546.6	1.04	1494.0	1.00	1387.9	0.93
II2S3	1542.3	1598.6	1.04	1590.9	1.03	1431.3	0.93
IISPL	1470.0	1352.2	0.92	1377.4	0.94	1201.1	0.82
III2S1	1821.5	1811.1	0.99	1812.5	1.00	1614.9	0.89
III2S2A	1848.4	1871.4	1.01	1796.7	0.97	1679.9	0.91
III2S3	1896.8	1843.9	0.97	1788.7	0.94	1656.1	0.87
IIISPL	1912.6	1635.9	0.86	1604.8	0.84	1463.6	0.77
IV2S2A	2081.8	2263.0	1.09	2186.6	1.05	2025.1	0.97
IV2S3	2065.9	2348.2	1.14	2240.0	1.08	2105.9	1.02
IV2S4	1975.0	2285.0	1.16	2159.4	1.09	2031.0	1.03
IVSPL	2182.5	2026.8	0.93	1983.2	0.91	1816.9	0.83
V2S2A	1550.0	1732.7	1.12	1639.7	1.06	1562.5	1.01
V2S3	1450.0	1835.0	1.27	1758.5	1.21	1639.5	1.13
V2S4	1560.0	1834.8	1.18	1690.5	1.08	1639.5	1.05
VSPL	1750.0	1691.3	0.97	1586.1	0.91	1535.3	0.88
		Ortalama:	1.04		1.01		0.93
		Standart sapma:	0.10		0.09		0.09



Şekil 4. Beton Basınç Dayanımı Etkisi

Awati & Khadiranaikar (2012) tarafından test edilen betonarme kolonların eksenel yük taşıma kapasitesinin teorik ve nümerik olarak tahmin edilmesinin daha iyi anlaşılabilmesi için ayrıca fiziksel olarak test edilen betonarme kolonlar; 30 MPa basınç dayanımına sahip olacak şekilde nümerik olarak test edilmiştir. Bununla ilgili karşılaştırmalar Tablo 3 üzerinde verilmiştir. Beton sınıfının 30 MPa olduğu senaryoda her iki sonlu eleman modelinden elde edilen sonuçlar Formül 1 ile karşılaştırılmıştır. Tablo 3'ten de görüldüğü üzere Formül 1 yaklaşık olarak betonarme kolon eksenel yük taşıma kapasitesini %13-15 hata ile tahmin edebilmiştir.

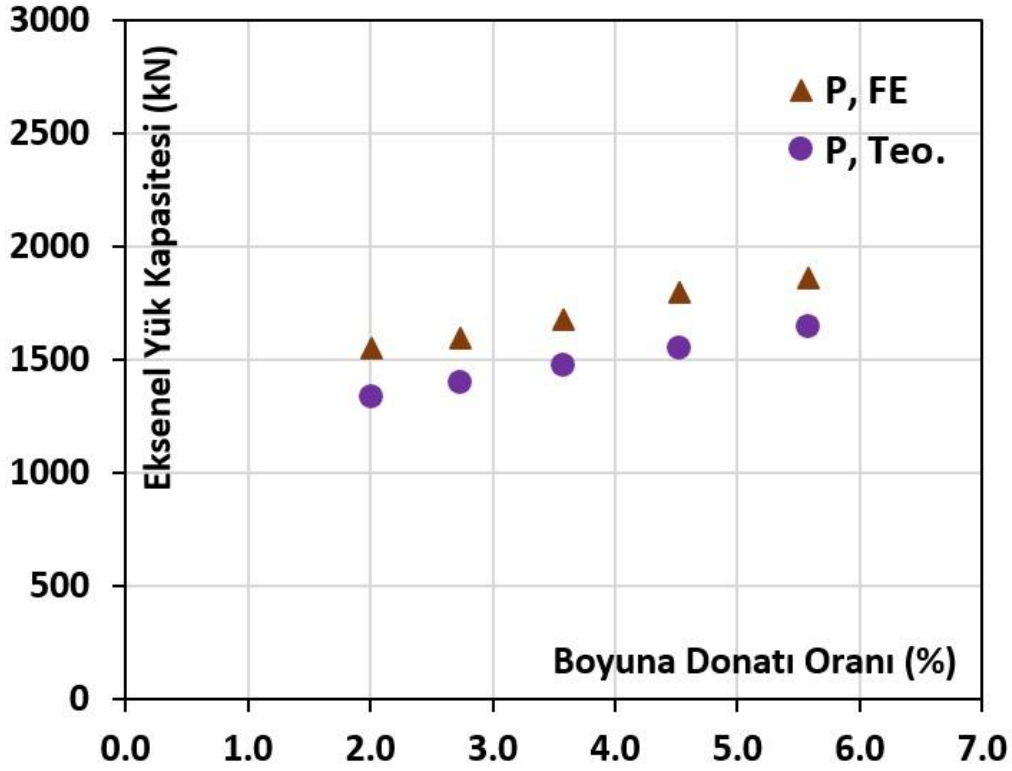
Tablo 3. C30 Beton Sınıfı İçin Model Tahminleri

Kolon	fc (MPa)	P, FE1 (kN)	P, FE2 (kN)	P, Teo. (kN)	P, Teo. / P, FE1	P, Teo. / P, FE2
II2S1	30	881.2	871.2	756.6	0.86	0.87
II2S2A	30	915.9	890.8	788.2	0.86	0.88
II2S3	30	890.5	878.0	756.6	0.85	0.86
IISPL	30	675.2	674.7	573.8	0.85	0.85
IV2S4	30	896.9	879.8	756.6	0.84	0.86
V2S2A	30	635.5	615.2	547.4	0.86	0.89
V2S3	30	617.8	608.5	525.5	0.85	0.86
V2S4	30	621.6	609.3	525.5	0.85	0.86
VSPL	30	468.9	469.1	398.4	0.85	0.85
				Ortalama:	0.85	0.87
				Standart: Sapma	0.01	0.01

Boyuna Donatı Oranı Etkisi

Boyuna donatı oranının betonarme kolonun eksenel yük kapasitesi üzerindeki etkisi, farklı donatı oranlarına sahip betonarme kolonların sonlu elemanlar yöntemiyle nümerik olarak test edilmesiyle incelenmiştir. Kolon eksenel yük taşıma kapasitesinin, boyuna donatı oranındaki değişim karşısında nasıl etkilendiğini incelemek amacıyla; kesit ölçüleri 150×150 mm olan, 61 MPa beton dayanımına sahip ve 8 mm çapında etriyelerin 100 mm aralıklarla yerleştirildiği II2S1 kolonuna eşdeğer olacak şekilde %2, %2.7, %3.6, %4.5 ve %5.6 boyuna donatı oranlarına sahip kolonlar üzerinde parametrik bir çalışma yürütülmüştür. Şekil 5, betonarme kolonun eksenel yük taşıma

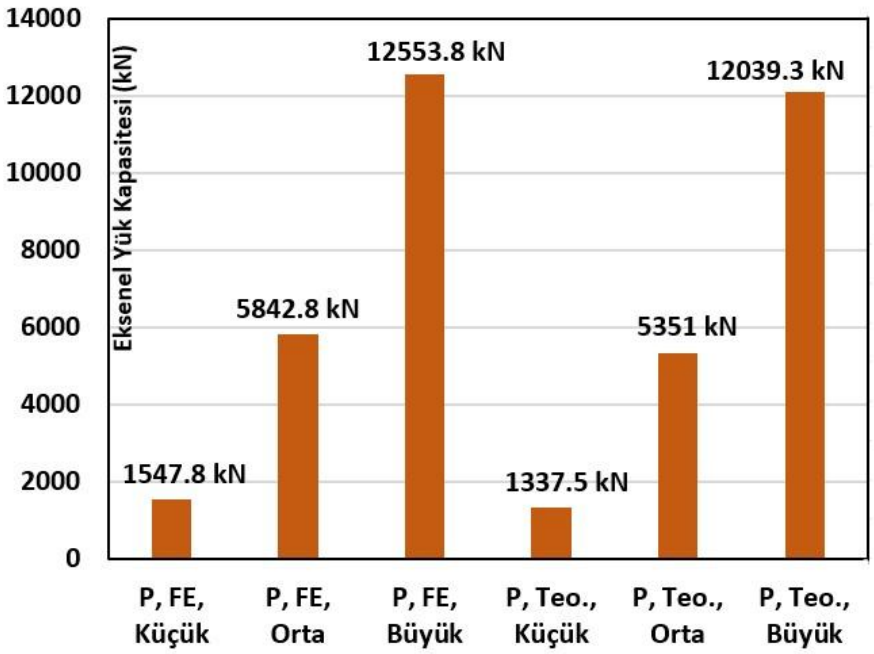
kapasitesinin, boyuna donatı oranının artması veya azalmasıyla nasıl değiştiğini göstermektedir. Hem nümerik hem de Formül 1'de verilen teorik eksenel yük taşıma kapasiteleri gösterilmiştir. Boyuna donatı oranının %2'den %5.6'ya çıkması durumunda, eksenel yük taşıma kapasitesi nümerik hesaplamada 1547.8 kN'dan 1862.5 kN'a, teorik hesaplamada ise 1337.5 kN'dan 1641.6 kN'a yükselmiştir. Bu artışlar sırasıyla yaklaşık %20 ve %23'tür. Ayrıca, beton basınç dayanımının etkisine benzer şekilde, Formül 1'de verilen teorik betonarme kolon eksenel yük kapasitesi tahminlerinin daha düşük kaldığı görülmektedir.



Şekil 5. Boyuna donatı oranı etkisi

Enkesit Boyutlarının Etkisi

Enkesit boyutlarının etkisini incelemek için üç tane betonarme kolon göz önüne alınmıştır. Göz önüne alınan kolonlardan ilkinin enkesit boyutları 150*150 mm olup, boyuna donatısı dört adet 12 mm çelik donatılardan teşkil edilmiştir. Böylece boyuna donatı oranı %2 olarak hesaplanmıştır. Etriye donatısı olarak 8 mm çelik donatılar 100 mm aralıklarla yerleştirilmişlerdir. Etriye oranı ise böylece %0.67 olarak tasarlanmıştır. İlk kolon II2S1 kolonuna eş kolon olarak tasarlanmıştır. İkinci kolon tüm ayrıtlar iki ile çarpılarak tasarlanmıştır. Enkesit boyutları 300*300 mm olup, boyuna donatı oranı korunarak dört adet 24 mm çelik donatılardan boyuna donatısı teşkil edilmiştir. Aynı şekilde etriye donatısı oranı da sabit tutularak 16 mm çelik donatılar 200 mm aralıklarla yerleştirilmişlerdir. Üçüncü kolon ise tüm ayrıtlar üç ile çarpılarak tasarlanmıştır. Enkesit boyutları 450*450 mm olup, boyuna donatı oranı korunarak dört adet 36 mm çelik donatılardan boyuna donatısı teşkil edilmiştir. Aynı şekilde etriye donatısı oranı da sabit tutularak 24 mm çelik donatılar 300 mm aralıklarla yerleştirilmişlerdir. Diğer bütün malzeme, yükleme ve geometrik özelikler korunarak parametrik çalışma yapılmıştır. Şekil 6 küçük (150*150 mm), orta (300*300 mm) büyük (450*450 mm) enkesitli betonarme kolonların eksenel yük taşıma kapasitesini karşılaştırmaktadır. Hem nümerik hem de Formül 1'de verilen teorik eksenel yük taşıma kapasiteleri karşılaştırılmıştır. Formül 1'e göre enkesit boyutlarının 150 mm' den 300 mm'ye çıkmasıyla eksenel yük taşıma kapasitesi 1337.5 kN'dan 5351 kN' a çıkmıştır. Benzer şekilde sonlu elemanlar modeli kullanılarak oluşturulan kolonlarda enkesit boyutunun 150 mm'den 300 mm'ye artması eksenel yük taşıma kapasitesini 1547.5 kN'dan 5842.8 kN'a çıkarmıştır. Formül 1'e göre enkesit boyutlarının 300 mm'den 450 mm'ye çıkması durumunda ise eksenel yük taşıma kapasitesi 5351 kN'dan 12039.3 kN' a çıkmıştır. Benzer şekilde sonlu elemanlar modelinin eksenel yük taşıma kapasite tahmini de enkesit boyutlarının 300 mm'den 450 mm'ye çıkması durumunda 5842.8 kN'dan 12553.8 kN' a çıkmıştır. Formül 1'e göre yapılan hesaplamalarda eksenel yük taşıma kapasitesinin daha düşük tahmin edildiği görülmüştür.



Şekil 6. Enkesit boyutlarının etkisi

SONUÇ

Bu çalışma kapsamında beton basınç dayanımı yüksek kolonların eksenel basınç kuvveti altındaki davranışları incelenmiştir. İki boyutlu sonlu eleman modeli geliştirilmiş ve bu model mevcut literatürde deneysel çalışmaları yapılan yüksek basınç mukavemetine sahip kolonların deneysel sonuçları karşılaştırılmış ve başarılı bir şekilde doğrulamıştır. Yürütülen nümerik çalışmalar neticesinde ulaşılan sonuçlar aşağıdaki gibi özetlenebilir;

- Yüksek basınç dayanımına sahip betonarme kolonlar için iki adet sonlu eleman modeli geliştirilmiş ve bu modeller, deney sonuçlarını sırasıyla %4 ve %1 hata oranlarıyla tahmin etmiştir. Pek çok yönetmelikte (ACI 318, 2019; TS 500, 2014) yer alan formülasyon ise deneysel sonuçları %7 hata oranıyla tahmin edebilmiştir. Buradan da anlaşılacağı üzere, kullanılan formül betonarme kolonların eksenel yük taşıma kapasitesini olduğundan daha düşük tahmin etmiştir.
- 30 MPa normal basınç dayanımına sahip betonarme kolonlar için yapılan nümerik analiz sonuçlarını, pek çok yönetmelik (ACI-318, 2019; TS 500, 2014) tarafından da kullanılan formülasyon yaklaşık olarak %13-15 daha az eksenel yük taşıma kapasitesiyle tahmin edebilmiştir. Teorik hesaplamalarda kullanılan formül hem yüksek hem de normal basınç dayanımına sahip betonarme kolonların eksenle yük taşıma kapasitesini daha düşük tahmin etmiştir.
- Beton basınç dayanımının 50 MPa' dan 100 MPa çıkması durumunda betonarme kolonun eksenel yük taşıma kapasitesinde yaklaşık olarak %69' luk bir artış gözlenmiştir.
- Boyuna donatı oranının %2'den %5,6'ya çıkması durumda betonarme kolon eksenel yük taşıma kapasitesi 1547.8 kN'dan 1862.5 kN'a çıkarak yaklaşık olarak %20 artmıştır.
- Betonarme kolonlarda enkesit boyutlarının 150 mm'den 300 mm'ye çıkması durumunda eksenel yük taşıma kapasitesinde 1547.5 kN' dan 5842.8 kN' a bir artış gözlenmiştir. Benzer şekilde enkesit boyutlarının 300 mm'den 450 mm'ye çıkması durumunda da eksenel yük taşıma kapasitesi 5842.8 kN'dan 12553.8 kN' a çıkmıştır.
- Bu çalışma kapsamında geliştirilen sonlu eleman modeli, deneysel sonuçlarla doğrulanmış olup, betonarme kolonların eksenel basınç kuvveti taşıma kapasitesini tahmin etmede ve boyutlandırmada kullanılabilir. Çalışma, kısıtlı bir çalışma alanına sahip olan yüksek mukavemetli betonarme kolonlar için teorik bir formülasyonun gerekliliğini ortaya koyarak, sonlu eleman modeli önermiştir. Ayrıca, yüksek mukavemetli betonarme kolonların eksenel basınç kuvveti altındaki davranışlarının incelenmesi için daha fazla deneysel çalışmaya ihtiyaç duyulmaktadır.

KAYNAKLAR

ACI Committee 318. (2019) Building code requirements for structural concrete and commentary. American Concrete Institute, Farmington Hills, MI.

ACI Committee 445 on Shear and Torsion (1998). Recent approaches to shear design of structural concrete. *Journal of Structural Engineering*. 124(12), 1375-1417.

Amirkhani, S., & Lezgy-Nazargah, M. (2022). Nonlinear finite element analysis of reinforced concrete columns: Evaluation of different modeling approaches for considering stirrup confinement effects. *Structural Concrete*, 23, 2820–2836. https://doi.org/10.1002/suco.202100532

Aslani, F., & Nejadi, S. (2012). Cyclic constitutive model for high-strength concrete confined by ultra-high-strength and normal-strength transverse reinforcements. *Australian Journal of Structural Engineering*. 12, 159–172. https://doi.org/10.7158/13287982.2011.11465088

Awati, M., & Khadiranaikar, R.B. (2012). Behavior of concentrically loaded high performance concrete tied columns. Engineering Structures, 37, 76-87. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2011.12.040

Canbay, E., Ozcebe, G., & Ersoy, U. (2006). High-strength concrete columns under eccentric load. *ASCE Journal of Structural Engineering*, 132, 1052–1060. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2006)132:7(1052)

Dirar, S., Caro, M., Sogut, K., & Quinn, A. (2024). Experimental behaviour, FE modelling and design of large-scale reinforced concrete deep beams shear-strengthened with embedded fibre reinforced polymer bars. *Structures*, 67, 106938. https://doi.org/10.1016/j.istruc.2024.106938

Dirar, S., Sogut, K., Caro, M., Rahman, R., Theofanous, M., & Faramarzi, A. (2025). Effect of shear span-to-effective depth ratio and FRP material type on the behaviour of RC T-beams strengthened in shear with embedded FRP bars. *Engineering Structures*, 332, 120105. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2025.120105

Eid, R., Cohen, A., Guma, R., Ifrach, E., Levi, N., & Zvi, A. (2019). High-strength concrete circular columns with TRC-TSR dual internal confinement. *Buildings*, *9*(10), 218. https://doi.org/10.3390/buildings9100218

Hognestad, E., Hanson, N.W., & McHenry, D. (1955). Concrete stress distribution in ultimate stress design. *ACI Journal*, 27(4), 455-479. https://doi.org/10.14359/11609

Ibrahim, H.H., & MacGregor, J.G. (1997). Modification of the ACI rectangular stress block for high-strength concrete. *ACI Structural Journal*, 94, 40–48. https://doi.org/10.14359/459

Koksal, H.O., & Erdogan, A. (2021). Stress–strain model for high-strength concrete tied columns under concentric compression. *Structures*, 32, 216-227. https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.02.063

Légeron, F., & Paultre, P. (2000). Behavior of high-strength concrete columns under cyclic flexure and constant Axial Load. *ACI Structural Journal*, 97(4), 591–601. https://doi.org/10.14359/7425

Palermo, D. & Vecchio, F.J. (2007) Simulation of cyclically loaded concrete structures based on the finite-element method. Journal of Structural Engineering. 133, 728–738. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733 9445(2007) 133:5(728)

Paultre, P.; Eid, R.; Robles, H.I.; & Bouaanani, N. (2009). Seismic performance of circular high-strength concrete Columns. *ACI Structural Journal*, 106(4), 395–404. https://doi.org/10.14359/56605

Said, A. I., Hilfi, H. A., Allawi, A. A., & Wardeh, G. (2024). Structural Performance of a Hollow-Core Square Concrete Column Longitudinally Reinforced with GFRP Bars under Concentric Load. *CivilEng*, *5*(4), 928-948. https://doi.org/10.3390/civileng5040047

Salah-Eldin, A., Mohamed, H. M., & Benmokrane, B. (2019). Structural performance of high-strength-concrete columns reinforced with GFRP bars and ties subjected to eccentric loads. *Engineering Structures*, 185, 286-300. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.01.143

Scott, B.D., Park, R., & Priestley, M.J.N. (1982). Stress-strain behavior of concrete confined by overlapping hoops at low and high strain rates. *ACI Journal*, 79(1), 13-27. https://doi.org/10.14359/10875

Sogut, K. (2025). Structural behaviour of concrete deep beams reinforced with aluminium alloy bars. *Applied Sciences*, 15(10), 5453. https://doi.org/10.3390/app15105453

Sogut, K., Dirar, S., Theofanous, M., Faramarzi, A., & Nayak, A.N. (2021). Effect of transverse and longitudinal reinforcement ratios on the behaviour of RC T-beams shear strengthened with embedded FRP BARS. *Composite Structures*, 262, 113622. https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.113622

Thorenfeldt, E., Tomaszewicz, A. & Jensen, J.J. (1987). Mechanical properties of high strength concrete and applications in design. In: Proceedings of the Symposium on Utilization of High Strength Concrete, Stavanger, p.p. 149–159.

TS 500: Requirements for design and construction of reinforced concrete structures (2014). TSE (Turkish Standards Institute), Ankara, Turkey.

Vecchio, F.J. (2000). Disturbed stress field model for reinforced concrete: formulation. *ASCE Journal of Structural Engineering*, 126(9), 1070-1077. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2000)126:9(1070)

Vecchio, F.J. & Collins M.P. (1986). The modified compression field theory for reinforced concrete elements subjected to shear. *ACI Structural Journal*, 83(2), 219–231. https://doi.org/10.14359/10416

Vecchio, F.J. & Collins, M.P. (1993). Compression response of cracked reinforced concrete. *ASCE Journal of Structural Engineering*, 119(12), 3590-3610. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1993)119:12(3590)

Wong, P.S., Vecchio, F.J. & Trommels, H. (2013). VecTor2 & FormWorks user's manual (second edition). Toronto: University of Toronto.

KSÜ Mühendislik Bilimleri Dergisi, 28(2), 2025
Araştırma Makalesi

KSU J Eng Sci, 28(2), 2025
Research Article

Kahramanmaras Sutcu Imam University
Journal of Engineering Sciences

Geliş Tarihi : 07.01.2025
Kabul Tarihi : 18.04.2025

Received Date : 07.01.2025
Accepted Date : 18.04.2025

AÇIKLANABİLİR YAPAY ZEKÂ YÖNTEMLERİYLE MR GÖRÜNTÜLERİNDEN BEYİN TÜMÖRÜ TESPİTİ

BRAIN TUMOR DETECTION FROM MRI IMAGES WITH EXPLAINABLE ARTIFICIAL INTELLIGENCE METHODS

Muhammet Doğukan İLİ[1*] (ORCID: 0009-0006-1518-0720)
Fatih ÖZYURT[1] (ORCID: 0000-0002-8154-6691)

[1] Fırat Üniversitesi, Yazılım Mühendisliği Bölümü, Elazığ, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Muhammet Doğukan İLİ, dogukanili25@gmail.com

ÖZET

Bu çalışma açıklanabilir yapay zeka yöntemleri kullanılarak MR görüntülerinden beyin tümörlerinin tespit edilmesini amaçlamaktadır. GradCAM, LIME ve Shapley görselleştirme yöntemleri CNN modellerine entegre edilerek, dört farklı beyin durumu (No Tumor, Glioma, Meningioma, Pituitary) sınıflandırılmıştır. GradCAM yöntemi modelin genel odaklanma alanlarını belirlerken, LIME modelin kararlarını detaylandırmış, Shapley ise modelin genel performansını ve eksikliklerini ortaya koymuştur. Çalışmada bu yöntemlerin birlikte kullanılması, model performansının artırılması için önemli bir yol gösterici olarak sunulmuştur.

Anahtar Kelimeler: Açıklanabilir yapay zeka, derin öğrenme, makine öğrenmesi, GradCAM, beyin tümörü

ABSTRACT

In this study, the aim is to detect brain tumors from MR images using explainable artificial intelligence methods. GradCAM, LIME, and Shapley visualization methods were utilized as part of CNN models in the study. The classification in the model developed during the study was examined under four groups: No Tumor, Glioma, Meningioma, and Pituitary. As a result of the study, GradCAM proved effective in identifying the general focus areas of the model, LIME provided a detailed explanation of the model's decisions, and Shapley revealed the overall performance and shortcomings of the model. The combined use of these techniques enables the provision of more data or the implementation of necessary improvements to ensure the model works more reliably and effectively.

Keywords: Explainable artifical intelligence, deep learning, machine learning, GradCAM, brain tumor

GİRİŞ

Günümüzde yapay zeka teknolojisinin gelişmesiyle birlikte günlük yaşamdan ekonomik faaliyetlere kadar birçok konuda başarının elde edildiği bilinmektedir. Bu başarı ile yapay zeka teknolojilerinin otomotiv sektöründen tıp alanına kadar geniş bir yelpazede aktif olarak kullanılmaya başlandığı söylenebilmektedir (Pannu, 2015). Sağlık alanında yapay zeka, ilaçların keşfedilmesi, hasta takibinin yapılabilmesi, hastalıkların tanılarının konulabilmesi, risk yönetimi gibi çeşitli uygulama alanlarında kullanılmaktadır. Tıbbi görüntüleme de yapay zeka teknolojilerinin aktif olarak kullanılmasının sebebi klinik açıdan etkinlik ve verimliliğin arttırılabilmesidir (Reddy, 2018). Özellikle günümüzde beyin tümörlerinin tespit edilmesi ve sınıflandırılabilmesi açısından yapay zeka teknolojilerinin önemli başarılara imza attığı bilinmektedir. Bu sebeple sağlık alanında özellikle önemli hastalıkların tespit edilmesinde bu teknolojilerin sıklıkla kullanılmaya başlandığı söylenebilmektedir (Manne ve Kantheti, 2021).

Makine öğrenmesi, tıbbi görüntüleme alanında önemli bir potansiyele sahiptir ve MR görüntülerinden beyin tümörlerinin tespit edilmesi amacıyla yaygın olarak kullanılmaktadır (Ellah vd., 2019). Beyin tümörlerini tespit

ToCite: İLİ, M. D. & ÖZYURT, F., (2025). AÇIKLANABİLİR YAPAY ZEKÂ YÖNTEMLERİYLE MR GÖRÜNTÜLERİNDEN BEYİN TÜMÖRÜ TESPİTİ. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 28(2), 1092-1109.

etmek amacıyla geniş bir MR görüntüleme veri setine ihtiyaç duyulmaktadır. Bu veri setleri genel olarak sağlıklı beyin MR görüntüleri, çeşitli türlerde tümör içeren görüntüler ve klinik etiketleme ile sınıflandırmalar içermektedir (Abdusalomov vd., 2023). Makine öğrenmesi modellerinden doğru sonuçların alınabilmesi için ön işleme gerekmektedir. Bu süreçte farklı cihazlardan kaynaklanan parlaklıklar ve kontrast farkları düzeltilmektedir. Görüntülerin boyutlarının standart hale getirilmesi gerekmektedir. MR görüntülerindeki parazitlerin filtrelenmesi ve tümörlerin manuel olarak işaretlenmesi, segmentasyon modeller için temel gerekliliklerdir (Rahman, 2019). Farklı türlerdeki makine öğrenmesi modelleri MR görüntülerinden beyin tümörünün tespit edilmesinde kullanılmaktadır. Örneğin, derin öğrenme modellerinden CNN'ler görüntü özelliklerini çıkarmada ve sınıflandırmada yaygın olarak kullanılmaktadır (Aamir vd., 2022).

Açıklanabilir yapay zeka, herhangi bir modelin karar verme süreçlerinin daha anlaşılır ve şeffaf olmasını amaçlamaktadır (Pillai, 2024). Görüntü işleme algoritmaları ile evrişimli sinir ağları (CNN) gibi farklı derin öğrenme modellerinde kullanılan açıklanabilir yöntemler, ilgili modelin herhangi bir görüntü üzerinde karar verme işlemini nasıl yaptığının görselleştirmek ve yorumlama amacıyla kullanılmaktadır (Singh vd., 2020). CNN, özellikle görüntü işleme, nesne tanıma ve çeşitli görsel veriler ile ilgili görevlerde kullanılan yapay sinir ağı türüdür. Bu ağlar, biyolojik sinir sisteminin işleyişinden esinlenmekte ve yapılarında bulunan evrişim katmanları aracılığıyla veriden özellik çıkarımı yapabilme becerisine sahiptirler (Kriegeskorte, 2015). CNN'ler genel olarak bilgisayarla görü, doğal dil işleme, tıp ve otonom araçlar başta olmak üzere farklı alanlarda kullanılabilmektedir (Turay ve Vladimirova, 2022). Günümüzde en sık kullanılan yöntemler ise LIME, GradCAM ve Shapley'dir. Yapılan literatür taramaları sonucunda beyin tümörü teşhisinde açıklanabilir yapay zeka teknolojilerinin kullanılarak yüksek başarıların elde edildiği bildirilebilmektedir (Aslan, 2024; Marmolejo ve Kose, 2024; Orman, 2021; Khan vd., 2020).

Yapılan çalışma kapsamında açıklanabilir yapay zeka teknikleriyle MR görüntülerinden beyin tümörünün tespit edilmesi amaçlanmıştır.

Literatür Araştırması

Baran (2024) çalışmasında belirli nöropsikolojik rahatsızlıkların (anksiyete, şizofreni, otizm spektrum bozukluğu, depresyon ve demans) yapay zeka temelli sınıflandırılması ve performanslarının incelenmesi amaçlanmıştır. Çalışmada makine öğrenmesi modelleri olarak Rastgele Orman, k-En Yakın Komşu, XGBoost, LightGBM ve Destek Vektör Makineleri kullanılmıştır. Çalışma sonucunda Destek Vektör'ün %97 doğruluk oranıyla en fazla doğruluk oranının olduğu ortaya konulmuştur. Karakaya (2024) çalışmasında meme kanseri tahmininde makine öğrenmesi algoritmaları ile AUTOML'nin incelenmesi amaçlanmıştır. Çalışma da Lojistik Regresyon, Karar Ağacı, KNN, Naive Bayes, Destek Vektör Makinesi, Rassal Orman, Stokastik Gradyan İniş, Adaboost, XGBoost, LightGBM, Yapay Sinir Ağları kullanılmıştır. Çalışma sonucunda AutoML yöntemlerinin makine öğrenmesi algoritmalarının tamamından daha yüksek doğruluk ve F1 skoruna sahip olduğu ortaya konulmuştur. Gülle vd. (2024) çalışmasında derin öğrenme yöntemleri kullanılarak böbrek hastalıklarının tespiti ve çoklu sınıflandırılması amaçlanmıştır. Çalışmada Classic CNN, ANN, ALEXNET, VGG16, VGG19 ağları ve Poly CNN modelleri kullanılmıştır. Çalışma sonucunda Poly CNN'in %99,94 oranıyla en yüksek doğruluğa sahip olduğu ortaya konulmuştur. Nancy ve Sathyarajasekaran (2024) çalışmasında beyin tümörü segmentasyonu gibi karmaşık görevlerin açıklanabilir yapay zeka modellerinin yorumlanabilirliğinin ve etkinliğinin incelenmesi amaçlanmıştır. Çalışmada MACE, Gradient Shap, LIME, GradCAM ve Guided GradCAM yöntemleri kullanılmıştır. Çalışma sonucunda beyin tümörü görüntülerinin etkili ve yorumlanabilirlik açısından en iyi performans gösteren modelin GradCAM olduğu ortaya konulmuştur. Amin vd. (2024) çalışmasında beyin tümörü teşhisinde GradCAM, LIME ve Shapley yöntemlerinin kullanılabilirlik performanslarının incelenmesini amaçlamıştır. Çalışma sonucunda her üç yönteminde doğrulama doğruluğunun %98 olduğu ve beyin tümörlerinde kullanılabilir olduğu ortaya konulmuştur. Aslan (2024) çalışmasında MR görüntüleri ile beyin tümörlerinin tespit edilmesi amaçlanmıştır. Çalışmada Evrişimli Sinir Ağı, uzun Kısa Süreli Bellek kullanılmıştır. Çalışma sonucunda çalışmada önerilen LSTM-ESA modelinin standart ESA modelinden daha iyi performans gösterdiği ve beyin tümörleri %98,1 doğruluk oranıyla tespit ettiği ortaya konulmuştur.

MATERYAL VE METOT

Yapılan çalışmada açıklanabilir yapay zeka yöntemleri kullanılarak MR görüntülerinden beyin tümörlerinin tespit edilmesi amaçlanmıştır. Bu bölümde çalışmada kullanılan materyal ve metotlar kapsamlıca verilmiştir.

Materyal

Çalışmada beyin tümörü sınıflandırmak için MR görüntüleri içeren veri seti kullanılmıştır. Bu veri seti dört farklı beyin durumunu içermektedir; NoTumor, Glioma, Meningioma ve Pituitary'dir. Mevcut görüntüler, etiketlenmiş olarak sınıflandırılmış ve modelin eğitimi, doğrulaması ve testi için ayrılmıştır.

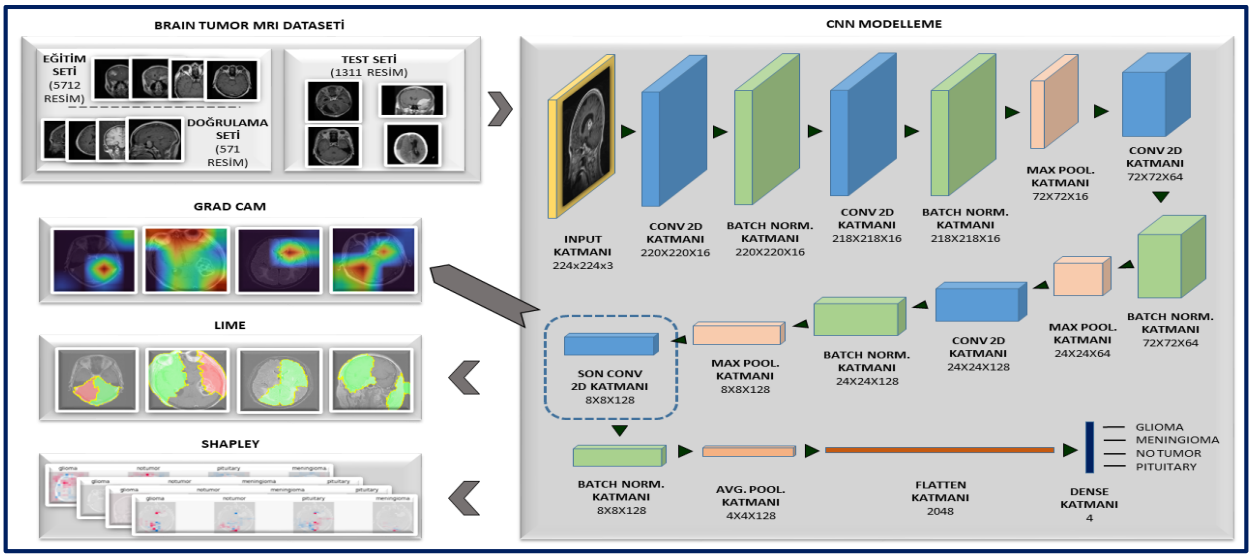
Çalışmanın genel akışı; veri setinin hazırlanması, ön işleme adımlarının uygulanması, derin öğrenme modeli ile sınıflandırmanın gerçekleştirilmesi ve açıklanabilir yapay zeka teknikleri ile model kararlarının görselleştirilmesi aşamalarından oluşmaktadır. İlk olarak, çalışmada kullanılacak MR görüntüleri içeren veri seti elde edilerek etiketlenmiş dört farklı beyin durumu (No Tumor, Glioma, Meningioma, Pituitary) için sınıflandırma yapılabilecek şekilde organize edilmiştir. Çalışmada kullanılan veri setindeki dört sınıftan (Glioma, Meningioma, Notumor ve Pituitary) üçer adet ve toplamda 12 adet resim seçilerek elde edilen sonuçların karşılaştırılabilmesi için görselleştirilmiştir. Daha sonra, veri seti üzerinde çeşitli ön işleme adımları uygulanarak görüntülerin boyutlandırılması, normalizasyonu ve veri artırma teknikleri kullanılmıştır. Ardından, CNN tabanlı bir derin öğrenme modeli eğitilmiş ve test edilmiştir. Modelin sınıflandırma kararlarının açıklanabilirliğini artırmak amacıyla açıklanabilir yapay zeka yöntemlerinden olan Grad-CAM, LIME ve Shapley değerleri kullanılmıştır. Bu yöntemler, modelin hangi bölgelerden yola çıkarak karar verdiğini görselleştirerek, tahmin sürecinin anlaşılmasını sağlamıştır. Grad-CAM yöntemi, derin öğrenme modelinin görüntü üzerinde odaklandığı bölgeleri ısı haritası şeklinde gösterirken, LIME yöntemi giriş görüntüsünü değiştirerek modelin verdiği kararın nedenlerini analiz etmiştir. Shapley değerleri ise modelin her bir özniteliğe olan bağımlılığını ölçerek sınıflandırma sürecindeki önemli özellikleri belirlemiştir. Modellemede kullanılan resimler giriş boyutunda 224x224x3 olarak modelde kullanılmıştır. Modelde sırasıyla Input Layer'ı takip eden birden fazla Convolution Layer, Batch Normalization, Max Pooling, Average Pooling ve Dense layerlardan oluşan katmanlarla model mimarisi kurulmuştur. Modelde aktivasyon fonksiyonu olarak "ReLu", Dense Layer için "Softmax" seçilmiş, Optimizer parametresi olarak "Adam" kullanılmış ve learning rate 0.0005 olarak belirlenmiştir. Loss function olarak "Categorical Cross Entropy", metrikler ise "Categorical Accuracy" olarak atanmıştır. Model eğitiminde 15 epoch ile eğitim gerçekleştirilmiştir.

Çalışmada kullanılan veri seti açık kaynak olarak tutulan Kaggle platformundan alınmıştır (Kaggle, 2025). Glioma (Eğitim Seti:1321, Test Seti:300), Meningioma (Eğitim Seti:1339, Test Seti:306), Notumor (Eğitim Seti:1594, Test Seti:405) ve Pituitary (Eğitim Seti:1457, Test Seti:300) sınıflarına görseller bulunan veri seti çalışma kapsamında eğitim ve test olmak üzere iki parçaya ayrılmıştır. Eğitim setinde toplam 5712, Test setinde 1311 resim bulunmaktadır. Eğitim setinin %10'u (571 resim) model eğitiminde kullanılmak üzere doğrulama seti olarak ayrılmış ve kalan 5141 adet resim eğitim setinde kullanılmıştır. İmgeler modele girmeden önce ön işlem (görüntü boyutlandırma, normalizasyon, veri artırma, veri kümesinin ayrılması) uygulanmıştır. Görselleştirmelerde tutarlılık sağlanması göz önünde bulundurularak her sınıftan (NoTumor, Glioma, Meningioma, Pituitary) üçer tane olacak şekilde test setinden resimler seçilmiştir. Bu resimler her görselleştirme modelinde karşılaştırılabilmesi için sabit olarak tutulmuştur. Çalışmada ele alınan sınıflamada No Tumor; sağlıklı beyin yapısını yani tümör bulunmayan beynin MR görüntüsünü, Glioma; beyin dokusunda gelişen tümörleri yani kötü huylu ve hızlı yayılabilen tümörleri ifade etmektedir. Meningioma; beyin zarlarında gelişen iyi huylu ancak büyüyerek baskı oluşturabilen tümörleri ve Pituitary ise hipofiz bezi tümörlerini ifade etmektedir.

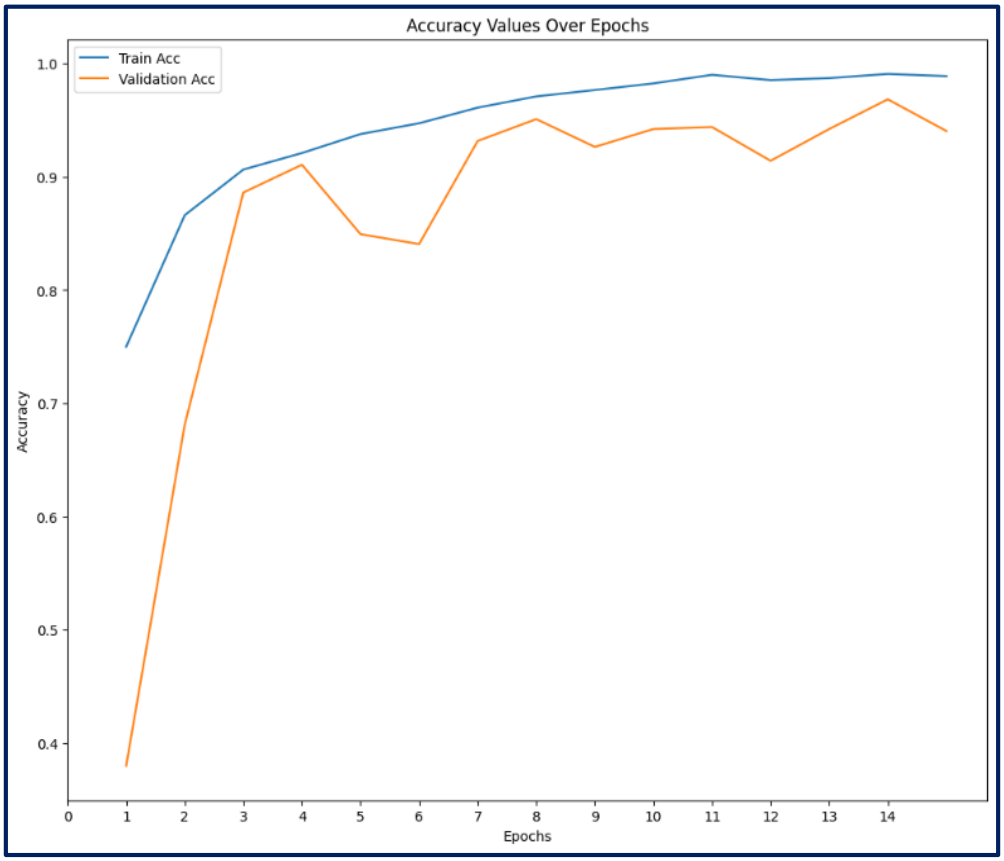
Metot

Bu bölümde çalışmada kullanılan CNN modelin blok diyagramı, epoch doğruluk grafiği, karmaşıklık matrisi ve açıklanabilir yapay zeka araçları olan GradCAM, Shapley ve LIME yöntemleri açıklanarak resimlerin görselleştirme işlemleri yani modelin açıklanma işlemi gerçekleştirilmiştir.
Şekil 1'de eğitimi yapılan CNN modelinin blok diyagramı görülebilmektedir.

Şekil 1'den de görüldüğü gibi diyagramda veri seti CNN modeline girer ve modelin her katmanından sıra ile geçer. Katmanlarda işlem uygulanan resimler dört sınıftan ağırlığı en fazla sınıf olarak tahmin çıktısı alınır. Ayrıca modellemeden sonra açıklanabilir yapay zeka tekniklerinden olan GradCAM, Lime ve Shapley ile görselleştirmeler modellenmiştir. Bu tekniklerden GradCAM doğrudan "Son Convolution Katmanı"ndaki ağırlıklara göre görselleştirmeler sağlarken, Lime ve Shapley tekniklerinde modelin tamamından yararlanılarak görselleştirmeler ortaya konulmuştur. Eğitim 15 epoch ile gerçekleşmiştir. Şekil 2'de eğitimi gerçekleştirilen CNN modeline ait Epoch-Doğruluk grafiği görülebilmektedir.



Şekil 1. Eğitimi Yapılan CNN Modelinin Blok Diyagramı



Şekil 2. Epoch Doğruluk Grafiği

Şekil 2'den de görüldüğü gibi epoch ilerledikçe genel olarak modelin doğruluk eğrilerinin de artış gösterdiği tespit edilmiştir. İlk epoch eğitim seti doğruluğu %75,00 ile başlamış ve on dördüncü epochta %99,09'a ulaşmıştır. Doğrulama setinde ise ilk epoch doğruluğu %38,00 ile başlamış ve on dördüncü epochta %96,85'e ulaşmıştır. Tablo 1'de eğitilen modelin ortalama sonuçlarının final metrikleri verilmiştir.

Tablo 1. Model Metrikleri

Final Model Metrikleri:	
Doğruluk (Accuracy):	0.9443
Kesinlik (Precision):	0.9430
Duyarlılık (Recall):	0.9401
F1 Skoru:	0.9413

Tablo 1'den de görüldüğü gibi eğitilen modelin doğruluğunun %94,43 olduğu, kesinliğinin %94,30 olduğu, duyarlılığının %94,0, olduğu ve F1 skorunun %94,13 olduğu tespit edilmiştir. Şekil 4'de CNN modelinin eğitimi sonucunda elde edilen karmaşıklık matrisi verilmiştir. Karmaşıklık matrisinin sol dikey ekseni gerçek sınıfları, alt yatay eksen ise tahmin edilenleri temsil etmektedir.

Açıklanabilir Yapay Zeka ve Araçları

Açıklanabilir yapay zeka, yapay zeka modellerinin iş işleyişlerini, tahminlerini ve kararlarını insanlar için anlaşılır yapmayı amaçlayan bir yaklaşıma sahiptir (Angelov vd., 2021). Geleneksel yapay zeka modelleri özellikle derin öğrenme gibi karmaşık olanlar genel olarak kara kutu olarak nitelendirilmektedir. Bunun sebebi, nasıl çalıştıklarının açıklanmasında güçlük çekilmesidir. Açıklanabilir yapay zeka ise modellerin şeffaf, güvenilir ve yorumlanabilir olması açısından daha avantajlı olmaktadır (Hassija vd., 2024). Görüntü işleme algoritmalarıyla evrişimli sinir ağları (ESA) gibi çeşitli derin öğrenme modellerinde, açıklanabilir teknikleri, modelin bir görüntü üzerindeki kararını nasıl verdiğini görselleştirmek ve yorumlamak amacıyla kullanılmaktadır. Görüntü işleme ve model açıklanabilirliği açısından en sık kullanılan yöntemler olan GradCAM, Shapley ve LIME detaylıca açıklanmıştır.

GradCAM Yöntemi

GradCAM, derin öğrenme modellerinin özellikle de görüntü işleme amacıyla kullanılan CNN'lerin kararlarının açıklanması için kullanılan bir tekniktir. Herhangi bir modelin tahmin yaparken giriş görüntüsündeki hangi bölgelere odaklanıldığının görselleştirilmesi amacıyla kullanılmaktadır (Selvaraju vd., 2020). GradCAM, CNN modelinin son evrişim katmanındaki aktivasyon haritasını ve gradyanlarını kullanmakta ve modelin tahmin yaparken hangi bölgeleri dikkate aldığını gösteren sıcaklık haritası (heatmap) oluşturmaktadır. Bu haritalar modelin karar alma sürecini daha anlaşılır kılmaktadır (Chattopadhay vd., 2018). GradCAM yönteminde görselleştirme işlemlerinde belirli adımlar izlenmektedir. İlk olarak modelin tahmini yapılmaktadır. Bu aşamada giriş olarak bir görüntü verilmekte ve modelin bir sınıf tahmini yapması sağlanmaktadır. İkinci aşamada hedef sınıfın gradyanları hesaplanmaktadır. Yani modelin tahmin edilen sınıfına yönelik kayıp fonksiyonları hesaplanır. Ayrıca kayıp fonksiyonlarına göre son evrişim katmanındaki aktivasyonların gradyanları da hesaplanmaktadır. Özellik haritası ağırlıklarının hesaplanması adımında; gradyanların ortalaması alınarak her bir özellik haritasının ağırlıkları hesaplanmaktadır. Sıcaklık haritasının oluşturulması aşamasında; ağırlıklar ve aktivasyon haritaları birleştirilmekte ve sınıf aktivasyon haritası oluşturulmaktadır. Son olarak haritanın görselleştirilmesi aşamasında da sınıf aktivasyon haritası, giriş görüntüsüyle birleştirilmekte ve sıcaklık haritası oluşturulmaktadır. Bu harita ile modelin hangi bölgelerde yoğunlaştığı gösterilmektedir (Selvaraju vd., 2020). GradCAM, CNN'de çalışan modellerde kullanılmakta ve genel olarak son evrişim katmanına odaklanmaktadır. Ayrıca derinlikli bilgileri analiz etmektedir. Bu yöntemle görüntülerdeki belirli alanların, modelin belirli bir sınıfı tahmin etmesinde ne denli etkili olduğu görselleştirilmektedir. GradCAM yöntemi, CNN modellerine kolay bir şekilde entegre edilebilmekte ve kod kütüphaneleriyle etkin bir şekilde uygulanabilmektedir. GradCAM yönteminin çeşitli avantajları vardır. Bunlar; karar verme sürecinin açıklanması sebebiyle güvenilir bir uygulama alanı sunması, modellerin değiştirilmeden uygulanabilirlik sağlaması ve görüntülerdeki birden fazla sınıflar için farklı sıcaklık haritalarını oluşturmasıdır (Kumar vd., 2023). GradCAM yönteminin önem ağırlığı formülü Denklem 1'de görülebilmektedir.

$$\alpha_k^c = \frac{1}{Z}\sum_i \sum_j \frac{\partial y^c}{\partial A_{ij}^k} \quad (1)$$

Denklem 1'de görülen "α_k^c"; hedef sınıf c'nin k nöronu önem ağırlığını sresimlemektedir. "y^c"; c'nin softmax katmanından önceki skorunu, "A_{ij}^k"; i, j konumundaki özellik haritasındaki aktivasyonunu k nöronu için sresimlemektedir. "Z" ise normalleştirme sabitidir. Ayrıca yöntemde kullanılan bir diğer fonksiyon olan ReLu fonksiyonunun formülü de Denklem 2'de görülebilmektedir (Selvaraju vd., 2020).

$$L_{GradCam}^C = \text{ReLU}\left(\sum_k \alpha_k^C A^k\right) \quad (2)$$

Denklem 2'deki "$L_{GradCam}^C$"; c sınıfındaki ayırt edici yerelleşme haritasını sresimlemektedir (Selvaraju vd., 2020).

Çalışma kapsamında görselleştirme için son Convolution katmanı kullanılmıştır. GradCAM görselleri için ısı haritaları elde edilmiş ve bu ısı haritaları orijinal resim üzerine bindirilerek süper piksel görseller oluşturulmuştur. Böylelikle doğrudan orijinal resim üzerindeki sonuçlar görülebilmiştir. Sonuçlarda her resim için sırasıyla orijinal

resim, temel ısı haritası ve GradCAM süper piksel ısı haritası bir arada bulunmaktadır. Isı haritasındaki mavi renkli alanlar az öneme sahip, kırmızı renkli alanlar ise modelin karar verme süreci için daha çok öneme sahip alanları ifade etmektedir. Bununla birlikte GradCAM çalışma yapısı nedeniyle, sonuçların son convolution katmanı için elde edilmiş olması modelin her adımındaki karar verme sürecini temsil etmemektedir.

Shapley Yöntemi

Shapley yöntemi, makine öğrenmesi ile oyun teorisinde kullanılan bir yaklaşımdır. Bu yöntem, makine öğrenmesi modellerinin açıklanabilirliğinin artırılması amacıyla geliştirilen araçlardan bir tanesidir. Shapley yöntemi, bir modelin tahmin edilmesinde her özelliğin katkısını adil bir biçimde dağıtmayı amaçlamaktadır. Shapley yöntemi, oyun teorisindeki işbirlikçi oyunlar kapsamında geliştirilmiştir (Verdinelli ve Wasserman, 2024). Bu yöntem, makine öğrenmesi modelinde herhangi bir özelliğin tahmine olan katkısının belirlenmesi amacıyla kullanılmaktadır. Shapley yönteminde her bir özellik "oyuncu" olarak ele alınmakta ve bir takımın toplam kazancını, oyuncular arasında eşit bir biçimde dağıtmayı hedeflemektedir. Özetle oyuncular, modelin özellikleri (bireylerin yaşları, eğitim düzeyleri, gelirleri vs.) iken kazanç ise modelin tahmininin toplam sonucudur. Özelliklerin katkıları, ilgili özelliğin tahmine dahil olma durumu ya da dahil olmama durumu arasındaki farkların ortalaması ile hesaplanmaktadır. Bu yöntemin tüm süreçlerinde bütün özelliklerin kombinasyonları dikkate alınmaktadır. Shapley yönteminin formülü Denklem 3'de görülebilmektedir.

$$\emptyset_i(\vartheta) = \sum_{S \subseteq N/\{i\}} \frac{|S|!(|N|-|S|-1)!}{|N|!} [\vartheta(S \cup \{i\}) - \vartheta(S)] \quad (3)$$

Denklem 3'de yer alan "$\emptyset_i(\vartheta)$"; modelin özellik i'sinin Shapley değerini, "N"; modeldeki tüm özelliklerin kümesini, "S"; modeldeki i özelliğini içermeyen alt kümeyi ve "$\vartheta(S)$" ise S'nin tahminini ifade etmektedir (Caelen, 2022). Shapley yöntemi kullanıcılarına çeşitli avantajlar sağlamaktadır. Bunlar; yöntemin farklı model türleriyle çalışabilmesi, katkıların adil bir biçimde hesaplanması için matematiksel garanti sağlaması ve özelliklerin modele etkisinin açık bir şekilde elde edilebilmesidir (Fatima vd., 2008).

Çalışma da Shapley metodu uygulanırken veri setinde sahip olunan dört sınıfın tamamı için sonuçlar elde edilmiştir. En başta orijinal resim, yanında ise dört sınıf için Shapley sonuçlarını içeren resimler bulunmaktadır. Isı haritasındaki mavi renkli alanlar az öneme sahip, kırmızı renkli alanlar ise modelin karar verme süreci için daha çok öneme sahip alanları ifade etmektedir.

LIME Yöntemi

LIME yöntemi, makine öğrenmesi modellerinin tahminlerinin açıklanması amacıyla kullanılan bir tekniktir. Modellerden bağımsız olarak çalışmakta ve bireysel tahminlerin açıklanmasına odaklanmaktadır. Özellikle CNN modellerinin karar alma süreçlerinin anlaşılabilmesinin kolaylaştırılmasında ve açıklanabilirliğinin artırılmasında avantajlar sunmaktadır (Vimbi vd., 2024). LIME, karmaşık modellerin yerel bölgelerde nasıl çalıştığını açıklamak amacıyla basit model oluşturmaktadır. Bu model genel olarak doğrusal regresyon ya da karar ağacı gibi açıklaması kolay modellerdendir. Bu durum sonucunda tahminlerin neden o şekilde yapıldığına dair kullanıcılarına bilgi sağlamaktadır (Juscafresa, 2022). LIME yönteminde tahminlerin açıklanabilmesi için çeşitli adımlar izlenmektedir. İlk olarak hedef tahmininin seçilmesi aşamasında; karmaşık modelden tahmin yapılmaktadır. Ardından girişin bozulması ve veri oluşturma adımı gelmektedir. Bu aşamada orijinal giriş verisi bozulmaktadır yani modelin belirli bir tahmini nasıl yaptığına dair açıklamaların üretilmesi amacıyla orijinal girdinin sistematik bir şekilde değiştirilme işlemi yapılmaktadır. Bu, modelin belirli tahmine ulaşmak için hangi özelliklere dayandığının analiz edilmesine yardımcı olmaktadır. Bu bozulmuş girişlerden veri kümeleri oluşturulmaktadır. Özetle makine öğrenmesi modelleri çok sayıda özelliğe dayalı kararlar vermektedir. LIME yönteminin, modelin hangi özelliklere daha fazla önem verdiğini anlamak için orijinal girdileri değiştirerek (bozarak) alternatif versiyonlar oluşturmaktadır. Bu bozulan girişler, modelin nasıl tepki verdiğini analiz etmek amacıyla kullanılmaktadır. Üçüncü aşamada karmaşık modelin çıktıları kullanılmaktadır. Yani bozulan veri noktaları karmaşık modele verilmekte ve tahminleri alınmaktadır. Dördüncü aşamada yerel doğrusal model eğitilmektedir. Bu aşamada orijinal verilerin çevrelerinde basit ve açıklanabilir model eğitilmektedir. Bu basit model, karmaşık modelin yerel davranışını yakalamaya çalışmaktadır. Son olarak özelliklerin katkılarının belirlenmesi yapılmaktadır. Bu aşamada basit modelin ağırlıkları ya da karar kuralları, karmaşık modelin tahmininde hangi özelliklerin önemli olduğunu göstermektedir (Garreau ve Mardaoui, 2021). LIME yöntemi, herhangi bir makine öğrenmesi modeliyle çalışabilmektedir. Ayrıca tahmin edilen veri noktaları için modelin yerel davranışları açıklanabilir ve karmaşık modellerden bağımsız olarak yalnızca seçilen tahminlerin çevrelerindeki bölgeleri analiz edebilmektedir. LIME yönteminin de çeşitli avantajları vardır. Bunlar;

hangi özelliklerin tahmin üzerinde etkili olduğunun kolay bir şekilde anlaşılabilir olması, çeşitli makine öğrenmesi modelleriyle entegre biçimde çalışılabilmesi ve yapılan tahminlerin neden yapıldığının ve hangi özelliklerin daha fazla katkıda bulunduğunun açıklanabilir olmasıdır (Bilekyiğit, 2022).

Çalışmada LIME görselleri için önce orijinal resim üzerinde sonuç alınmış daha sonra ısı haritaları elde edilmiş ve bu ısı haritaları orijinal resim üzerine bindirilerek süper piksel görseller oluşturulmuştur. Böylelikle doğrudan orijinal resim üzerindeki sonuçlar ısı haritası değerlerine göre görülebilmiştir. Sonuçlarda her resim için sırasıyla orijinal resim, LIME sonucu, temel ısı haritası ve LIME süper piksel ısı haritası bir arada bulunmaktadır. LIME sonucunu içeren ikinci sıradaki resimlerde (LIME Explanation) sarı kenar çizgileri içinde yapılan segmentasyon modelin karar verme sürecini en çok etkileyen üç alanı ifade etmektedir. Segmentasyon için quickshift algoritması kernel_size=9 parametresiyle kullanılmıştır. Bu üç alan yeşil veya kırmızı renkle ifade edilebilmektedir. Bu üç alandan birbirine bitişik olan aynı renkteki bölgeler birleştirilmiş şekildedir ve sonuçta bu sebeple üçten daha az alan görülebilmektedir. Bu bazı resimlerde tamamen yeşil yani olumlu etkileyen iki alanı birleşmiş şekilde, bazı resimlerde ise yeşil ve kırmızı olarak olumlu ve olumsuz etkileyen alanları ifade etmektedir. Bunların yanındaki LIME Isı Haritası (Heatmap) farklı renklerden oluştuğu için bu üç alan renk aralığı birbirine yakın dahi olsa seçilebilmektedir.

Nancy ve Sathyarajasekaran (2024) çalışmasında beyin tümörü segmentasyonu gibi karmaşık görevlerin açıklanabilir yapay zeka modellerinin yorumlanabilirliğinin ve etkinliğinin incelenmesi amaçlanmıştır. Çalışmada MACE, Gradient Shap, LIME, GradCAM ve Guided GradCAM yöntemleri kullanılmıştır. Çalışma sonucunda beyin tümörü görüntülerinin etkili ve yorumlanabilirlik açısından en iyi performans gösteren modelin GradCAM olduğu ortaya konulmuştur. Amin vd. (2024) çalışmasında beyin tümörü teşhisinde GradCAM, LIME ve Shapley yöntemlerinin kullanılabilirlik performanslarının incelenmesini amaçlamıştır. Çalışma sonucunda her üç yönteminde doğrulama doğruluğunun %98 olduğu ve beyin tümörlerinde kullanılabilir olduğu ortaya konulmuştur. Gaur vd. (2024) çalışmasında MR görüntü veri setlerinin kullanılarak Menenjiyom, Gliom ve Hipofiz tümörleri gibi beyin tümörlerinin ayrık alt türlerinin tahmin edilmesinin derin öğrenme modelleriyle uygulanabilirliğinin incelenmesi amaçlanmıştır. Çalışma da Shapley, LIME ve GradCAM yöntemleri kullanılmıştır. Çalışma sonucunda CNN modelinin %94,64 doğruluğunun olduğu ve yöntemlerin kullanılabilir olduğu ortaya konulmuştur.

BULGULAR

Bu bölümde GradCAM, LIME ve Shapley yöntemlerine yönelik No Tumor, Glioma, Meningioma ve Pituitary sınıfına ait modelin elde ettiği görseller verilmiştir. Çalışmada çok sınıflı karmaşıklık matrisi kullanılmış olup model değerlendirme metriği olarak Doğruluk (Accuracy), Kesinlik (Precision), Duyarlılık (Recall) ve F1 Skoru kullanılmıştır. Denklem 4'de Doğruluk formülü görülebilmektedir.

$$\text{Doğruluk} = \frac{Doğru\ tahminlerin\ sayısı}{Toplam\ tahmin\ sayısı} \quad (4)$$

Denklem 4'den de görüldüğü gibi Doğruluk oranı; doğru tahminlerin sayısının toplam tahmin sayısına bölümüyle bulunmaktadır. Denklem 5'de Hassasiyet formülü görülebilmektedir.

$$\text{Kesinlik} = \frac{Gerçek\ pozitifler}{Gerçek\ pozitifler + Yanlış\ pozitifler} \quad (5)$$

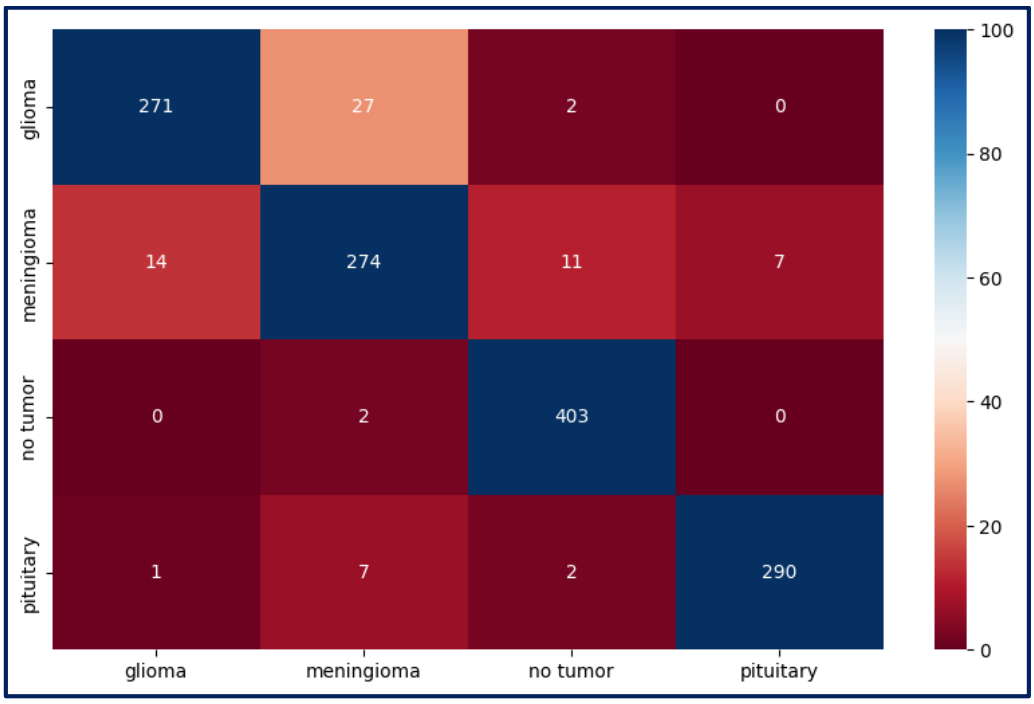
Denklem 5'den de görüldüğü gibi Kesinlik oranı gerçek pozitiflerin gerçek pozitifler ile yanlış pozitiflerin toplamına bölünmesiyle bulunmaktadır. Denklem 6'da Duyarlılık formülü görülebilmektedir.

$$\text{Duyarlılık} = \frac{Gerçek\ pozitifler}{Gerçek\ pozitifler + Yanlış\ negatifler} \quad (6)$$

Denklem 6'dan da görüldüğü gibi Duyarlılık; gerçek pozitiflerin gerçek pozitifler ile yanlış negatiflerin toplamına bölünerek bulunmaktadır. Denklem 7'de F1 skoru formülü görülebilmektedir.

$$\text{F1 skoru} = 2 \times \frac{Hassasiyet x Duyarlılık}{Hassasiyet + Duyarlılık} \quad (7)$$

Denklem 7'den de görüldüğü gibi F1 skoru; hassasiyet ile duyarlılığın çarpımının, hassasiyet ile duyarlılığın toplamına bölünmesi ve iki ile çarpılmasıyla bulunmaktadır. Şekil 3'de CNN modelinin eğitimi sonucunda elde edilen karmaşıklık matrisi verilmiştir. Bu sonuçlar test seti kullanılarak elde edilmiştir. Resimlere ait gerçek sınıfları sol dikey eksen, modelin tahmin ettiği sınıfları ise alt yatay eksen temsil etmektedir.



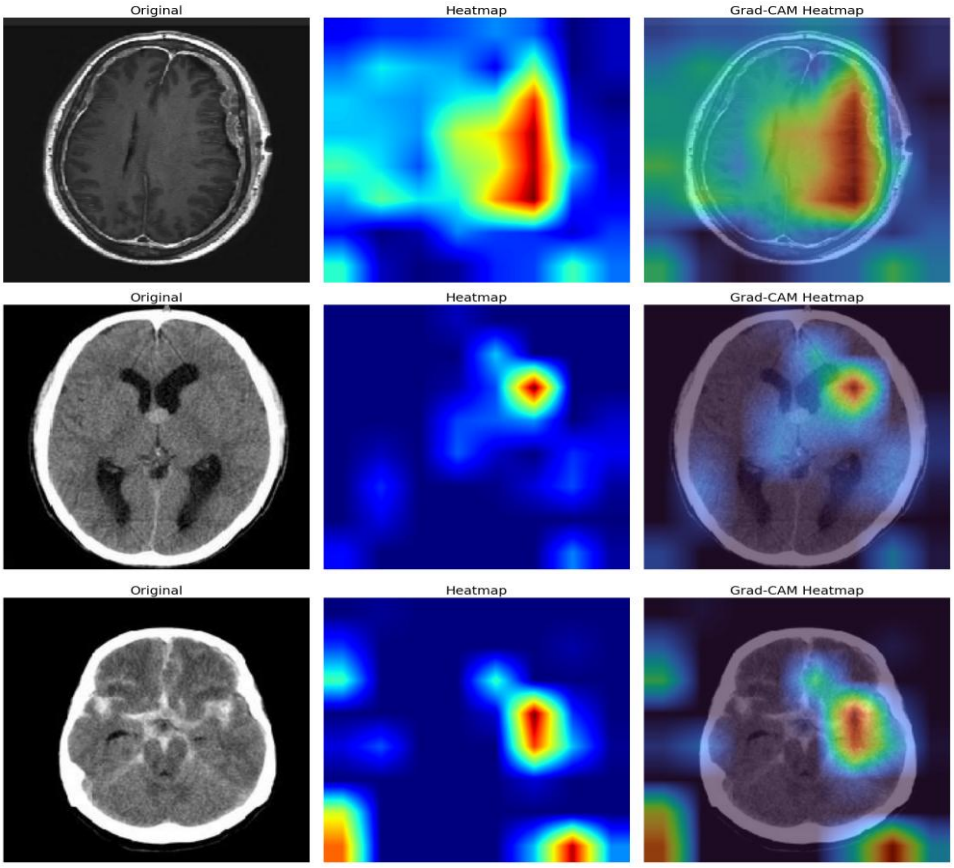
Şekil 3. Karmaşıklık Matrisi

Şekil 3'den de görüldüğü gibi Glioma sınıfına ait resimlerden 271 adet doğru şekilde tespit edilirken, bu sınıftan 27 adet görsel "Meningioma", 2 adet görsel ise "No tumor" sınıfı olarak, Meningioma sınıfına ait resimlerden 274 adet doğru şekilde tespit ederken, bu sınıftan 14 adet görsel "Glioma", 11 adet görsel "No tumor", 7 adet görsel ise "Pituitary" sınıfı olarak, No Tumor sınıfına ait resimlerden 403 adet doğru şekilde tespit edilirken, bu sınıftan 2 görsel "Meningioma" sınıfı olarak, Pituitary sınıfına ait resimlerden 290 adet doğru şekilde tespit edilirken, bu sınıftan 1 görsel "Glioma", 7 görsel "Meningioma", 2 görsel "No tumor" sınıfı olarak tahmin edildiği tespit edilmiştir.

GradCAM Yöntemi ile Görselleştirme

Çalışmada CNN eğitiminden sonra elde edilen sonuçlar bağlamında, modelden elde edilen tahminler öncelikle GradCAM yöntemi kullanılarak görselleştirilmiştir. GradCAM sonuçları Şekil 4'de gösterilmiştir.

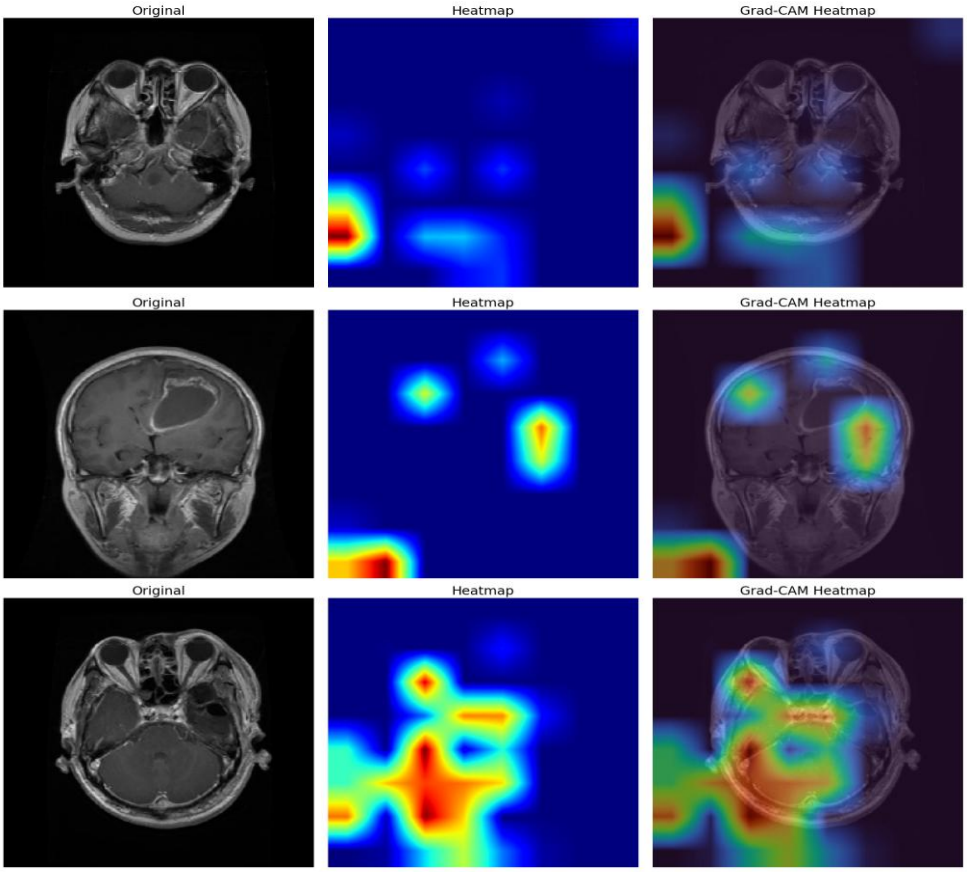
Şekil 4'den de görüldüğü gibi ilk görselde No Tumor sınıfına ait bulgular verilmiştir. Bu modelin geniş bir alanında mavi renkte aktivasyon gösterdiği ve daha kısa fakat yoğun kırmızılı bir alanda yoğun aktivasyon gösterdiği görülmektedir. Geniş mavi alanlar modelin tümör bulunmayan beyin dokusunu geniş bir alanda değerlendirdiğini, dar kırmızı alanlar ise bu bölgede tümör olasılığı ile ilgili yüksek önem taşıyan aktivasyonları ifade etmektedir. Bununla birlikte bu sonuç modelin No Tumor sınıfı için büyük oranda doğru değerlendirme yaptığını göstermektedir. İkinci No Tumor sınıfına ait görselde, yine mavi rengin geniş bir alanda etkin olduğu ve daha küçük bir beyin bölgesinde ise kırmızı rengin ağırlıkta olduğu görülmektedir. Kırmızı aktivasyonun dar bir bölgede yoğunlaşması, modelin potansiyel anormal bölgeleri doğru bir şekilde tespit etme çabasında olduğunu ancak bu bölgenin küçüklüğü göz önüne alındığında, yanlış pozitif tespitlere de yol açabileceğini düşündürmektedir. Üçüncü No Tumor sınıfına ait görselde geniş bir alana yayılmış birkaç mavi aktivasyon bölgesi ve daha küçük birkaç alanda kırmızı aktivasyon bölgesi gözlemlenmektedir. Bu, modelde aktivasyon sırasında farklı tümör tipleri için görselin farklı alanlarının değişken aktivasyonlar ürettiğini göstermektedir. Bu durum, modelin beyin boyunca geniş bir alanı taradığını, No Tumor sınıfını ayırt ettiğini ve potansiyel anomalilerin farkında olduğunu göstermektedir. Şekil 5'de Glioma tümör sınıfından 3 görsel görülebilmektedir.



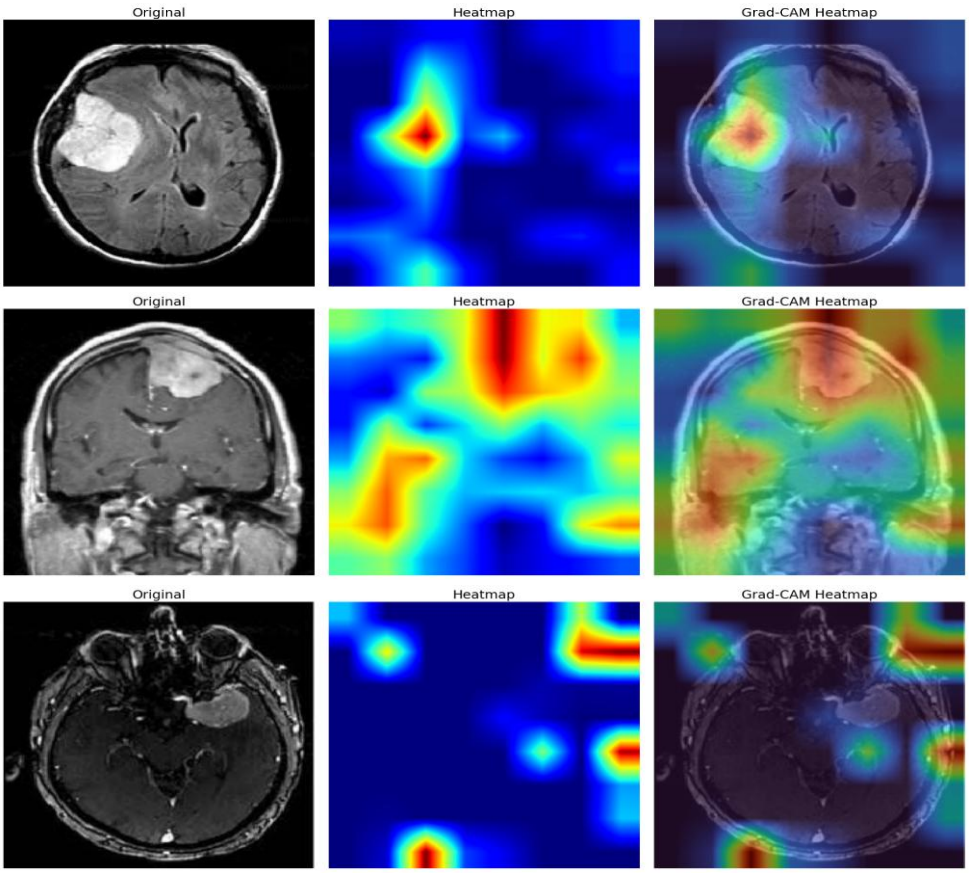
Şekil 4. GradCAM Yöntemi Görselleştirmesi (No Tumor)

Şekil 5'den de görüldüğü gibi ilk Glioma sınıfına ait görselde, modelin aktivasyonları beynin alt ve orta kısımlarında mavi renkte yoğunlaşırken, beynin dışında daha yüksek bir kırmızı aktivasyon gözlemlenmiştir. Bu, modelin beynin dışında tümör olması muhtemel olmayan bir alana odaklanmakta ve dolayısıyla yanlış çalıştığını gösteren yanlış pozitif bir aktivasyon vermektedir. Hatalı aktivasyon, modelin bu resimde yanlış tahminde bulunabileceğini göstermektedir. İkinci Glioma sınıfına ait görselde, modelin beynin üst kısımlarında mavi ve kırmızı renklerde aktive olduğu, ancak beynin dışında bir bölgede de kırmızı aktivasyonun yoğun olduğu bir alan bulunduğu görülmektedir. Bu modelin tümörün olmaması gereken alanlara odaklandığını gösteriyor ve bu görüntü için yanlış sınıflandırmaya olan eğilimini açıklıyor. Hatalı aktivasyon, modelin bu resimde yanlış tahminde bulunabileceğini göstermektedir. Üçüncü Glioma sınıfına ait görselde, modelin beynin sol kısmında ve bunun dışındaki bazı alanlarda büyük miktarlarda kırmızı renkte aktivasyon gösterdiği görülmektedir. Modelin tümörün de bulunabileceği geniş bir beyin alanını yeterince değerlendirdiği gözlemlenebilir; ancak çevredeki alanlara doğru düşük seviyeli aktivasyonlar olduğu dikkat çekmektedir. Bu, modelin geniş alanları glioma sınıfı için değerlendirirken bazı dış bölgelerde gereksiz aktivasyonlar gösterdiğini ifade eder. Şekil 6'da 3 farklı Meningioma sınıfına ait sonuç çıktısı görülebilmektedir.

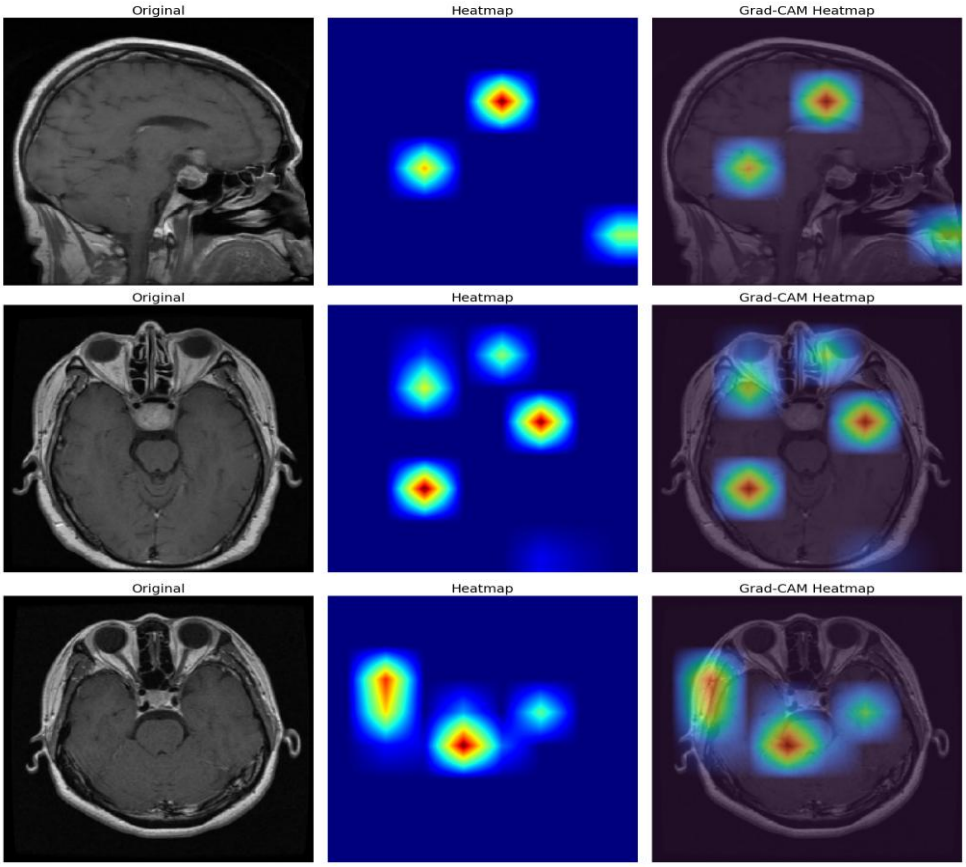
Şekil 6'dan da görüldüğü gibi ilk Meningioma sınıfına ait görselde, beynin zar bölgesine yakın bir alanda modelin aktivasyonlarının yoğunlaştığı görülmektedir Modelin tümör tespiti için doğru bir alan belirleyebildiğine dair bu kırmızı aktivasyonlar, söz konusu görselde etkili bir sınıflandırma tahmini yapabileceğini göstermektedir. İkinci Meningioma sınıfına ait görselde, model beyinin çevresinde, zar bölgesinde kırmızı renkte yoğun aktivasyon göstermiştir. Bu durum modelin tümör tespitinde doğru alanları değerlendirdiğini göstermektedir. Üçüncü Meningioma sınıfına ait görselde, modelin beynin etrafında ve hatta dışında aktive olduğu bazı alanları kırmızı renkte göstermektedir. Burada modelin tümörün bulunabileceği ve tümör olmaması gereken dış alanlara da odaklandığını görülmektedir. Bu hatalı aktivasyonların bulunması, modelin bu resimde yanlış tahminde bulunabileceğini göstermektedir. Şekil 7'de 3 farklı Pituitary tümör sınıfına ait sonuç çıktısı görülebilmektedir.



Şekil 5. GradCAM Yöntemi Görselleştirmesi (Glioma Tümör)



Şekil 6. GradCAM Yöntemi Görselleştirmesi (Meningioma Tümör)



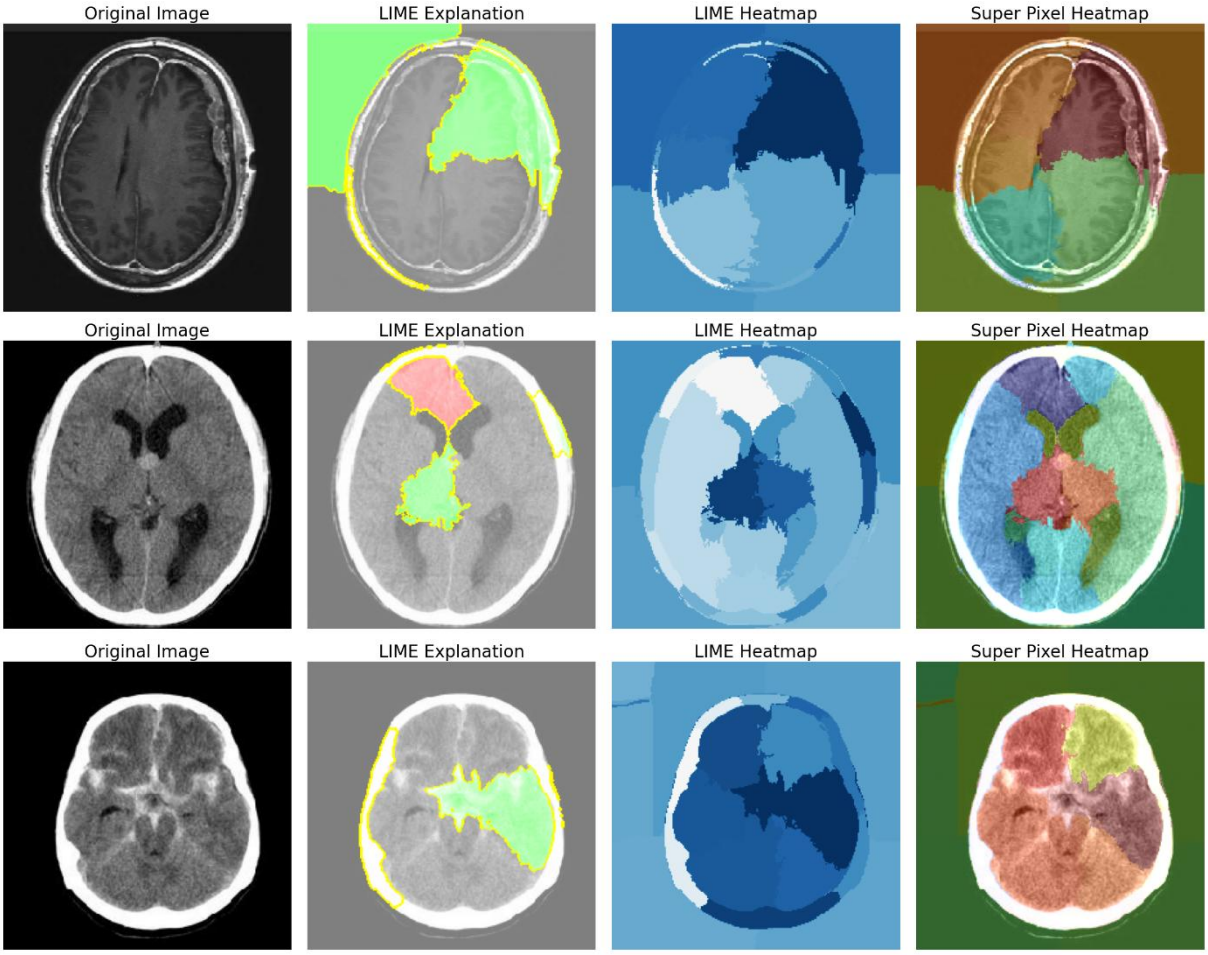
Şekil 7. GradCAM Yöntemi Görselleştirmesi (Pituitary Tümör)

Şekil 7'den de görüldüğü gibi ilk Pituitary sınıfına ait görselde, modelin beynin orta ve alt bölümlerinde kırmızı, ayrıca burun bölgesinde mavi renkte aktivasyon gösterdiği gözlemlenmiştir. Modelin beynin iç bölgesinde doğru aktivasyonlar göstermesi, tümör tespiti için uygun alanlara odaklandığını ortaya koymaktadır. Ayrıca, burun bölgesinde mavi aktivasyon göstermesi, modelin bu görselde gereksiz bölgelere önem vermediğini göstermektedir. İkinci Pituitary sınıfına ait görselinde, modelin sol ve sağ beyin bölgelerinde kırmızı, göz çevresinde ise mavi renkte aktivasyonlar gözlemlenmiştir. Modelin beynin iç bölgelerinde doğru aktivasyonlar göstermesi, tümör tespiti için uygun alanları değerlendirdiğini gösterirken, göz çevresinde düşük öneme sahip mavi aktivasyonların olması, modelin tümör bulunmaması gereken bölgelerde daha az odaklandığını, yani dikkatli bir sınıflandırma yapabileceğine işaret etmektedir. Üçüncü Pituitary sınıfına görselde, modelin beynin orta ve sol bölümlerinde kırmızı, sağ tarafında ise mavi renkte aktivasyon gösterdiği tespit edilmiştir. Bu aktivasyonlar, modelin tümör bulunabilecek beyin bölgelerinde doğru alanlara odaklandığını ve bu görselde tutarlı bir sınıflandırma gerçekleştirebileceğini ortaya koymaktadır.

LIME Yöntemi ile Görselleştirme

Şekil 8'de Lime yöntemi No Tumor sınıfına ait 3 farklı bulgu görülebilmektedir.

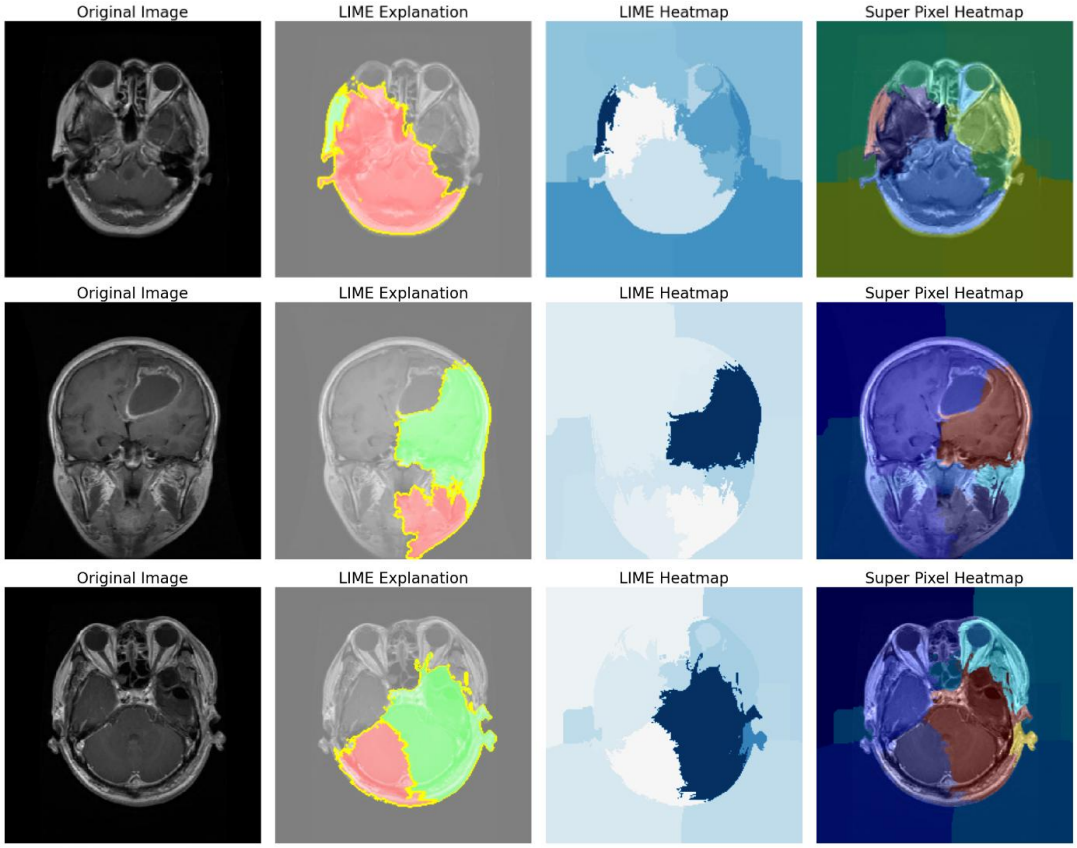
Şekil 8'den de görüldüğü gibi ilk No Tumor sınıfına ait görselde, modelin aktivasyonlarının beyinin sağ bölümünde, sol alt kenarda ve beynin dışında sol bölümde yeşil renkte yoğunlaştığı gözlemlenmiştir. Modelin geniş bir alanda aktivasyon göstermesi, tümör bulunmayan bölgelerde de değerlendirme yaptığını ortaya koymaktadır. Bu durum, modelin gereksiz bölgelere odaklanarak yanlış pozitif tahmin yapabileceğini göstermektedir. İkinci No Tumor sınıfına ait görselde, modelin beyinin orta bölümünde ve sağ kenarda yeşil, beynin üst bölümünde ise kırmızı renkte aktivasyon gösterdiği tespit edilmiştir. Bu aktivasyonların, modelin tümör bulunabilecek alanlarda odaklandığını göstermesi, sınıflandırmanın doğru tahmin edilebileceğini göstermektedir. Üçüncü No Tumor sınıfına ait görselde, modelin beyinin sağ bölümünde, sağ ve sol kenarlarda yeşil renkte aktivasyonlar gösterdiği görülmüştür. Bu aktivasyonların, modelin potansiyel tümör alanlarına odaklandığını göstermektedir. Bu durum farklı tümör tipleri için modelin görselde farklı alanları değerlendirdiğini göstermektedir. Şekil 9'da Glioma sınıfa ait LIME görselleştirmeleri görülebilmektedir.



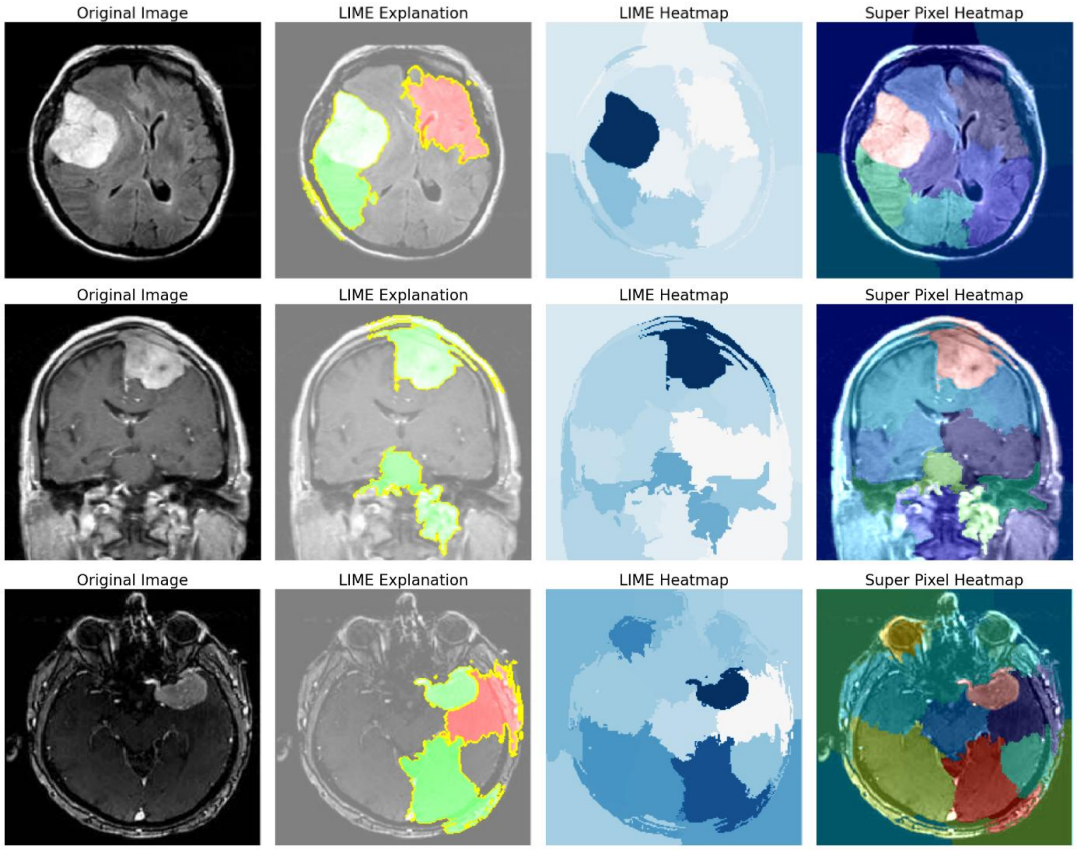
Şekil 8. LIME Yöntemi Görselleştirmesi (No Tumor)

Şekil 9'dan da görüldüğü gibi ilk Glioma sınıfına ait bir görselde, modelin beynin sol kenar bölümünde yeşil, beynin büyük bölümünde ise kırmızı renkte aktivasyonlar gösterdiği tespit edilmiştir. Bu durum, modelin tümör bulunabilecek alanlarda düşük öncelikli aktivasyonlar oluşturduğunu ve bu görselde hatalı bir şekilde odaklandığını göstermektedir. Kırmızı aktivasyonun geniş bir alana yayılması, modelin bazı bölgelerde gereksiz yüksek önem verdiğini ve bu nedenle doğruluk oranının olumsuz etkilenebileceğini ortaya koymaktadır. İkinci Glioma sınıfına ait görselde, modelin beyinin sağ bölümünde ve sağ alt kısmında yeşil, ayrıca sağ alt bölümde kırmızı renkte aktivasyon gösterdiği gözlemlenmiştir. Model, tümör bulunabilecek alanlara odaklanırken, alt bölgedeki düşük önem seviyesine sahip aktivasyonlar ile tümör bulunma ihtimali az olan bölgelerde de odaklanma göstermektedir. Bu durum, modelin genel olarak doğru bir sınıflandırma yapabileceğini göstermektedir. Üçüncü Glioma sınıfına ait görselde, modelin beyinin sağ bölümünde ve sağ kenarda yeşil, sol alt bölümünde ise kırmızı renkte aktivasyonlar gösterdiği gözlemlenmiştir. Modelin, tümör bulunabilecek alanlara odaklanma eğiliminde olduğu anlaşılmaktadır. Bu durum modelin bu görselde tümör tespiti için belli bir alana odaklandığını göstermektedir. Şekil 10'da Meningioma sınıfına yönelik yapılan LIME görselleştirme sonuçları verilmiştir.

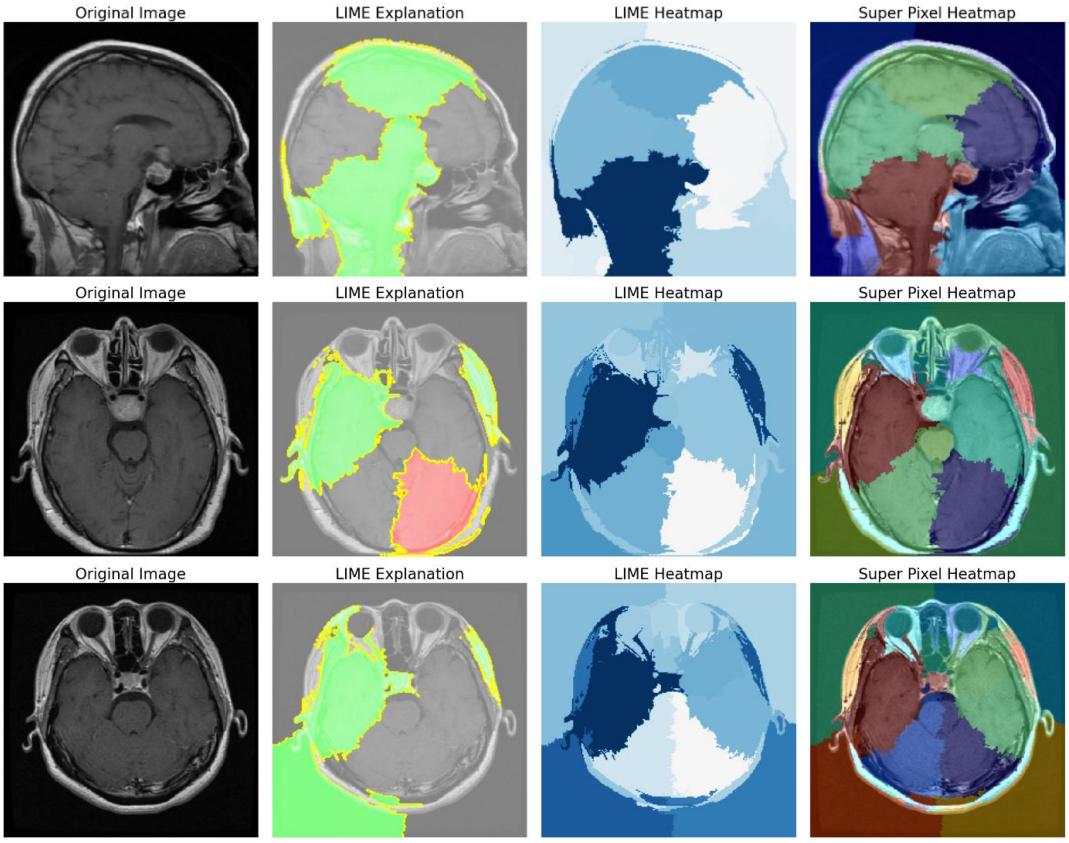
Şekil 10'dan da görüldüğü gibi ilk Meningioma sınıfına ait görselde, modelin beyinin sol alt ve sol üst bölümlerinde yeşil, sağ üst bölümünde ise kırmızı renkte aktivasyon gösterdiği tespit edilmiştir. Modelin, tümör bulunabilecek sol bölgelere yoğunlaşması doğru bir odaklanmayı gösterirken, sağ üst bölümdeki düşük öncelikli kırmızı aktivasyonlar, modelin bu bölgede de dikkat verdiğini ancak daha az öneme sahip olduğunu ortaya koymaktadır. Bu durum modelin bu görselde tümör tespiti için doğru alana odaklandığını göstermektedir. İkinci Meningioma sınıfına ait görselde, modelin beyinin üst sağ ve orta alt bölümlerinde yeşil renkte aktivasyonlar gösterdiği gözlemlenmiştir. Bu durum, modelin tümör bulunabilecek doğru alanlara odaklandığını ve bu görselde tutarlı bir sınıflandırma gerçekleştirdiğini göstermektedir. Üçüncü Meningioma sınıfına ait görselde, modelin beyinin sağ orta ve sağ alt bölümlerinde yeşil, sağ bölümünde ise kırmızı renkte aktivasyon gösterdiği tespit edilmiştir. Modelin sağ bölgedeki düşük öncelikli kırmızı aktivasyonlara rağmen, tümör bulunma olasılığı yüksek alanlara odaklanmış olması, sınıflandırma tahmininin doğru olabileceğini göstermektedir. Şekil 11'de Pituitary sınıfına yönelik yapılan LIME görselleştirme sonuçları verilmiştir.



Şekil 9. LIME Yöntemi Görselleştirmesi (Glioma Tümör)



Şekil 30. LIME Yöntemi Görselleştirmesi (Meningioma Tümör)



Şekil 41. LIME Yöntemi Görselleştirmesi (Pituitary Tümör)

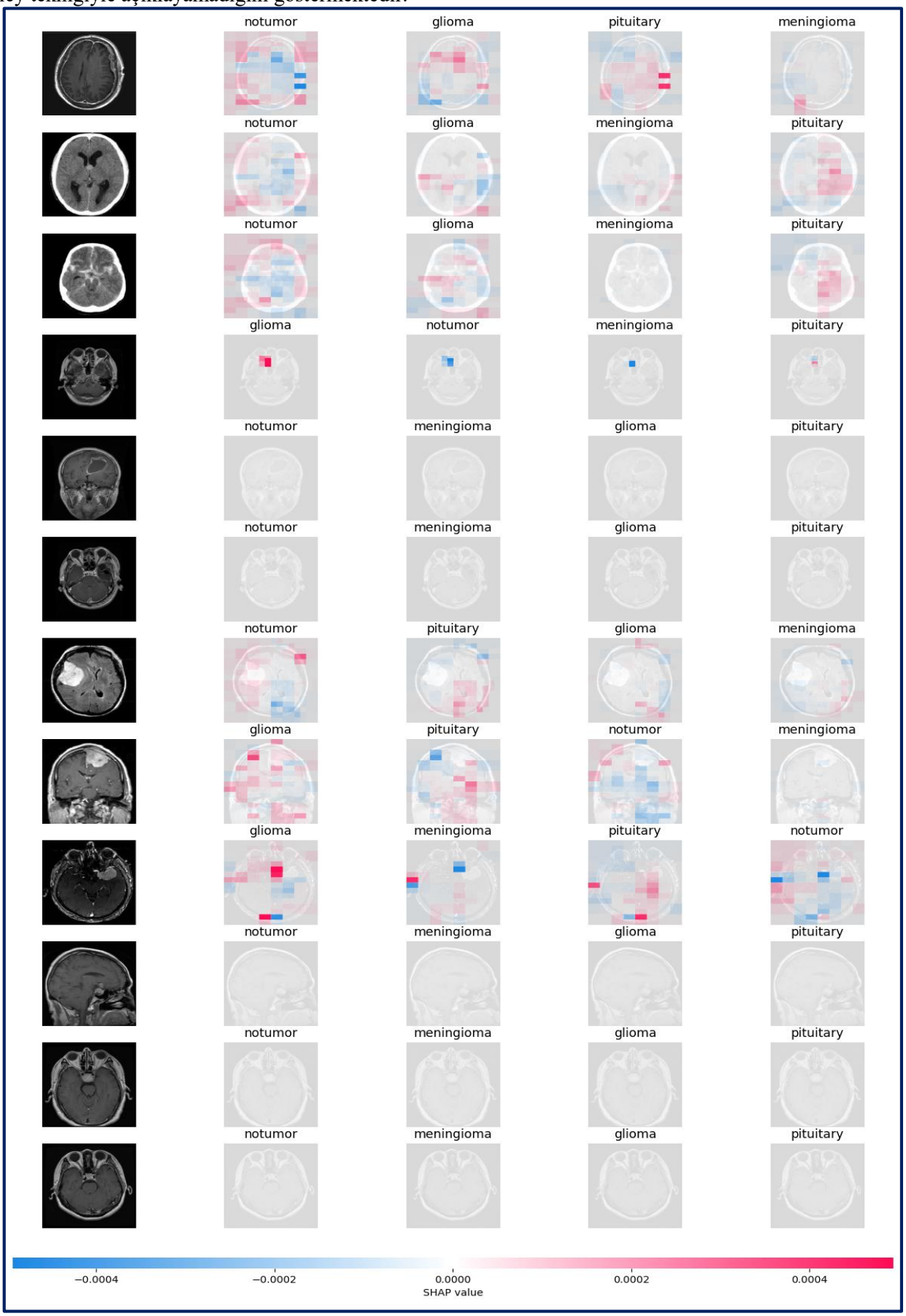
Şekil 11'den de görüldüğü gibi ilk Pituitary sınıfına ait görselde, modelin beynin üst, orta ve sol alt bölümlerinde yeşil renkte aktivasyon gösterdiği tespit edilmiştir. Modelin, tümör bulunma olasılığı yüksek geniş alanlarda aktivasyonlar göstermesi, bu görselde doğru alanları değerlendirdiğini ortaya koymaktadır. İkinci Pituitary sınıfına ait görselde, modelin beynin sol ve sağ kenar bölümlerinde yeşil, sağ alt bölümünde ise kırmızı renkte aktivasyonlar gözlemlenmiştir. Bu aktivasyonların dağılımı, modelin tümör bulunabilecek alanlara odaklandığını ve sağ alt bölgedeki düşük öncelikli aktivasyonların, bu alanlarda daha az önem verildiğini göstermektedir. Bu, modelin doğru bir sınıflandırma için belirli alanlara odaklandığına işaret eder. Üçüncü Pituitary sınıfına ait görselde, modelin beynin sol ve sağ kenarları ile beyin dışındaki sol alt bölgede yeşil renkte aktivasyon gösterdiği tespit edilmiştir. Bu durumda, modelin hem beynin içindeki doğru bölgelerde hem de tümör bulunmaması gereken dış alanlarda aktivasyon göstermiştir. Bu durum %100 doğruluk elde edilmeyen modelin bu görsel için hatalı aktivasyona sahip olabileceğini göstermektedir.

Shapley Yöntemi ile Görselleştirme

Şekil 12'de Shapley yöntemine ait her bir resim için orijinal ve her dört sınıf tahmininde aktivasyon görülen sonuçlar görülebilmektedir.

Şekil 12'den de görüldüğü gibi No Tumor Sınıfına ait görselde modelin beyin genelinde geniş bir aktivasyon alanı oluşturduğu gözlemlenmiştir. Beynin farklı bölgelerinde görülen bu aktivasyonlar, modelin tümör tespiti için beynin geniş alanlarını değerlendirdiğini ve çoğunlukla doğru alanlara odaklandığını göstermektedir. Ancak, bazı durumlarda aktivasyonların beyin dışına kayması, modelin sınıflandırma kararlarını etkileyebilecek potansiyel hatalara yol açabileceğini göstermektedir. Bu durum, modelin No Tumor sınıfı için genellikle güvenilir bir sınıflandırma yaparken, nadiren de olsa yanlış pozitiflere yol açabileceğini göstermektedir. Glioma Sınıfına ait görsellerde yalnızca bir görselde belirgin bir aktivasyon gözlemlenmiştir. Bu görselde model, tümör bulunabilecek bir bölgeye odaklanarak doğru bir alanda değerlendirme yapmıştır. Ancak, diğer iki görselde herhangi bir aktivasyonun bulunmaması, modelin bu sınıf için her zaman tutarlı bir performans sergileyemediğini göstermektedir. Meningioma Sınıfına ait görsellerin bazılarında, modelin beynin kenar kısımlarında ve genelinde aktivasyonlar gösterdiğini ortaya koymuştur. Modelin doğru alanlara odaklanarak etkili bir sınıflandırma yaptığı anlaşılmakla birlikte, bazen beyin dışına da kayması, yanlış pozitif sonuçlara neden olabilmektedir. Pituitary Sınıfına ait

görsellerin bazılarında ise herhangi bir belirgin aktivasyon gözlemlenmemiştir. Bu durum bu sınıftaki resimleri Shapley tekniğiyle açıklayamadığını göstermektedir.



Şekil 12. Shapley Yöntemine Ait Bulgular

Yapılan çalışma ile literatürdeki çalışmaların (Nancy ve Sathyarajasekaran, 2024; Amin vd., 2024; Gaur vd., 2024) doğruluklarının paralel sonuçlar verdiği ancak kullanılacak model önerilerinin farklılık gösterdiği bildirilebilmektedir. Bu farklılığın literatürdeki çalışmalardan farklı bir sonuç vermesinin en temel sebepleri; yapılan çalışmada karmaşık modelin kullanılmasından ve model mimarisinin özellik haritasının anlamlandırılmasının zor olmasından kaynaklı olabileceği düşünülmektedir.

SONUÇ

Çalışma sonucunda her üç teknik de modeli açıklamaya çalışırken model metrikleri ve sınıflandırma tahminleri ne olursa olsun, seçilen resimler üzerinde tam performans gösteremediği tespit edilmiştir. GradCAM yöntemi, modelin son katmanlarındaki aktivasyonları görselleştirerek, tümör bulunma olasılığı yüksek alanların belirlenmesinde önemli bir araç olarak öne çıkmıştır. Bu teknik, modelin doğru alanlara odaklandığını açık bir şekilde göstermiş ancak zaman zaman modelin tümör bulunmayan bölgelere de odaklanabildiğini ortaya koymuştur. LIME yöntemi ise, modelin her bir sınıflandırma kararını daha detaylı bir şekilde açıklayarak, modelin hangi alanlara daha fazla önem verdiğinin anlaşılmasına olanak tanımıştır. LIME analizleri, modelin genellikle doğru alanlara odaklandığını ancak bazı durumlarda yine gereksiz aktivasyonlar üretebildiğini göstermiştir. Shapley yöntemi, her bir sınıf tahmini için modelin aktivasyon dağılımını inceleyerek, modelin genel performansının değerlendirilmesine yardımcı olmuştur. Shapley analizi, modelin bazı sınıflarda (No Tumor ve Meningioma) genellikle doğru alanlara odaklandığını ancak Glioma ve Pituitary sınıflarında performansın tutarlı olmadığını göstermiştir. Sonuç olarak, her üç teknik de modelin karar mekanizmalarını farklı açılardan inceleyerek, modelin güçlü ve zayıf yönlerini belirlemekte önemli bir rol oynamıştır. GradCAM, modelin genel odaklanma alanlarını belirlemekte etkili olmuş; LIME, modelin kararlarının detaylı bir açıklamasını sunmuş; Shapley ise modelin genel performansını ve eksikliklerini ortaya koymuştur.

Açıklanabilir yapay zeka tekniklerinin Meningioma sınıfındaki başarısının diğer sınıflara göre daha yüksek olduğu görülmüştür. GradCAM yöntemiyle yapılan görselleştirmelerde, modelin Meningioma tümörlerini genel olarak doğru alanlara odaklanarak tespit ettiği ve aktivasyonların beynin zar bölgesinde yoğunlaştığı görülebilmektedir. Ancak bazı görsellerde yanlış altivasyonlar olsa da genel olarak doğru tahmin yapabildiği belirtilebilmektedir. LIME yönteminde yapılan analizlerde, modelin Meningioma tümörlerinin bulunduğu alanlara güçlü bir şekilde odaklandığı ve genel olarak doğru sınıflandırmalar yaptığı görülebilmektedir. Shapley yöntemiyle yapılan incelemelerde ise modelin Meningioma sınıfında beynin doğru bölgelerine odaklandığı ancak bazen beyin dışına da aktivasyon kaydırarak yanlış pozitif sonuçlara sebep olduğu söylenebilmektedir. Bu durum Meningioma tümörlerinin MR görüntülerinde daha belirgin olmasıyla ilişkili olabilmektedir. Bunun sebebi Meningioma'nın beynin zar kısmında yer alan bir tümör türü olması ve bu nedenle kontrast farkı diğer bazı tümörlere kıyasla daha belirgin olabilmektedir. Ayrıca tümör sınırları daha net görünebilir ve bu da modelin görselleştirme yöntemleriyle daha doğru aktivasyonlar oluşturmasını sağlayabilir. Glioma ve Pituitary sınıflarında model bazen düşük aktivasyon göstermiş ya da tutarsız tahminler yapmışlar. Bu da Meningioma'nın diğerlerine kıyasla daha kolay tespit edilebildiğini düşündürmektedir. Meningioma tümörlerinin net görünebilir olması, açıklanabilir yapay zeka yöntemlerinin bu sınıfta daha başarılı olmasını sağlamış olabilir. Ancak, modelin gerçekten başarılı olup olmadığını değerlendirmek için sayısal metriklerin (Accuarcy (Doğruluk), Precision (Kesinlik), Recall (Duyarlılık), F1 Skoru) de incelenmesi gerekmektedir.

Açıklanabilir yapay zeka tekniklerinin incelenmesi için seçilen kesitlerde diğer tümörlü sınıflardan tümörün net bir şekilde görülebildiği kesitler seçilseydi, açıklanabilir yapay zeka tekniklerinin başarımının muhtemelen daha yüksek olacağı söylenebilmektedir. Açıklanabilir yapay zeka teknikleri, modelin odaklandığı bölgeleri insan yorumuna sunmaktadır. Ancak, eğer bir görüntüde tümör belirgin değilse ya da çok düşük kontrasta sahipse, modelin doğru tahmin yapması ve bunu anlamlandırması zorlaşabilmektedir. Glioma ve Pituitary sınıflarında tümörün konumu net olmadığı için modelin aktivasyonları da düşük ya da yanlış olabilmektedir. Bu da Shapley, GradCAM ve LIME gibi yöntemlerin tümörlü bölgeyi doğru bir şekilde vurgulayamamasına sebep olabilmektedir. Eğer tümör net olarak seçilebilen kesitler kullanılsaydı, modelin tahmin yaparken daha doğru bölgelere odaklanması sağlanırdı. Bu durumda açıklanabilir yapay zeka tekniklerinin gösterdiği aktivasyon haritaları daha anlamlı olabilir ve modelin başarımı artırılabilirdi. Bu tekniklerin birlikte kullanılması, modelin daha güvenilir ve etkili bir şekilde çalışmasını sağlamak için daha fazla veri sağlanmasına veya gerekli iyileştirmelerin yapılmasına olanak tanımaktadır.

Yapılan çalışma açıklanabilir yapay zeka yöntemlerini (GradCAM, LIME ve Shapley değerleri) kullanarak MR görüntülerinden beyin tümörü tespiti yapmaktadır. Bu yöntemlerin birlikte kullanılması, modelin kararlarını şeffaflaştırarak tıbbi alanda güvenilir yapay zeka modellerinin geliştirilmesine katkı sağlayabilmektedir. Literatürde genel olarak tek bir açıklanabilirlik yöntemi kullanılırken, bu çalışmada birden fazla açıklanabilir yapay zeka

yönteminin kullanılmış ve modellerin karar verme süreçleri daha kapsamlı bir şekilde incelenmiştir. Çalışma, beyin tümörü teşhisi konusunda doktorlara daha iyi karar destek sistemleri sunabilecek bir yapay zeka modeli geliştirmeye yönelik katkı sunmuştur. Açıklanabilirlik teknikleri, modelin hangi özelliklere dayalı olarak karar verdiğini göstererek, tıp uzmanlarının modelin doğruluğunu değerlendirmesine yardımcı olabilmektedir. Bu da klinik uygulamalarda yapay zeka kullanımının benimsenmesini hızlandırabilmektedir. Ayrıca gelecekte yapılacak çalışmalara; daha geniş ve dengeli veri setleriyle çalışmaları, farklı tümör tipleriyle alt türlerinin tespit edilmesine yönelik özelleştirilmiş modeller geliştirmeleri, MR görüntüleme tekniklerinin yanı sıra farklı tıbbi görüntüleme tekniklerini kullanarak çok modaliteli modeller geliştirmeleri önerilmektedir. Modelin eksiklikleri ve gelecekte yapılacak çalışmalara öneriler ise şu şekilde sıralanabilmektedir; veri setinin, beyin tümörlerinin tüm türlerini ve varyasyonlarını tam olarak kapsamadığı için gelecekte yapılacak çalışmaların daha büyük ve çeşitli veri setleri kullanarak modelin genelleme kapasitesini ve performansını artırmaları, doktorlarla iş birliği yapılarak gerçek dünyada klinik ortamlarda modelin gerçek hasta verileriyle test edilmesi, farklı açıklanabilirlik yöntemlerinin etkinliğinin daha kapsamlı analiz edilmesi ve modelin daha fazla hiperparametre optimizasyonuyla geliştirilmesi ve transfer öğrenme gibi çeşitli tekniklerin kullanılarak performansının artırılması önerilmektedir.

KAYNAKLAR

Aamir, M., Rahman, Z., Dayo, Z. A., Abro, W. A., Uddin, M. I., Khan, I., & Hu, Z. (2022). A deep learning approach for brain tumor classification using MRI images. *Computers and Electrical Engineering*, 101, 108-145. https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2022.108105

Abdusalomov, A. B., Mukhiddinov, M., & Whangbo, T. K. (2023). Brain tumor detection based on deep learning approaches and magnetic resonance imaging. *Cancers*, 15(16), 1-29. https://doi.org/10.3390/cancers15164172

Amin, K. H., Saleh, Z. S., & Deo, C. (2024). An explainable aı framework for artificial ıntelligence of medical things, https://arxiv.org/pdf/2403.04130 03.01.2025'de erişildi.

Angelov, P. P., Soares, E. A., Jiang, R., Arnold, N. I., & Atkinson, P. M. (2021). Explainable artificial intelligence: an analytical review. *Wiley*, 11(5), 1-13. https://doi.org/10.1002/widm.1424

Aslan, E. (2024). LSTM-ESA Hibrit modeli ile MR görüntülerinden beyin tümörünün sınıflandırılması. *Adıyaman Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 11(22), 63-81.

Baran, F. D. (2024). Belirli nöropsikolojik rahatsızlıkların yapay zeka temelli sınıflandırılması. Yüksek Lisans Tezi. Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı, Denizli 134s.

Bilekyiğit, S. (2022). Kalp yetmezliği riskinin makine öğrenmesi yöntemleri ile analiz edilmesi. Yüksek Lisans Tezi. Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Mühendislik Bilimleri Anabilim Dalı, Karaman 152s.

Caelen, O. (2022). What is the Shapley value?.. https://medium.com/the-modern-scientist/what-is-the-shapley-value-8ca624274d5a 03.01.2025'de erişildi.

Chattopadhay, A., Sarkar, A., Howlader, P., & Balasubramanian, V. N. (2018). Grad-cam++: Generalized gradient-based visual explanations for deep convolutional networks. *WACV*, 839-847. https://doi.org/10.1109/WACV.2018.00097

Ellah, M. K., Awad, A. I., Khalaf, A. A., & Hamed, H. F. (2019). A review on brain tumor diagnosis from MRI images: Practical implications, key achievements, and lessons learned. *Magnetic Resonance Imaging*, 61, 300-318. https://doi.org/10.1016/j.mri.2019.05.028

Fatima, S. S., Wooldridge, M., & Jennings, N. R. (2008). A linear approximation method for the Shapley value. *Artificial Intelligence*, 172(14), 1673-1699. https://doi.org/10.1016/j.artint.2008.05.003

Garreau, D. ve Mardaoui, D. (2021). What does LIME really see in images? https://proceedings.mlr.press/v139/garreau21a/garreau21a.pdf 03.01.2025'de erişildi.

Gaur, L., Bhandari, M., Razdan, T., Mallik, S., & Zhao, Z. (2022). Examining the prediction of discrete subtypes of brain tumors with deep learning models 2022. file:///C:/Users/admin/AppData/Local/Microsoft/Windows/INetCache/IE/3DRHLJ80/fgene-13-822666[1].pdf 03.01.2025'de erişildi.

Gülle, K., Özdemir, D., & Temurtaş, H. (2024). Derin öğrenme yöntemleri kullanılarak böbrek hastalıklarının tespiti ve çoklu sınıflandırma. *Eskişehir Türk Dünyası Uygulama ve Araştırma Merkezi Bilişim Dergisi*, 5(1), 19-28.

Hassija, V., Chamola, V., Mahapatra, A., Singal, A., Goel, D., Huang, K., & Hussain, A. (2024). Interpreting black-box models: A review on explainable artificial intelligence. *Cognitive Computation*, 16(1), 45-74.

Juscafresa, A. (2022). An introduction to explainable artificial intelligence with LIME and SHAP.. https://diposit.ub.edu/dspace/bitstream/2445/192075/1/tfg_nieto_juscafresa_aleix.pdf 03.01.2025'de erişildi.

Kaggle. Datasets. (2025). https://www.kaggle.com/datasets 06.03.2025 'de erişildi.

Karakaya, A. (2024). Meme kanseri tahmininde makine öğrenmesi algoritmaları ve AutoML. Yüksek Lisans tezi. Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı, Denizli 98s.

Khan, H. A., Jue, W., Mushtaq, M., & Mushtaq, M. U. (2020). Brain tumor classification in mrı image using convolutional neural network. *Math. Biosci. Eng*., 17, 6203-6216.

Kriegeskorte, N. (2015). Deep Neural Networks: A New Framework For Modeling Biological Vision And Brain İnformation Processing. *Annual Review of Vision Science*, 1(1), 417-446. https://doi.org/10.1146/annurev-vision-082114-035447

Kumar, S., Abdelhamid, A. A., & Tarek, Z. (2023). Visualizing the unseen: Exploring GRAD-CAM for interpreting convolutional image classifiers. *Full Length Article*, 4(1), 34-42. https://doi.org/10.54216/JAIM.040104

Manne, R. & Kantheti, S. C. (2021). Application of artificial intelligence in healthcare: chances and challenges. *Current Journal of Applied Science and Technology*, 40(6), 78-89.

Marmolejo, J. A. & Kose, U. (2024). Numerical Grad-Cam based explainable convolutional neural network for brain tumor diagnosis. *Mobile Networks and Applications*, 29(1), 109-118.

Nancy, A. M. & Sathyarajasekaran, K. (2024). Multi-modal explainability evaluation for brain tumor segmentation: Metrics MSFI. *International Journal of Intelligent Systems and Applications in Engineering*, 12, 341–347.

Orman, A. (2021). Brain Tumor Detection Via Explainable Convolutional Neural Networks. *El-Cezeri Journal of Science and Engineering*, 8(3), 1323-1337. http://doi.org/10.31202/ecjse.924446

Pannu, A. (2015). Artificial Intelligence And Its Application In Different Areas. *Artificial Intelligence*, 4(10), 79-84.

Pillai, V. (2024). Enhancing Transparency And Understanding In AI Decision-Making Processes. *Iconic Research and Engineering Journals*, 8(1), 168-172.

Rahman, A. (2019). Statistics-Based Data Preprocessing Methods And Machine Learning Algorithms For Big Data Analysis. *International Journal of Artificial Intelligence*, 17(2), 44-65.

Reddy, S. (2018). Use of artificial intelligence in healthcare delivery. London: IntechOpen.

Selvaraju, R. R., Cogswell, M., Das, A., Vedantam, R., Parikh, D., & Batra, D. (2020). Grad-CAM: visual explanations from deep networks via gradient-based localization. *International Journal of Computer Vision*, 128, 336-359.

Singh, A., Sengupta, S., & Lakshminarayanan, V. (2020). Explainable deep learning models in medical image analysis. *Journal of Imaging*, 6(6), 1-19. https://doi.org/10.3390/jimaging6060052

Turay, T. & Vladimirova, T. (2022). Toward performing image classification and object detection with convolutional neural networks in autonomous driving systems: A survey. *IEEE Access*, 10, 14076-14119.

Verdinelli, I. & Wasserman, L. (2024). Feature importance: A closer look at shapley values and loco. *Statistical Science*, 39(4), 623-636. https://doi.org/10.1214/24-STS937

Vimbi, V., Shaffi, N., & Mahmud, M. (2024). Interpreting artificial intelligence models: A systematic review on the application of LIME and SHAP in Alzheimer's disease detection. *Brain Informatics*, 11(1), 1-29.

KSÜ Mühendislik Bilimleri Dergisi, 28(2),2025
Derleme Makalesi

KSU J Eng Sci, 28(2),2025
Review Article

Kahramanmaras Sutcu Imam University
Journal of Engineering Sciences

Geliş Tarihi : 11.12.2024
Kabul Tarihi : 21.03.2025

Received Date : 11.12.2024
Accepted Date : 21.03.2025

APPLICATIONS OF MICROBIAL CALCIUM CARBONATE PRECIPITATION FOR SOIL IMPROVEMENT: A REVIEW

ZEMİN İYİLEŞTİRME İÇİN MİKROBİYAL KALSİYUM KARBONAT ÇÖKELİMİ UYGULAMALARI: BİR İNCELEME

Nurdan BAYKUŞ[1] (ORCID: 0000-0002-6199-3363)

[1]Kilis 7 Aralık University, Vocational School of Technical Sciences, Department of Construction, Kilis, Turkey

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Nurdan BAYKUŞ, nurdanbaykus@kilis.edu.tr

ABSTRACT

Soil improvement is one of the significant geotechnical engineering issues in many parts of the world. It can be stated that traditional soil improvement techniques are widely used. However, since the perception of the environment and sustainability is very effective today, meeting the ever-increasing needs requires searching for innovative solutions and techniques in this direction. Recently, the improvement of soils with microbial calcium carbonate precipitation, which is known for its successful, sustainable, and environmentally friendly potential, has provided promising opportunities to provide solutions to many geotechnical problems. Microbial calcium carbonate precipitation is a naturally occurring technique used in soil improvement as part of biological and chemical metabolic activity processes, and has made significant progress with scientific research. This study aims to provide an overview of the effect of microbial calcium carbonate precipitation on the engineering properties of soils. In this study, firstly, an overview of the microbial calcium carbonate formation mechanism and the factors influencing this mechanism are presented. Secondly, the interaction between microorganisms and soil is explained. Thirdly, current studies in the literature are reviewed in detail, and their applications, advantages, and the difficulties that may be encountered in their application are presented. Finally, it contains evaluations and recommendations.

Keywords: Soil improvement, biocementation, microbial calcium carbonate precipitation, geotechnical engineering, soil strength

ÖZET

Zemin iyileştirme dünyanın birçok yerinde önemli geoteknik mühendisliği konularından biridir. Geleneksel zemin iyileştirme tekniklerinin yaygın bir kullanım alanının olduğu belirtilebilir. Ancak günümüzde çevre ve sürdürülebilirlik algısının önemle etkin olması, sürekli artan ihtiyaçları karşılama da yeni çözümler ve tekniklerin aramasını zorunlu kılmaktadır. Son zamanlarda başarılı aynı zamanda sürdürülebilir ve çevre dostu potansiyele sahip mikrobiyal kalsiyum karbonat çökeltisi ile zeminler iyileştirilebilmesi birçok geoteknik sorununa çözüm sağlamak için umut vaat eden fırsatların ortaya çıkmasını sağlamıştır. Mikrobiyal kalsiyum karbonat çökeltisi doğal olarak oluşan ve biyolojik ve kimyasal metabolik aktivite süreçlerinin bir parçası olarak zeminlerin iyileştirilmesinde kullanılan ve dahası yoğun bilimsel araştırmalar ile önemli ilerlemeler kaydeden bir tekniktir. Bu çalışma mikrobiyal kalsiyum karbonat çökeltisinin zeminlerin mühendislik özelliklerine etkisine dair genel bir bakış sunmayı amaçlamaktadır. Bu çalışmada, öncelikle mikrobiyal kalsiyum karbonat oluşum mekanizmasına ve bu mekanizmayı etkileyen faktörlere genel bir bakış sunulmaktadır. İkinci olarak mikroorganizmalar ve zemin arasındaki etkileşim açıklanmaktadır. Üçüncü olarak ise literatürdeki güncel çalışmalar ayrıntılı olarak incelenmekte ve uygulamaları, avantajları ve uygulamasında karşılaşılabilecek zorlukları sunulmaktadır. Son olarak değerlendirmeleri ve önerileri içermektedir.

Anahtar Kelimeler: Zemin iyileştirme, biyoçimentolama, mikrobiyal kalsiyum karbonat çökelmesi, geoteknik mühendisliği, zemin mukavemeti

ToCite: BAYKUŞ, N., (2025). APPLICATIONS OF MICROBIAL CALCIUM CARBONATE PRECIPITATION FOR SOIL IMPROVEMENT: A REVIEW. *Kahramanmaras Sutcu Imam University, Journal of Engineering Sciences*, 28(2), 1110-1122.

INTRODUCTION

In recent years, the rapid increase in population, urbanization, and industrialization has led to the rapid depletion of building areas in many countries. The fact that residential areas in cities have become insufficient over time has made it necessary to open new settlement and development areas (Candoğan, 2015). Many of these residential areas that have been opened are limited by the availability of soil that is not suitable for construction (DeJong et al., 2010). These areas, which have been opened for use and have weak soil characteristics, have brought many engineering problems and infrastructure investments to the agenda, especially in the last 20 years (PwC Türkiye, 2024; Candoğan, 2015).

Soil improvement is one of the oldest practices in civil engineering (Selçukhan & Ekinci, 2021). Soils can be improved by mechanical (compaction) methods, removal of water from the environment (drainage), creation of rigid columns in the soil, injection techniques, reinforced stabilization, geosynthetics and geotextiles, stabilization with additives, heat treatments, biotechnical improvement, etc (Selçukhan & Ekinci, 2021; Akyıldız, 2019; Demiröz & Karaduman, 2009). Many of these methods may require significant amounts of energy or cost to manufacture or assemble materials, or the use of artificial materials (DeJong et al., 2010). Moreover, to ensure the soil's stability, synthetic artificial materials such as cement, epoxy, silicates, phenoplasts, acrylamide, and polyurethane are applied to the soil with chemical, spraying, and permeability injection techniques (Yıldırım et al., 2016; DeJong et al., 2010). However, these practices create environmental concerns with the deterioration of the chemical properties or structure of the soil and the release of some toxic or dangerous gases such as carbon dioxide (CO_2) during production or use (Yıldırım et al., 2016; DeJong et al., 2010; Karol, 2003). This issue has led researchers to develop environmentally friendly methods, production, and techniques.

The amount of cement consumption in the world in 2022 is 4,125 million tons (PwC Türkiye, 2024). During the cement production process, high temperatures, dust, toxic and allergenic chemicals, heavy metals, and waste gases in chimney emissions can harm all living and non-living environments day by day (Yıldırım et al., 2016). Cement production, which is an energy-intensive sector, accounts for a significant share of global CO_2 emissions from industrial production (PwC Türkiye, 2024). This shows the magnitude of the impact of the cement industry on carbon emissions, which is one of today's important environmental problems (Cuzman et al., 2015). As a result, research into using alternative raw materials, sustainability, and reducing environmental impacts in cement production is becoming increasingly important (PwC Türkiye, 2024; Naqi & Jang, 2019; DeJong et al., 2010)

As is known, cement is a hydraulic binding material formed by the calcination of a raw material mixture containing natural limestone and clay at high temperatures (Özer & Özgünler, 2023). The structure of limestone consists of 90% calcium carbonate ($CaCO_3$) by weight (Ramakrishna et al., 2018). Therefore, it can be stated that approximately 65-70% of the cement consists of $CaCO_3$ (Yıldırım et al., 2016). New research aims to develop by chemical and biochemical means, cement-based composites, especially those used in repair or improvement processes, by imitating nature, thanks to the spontaneous formation of the components contained in cement (Yıldırım et al., 2016). In recent years, the process of producing $CaCO_3$ as a result of the metabolic activities of microorganisms using minerals in their environment has opened up exciting opportunities as a new and environmentally friendly approach (DeJong et al., 2010).

This study aims to provide an overview of the effect of microbial $CaCO_3$ precipitation on soil properties. First, an overview of the microbial $CaCO_3$ formation mechanism and the factors influencing this mechanism is presented. Secondly, the interaction between microorganisms and soil is explained. Thirdly, current studies in the literature are reviewed in detail. Its applications and advantages are presented. Then its difficulties are given. Finally, evaluations and recommendations are presented.

MICROBIAL $CaCO_3$ PRECIPITATION MECHANISM

The mechanism of microbial $CaCO_3$ precipitation is the biological or chemical transformation of organic components into inorganic components that form them as a result of the reaction carried out by microorganisms (Bozbeyoğlu Kart, 2021; Yıldırım et al., 2016). Microbial $CaCO_3$ precipitation can occur in soil, water, and marine environments by various microorganisms. These precipitates can form through the following reactions depending on the type of microorganism (Bozbeyoğlu Kart, 2021; Anitha et al., 2018; Yıldırım et al., 2016; Dhami et al., 2013).

(i) In photosynthetic metabolism carried out by photosynthetic microorganisms (e.g. Nostoc calcicola, Oscillatoria willei, Anabaena cycadae)

(ii) In sulphate reduction metabolism by sulphate-reducing bacteria (e.g. Desulfovibrio desulfuricans, Desulfobacterium autotrophicum)

(iii) During denitrification reactions by nitrate-reducing bacteria (e.g. Nitromonos spp., Nitrobacter spp.)
(iv) In ammonification reactions of myxobacteria (e.g. Myxococcus xanthus)
(v) Urea hydrolysis reactions carried out by urolytic bacteria (e.g. Bacillus sphaericus, Bacillus megaterium, Sporosarcina pasteurii (S.pasteurii was previously classified as Bacillus pasteurii)).

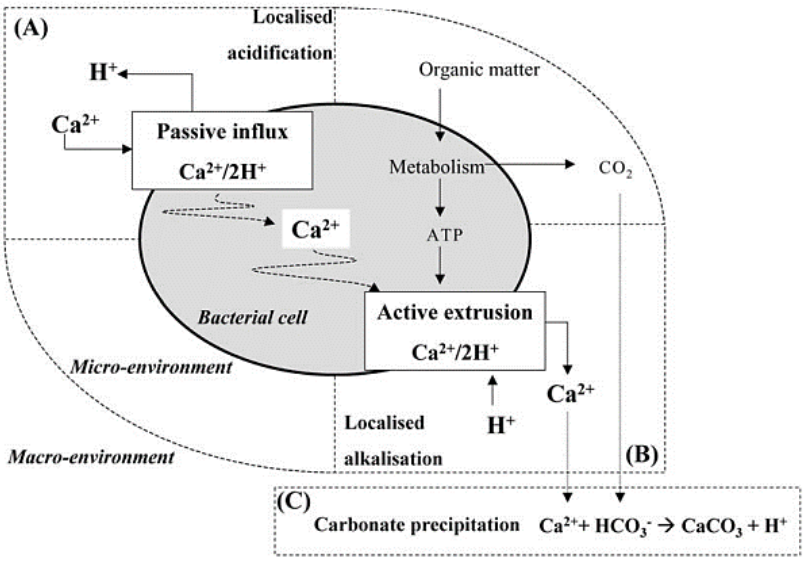


Figure 1. Schematic Presentation of Suggested Bacterial Calcium Metabolism and Subsequent $CaCO_3$ Precipitation under High-pH and High-Ca^{2+} Extracellular Conditions (Hammes & Verstraete, 2002).

Of all the above, microbial $CaCO_3$ precipitation via urea hydrolysis is the simplest and most widely used method for the precipitation of carbonates in various technical applications (Dhami et al., 2013). A schematic diagram of bacterial calcium metabolism and subsequent $CaCO_3$ precipitation is presented in Figure 1. Considering the reactions mentioned, it can be stated that there are 4 important factors in $CaCO_3$ precipitation (De Muynck et al., 2010). These factors can be counted as a) Dissolved inorganic carbon concentration (to increase calcite precipitation by reducing $CaCO_3$ saturation) b) pH c) Concentration of calcium (Ca^{2+}) ions d) Nucleation (to ensure the accumulation of Ca^{2+} ions on the surface of the cell wall) (De Muynck et al., 2010; Hammes & Verstraete, 2002).

FACTORS AFFECTING MICROBIAL $CaCO_3$ PRECIPITATION

Since microbial $CaCO_3$ precipitation is a biological and chemical process, it can be affected by many factors. However, the main factors can be listed as bacterial type, temperature, pH, inoculation rate, type and concentration of calcium source, and urea concentration (Bozbeyoğlu Kart, 2021; De Muynck et al., 2010; Okwadha & Li, 2010).

Bacteria are microorganisms that are active in many different processes and have different $CaCO_3$ production capabilities. The most commonly used of these microorganisms is the precipitation of $CaCO_3$ via urea hydrolysis by ureolytic bacteria (Anbu et al., 2016; Candoğan, 2015; Okwadha & Li, 2010). Ryparova et al. (2021) compared the viability and calcite production abilities of three bacterial species commonly used in the literature under suboptimal conditions. They showed that Bacillus pseudofirmus is the most suitable bacterium due to its ability to precipitate sufficient amounts of dense calcite and its satisfactory metabolic activity. Temperature is an important parameter affecting all chemical reactions (Bozbeyoğlu Kart, 2021). It is stated that temperature is effective on bacterial activity and growth, calcite precipitation amount and content, and nucleation rate in the biological process by microorganisms (Sun et al., 2019; Kim et al., 2018). The pH value of the environment is also important for microbial $CaCO_3$ precipitation. The increase in pH can be considered as an indicator of urea hydrolysis (Okwadha & Li, 2010). In addition, the pH value of the environment can affect the urease enzyme activity of bacteria (Anbu et al., 2016). Therefore, the number of cells in the environment may also be affected. Because the number of cells is proportional to the amount of enzymes in the environment. Ali & Karkush (2021) and Martinez et al. (2013) found that yield was higher in the environment with a higher inoculation rate. For $CaCO_3$ precipitation to occur outside the cell as a result of the activities of the enzymes, Ca^{2+} ions must be present in certain concentrations in the environment. The amount of $CaCO_3$ released at the end of the $CaCO_3$ precipitation process depends on both the type of calcium source (organic or inorganic) and its amount in the environment (Bozbeyoğlu Kart, 2021). In the study conducted by Xu et al. (2014), they stated that an organic calcium source increased the efficiency of $CaCO_3$ precipitation. De Muynck et al. (2010) and Naveed et al. (2020) revealed that bacterial $CaCO_3$ precipitation increases as the urea concentration increases.

BACTERIA AND SOIL INTERACTION

Bacteria and soil interaction generally refers to the formation of a chemical reaction network that is managed and controlled within the soil through biological activity, which ultimately changes the soil's engineering properties by forming by-products (DeJong et al., 2010). This formation occurs through the harmony between the bacteria and the soil into which they are injected. This harmony can cover a wide size range thanks to bacteria typically having sizes of 0.5 to 3 μm (Madigan et al., 1997), enabling them to interact with with both coarse and fine-grained soil particles. As a result, bacteria or microorganisms can interact with many types of soil (DeJong et al., 2010).

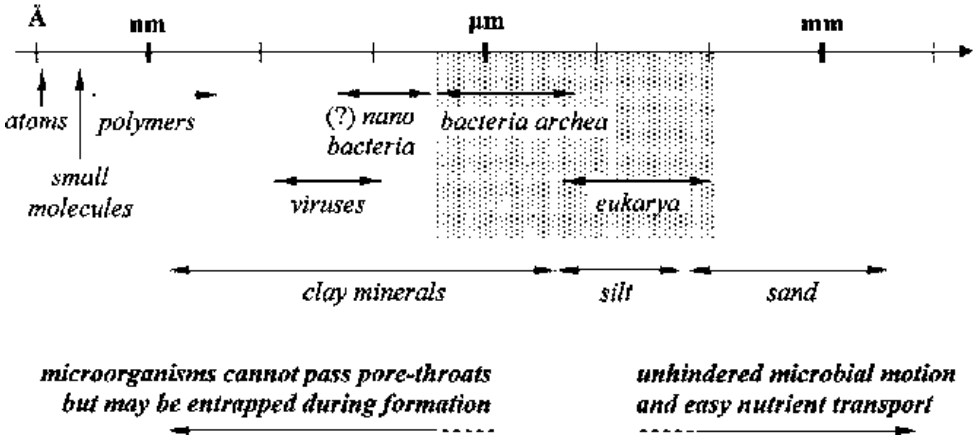


Figure 2. Typical Sizes and Geometric Limitations of Microorganisms and Soil Particles (Mitchell & Santamarina, 2005).

The primary factor affecting microbial transport is pore size, which allows bacteria to move through the pore space (Mitchell & Santamarina, 2005). Figure 2 may present a limit for an in-situ soil improvement that depends on the soil particle size relative to the size of the bacteria. However, the range of soils that are not in situ and are suitable for improvement can be expanded to pure clays (DeJong et al., 2010). As it is known, clay is a natural material consisting of minerals. Due to their fine colloidal particle structure, clays can have very high specific surface areas and affinity for microorganisms. Therefore, it can be stated that there is a positive relationship between the tendency of microorganisms to stay near or together on the water and ion-rich clay surface (Bozbeyoğlu Kart, 2021).

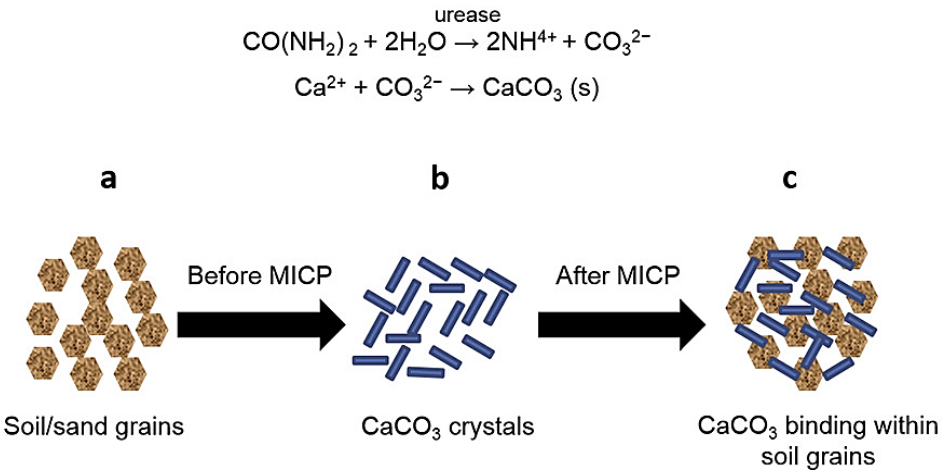


Figure 3. Microbial $CaCO_3$ Precipitation with Urea Hydrolysis Improves Soil Structure (Naveed et al., 2020).

In recent years, the precipitation of $CaCO_3$ through the biological activity process that can occur naturally in the soil and thus the formation of a structure that strengthens the bond between soil particles has become an innovative and sustainable method for geotechnical applications (Naveed et al., 2020). This method called 'Biocementation' depending on microbial activity, generally results in the catalyzing of urease hydrolysis and thus the production of carbonate (CO_3^{2-}) ion (Zhang et al., 2024). CO_3^{2-} ions form $CaCO_3$ precipitates in the soil in the presence of soluble Ca^{+2} (Putra et al., 2017). As seen in Figure 3, these precipitates can improve soil properties through interparticle bonding and filling pore spaces (Meng et al., 2021).

SOIL IMPROVEMENTS TREATED BY MICROBIAL $CaCO_3$ PRECIPITATION

Many researchers worldwide are studying the microbial $CaCO_3$ precipitation process to improve the strength and mechanical properties for soil stabilization (El Mountassir et al., 2018). Since it is currently a very young and new field, it is widely used in research areas for the efficiency, limitations, advantages, disadvantages, effective methods, and techniques of the applications. In general, many researchers have reported the successful potential of microbial $CaCO_3$ precipitation for soil improvement in properties such as soil shear strength parameters, permeability, unconfined compressive strength (UCS), and binding of the soil particles (Ali & Karkush, 2021; Kalantary & Kahani, 2019; Akoğuz et al., 2018; Sharaky et al., 2018; Putra et al., 2017; Chu et al., 2015; Dhami et al., 2013). Moreover, successful results have been shown in reducing the liquefaction ability of sand (Riveros & Sadrekarimi, 2020; Xiao et al., 2019; Chu et al., 2015) and erosion prevention (Salifu et al., 2016) studies. On the contrary, the disadvantages of microbial $CaCO_3$ precipitation are also stated in the literature, such as the formation of toxic by-products such as ammonia (NH_3) and ammonium (NH_4) during urea hydrolysis and the uncontrolled accumulation of these by-products that may endanger human and environmental health (Zhang et al., 2024; Naveed et al., 2020).

Although microbial $CaCO_3$ precipitation generally takes place in a complex physical environment, it can change the properties of the soil in which it is applied, including biotic and abiotic factors, at the macro or micro level (Zhang et al., 2024). When Figure 4 is examined, it is seen that permeability, hardness, compressibility, shear strength, and volumetric behavior are among the primary soil properties that can change 10 times or more (DeJong et al., 2010). However, to achieve this stabilization of the soil with microbial $CaCO_3$ precipitation, it can be said that factors such as the bacterial concentration in the soil particles, the concentration and morphology of the cementing solution, the convection and diffusion of solute molecules, the injection method and time intervals are also important (Zhang et al., 2024; Naveed et al., 2020).

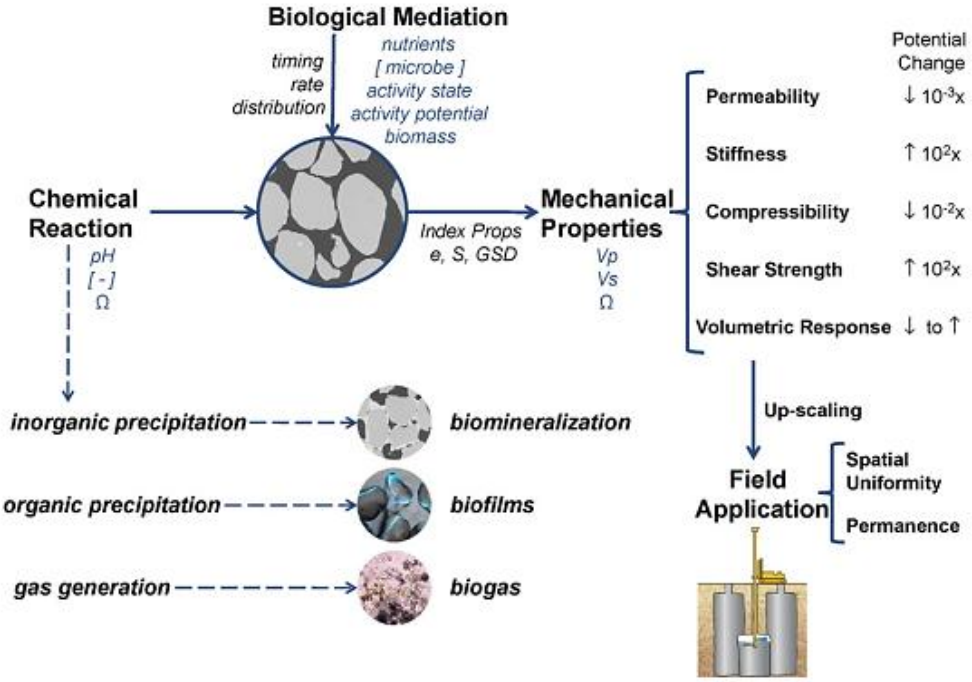


Figure 4. Overview of Biological Mediation Soil Improvement Systems (ω=Resistivity, Vs=Shear Wave Velocity, Vp=Compression Wave Velocity, [−]=Chemical Concentration (DeJong et al., 2010).

The most effective organisms in $CaCO_3$ precipitation are ureolytic bacteria (Bozbeyoğlu Kart, 2021). Among ureolytic bacteria, studies in the literature mostly include bacteria of the genus Bacillus as model microorganisms. Because these bacteria are popular as the bacteria with the fastest rate of catalyzing urea due to their excellent compatibility with the soil environment (Zhang et al., 2024; Yıldırım et al., 2016). Urease catalysis in urea hydrolysis may be a critical step related to the rate of $CaCO_3$ precipitation (Zhang et al., 2024). Table 1 presents the types of bacteria and soils, tests, and brief results that some researchers in the literature have examined in the process of microbial $CaCO_3$ precipitation with urea hydrolysis.

Table 1. Overview of Soil Improvement Research with Microbial $CaCO_3$ Precipitation

Researchers	Soil type	Types of bacteria	Evaluation procedures	Findings achieved
Ali & Karkush (2021)	Soft clay soil (CL)	Bacillus sonorensis	UCS	→UCS value increased with the microbial $CaCO_3$ precipitation technique →UCS value increased significantly with increasing treatment duration.
Kalantary & Kahani (2019)	Poorly graded sand (SP)	S. pasteurii and Arthrobacter crystallopoietes	UCS, SEM and XRD	→Depending on the temperature variable, the UCS strength increases from approximately 70 kPa to 230 kPa has been observed.
Akoğuz et al. (2018)	Coarse sand, coarse sand - gravel mixture and silica sand	Viridibacillus arenosi	UCS, SEM and XRD	→Different environments can affect bioremediation. →Biological soil improvement can be achieved by using V. arenosi bacteria.
Sharaky et al. (2018)	Sandy soil (BS classification)	Sporosarcina pasteurii	Stability in water, UCS, Shear parameters (c, ϕ), Point load test, Bulk density, Slake durability index, $CaCO_3$ content, SEM, and XRD	→The precipitation of $CaCO_3$ has played a significant role in increasing the compressive strength of bio-cemented samples. →The stiffening of the treated soil increased. →Calcite formation inside the sample may affect bulk density.
Shan et al. (2022)	Calcareous sand (with activated carbon addition)	Sporosarcina pasteurii	Cyclic triaxial (CTX) tests, Bacterial retention tests, and SEM for liquefaction resistance	→As the activated carbon content increased, the samples' bacterial retention rate, cyclic strength, and secant modulus improved significantly. →The test using 0.75% activated carbon content best increased the resistance of calcareous sand to liquefaction. →When the activated carbon content exceeded 0.75%, the $CaCO_3$ content decreased. Excessive addition of activated carbon to the sample can reduce the effect of the microbial $CaCO_3$ precipitation process.
Bağrıaçık et al. (2021)	High plasticity clay (CH) and sandy clay (SC)	Bacillus Sp.	UCS, Swelling pressure	→Bacillus Sp. injection has a positive effect on the strength and swelling pressures of soils in freeze-thaw situations. →The increase in the SC soil's strength value was 12.60% more than the CH soil.
Whiffin et al. (2007)	Sand	Sporosarcina Pasteurii	Strength, Stiffness, Porosity, and Permeability	→A linear relationship was observed between the presence of $CaCO_3$ and porosity. →The highest strength or stiffness in the column was 570 kPa, measured at the same location as the maximum $CaCO_3$ amount, approximately 1 m away from the injection point. →Permeability decreased slightly independent of $CaCO_3$ content.
Liu et al. (2020)	Clayey soils (CL)	Sporosarcina pasteurii	Crack image analysis system (CIAS), SEM	→Microbial $CaCO_3$ precipitation is effective in increasing the resistance of soil to drying cracking. →Microbial $CaCO_3$ precipitation reduced soil cracking by a max of 89%. →$CaCO_3$ precipitation improves the mechanical behavior of the soil.

Canakci et al. (2015)	Sandy organic silt (OH)	Sporosarcina pasteurii	SEM, EDX, Consolidation tests, and Shear strength (c, ϕ)	→Bacterial $CaCO_3$ precipitation improves the shear strength and the compressibility behavior of organic soil. →The amount of $CaCO_3$ in organic soil increased by approximately 20%.
Soon et al. (2013)	Tropical residual soil and sand	B. megateri um	Shear strength, Hydraulic conductivity, SEM, $CaCO_3$ precipitation	→The improvement rates in the shear strength of residual soil samples are higher than those of sand samples. →A decrease in hydraulic conductivity can be observed with a relative increase in the amount of precipitated calcite.
Nagy et al. (2022)	Quartz and calcareous sands.	Sporosarcina pasteurii	Uniaxial compressive strength, $CaCO_3$ precipitation, XRD, and SEM	→Higher compressive strengths are obtained in calcareous sand compared to quartz sand. →The $CaCO_3$ precipitation rate remains nearly constant at about 97.8 - 99.3% over the tested duration.
Duo et al. (2018)	Desert aeolian sand	Sporosarcina pasteurii	Density, Permeability, UCS, XRD, Micro-structure analysis, $CaCO_3$ content	→The microbial $CaCO_3$ precipitation was found to increase the UCS and sand density. →The permeability decreased due to the increase in $CaCO_3$ content. →Solidification solutions at different concentrations (0.5, 1.0, 1.5, 2.0, and 2.5 mol/L) can affect sand properties.
Wani & Mir (2021)	Low plasticity silt (ML)	Bacillus pasteurii	UCS and Plate load tests, $CaCO_3$ precipitate, XRD, and SEM	→The increased strength values, higher bearing capacity, and decreased vertical stresses are attributed to the $CaCO_3$ formation seen in the SEM micrographs. →The UCS values of the treated soil increased by 3.5 times and the carrying capacity by 2 times.
Akoğuz et al. (2023)	Poorly graded sand (SP)	Viridibacillus arenosi	UCS, XRD, SEM, and Line profile analysis, Permeability, Calcite content, Direct shear test, pH, and Urease activity	→Different results were obtained with the same cementation solution flow rate (0.266, 0.400, and 0.666 ml/sec) and treatment times (3, 6, and 11 days) of two soil types with different grain sizes. →Decreasing the flow rate in soils with small pore volumes or increasing the flow rate in soils with large pore volumes produces better UCS results. →Differences in strength and permeability results can be attributed to grain size distribution, flow rate, and treatment time.

In studies conducted with microbial $CaCO_3$ precipitation for soil improvement as examined in Table 1, the strength of the treated soil was a direct measure of the improvement effectiveness. Researchers usually relate the UCS values reported in literature studies to the rate of $CaCO_3$ precipitated to indicate the level of biocementation achieved (Fu et al., 2023). Moreover, They have confirmed that $CaCO_3$ is present in the soil environment and that its amount has increased or the grains have bonded together using X-ray diffraction analysis (XRD) and scanning electron microscopy (SEM) tests (Nagy et al., 2022; Wani & Mir, 2021; Duo et al., 2018; Sharaky et al., 2018; Canakci et al., 2015; Soon et al., 2013; Whiffin et al., 2007) Although the ratio of precipitated $CaCO_3$ is important in predicting and modifying the level of strength improvement, there are different correlations reported in the literature (Zhang et al., 2024; Fu et al., 2023; Duo et al., 2018). When the proportion of precipitated $CaCO_3$ is low, the $CaCO_3$ crystal units between soil particles are few, and thus the cementing bonds may be weak and easy to break. In this case, it can be said that the strength gain is uncertain. It can be noted that as the proportion of $CaCO_3$ increases and more $CaCO_3$ crystals accumulate between the particles, the cementation bonds can be stronger and the strength gain can increase (Fu et al., 2023). Therefore, it is also reported that UCS may increase with higher $CaCO_3$ content (Zhang et al., 2024; Wani & Mir, 2021). Additionally, significant improvements in the shear behavior (friction angle and cohesion) of soils treated with microbial $CaCO_3$ precipitation have been shown (Sharaky et al., 2018; et al., 2015; Soon et al., 2013). Behzadipour & Sadrekarimi (2023) stated that compared to untreated samples, the cohesion and friction angle

values of samples treated with microbial $CaCO_3$ precipitation improved by approximately 19 kPa and 5°, respectively.

There are many experimental studies in the literature where different reagent concentrations are examined or depending on other variables. For example, Soon et al. (2013) revealed that when the reagent concentration was increased from 0.25 to 0.5 mol/L, the UCS of the soil increased, but when 1 mol/L was removed, the UCS returned to its unbiocemented state. Lian et al. (2019) and Mahawish et al. (2019) demonstrated that the reagent concentration, reaction time, temperature, and cementing solution affected the microbial $CaCO_3$ precipitation process. Whiffin (2004) demonstrated changes in urease activity occurring with increasing urea and calcium concentrations. Kalantary & Kahani (2019) examined the effect of temperature on the microbial $CaCO_3$ precipitation process and stated that the temperature decrease is more effective in bacteria with high urease activity. Decreasing temperature may lead to a decrease in urease activity, reduce the cementation degree, and cause low $CaCO_3$ content. In addition, depending on the temperature conditions, the formation of $CaCO_3$ polymorphs in various particle morphologies can be observed (Tai & Chen, 1998). Therefore, it can be stated that the effect of temperature variables on microbial $CaCO_3$ precipitation-based soil improvement is complex (Fu et al., 2023). In the study conducted by Sadjadi et al. (2014), they reported that the swelling potential of the soil decreased with the increase in the bacterial ratio and application time during the microbial $CaCO_3$ precipitation process.

Researchers have shown that the application of microbial $CaCO_3$ precipitation plays an important role in the improvements in the porosity and permeability of soils (Song & Elsworth, 2024; Zhang et al., 2024; Duo et al., 2018; Soon et al., 2013; Whiffin et al., 2007; Kantzas et al., 1992). The formation of cementation that fills the voids due to the bonding between particles with microbial $CaCO_3$ precipitation optimizes the soil pore structure and reduces its permeability (Zhang et al., 2024; Wani & Mir, 2021). The conversion of loose, unconsolidated sand into well-cemented sand using B. pasteurii-type bacteria has been demonstrated by Kantzas et al. (1992). They reported that porosity decreased by up to 50% and permeability decreased by up to 90% in areas where cementation took place. Song & Elsworth (2024) observed a decrease in porosity from 19.11%-19.67% to 10.1% and a decrease in permeability of approximately 95% after microbial $CaCO_3$ injection cycles. Whiffin et al. (2007) found that the permeability of sand column treated with microbial $CaCO_3$ precipitation decreased from 2×10^{-5} m/s to 9×10^{-6} m/s compared to the original soil. Zhang et al. (2024) showed that permeability decreased with increasing $CaCO_3$ content.

Research has also proven that microbial $CaCO_3$ precipitation applications have significant application value in reducing soil erosion and liquefaction (Zhang et al., 2024; Shan et al., 2022; Chittoori et al., 2020; Amin et al., 2017). Chittoori et al. (2020) showed that microbial $CaCO_3$ precipitation successfully provides stabilization of expanding soils. They concluded that the calcite content of the soil increased from 3% to 8%, and the free swelling index decreased from 114% to 29%. Amin et al. (2017) showed that the application of microbial $CaCO_3$ precipitation provided a 95% reduction in erodibility and a 5 times increase in shear stress compared to untreated sand.

CHALLENGES OF SOIL IMPROVEMENTS TREATED WITH MICROBIAL $CaCO_3$ PRECIPITATION

The novel, promising, sustainable environmental potential of soil improvements treated with microbial $CaCO_3$ precipitation has been well demonstrated in many studies. However, the multiple effects on the microbial $CaCO_3$ precipitation process can be considered to be full of uncertainty before it reaches relatively practical applications (Fu et al., 2023). It can be stated that the biological, chemical, physical, and environmental effects in question are of a complex nature (Zhang et al., 2024; Fu et al., 2023; Naveed et al., 2020). The process of microbial $CaCO_3$ precipitation potential mineralization mechanism is difficult to precisely control, and the effect of by-products (such as NH_4 ions) formed during the mineralization mechanism may be limiting (Suresh & Uday, 2024; Zhang et al., 2024; Yu & Yang, 2023; Naveed et al., 2020). In the case of large-scale application of soil improvement by microbial $CaCO_3$ precipitation, the technique's applicability or simultaneous progress may require integrated efforts (Fu et al., 2023; Dhami et al., 2013).

Injecting bacteria and cementing solutions into the soil is an important step for the effective application of microbial $CaCO_3$ precipitation mineralization in the field. The application method can affect the mechanical properties of the soil, such as strength and permeability, by affecting the efficiency and spatial distribution of the injection (Zhang et al., 2024). In the literature, soil improvement and application methods with microbial $CaCO_3$ precipitation are included as mix and compact, injection, percolation, spraying, and immersion/soaking (Suresh & Uday, 2024; Zhang et al., 2024). The criteria for adopting these methods are the soil type and the field application where the process is performed (Suresh & Uday, 2024). For example, the percolation methods can be performed in coarse or fine sand due to the ease of flow. However, it may be appropriate to adopt the "mix and compact" method in fine-grained soils

such as silts and clays due to their low permeability (Suresh & Uday, 2024; Oliveira et al., 2017). Efficient application of the method (such as injection pressure and rate) is as important as choosing the right method for the application area (Zhang et al., 2024). Creating cementation with homogeneously distributed $CaCO_3$ precipitation in fields treated with microbial $CaCO_3$ precipitation can allow the soil structure to develop more stably (Kalantary & Kahani, 2019). A heterogeneous $CaCO_3$ precipitation distribution may lead to uneven cementation. The result of this may lead to an uneven strength distribution throughout the soil, creating weak areas in terms of mechanical performance (Fu et al., 2023). Van Paassen et al. (2010) stated that the size of the treated soil volume, the volume of injected grouts, and the distance of grout application points can be criteria to evaluate the distribution of mechanical properties throughout the soil. It has been shown by Al Qabany et al. (2012) and Su et al. (2023) that the injection velocity affects the spatial distribution and homogeneity of the injection materials (solutions) and can also increase the efficiency of the cementing solution. Finally, the interaction between bacteria and soil particles during the microbial $CaCO_3$ precipitation process and sufficient retention time for chemical reactions to occur may also be attributed to the homogeneity (Su et al., 2023; Fu et al., 2023; Al Qabany et al., 2012; Van Paassen et al., 2010).

CONCLUSION AND RECOMMENDATIONS

This study presents in detail the improvement of soils treated with microbial $CaCO_3$ precipitation, which has recently innovative, sustainable, and environmentally friendly potential. Although there are already some gaps in the existing literature, important results have been demonstrated that the engineering properties of soils can be successfully improved with microbial $CaCO_3$ precipitation both at the laboratory and field scale, and the applicability of the technique. The bonding between soil grains by microbial $CaCO_3$ precipitation can improve the internal structure of the soil by providing a more compact structure, and it can improve properties of its permeability, strength, density, shear, liquefaction resistance, etc. However, it is also stated that multiple effects, such as biological, chemical, physical, or environmental related to both the operation of the microbial $CaCO_3$ precipitation process and its success in practice have an uncertain or complex structure. It seems that additional research is needed to more rationally explain the factors that may directly or indirectly affect the microbial $CaCO_3$ precipitation process, to present its performance in long-term field application, and the environmental compatibility effect of suspected by-products. It can be stated that these researches emerging in the multidisciplinary field will provide significant contributions to the development of decision-making methods that aim to determine the best alternative by taking into account many variables and the anticipated potential and application range of microbial $CaCO_3$ precipitation.

REFERENCES

Akoğuz, H., Çelik, S., & Barış, Ö. (2018). Zeminlerin biyolojik iyileştirilmesinde viridibacillus arenosi bakterisinin zemin ortamına olan etkisinin gözlemlenmesi. Bayburt Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 1(1), 53-66, https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/604855.

Akoğuz, H., Çelik, S., & Baris, O. (2023). Effect of biocementation on the engineering properties of sand soils under different flow rates and treatment durations. International Journal of Environmental Science and Technology, 20(10), 11437-11450, https://doi.org/10.1007/s13762-023-05059-5.

Akyıldız, M. H. (2019). Zemin iyileştirme yöntemleri. Mühendislik ve Multidisipliner Yaklaşımlar, Güven Plus Grup A.Ş. Yayınları: Aralık 2019, Yayıncı Sertifika No: 36934, E-ISBN: 978-605-7594-39-6, 147-165.

Al Qabany, A., Soga, K., & Santamarina, C. (2012). Factors affecting efficiency of microbially induced calcite precipitation. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 138(8), 992-1001, https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000666.

Ali, N. A., & Karkush, M. O. (2021). Improvement of unconfined compressive strength of soft clay using microbial calcite precipitates. Journal of Engineering, 27(3), 67-75, https://doi.org/10.31026/j.eng.2021.03.05.

Amin, M., Zomorodian, S. M. A., & O'Kelly, B. C. (2017). Reducing the hydraulic erosion of sand using microbial-induced carbonate precipitation. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Ground Improvement, 170(2), 112-122, https://doi.org/10.1680/jgrim.16.00028.

Anbu, P., Kang, C. H., Shin, Y. J., & So, J. S. (2016). Formations of calcium carbonate minerals by bacteria and its multiple applications. Springerplus, 5, 1-26, https://doi.org/10.1186/s40064-016-1869-2.

Anitha, V., Abinaya, K., Prakash, S., Seshagiri Rao, A., & Vanavil, B. (2018). Bacillus cereus KLUVAA mediated biocement production using hard water and urea. Chemical and Biochemical Engineering Quarterly, 32(2), 257-266, https://doi.org/10.15255/CABEQ.2017.1096.

Bağrıaçık, B., Uslu, F. M., Yiğittekin, E. S., Delik, A., & Dinçer, S. (2021). Bacillus sp. ile iyileştirilmiş zeminlerin donma çözülme etkisindeki davranışı. Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 10(2), 704-711, https://doi.org/10.28948/ngumuh.898554.

Behzadipour, H., & Sadrekarimi, A. (2023). Effect of microbial-induced calcite precipitation on shear strength of gold mine tailings. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 82(8), 331, https://doi.org/10.1007/s10064-023-03357-3.

Bozbeyoğlu Kart, N. N. (2021). Bakteriyel kalsiyum karbonat mineralizasyonunda üreolitik bakterikil etkileşimi: Paenibacillus Favisporus U3. Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Doktora Tezi.

Canakci, H., Sidik, W., & Kilic, I. H. (2015). Effect of bacterial calcium carbonate precipitation on compressibility and shear strength of organic soil. Soils and Foundations, 55(5), 1211-1221, https://doi.org/10.1016/j.sandf.2015.09.020.

Candoğan, T. Ş. (2015). Üreolitik bakteriler ile kalsiyum karbonat mineralizasyonu ve zemin iyileştirmede kullanımı. Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi.

Chittoori, B. C., Pathak, A., Burbank, M., & Islam, M. T. (2020, February). Application of bio-stimulated calcite precipitation to stabilize expansive soils: Field trials. In Geo-Congress 2020, pp. 111-120, Reston, VA: American Society of Civil Engineers, https://doi.org/10.1061/9780784482834.013.

Chu, J., Ivanov, V., He, J., Maeimi, M., & Wu, S. (2015). Use of biogeotechnologies for soil improvement. In Ground Improvement Case Histories, pp.571-589, Butterworth-Heinemann, https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100191-2.00019-8.

Cuzman, O. A., Rescic, S., Richter, K., Wittig, L., & Tiano, P. (2015). Sporosarcina pasteurii use in extreme alkaline conditions for recycling solid industrial wastes. Journal of Biotechnology, 214, 49-56, https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2015.09.011.

De Muynck, W., Verbeken, K., De Belie, N., & Verstraete, W. (2010). Influence of urea and calcium dosage on the effectiveness of bacterially induced carbonate precipitation on limestone. Ecological Engineering, 36(2), 99-111, https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2009.03.025.

DeJong, J. T., Mortensen, B. M., Martinez, B. C., & Nelson, D. C. (2010). Bio-mediated soil improvement. Ecological Engineering, 36(2), 197-210, https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2008.12.029.

Demiröz, A., Karaduman, M. (2009). Zemin iyileştirme metotları. Selçuk-Teknik Dergisi, 8,(3), 176-192, https://hdl.handle.net/20.500.12395/10799.

Dhami, N. K., Reddy, M. S., & Mukherjee, A. (2013). Biomineralization of calcium carbonates and their engineered applications: A review. Frontiers in Microbiology, 4, 314, https://doi.org/10.3389/fmicb.2013.00314.

Duo, L., Kan-liang, T., Hui-li, Z., Yu-yao, W., Kang-yi, N., & Shi-can, Z. (2018). Experimental investigation of solidifying desert aeolian sand using microbially induced calcite precipitation. Construction and Building Materials, 172, 251-262, https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.255.

El Mountassir, G., Minto, J. M., van Paassen, L. A., Salifu, E., & Lunn, R. J. (2018). Applications of microbial processes in geotechnical engineering. Advances in Applied Microbiology, 104, 39-91, https://doi.org/10.1016/bs.aambs.2018.05.001.

Fu, T., Saracho, A. C., & Haigh, S. K. (2023). Microbially induced carbonate precipitation (MICP) for soil strengthening: A comprehensive review. Biogeotechnics, 1(1), 100002, https://doi.org/10.1016/j.bgtech.2023.100002.

Hammes, F., & Verstraete*, W. (2002). Key roles of pH and calcium metabolism in microbial carbonate precipitation. Reviews in Environmental Science and Biotechnology, 1, 3-7, https://doi.org/10.1023/A:1015135629155.

Kalantary, F., & Kahani, M. (2019). Optimization of the biological soil improvement procedure. International Journal of Environmental Science and Technology, 16, 4231-4240, https://doi.org/10.1007/s13762-018-1821-9.

Kantzas, A., Stehmeier, L., Marentette, D. F., Ferris, F. G., Jha, K. N., & Maurits, F. M. (1992, June). A novel method of sand consolidation through bacteriogenic mineral plugging. In PETSOC Annual Technical Meeting, pp. Petsoc-92, https://doi.org/10.2118/92-46.

Karol, R.H. (2003). Chemical grouting and soil stabilization, Revised and Expanded (3rd ed.). CRC Press. https://doi.org/10.1201/9780203911815.

Kim, G., Kim, J., & Youn, H. (2018). Effect of temperature, pH, and reaction duration on microbially induced calcite precipitation. Applied Sciences, 8(8), 1277, https://doi.org/10.3390/app8081277.

Lian, J., Xu, H., He, X., Yan, Y., Fu, D., Yan, S., & Qi, H. (2019). Biogrouting of hydraulic fill fine sands for reclamation projects. Marine Georesources & Geotechnology, 37(2), 212-222, https://doi.org/10.1080/1064119X.2017.1420115.

Liu, B., Zhu, C., Tang, C. S., Xie, Y. H., Yin, L. Y., Cheng, Q., & Shi, B. (2020). Bio-remediation of desiccation cracking in clayey soils through microbially induced calcite precipitation (MICP). Engineering Geology, 264, 105389, https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2019.105389.

Madigan, M. T., Martinko, J. M., & Parker, J. (1997). Brock biology of microorganisms (Vol. 11). Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall.

Mahawish, A., Bouazza, A., & Gates, W. P. (2019). Factors affecting the bio-cementing process of coarse sand. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Ground Improvement, 172(1), 25-36, https://doi.org/10.1680/jgrim.17.00039.

Martinez, B. C., DeJong, J. T., Ginn, T. R., Montoya, B. M., Barkouki, T. H., Hunt, C., ... & Major, D. (2013). Experimental optimization of microbial-induced carbonate precipitation for soil improvement. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 139(4), 587-598, https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000787.

Meng, H., Shu, S., Gao, Y., Yan, B., & He, J. (2021). Multiple-phase enzyme-induced carbonate precipitation (EICP) method for soil improvement. Engineering Geology, 294, 106374, https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2021.106374.

Mitchell, J. K., & Santamarina, J. C. (2005). Biological considerations in geotechnical engineering. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 131(10), 1222-1233, https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2005)131:10(1222).

Nagy, B., Baptist, S., & Kustermann, A. (2022). A novel approach for the consolidation of sand by MICP single treatment. In MATEC Web of Conferences, Vol.364, p.05003, EDP Sciences, https://doi.org/10.1051/matecconf/202236405003.

Naqi, A., & Jang, J. G. (2019). Recent progress in green cement technology utilizing low-carbon emission fuels and raw materials: A review. Sustainability, 11(2), 537, https://doi.org/10.3390/su11020537.

Naveed, M., Duan, J., Uddin, S., Suleman, M., Hui, Y., & Li, H. (2020). Application of microbially induced calcium carbonate precipitation with urea hydrolysis to improve the mechanical properties of soil. Ecological Engineering, 153, 105885, https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2020.105885.

Oliveira, P. J. V., Freitas, L. D., & Carmona, J. P. (2017). Effect of soil type on the enzymatic calcium carbonate precipitation process used for soil improvement. Journal of Materials in Civil Engineering, 29(4), 04016263, https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001804.

Okwadha, G. D., & Li, J. (2010). Optimum conditions for microbial carbonate precipitation. Chemosphere, 81(9), 1143-1148, https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2010.09.066.

Özer, N. & Özgünler Acun, S. (2023). A research on natural cement as a sustainable hydraulic binder for buildings. In Ü.T. Arpacıoğlu & S. Akten, (Eds.). Architectural Sciences, Sustainable Materials and Built Environment, Chapter-3, ISBN:978-625-367-287-4, 104-134, Ankara:Iksad Publications.

Putra, H., Yasuhara, H., & Kinoshita, N. (2017). Optimum condition for the application of enzyme-mediated calcite precipitation technique as soil improvement method. Int. J. Adv. Sci. Eng. Inf. Technol, 7(6), 2145-2151, DOI: 10.18517/ijaseit.7.6.3425.

PwC Türkiye - Dünyada ve Türkiye'de Çimento Sektörü (2024). https://www.pwc.com.tr/tr/sektorler/i%CC%87nsaat-ve-muhendislik/pdf/dunyada-ve-turkiyede-cimento-sektoru.pdf. Access date of:15.10.2024.

Ramakrishna, C., Thenepalli, T., Nam, S. Y., Kim, C., & Ahn, J. W. (2018). Oyster shell waste is alternative sources for calcium carbonate ($CaCO_3$) instead of natural limestone. Journal of Energy Engineering, 27(1), 59-64, https://doi.org/10.5855/ENERGY.2018.27.1.059.

Riveros, G. A., & Sadrekarimi, A. (2020). Liquefaction resistance of Fraser River sand improved by a microbially-induced cementation. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 131, 106034, https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2020.106034.

Ryparova, P., Prošek, Z., Schreiberova, H., Bílý, P., & Tesarek, P. (2021). The role of bacterially induced calcite precipitation in self-healing of cement paste. Journal of Building Engineering, 39, 102299, https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102299.

Sadjadi, M., Nikooee, E., & Habibagahi, G. (2014). Biological treatment of swelling soils using microbial calcite precipitation. Unsaturated Soils: Research and Applications, 917–922, DOI:10.1201/b17034-132.

Salifu, E., MacLachlan, E., Iyer, K. R., Knapp, C. W., & Tarantino, A. (2016). Application of microbially induced calcite precipitation in erosion mitigation and stabilisation of sandy soil foreshore slopes: A preliminary investigation. Engineering Geology, 201, 96-105, https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2015.12.027.

Selçukhan, O., & Ekinci, A. (2021). Zemin iyileştirme yöntemleri ve yaygın kullanımına bağlı değerlendirilmesi. Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi, (23), 481-496, https://doi.org/10.31590/ejosat.881603.

Shan, Y., Zhao, J., Tong, H., Yuan, J., Lei, D., & Li, Y. (2022). Effects of activated carbon on liquefaction resistance of calcareous sand treated with microbially induced calcium carbonate precipitation. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 161, 107419, https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2022.107419.

Sharaky, A. M., Mohamed, N. S., Elmashad, M. E., & Shredah, N. M. (2018). Application of microbial biocementation to improve the physico-mechanical properties of sandy soil. Construction and Building Materials, 190, 861-869, https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.09.159.

Song, C., & Elsworth, D. (2024). Stress sensitivity of permeability in high-permeability sandstone sealed with microbially-induced calcium carbonate precipitation. Biogeotechnics, 2(1), 100063, https://doi.org/10.1016/j.bgtech.2023.100063.

Soon, N. W., Lee, L. M., Khun, T. C., & Ling, H. S. (2013). Improvements in engineering properties of soils through microbial-induced calcite precipitation. KSCE Journal of Civil Engineering, 17, 718-728, https://doi.org/10.1007/s12205-013-0149-8.

Su, F., Wang, Y., Liu, Y., Zhang, J., Liu, X., & Zhang, S. (2023). Factors affecting soil treatment with the microbially induced carbonate precipitation technique and its optimization. Journal of Microbiological Methods, 211, 106771, https://doi.org/10.1016/j.mimet.2023.106771.

Sun, X., Miao, L., Tong, T., & Wang, C. (2019). Study of the effect of temperature on microbially induced carbonate precipitation. Acta Geotechnica, 14, 627-638, https://doi.org/10.1007/s11440-018-0758-y.

Suresh, D., & Uday, K. V. (2024). A comparative study of various parameters influencing biocalcification via ureolysis mediated by enzyme and microbe: A comprehensive review. Geomicrobiology Journal, 41(1), 17-34, https://doi.org/10.1080/01490451.2023.2283419.

Tai, C. Y., & Chen, F. B. (1998). Polymorphism of $CaCO_3$, precipitated in a constant-composition environment. AIChE Journal, 44(8), 1790-1798, https://doi.org/10.1002/aic.690440810.

van Paassen, L. A., Ghose, R., van der Linden, T. J., van der Star, W. R., & van Loosdrecht, M. C. (2010). Quantifying biomediated ground improvement by ureolysis: Large-scale biogrout experiment. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 136(12), 1721-1728, https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.00003.

Wani, K. S., & Mir, B. A. (2021). Effect of microbial stabilization on the unconfined compressive strength and bearing capacity of weak soils. Transportation Infrastructure Geotechnology, 8(1), 59-87, https://doi.org/10.1007/s40515-020-00110-1.

Whiffin, V. S. (2004). Microbial $CaCO_3$ precipitation for the production of biocement. Doctoral Dissertation, Murdoch University.

Whiffin, V. S., Van Paassen, L. A., & Harkes, M. P. (2007). Microbial carbonate precipitation as a soil improvement technique. Geomicrobiology Journal, 24(5), 417-423, https://doi.org/10.1080/01490450701436505.

Xiao, P., Liu, H., Stuedlein, A. W., Evans, T. M., & Xiao, Y. (2019). Effect of relative density and biocementation on cyclic response of calcareous sand. Canadian Geotechnical Journal, 56(12), 1849-1862, https://doi.org/10.1139/cgj-2018-057.

Xu, J., Yao, W., & Jiang, Z. (2014). Non-ureolytic bacterial carbonate precipitation as a surface treatment strategy on cementitious materials. Journal of Materials in Civil Engineering, 26(5), 983-991, https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.00009.

Yıldırım, N., Gürtuğ, Y., & Sesal, C. (2016). Mikrobiyal kalsiyum karbonat oluşum mekanizmaları ve uygulama alanları. Marmara Fen Bilimleri Dergisi, 28(2), 70-80, https://doi.org/10.7240/mufbed.73209.

Yu, X., & Yang, H. (2023). One-phase MICP and two-phase MISP composite cementation. Construction and Building Materials, 409, 133724, https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.133724.

Zhang, X., Wang, H., Wang, Y., Wang, J., Cao, J., & Zhang, G. (2024). Improved methods, properties, applications, and prospects of microbial induced carbonate precipitation (MICP) treated soil: A review. Biogeotechnics, 100123, https://doi.org/10.1016/j.bgtech.2024.100123.

KSÜ Mühendislik Bilimleri Dergisi, 28(2), 2025
Derleme Makalesi

KSU J Eng Sci, 28(2), 2025
Review Article

Kahramanmaras Sutcu Imam University
Journal of Engineering Sciences

Geliş Tarihi :17.02.2025
Kabul Tarihi :15.04.2025

Received Date : 17.02.2025
Accepted Date : 15.04.2025

SÜRDÜRÜLEBİLİR ÜRETİM: KENEVİR BİTKİSİ VE SIFIR ATIK UYGULAMALARI

SUSTAINABLE PRODUCTION: HEMP PLANT AND ZERO WASTE APPLICATIONS

Naciye Olcay HELVACI[1*] (ORCID: 0009-0008-6628-9325)
Yasemin KORKMAZ[1] (ORCID: 0000-0002-0030-6259)

[1] Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Tekstil Mühendisliği Bölümü, Kahramanmaraş, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Naciye Olcay HELVACI, helvaciolcay@gmail.com

ÖZET

Sıfır atık projeleri, sürdürülebilir bir geleceğin temel taşlarını oluştururken, kenevir bitkisi bu yaklaşımın somut bir sembolü olarak öne çıkmaktadır. Köklerinden başlayarak tamamı değerlendirilebilen kenevir, atık oluşturmadan çeşitli parçalara dönüştürülebilmektedir. Tekstil, tıp, gıda, biyokompozit, inşaat malzemeleri ve enerji üretimi gibi birçok alanda kullanılan kenevir, çevre dostu özelliklerle döngüsel ekonominin en güçlü aktörüdür. Bu nedenle son yıllarda kenevirin endüstriyel kullanımına yönelik ilgi yeniden artmış ve kenevir üretimiyle ilgili yasal düzenlemeler yapılmıştır. Bu çalışmada, kenevir bitkisinin özellikleri, tarih boyunca maruz kaldığı yasaklamalar ve günümüze kadar yaşanan değişimler ele alınarak küresel kenevir pazarı incelenmiştir. Ayrıca, kenevirin her bir parçasının çeşitli amaçlar için değerlendirilebilmesi ve çok yönlü, sürdürülebilir bir kaynak olması nedeniyle sıfır atık çalışmaları kapsamında kullanım alanları araştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Kenevir, sıfır atık, çevre dostu, sürdürülebilirlik

ABSTRACT

While zero waste projects form the cornerstones of a sustainable future, the hemp plant stands out as a concrete symbol of this approach. Hemp, which can be evaluated in its entirety starting from its roots, can be transformed into various parts without creating waste. Hemp, which is used in many areas such as textile, medicine, food, biocomposite, construction materials and energy production, is the strongest actor of the circular economy with its environmentally friendly features. For this reason, interest in the industrial use of hemp has increased again in recent years and legal regulations have been made regarding hemp production. In this study, the global hemp market was examined by considering the characteristics of the hemp plant, the prohibitions it has been subjected to throughout history and the changes experienced until today. In addition, since each part of hemp can be evaluated for various purposes and is a versatile and sustainable resource, its areas of use were investigated within the scope of zero waste studies.

Keywords: Hemp, zero waste, environmentally friendly, sustainability

ToCite: HELVACI, N.O., & KORKMAZ, Y., (2025). SÜRDÜRÜLEBİLİR ÜRETİM: KENEVİR BİTKİSİ VE SIFIR ATIK UYGULAMALARI. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 28(2), 1123-1142.

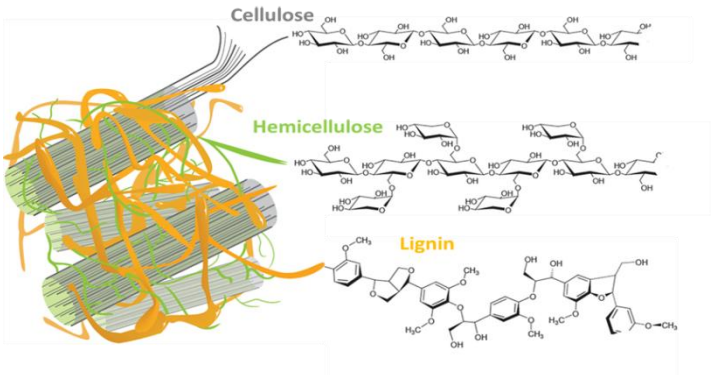
GİRİŞ

Sıfır Atık terimi, atık oluşumunu en az indirmeyi, kaynakların daha verimli kullanılmasını ve atıkların geri dönüştürülerek tekrar ekonomiye kazandırılmasını amaçlayan bir çevre yönetimi formülüdür. Bu yaklaşımla atıkların doğaya zarar vermesini önleyerek sürdürülebilir bir yaşam biçimi oluşturmayı hedeflemektedir. Küresel çapta "Sıfır Atık" kavramı, 1990'lı yıllarda ortaya çıkmaya başlamıştır. Ancak kökleri, 1970'lerde çevre hareketlerinin güç kazanmaya başladığı döneme kadar uzanmaktadır. O yıllarda, artan çevre kirliliği ve kaynakların sınırlı olduğu bilinci, atık yönetimi ve geri dönüşüm konularında çeşitli çalışmaların temelini oluşturmaktadır. Atıkların tamamen ortadan kaldırılmasının ya da kaynağında en aza indirilmesinin mümkün olabileceği fikri, "Sıfır Atık" kavramını doğurmuştur. 1995 yılında kurulan Zero Waste International Alliance (ZWIA**)**, bu hareketin küresel düzeyde organize edilmesine ve standartların belirlenmesine öncülük etmiştir. Bu dönem, "Sıfır Atık" anlayışının temellerinin atıldığı ve yalnızca atık yönetiminin ötesinde, sürdürülebilir üretim ve tüketim modellerinin de ön plana çıktığı bir zaman dilimi olarak kendini göstermiştir. Türkiye'de Sıfır Atık Projesi, 2017 yılında Cumhurbaşkanı Recep Tayyip Erdoğan'ın eşi Emine Erdoğan'ın himayelerinde başlatılmıştır. Çevre, Şehircilik ve İklim Koruma Bakanlığı tarafından yürütülen proje, atık yönetimi konusunda ulusal çapta oluşturmayı ve geri dönüşüm oranlarını artırmayı hedeflemektedir. Projenin ilk uygulamaları Cumhurbaşkanlığı Külliyesi ve TBMM gibi kamuya yönelik olarak başlamış, ardından tüm Türkiye'ye yayılmıştır. 2019 yılında Sıfır Atık Yönetmeliği yayımlanmış ve resmi olarak atık yönetimi standartları belirlenmiştir. 2020 yılı takviminde tüm kamu idareleri sıfır atık sistemi gereklilikleri mevcut olup, 2023 yılına kadar ise sanayi merkezleri, belediyeler ve özel sektör bu sürece dahil edilmiştir. Sıfır Atık Projesi kapsamında 2017'de % 13 olan geri kazanım oranı 2021 yılında % 27,2'ye; 2022 yılında % 30,13'e; 2023 yılında % 34,92'ye yükselmiştir. Geri kazanım oranının 2035 yılında % 60'a çıkarılması hedeflenmektedir (Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, 2025; Sıfır Atık, 2025). Kenevir, sürdürülebilir üretim ve çevre dostu yaklaşımlar doğrultusunda sıfır atık prensiplerine uyum sağlayan değerli bir bitkidir. Hızlı büyüme özelliği sayesinde kısa sürede gelişir ve yılda birden fazla hasat edilebilir. Bu özelliği, karbon emilimini artırarak çevresel fayda sağlamaktadır. Kenevirin diğer bitkilere kıyasla daha fazla karbondioksit emmesi ve yüksek miktarda oksijen salınımı gerçekleştirmesi, onu negatif karbon ayak izi ile sanayi sektöründe stratejik bir konuma taşımaktadır. Ayrıca, hem tarım hem de sanayi alanlarında geniş kullanım yelpazesine sahip olan kenevir, çeşitli ürünlere dönüştürülerek atık oluşumunu en aza indirmekte ve döngüsel ekonomi modeline önemli katkılar sunmaktadır (Enarevba & Haapala, 2024).

Bu çalışmada, kenevir bitkisinin özgün özellikleri ele alınarak, küresel ve yerel ölçekte kenevir endüstrisinin geçmişten günümüze kadar olan gelişimi incelenmiş, gelecekteki potansiyel büyüme öngörüleri değerlendirilmiştir. Aynı zamanda, sıfır atık, yeşil dönüşüm ve karbon ayak izi gibi çevresel projelerde kilit bir rol oynayan sıfır atık kenevirin çeşitli uygulama alanları araştırılarak, bu sürdürülebilir kaynağın önemi vurgulanmıştır.

KENEVİR

Kenevir lignoselülozik yapıda olup, temel olarak lignin, selüloz ve hemiselüloz bileşenlerinden oluşur (Şekil 1). Yapıda bulunan lignin, selüloz ve hemiselüloz miktarları hammaddeden hammaddeye farklılık göstermektedir. Lignin bitkilerde lifleri, damarları ve hücreleri birbirine bağlayan organik bir maddedir. Selülozdan sonra doğada en çok bulunan ve yenilenebilen bir karbon kaynağıdır (Çalgeriş, 2010). Lignoselülozik yapılarda, selüloz hemiselüloz tarafından çevrelenir, hemiselüloz ve ligninin matrisine yerleşir. Ayrıca lignin enzimatik saldırıya karşı bir bariyer oluştururken, selülozun yüksek kristalin yapısı suda çözünmez. Hemiselüloz ve lignin selülozun çevresinde koruyucu bir kılıf oluşturur (Jingjing, 2011; Stenius, 2000)



Şekil 1. Bitki Hücre Duvarı

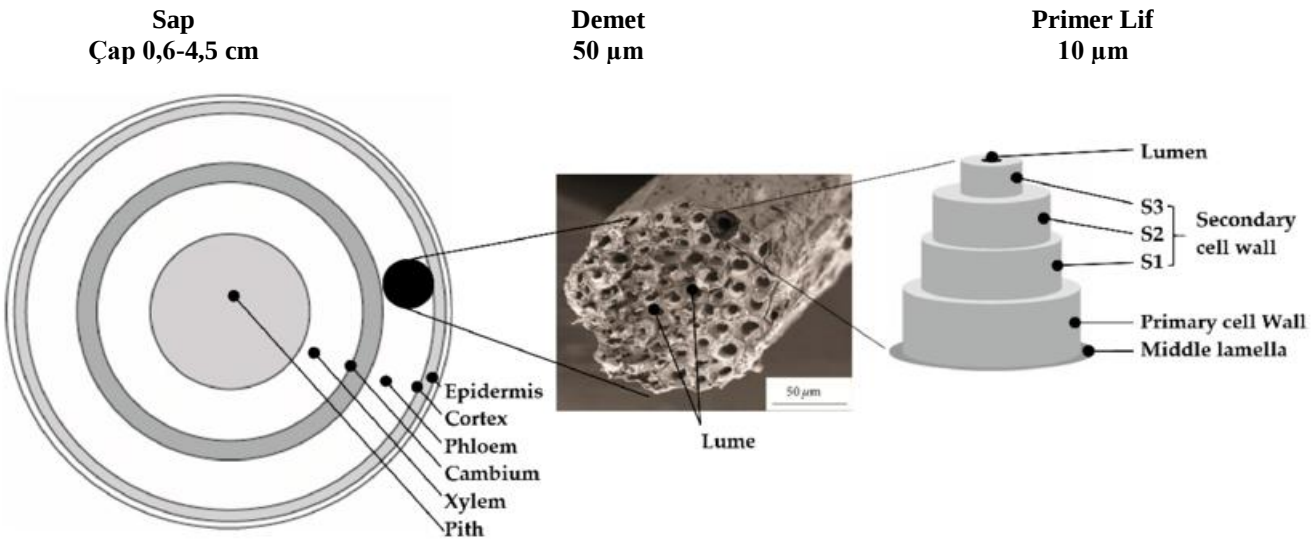
Doğal selülozik liflerin ve kenevirin yapısında bulunan selüloz, hemiselüloz ve lignin miktarları ise Tablo 1'de gösterilmektedir.

Tablo 1. Kenevir Lifinin ve Diğer Selülozik Liflerin Yapısında Bulunan Bileşenler (Sangalang, 2021; Kaya vd., 2020)

Lif Cinsi	Selüloz%	Hemiselüloz%	Lignin%	Pektin%
Pamuk	92	6		<1
Jüt	72	13	13	-
Keten	81	14	3	4
Sisal	73	13	11	2
Kenevir	74	18	3-4	1
Rami	76	15	1	2
Kapok	13	-	14,1	-

Kenevir lifinin yapısı, bitkinin biyolojik yapısının anlaşılması açısından oldukça önemlidir. Kenevirin yapısı Şekil 2'de gösterilen epidermis, kabuk (korteks), primer ve sekonder floem, ksilem (odunsu doku) ve sünger doku bölümlerinden oluşur.

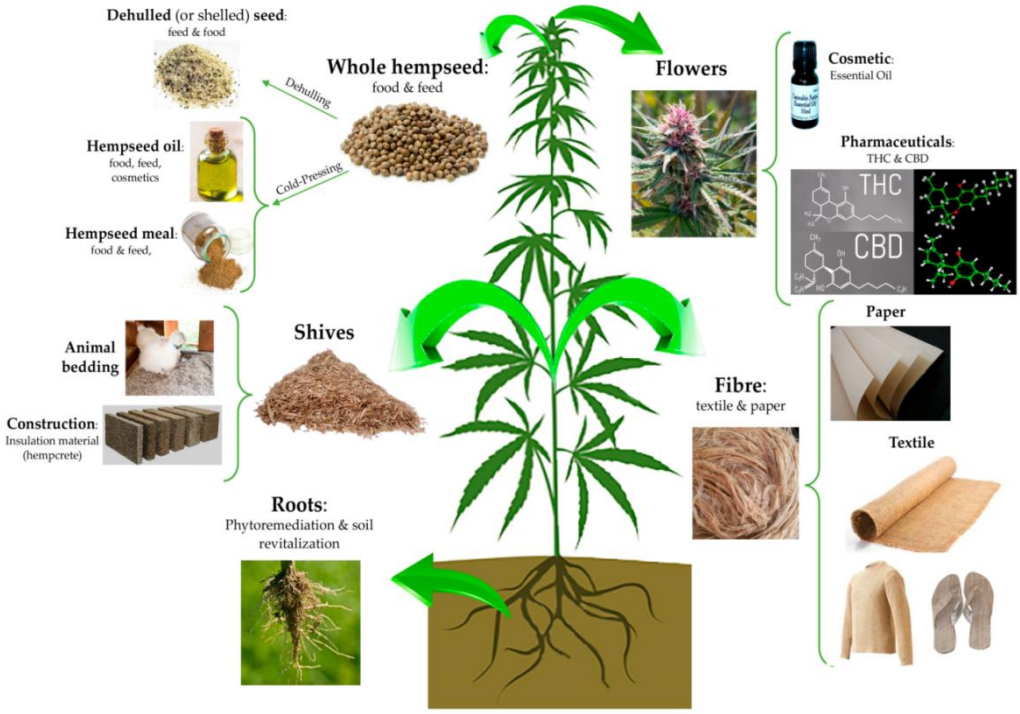
***Epidermis**:* Sapın en dış tabakasıdır. Bu tabaka, bitkinin dış etkenlerden korunmasına yardımcı olur ve genellikle mumsu bir yapı ile kaplıdır.
***Kabuk (Korteks)**:* Epidermisin hemen altında yer alır ve lifleri içerir. Kenevirin lifleri bu bölgede yoğunlaşmıştır. Bu lifler, tekstil ve inşaat gibi farklı endüstrilerde kullanılır.
***Primer ve Sekonder Floem**:* Bu yapı, bitkinin besin taşıma sisteminin bir parçasıdır. Primer floem bitkinin genç dokularında bulunurken, sekonder floem büyüdükçe gelişen bir yapıdır.
***Ksilem (Odun dokusu)**:* Ksilem, su ve minerallerin kökten yukarı taşınmasını sağlar. Ayrıca bitkiye mekanik destek sunar.
***Sünger doku**:* Kenevir sapının merkezindeki içi boş veya süngerimsi yapıdır. Genellikle bu bölge, bitkinin büyüme sürecine ve yaşına bağlı olarak değişiklik gösterir (Manaia vd., 2019).



Şekil 2. Kenevir Lifinin Yapısı (Manaia vd., 2019)

Kenevirin kök sistemi güçlü ve derinlere uzanır, bu da toprağı stabilize eder ve erozyonu önler. Genellikle bitkinin ihtiyacı olan suyu ve besinleri toplamakta etkilidir. Kenevir bitkisi genellikle kuraklığa karşı dirençlidir. Kenevirin gövdesi uzun ve ince yapılıdır, boyu 2 ile 5 metre arasında değişebilir. Gövde, iki ana bölümden oluşur: dış kısmı lifler ve iç kısmı odunsu çekirdek (hurda)tir. Dış kabukta bulunan lifler çok dayanıklı olup tekstil, ip, halat ve kâğıt üretiminde kullanılır. Odunsu çekirdek (hurda); İç kısmındaki odunsu doku, biyoyakıt ve yapı malzemeleri üretiminde kullanılır. Kenevir yaprakları genellikle el şeklinde ve 5 ila 9 parça halindedir. Yapraklar derin damarlı

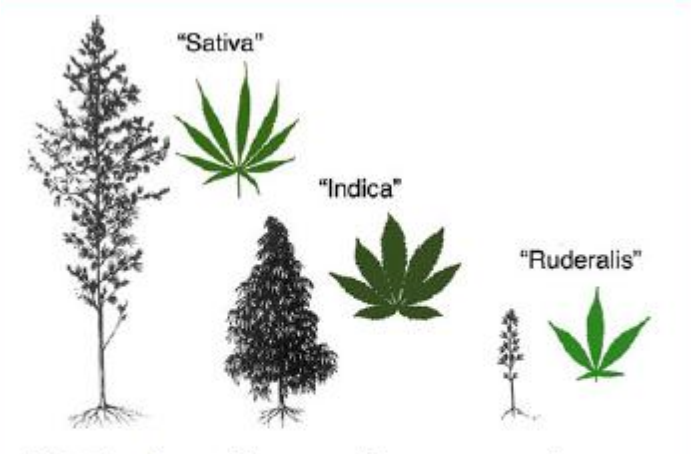
ve tırtıklı kenarlı olup, karakteristik görünüşüyle kolayca tanınır. Yapraklar, THC (tetrahidrokannabinol) ve CBD (kannabidiol) gibi bileşikler içerir. Kenevir bitkisi iki evciklidir, yani erkek ve dişi bitkiler ayrı ayrı bulunur. Dişi çiçekler; Tozlaşmadan sonra tohumlar oluşturan ve daha fazla CBD ve THC içeren kısımlardır. Tıbbi ve psikoaktif amaçlarla genellikle bu çiçekler kullanılır. Erkek çiçekler; Polen üreten çiçeklerdir. Dişi bitkilerin döllenmesi için gereklidir, ancak ticari üretimde genellikle erkek bitkiler tercih edilmez. Kenevir tohumları yüksek besin değeri taşır ve yağ açısından zengindir. Kenevir tohumu yağı, gıda üretiminde ve kozmetikte yaygın olarak kullanılır (Farinon vd., 2024; Altman vd., 2024; Amaduccia vd.,2015) (Şekil 3).



Şekil 3. Kenevir bitkisinin yapısı (Farinon vd., 2024)

Kenevir Bitkisinin Türleri

Kenevir, farklı özellikleri ve kullanım amaçları doğrultusunda çeşitlendirilen bir bitkidir. Kenevirin çeşitli türleri, lif, tohum ve tıbbi içerikleri gibi özelliklerine göre ayrılmakta ve bu çeşitler farklı alanlarda kullanılmaktadır. İşlevlerine ve içerdiği kimyasal bileşiklere göre Şekil 4'te gösterildiği gibi kenevirin başlıca üç türü bulunmaktadır (McParland,2018).



Şekil 4. Kenevir Türleri (McParland,2018)

Cannabis Sativa

Uzun boylu ve ince yapılıdır, 5 metreye kadar uzayabilir. Genellikle düşük THC (tetrahidrokannabinol) ve yüksek CBD (kannabidiol) içerir. Bu nedenle, endüstriyel ve tıbbi amaçlarla tercih edilir. Lif üretimi için idealdir. Tekstil, halat, kâğıt ve biyoplastik üretiminde kullanılır. CBD içerdiği için tıbbi ürünlerde kullanılır. Ağrı kesici, sakinleştirici

ve anti-inflamatuar özelliklere sahiptir. Diğer kenevir çeşitlerine göre daha uzun sürede olgunlaşır ve daha geniş yapraklara sahiptir. Lif verimi yüksek olduğu için endüstriyel üretimde önceliklidir (Onay vd.,2020).

Cannabis Indica

Daha kısa ve daha geniş yapılıdır, boyu genellikle 1-2 metre civarındadır. Yüksek THC ve düşük CBD içerir. THC oranı yüksek olduğu için psikoaktif etkileri belirgindir. Ağrı kesici, uyku düzenleyici ve anti-anksiyete tedavilerinde kullanılır. THC oranı yüksek olduğundan, esrar gibi psikoaktif ürünlerin üretiminde tercih edilir. Daha kısa sürede olgunlaşır ve soğuk iklimlere dayanıklıdır. Sativa'ya kıyasla daha kısa ve daha sık yapraklara sahiptir. Özellikle medikal amaçlarla kullanılan esrar bu türden elde edilir (Brito vd., 2023; Gizlenci vd., 2019).

Cannabis Ruderalis

En kısa ve en dayanıklı kenevir türüdür, boyu 0.5-1 metre arasındadır. Düşük THC ve düşük CBD içerir. Genetik özelliklerinden dolayı diğer kenevir türleriyle melezlenerek daha dayanıklı ve hızlı büyüyen bitkiler elde edilir. Tıbbi potansiyeli daha azdır, ancak melezlemelerle yüksek CBD içeriği sağlanabilir. Küçük yapılı ve sert koşullara dayanıklı bir türdür. Diğer türlerden farklı olarak otomatik çiçeklenme özelliği vardır, yani ışık döngüsünden bağımsız olarak belirli bir büyüme evresine ulaştığında çiçeklenmeye başlar. Bu özellik, diğer türlerle melezlenerek endüstriyel ve tıbbi amaçlarla kullanılan çeşitlerin geliştirilmesinde önemli bir rol oynar (Brito vd., 2023; Gizlenci vd., 2019)

KENEVİRİN TARİHÇESİ

Kenevir (Cannabis), insanlık tarihi boyunca hem endüstriyel hem de tıbbi amaçlarla kullanılmış önemli bir bitkidir (Şekil 5). Tarihi, binlerce yıl öncesine kadar uzanmakta olup, farklı kültürlerde çeşitli alanlarda kullanılmıştır.

MÖ 8000 civarı, kenevirin bilinen en eski kullanımı Çin'de başlamıştır. Arkeolojik bulgulara göre, Çin'de insanlar kenevir liflerini ip, kumaş ve kağıt yapımında kullanmışlar. ***MÖ 2700 civarı***, Çinli İmparator Shen Nung, kenevirin tıbbi faydalarından bahseden en eski yazılı kayıtları oluşturmuştur. Bu dönemde kenevir, ağrı kesici ve iltihap önleyici özellikleriyle tıbbi olarak kullanılmıştır. ***MÖ 2000-1400***, Hindistan'da kenevir bitkisi "bhang" adı verilen bir içeceğin yapımında kullanılmış ve dini ritüellerde yer almıştır.



Şekil 5. Kenevir Bitkisi

1000'li Yıllar, Orta Doğu'da İslam dünyasında kenevir yaygın olarak kullanılmıştır. Arap doktorlar kenevirin ağrı kesici ve uyutucu etkilerini keşfetmişler. Bu dönemde kenevir lifleri, ip yapımı, halat üretimi ve kağıt yapımında önemli rol oynamıştır. ***Ortaçağ Avrupa'sı***, kenevir, Avrupa'ya yayılmış ve birçok ülkede gemi yapımında halat, kumaş ve kağıt üretimi gibi alanlarda kullanılmıştır. Özellikle denizcilikte kullanılan halat ve yelkenler kenevir liflerinden yapılmıştır. ***16. ve 17. Yüzyıllar***, kenevir, Amerika'ya Avrupalı kaşifler tarafından taşınmış ve İngiliz kolonileri kenevir üretimini teşvik etmiş ve hatta kolonilere kenevir yetiştirilmesi zorunluluğu getirilmiştir. Kenevirden elde edilen lifler, ip ve kumaş yapımında kullanılmıştır. ***19. Yüzyıl***, kenevirin tıbbi kullanımı daha da yaygınlaşmıştır. Kenevir özleri, ağrı kesici, anti-enflamatuar ve yatıştırıcı özelliklerinden dolayı tıbbi reçetelerde kullanılmıştır. ***20. Yüzyıl Başları***, kenevirin çeşitli sanayi dallarında kullanımı devam ederken, aynı zamanda uyuşturucu madde olarak da kullanılmaya başlanması, kenevirin yasaklanmasına yönelik girişimleri artırmıştır.

1930'lar, ABD'de kenevire karşı kampanyalar başlamıştır. 1937'de ABD'de çıkarılan "Marihuana Vergi Yasası" ile kenevirin yetiştirilmesi, ticareti ve kullanımı üzerine sıkı denetimler getirilmiştir. Bu yasaklar, dünya genelinde kenevirin yasallaştırılması sürecini duraklatmıştır. ***1970'ler,*** kenevirin yasa dışı uyuşturucu olarak sınıflandırılması, birçok ülkede yasakların artmasına neden olmuştur. ***1990'lar ve sonrası,*** 20. yüzyılın sonlarına doğru tıbbi ve endüstriyel kenevire yönelik ilgi yeniden canlanmıştır. 1990'larda birçok ülke tıbbi kenevir kullanımını yasallaştırmaya başlamıştır. 21. yüzyılda ise endüstriyel kenevirin tekrar üretime dahil edilmesi, özellikle çevre dostu ürünlerde kullanılmaya başlamasıyla yaygınlaşmıştır. ***21. Yüzyıl,*** birçok ülke, tıbbi ve eğlence amaçlı kenevir kullanımını yasallaştırma yönünde adımlar atmıştır. Aynı zamanda kenevirin endüstriyel alanda kullanımı da artmıştır (Gizlenci vd., 2019; Mechoulam, 2019).

Türkiye'de ise kenevirin tarihçesi oldukça eskiye dayanmakla birlikte birçok farklı dönemde önemli bir tarım ürünü olarak kullanılmıştır. Kenevir, hem tekstil sektöründe hem de tıbbi amaçlarla kullanılmış ve zamanla farklı dönemlerde yasaklar veya düzenlemelerle karşı karşıya kalmıştır.

***Eski Dönemler ve Osmanlı İmparatorluğu*;** Anadolu'da kenevirin kullanımı M.Ö. 1500'lü yıllarda başlamış, özellikle ip, kumaş ve halat yapımında yaygın olarak kullanılmıştır. Osmanlı İmparatorluğu döneminde kenevir üretimi önemli bir tarım faaliyeti olmuştur. Kenevirden elde edilen lifler, gemi halatları ve yelken bezlerinin yapımında kritik öneme sahip olmakla birlikte kenevirin tıbbi kullanımı da yaygınlaşmıştır.

Cumhuriyet Dönemi; Türkiye Cumhuriyeti'nin ilk yıllarında kenevir tarımı yaygın olarak yapılmıştır. 1920'li yıllarından itibaren devlet tarafından teşvik edilen bir bitki olmuştur. 1960'larda Türkiye'de kenevir üretimi önemli bir seviyeye ulaşmıştır ve 20.800 hektar alanda kenevir yetiştirilmiştir. Kastamonu, Samsun ve Zonguldak gibi iller kenevir üretiminde öne çıkan bölgeler arasında olmuştur.

20. Yüzyıl ve Yasaklamalar; Ancak 20. yüzyılın ortalarında dünya genelinde artan uyuşturucu endişeleri nedeniyle kenevir üretimi kısıtlanmaya başlamıştır. 1930'lu yıllarda ABD'de başlayan kenevir karşıtı kampanyalar, Türkiye'de de etkisini göstermiştir. 1961 yılında Türkiye, uluslararası anlaşmalar doğrultusunda kenevir üretimini sıkı kontrol altına alınmıştır ve üretim alanları daralmıştır (Şakiroğlu, 2023; Tiret, 2002).

DÜNYADA VE TÜRKİYE'DE KENEVİR PAZARI

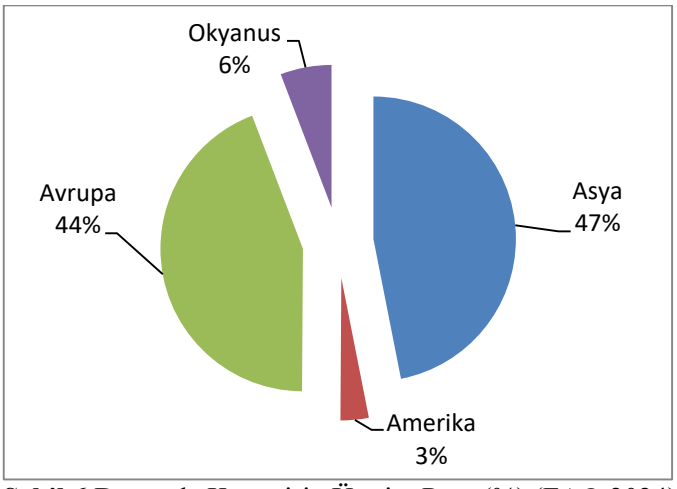
Kenevir, ticari veya endüstriyel amaçlar için özel olarak yetiştirilen Cannabis sativa, L.'nin botanik sınıfına aittir (Onay vd., 2020). Bu nedenle, endüstriyel kenevir olarak da bilinmektedir. Ancak yetiştirme koşulları, amaçlanan kullanımına göre değişmektedir. Kenevir, özellikle liflerinden, tohumlarından ve çiçeklerinden elde edilebilen ürünlerin endüstriyel kullanımları için yetiştirilmektedir. Asya Pasifik bölgesi kenevir pazarında %33 değerle en büyük paya sahiptir. Bunun nedeni, Çin, Hindistan, Japonya, Kore, Avustralya, Yeni Zelanda ve Tayland gibi ülkelerin endüstriyel kenevir üretimine aktif katılımıdır. Çin, kenevirin doğum yeri olarak kabul edilir ve yıllardır kenevir pazarına hakim olduğu bilinmektedir. Bugün, bu ülke her yıl en fazla ticari kenevir üretmektedir ve dünyanın en büyük kenevir kağıdı, tekstil ve biyokompozit ihracatçısı olmaya devam etmektedir (Grand View Research, 2024).

Son yıllarda Kuzey Amerika, kenevir ürünlerinin yetiştirilmesi, işlenmesi ve üretimiyle ilgili yasaların kademeli olarak gevşetilmesi nedeniyle kenevir pazarında en yüksek büyüme oranına sahiptir (Cognitive Market Research, 2024).

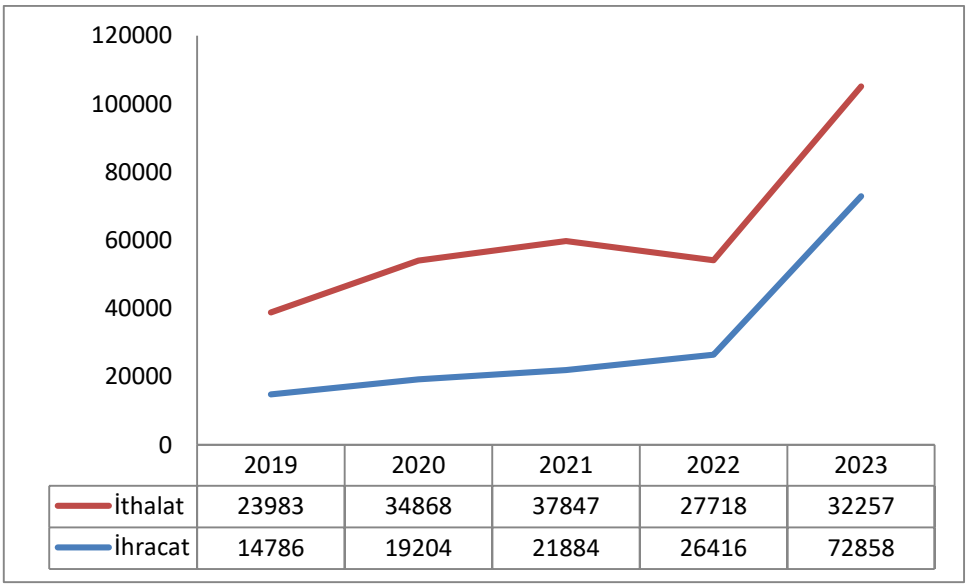
Birleşmiş Milletler Gıda ve Tarım Örgütü (FAO) 2014-2022 yılları arasındaki raporunda, Şekil 6'ya göre kenevir üretim pazarında Asya (%47) bölgesinin yine lider olduğu görülmektedir. Asya bölgesini sırasıyla Avrupa (%44), Okyanusya (%6) ve Amerika(%3) bölgeleri olarak takip etmektedir. Markets and Markets raporuna göre, küresel kenevir pazarının büyüklüğünün önümüzdeki yıllarda hızla büyümesi, 2022'de 6,8 milyar dolardan 2027'de 18,1 milyar dolara çıkması ve 2022-2027 yıllarında kenevir endüstrisinin Bileşik Yıllık Büyüme Oranının %21,6 olması beklenmektedir (Markets and Markets, 2024). Bu artışın nedenleri;

- Birçok ülkede kenevir yetiştiriciliğinin yasallaştırılması ve serbestleştirilmesinin artması, hammaddeye daha fazla erişimin sağlanması,
- Tekstil, kâğıt ve yapı malzemeleri gibi kenevir bazlı ürünlere olan talebin yüksek olması,
- Maliyetleri düşüren ve verimliliği artıran yetiştirme ve işleme teknolojisindeki gelişmelerin olması,
- Kenevirin, yetiştirilmesi için daha az su ve pestisit gerektirmesi nedeniyle geleneksel ürünlere sürdürülebilir bir alternatif olması,

- Kenevirin gıda ve içecek endüstrisinde, özellikle kenevir tohumu ve kenevir yağında kullanımının artması olarak sıralanmaktadır.

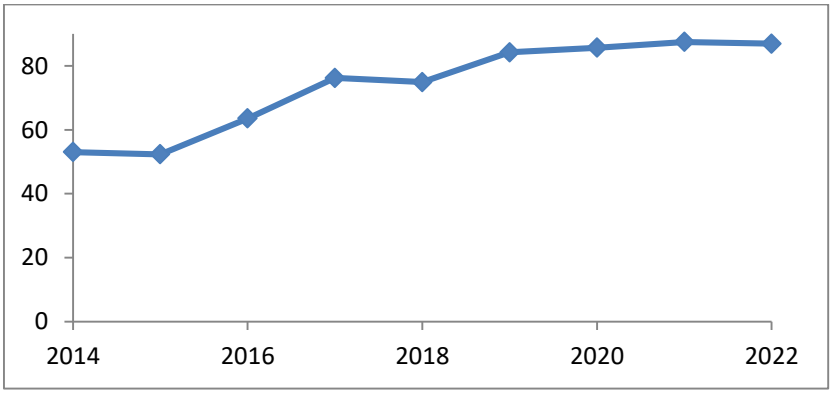


Şekil 6.Dünyada Kenevirin Üretim Payı (%) (FAO,2024)



Şekil 7. Dünyada Kenevirin Yıllara Göre İthalat/İhracat Miktarları (ton) (Trademap,2024)

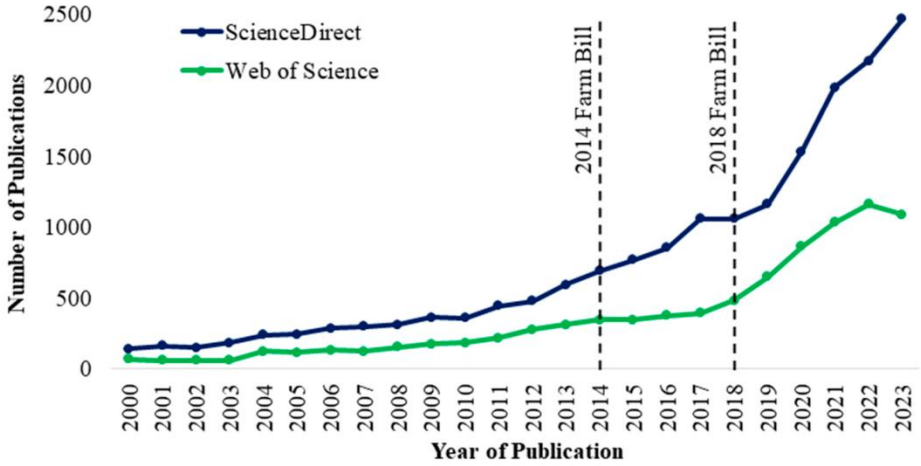
Trademap 2024 (Trade Statistics for International Business Development) raporuna göre, dünyada kenevir ihracatı 2019 yılında 14.786 tondan 2023 yılında artarak 72.858 tona ulaşmıştır. İthalat ise 2019 yılında 23.983 tondan 2023 yılına kadar dalgalanma görülse de genel anlamda arttığı gözlenmektedir (Şekil 7) (Trademap, 2024).



Şekil 8. Dünyada Yıllara Göre Kenevir (ham veya çürütülmüş) Hasatı Yapılan Alan (ha) (FAO, 2024)

Birleşmiş Milletler Gıda ve Tarım Örgütü (FAO) tarafından 2014-2022 yılları arasında kenevir hasatı yapılan alanın büyüklüğü Şekil 8'de verilmiştir. Grafiğe göre bazı yıllarda dalgalanmalar meydana gelse de son yıllarda yapılan yasal düzenlemeler sayesinde dünyada kenevir hasatı yapılan alanların arttığı görülmektedir.

Endüstriye yön veren aktörler, tohum boyutu ve yağ dağılımı açısından geniş bir çeşitlilik sunan yüksek kaliteli endüstriyel kenevir üretimi gerçekleştirmektedir. Potansiyel verimler ve işleme yöntemleri, kullanılan teknolojiler, üretim maliyeti ve getirilerle birlikte, endüstrideki rekabeti yönlendirmede önemli bir rol oynamaktadır. Endüstriyel kenevir şirketlerinin, bitkinin yasal olarak yetiştirilebildiği ekonomilerde ürün yetiştirme ve işleme tesislerini artırmaya odaklanması, Ar-Ge faaliyetlerine büyük yatırımlar yapması büyük pazarlara nüfuz edebilmesini önünü açmaktadır. Kenevir yetiştiriciliği daha da yasal hale geldikçe, üreticilerin ve araştırma kurumlarının endüstriyel kenevirden yeni ürünler gelişimini destekleyeceği aşikârdır. Örneğin bu tür uygulamalardan biri, önümüzdeki yıllarda önemli bir büyüme potansiyeline sahip olması beklenen biyoyakıttır. Petrol fiyatlarındaki (dizel ve benzin) artış ve küresel ısınmayla ilgili artan endişelerle birlikte biyoyakıtlar popülerlik kazanmıştır. Kenevir tohumu özleri, herhangi bir dizel yakıtlı araçta kullanılmaya uygun olan kenevir biyodizelini üretmek için kullanılmaktadır (Markets and Markets, 2024). Diğer bir uygulama örneği ise, Cannabis sativa bitkisinden elde edilen kenevir tohumlarının insan beslenmesi için kullanılmasıdır. Kenevir tohumları eser miktarda tetrahidrokanabinol (THC) içerir. Bunlar, linoleik (omega-6) ve linolenik (omega-3) olmak üzere iki temel yağ asidi ile E, 81, 82, 86 ve D vitaminleri, kalsiyum, magnezyum ve potasyum açısından zengindir. Kenevir tohumu, kolay sindirilebilir protein (%20-25), çoklu doymamış yağ asitleri (PUFA), çok sayıda lipit (%25-35), çok sayıda çözünmeyen lif, çok sayıda karbonhidrat (%20-30) içeren zengin içerikli bir besin kaynağıdır (Aryal vd., 2024).



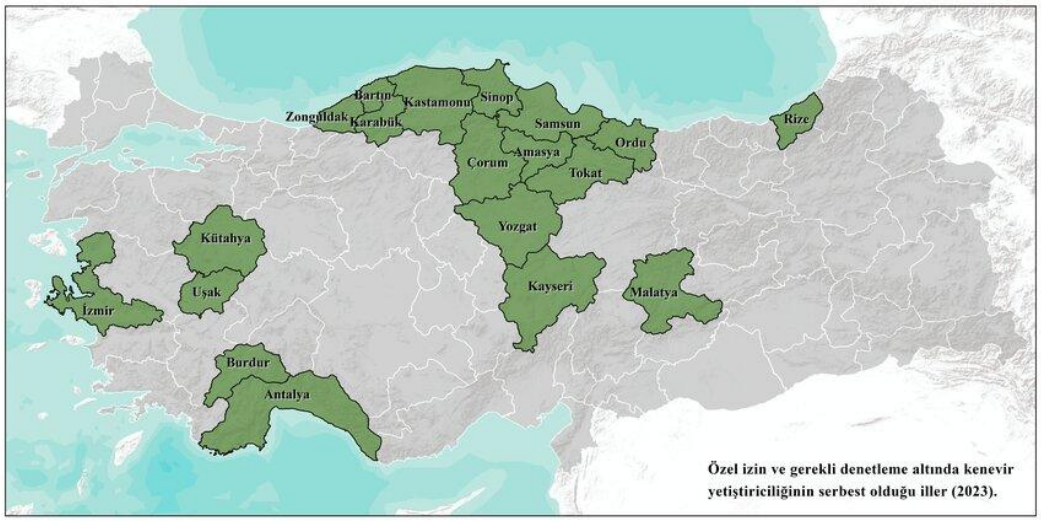
Şekil 9. Küresel Kenevir Araştırma Verimliliğindeki Artış

Dünyada üretilen kenevir miktarının artması beraberinde kenevir araştırma verimliğindeki artışı da pozitif yönde etkilemektedir. Şekil 9'da kenevir üzerine yapılan araştırmaların 2000-2023 yılları arasında giderek arttığı görülmektedir (Enarevba & Haapala, 2024).

Son yıllarda kenevir endüstrisine yönelik artan ilgiden dolayı Türkiye'de de kenevir üretimiyle ilgili yasal düzenlemeler yapılmıştır. 2016 yılında Türkiye'nin belirli illerinde kontrollü kenevir üretimi yapılmasına izin verilmiştir. İzin verilen iller; Amasya, Antalya, Bartın, Burdur, Çorum, İzmir, Karabük, Kastamonu, Kayseri, Kütahya, Malatya, Ordu, Rize, Samsun, Sinop, Tokat, Uşak, Yozgat ve Zonguldak illeri ile bu illerin bütün ilçeleri şeklinde sıralanabilir (Şekil 10) (Gizlenci vd., 2019).

Türkiye'de lif amaçlı kenevir ekim alanı, verimi ve üretim miktarı yıllara göre farklılık göstermektedir. Yapılan ıslah ve yeni çeşit çalışmalarının etkisiyle kenevir lifi hem veriminde hem de üretimde artış sağlanmıştır. Kenevir lifi üretim miktarı ise 2014 yılında 1 ton iken, 2016 yılında 7 tona, 2023 yılında ise 359 tona kadar artmıştır (Tablo 2).

Türkiye'de yıllara göre kenevir tohumu ekim alanı, üretim miktarı ve verimi Tablo 3'de verilmiştir. Türkiye'de tohum amaçlı kenevir ekimi 2015 yılında 10 da iken, hızla artarak 2020 yılında 4.252 da ile zirve yapmış, 2023 yılında ise 3.923 da alana gerilemiştir.



Şekil 10. Kenevir Yetiştiriciliğine İzin Verilen İller

Tablo 2. Yıllara Göre Türkiye'nin Kenevir Lifi Ekim Alanı, Üretimi ve Verimi

	Ekim Alanı (dekar)	**Üretim (ton)**	**Verim (kg/dekar)**
2014	10	1	100
2015	10	1	100
2016	45	7	156
2017	46	7	152
2018	55	7	127
2019	160	19	119
2020	101	9	89
2021	324	21	65
2022	365	31	85
2023	2 117	359	170

TÜİK, 2024

Tablo 3. Yıllara Göre Türkiye'nin Kenevir Tohumu Ekim Alanı, Üretimi ve Verimi

	Ekim Alanı (dekar)	**Üretim (ton)**	**Verim (kg/dekar)**
2014	10	1	100
2015	10	1	100
2016	25	1	40
2017	24	1	42
2018	59	3	51
2019	536	20	37
2020	4 252	273	64
2021	317	20	63
2022	1 963	159	81
2023	3 923	327	83

TÜİK, 2024

KENEVİR BİTKİSİNİN SIFIR ATIK UYGULAMALARI

Kenevir üretimi sırasında ortaya çıkan atıklar, bitkinin farklı bölümlerinin işlenmesiyle oluşur. Kenevirin çok yönlü yapısı sayesinde bu atıkların tamamı geri dönüştürülebilir ve çeşitli endüstriyel alanlarda değerlendirilebilir. Böylece kenevir atıkları, değerli ürünlere dönüştürülerek çevresel sürdürülebilirliğe katkı sağlarken, sıfır atık uygulamalarında da önemli bir rol oynar (Şekil 11).

Kenevir Gövdesi Atıkları (Hurda)

Kenevir gövdesi lif üretimi sırasında ayrılan odunsu kısımlarına hurda adı verilir. Lifler çıkarıldıktan sonra kalan bu odunsu materyaller, genellikle en büyük kenevir atık türünü oluşturur.



Şekil 11. Kenevir atıkları

İnşaat Malzemeleri; Kenevir hurdası, kenevir kireci adı verilen bir inşaat malzemesinin ana bileşeni olarak kullanılır. Kenevir kireci, çevre dostu, yalıtım sağlayan ve dayanıklı bir yapı malzemesidir (Muhit vd., 2024). Hindistan'daki UNESCO tarafından koruma altına alınan Ellora Mağaraları'nın duvarları da MS 6.yüzyıldan kalma kenevir sıvalarıyla kaplıdır ve günümüze kadar eski insanların kenevir sıvası kullanması sayesinde korunmuştur (Şekil 12).



Şekil 12. Ellora Mağaraları/Hindistan

Şekil 13'te gösterilen kenevir beton (hempcrete) kullanımı günümüzde yeşil dönüşüm projeleri kapsamında tercih edilmektedir. Kenevir betonu insan yapımı yalıtım ve duvar dolgularıyla karşılaştırdığınızda, sınırsız bir ömre sahip, üretimi çok daha az enerji ve karbona mal olan yenilenebilir bir ürün olarak karşımıza çıkmaktadır (Sarno vd., 2024). Kenevir betonun günümüzde en güzel örneklerinden biri Şekil 14'te verilen Bright Building binasıdır.

Hayvan Yatağı (Altlık); Kenevir hurdası, hayvanlar için yatak materyali olarak kullanılır. Kokusuz, yüksek emicilik özelliğine sahip ve çevre dostudur.

Kağıt ve Karton Üretimi; Kenevirin odunsu kısımları, kağıt ve karton üretiminde selüloz kaynağı olarak kullanılabilir.

Kompost; Hurda kenevir materyalleri organik tarım için kompost yapımında değerlendirilebilir. Bu sayede tarımsal alanlarda doğal gübre olarak kullanılır.

Aktif Karbon; Kenevir gövdesi atıklarından yüksek yüzey alanına sahip kenevir esaslı aktif karbonlar üretilmektedir (Helvacı & Korkmaz, 2024). Aksoğan Korkmaz & Önal, (2022)'ın yaptığı çalışmada kenevir bitkisinin atık kısımlarını (kök, gövde ve diğer) değerlendirmişler. Kenevir atıklarından karbonizasyon ile kimyasal aktivasyon

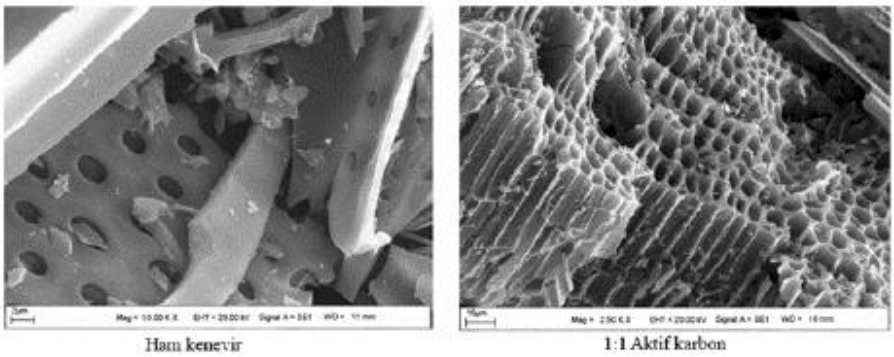
yöntemi kullanılarak aktif karbon elde etmişler (Şekil 15). Karbonize edilmiş kenevir atığında toplam yüzey alanını 1:4 oranında KOH emdirilmiş aktif karbonda sırasıyla 1881,80 m^2/g, 1152,40 m^2/g ve 728,40 m^2/g olarak bulmuşlar.



Şekil 13. a. Kenevir Beton (Hempcrete) **b.** Kenevir Beton Bloklar (Muhit vd., 2024).



Şekil 14. Dünyanın En Büyük Kenevir Beton Binası Bright Building

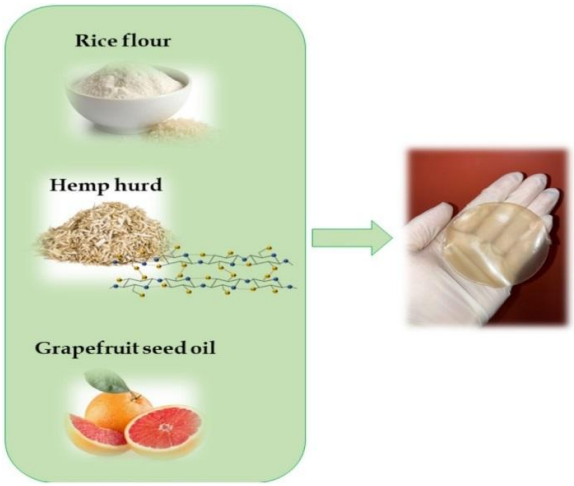


Şekil 15. Ham kenevir ve 1:1 KOH emdirilmiş aktif karbonun SEM görüntüleri

Hossain vd., (2018) çalışmasında Amerika'dan temin ettiği kenevir liflerine hidrotermal işlem uygulayarak son derece yüksek yüzey alanına sahip mezo-gözenekli aktif karbon hazırlamışlar. Aktivasyonu ise 750°C'de argon atmosferinde, farklı oranlarda KOH ve NaOH kullanılarak gerçekleştirmişler. BET (Brunauer-Emmett-Teller) sonuçlarına göre, 390°C hidrotermal sıcaklığında ve 1:3 emdirme oranında KOH ile yapılan aktivasyonda en yüksek yüzey alanına (2425 m^2/g) sahip olduğunu bulmuşlar.

Yenilebilir Ambalaj; Son yıllarda kenevir hurdası ve kenevir tohumları vb. yenilebilir ambalaj üretiminde kullanılmaktadır. Yenilebilir ambalaj, gıda ürünlerinin görünümünü iyileştirmek ve korunmasını sağlamak amacıyla yaygın olarak kullanılan bir ambalajlama yöntemidir. Viscusi vd., (2021)'nin yaptığı çalışmada, kenevir hurdası tozu ve greyfurt çekirdeği yağı ile zenginleştirilmiş, potansiyel antimikrobiyal aktiviteye sahip doğal bileşikler içeren

biyolojik olarak parçalanabilir pirinç unu bazlı yeni filmler geliştirmişler (Şekil 16). Cabrera Villamizar vd., (2025) çalışmasında göre kenevir selüloz bazlı aerojellerin ve kriyojellerin sürdürülebilir gıda ambalajlama uygulamaları için potansiyelini araştırmışlar. Araştırmada, kenevirden selülozu başarıyla çıkarmışlar ve hem aerojeller hem de kriyojeller geliştirmişler. Her iki malzeme de iyi bir potansiyel göstermiş, ancak kriyojeller daha düşük büzülme, üstün su emme kapasitesi ve biyoaktif bileşiklerle emprenye edilmeye uygunluğu nedeniyle tercih edilmiştir.



Şekil 16. Kenevir hurdu esaslı yenilebilir ambalaj (Viscusi vd., 2021)

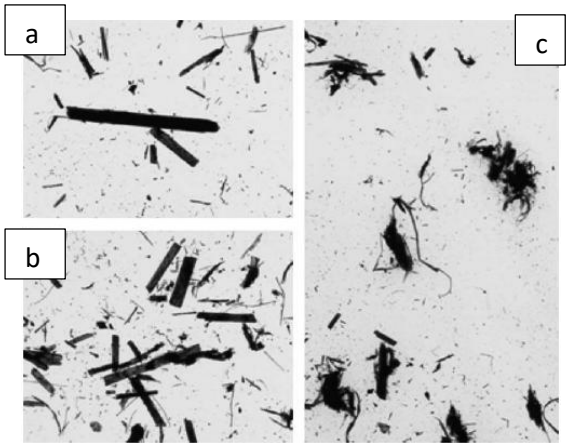
Kenevir Yaprak ve Sap Atıkları

Kenevir bitkisi yetiştirildiğinde, yapraklar ve saplar hasat sonrası genellikle işlenmeden atık olarak kalır.

Hayvan Yemi; Kenevirin yaprakları ve sapları, özellikle lif keneviri yetiştiriciliğinde, hayvanlar için yem olarak kullanılabilir. Protein açısından zengin bir yem kaynağıdır.

Biyokütle Enerjisi; Kenevirin yaprak ve sap atıkları, biyokütle enerjisi üretiminde kullanılabilir. Kenevir biyokütlesi, yenilenebilir bir enerji kaynağı olarak değerlidir ve bioyakıt üretiminde kullanılabilir. Kenevir yüksek biyokütle kuru maddesine ve hektar başına iyi net enerji verimine sahiptir. Dahası, kenevir iyi enerji çıktısı-girdisi oranlarına sahiptir ve bu nedenle ortalamanın üzerinde bir enerji ürünüdür (Prade vd.,2012).

Kompost ve Gübre; Yapraklar ve saplar, organik tarımda kompost yapımında kullanılabilir. Doğal yollarla çürütülerek toprağa karıştırıldığında, toprak yapısını iyileştirir ve besin maddesi sağlar. Dresboll, (2005)'un yaptığı çalışmasından Şekil 17'de buğday, Miscanthus ve kenevirden yapılan kompostun taranmış görüntüleri verilmiştir. Kenevir kompostundaki parçacıklar diğer kompostlara göre daha fazla engebeli yüzeye ve en yüksek su tutma kapasitesine sahip olduğu görmüş ve bu nedenle, parçacıkların geometrisi ve yüzey özellikleri ve oluşturulan gözenekler bitki bazlı yetiştirme ortamının uygunluğunu belirlemede önemli bir kriter olduğunu bulmuştur.



Şekil 17. **a**. Buğday Kompostu **b**.Miscanthus kompostu **c**. Kenevir Kompostu Parçacıklarının Taranmış Görüntüleri.

Tohum ve Yağ Atıkları

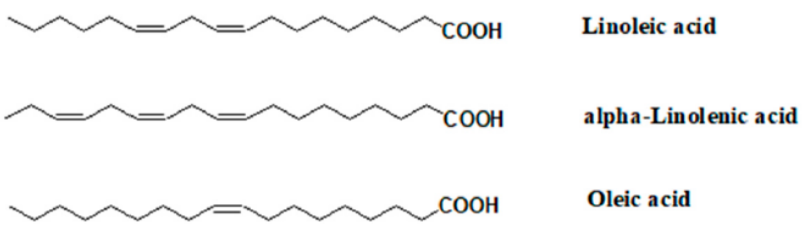
Kenevirden elde edilen tohumlar ve yağlar, bazı işlemler sonrasında işlenir ve bu süreçlerde çeşitli yan ürünler oluşur.

Protein ve Yem Ürünleri; Kenevir tohumunun yağı çıkarıldıktan sonra geriye kalan posa, yüksek proteinli bir yan ürün olarak değerlendirilir. Bu posa, hayvan yemi veya protein takviyesi olarak kullanılır (Altman vd., 2024).

Besin Ürünleri; Kenevir tohumları, çok yönlü besinsel ve farmasötik özellikleri nedeniyle araştırma alanında giderek daha fazla ilgi görmektedir. Özellikle, bu tohumlar zengin bir protein, karbonhidrat, çoklu doymamış yağ asitleri, vitamin ve mineral kaynağı sunarak, bunları kişinin diyetine değerli bir katkı haline getirir (Şekil 18). Bu nedenle kenevir tohumu kabukları ve lifleri, gıda endüstrisinde besleyici takviyeler veya sağlıklı gıda ürünlerinde değerlendirilebilir (Tablo 4) (Kamle vd.,2024).

Tablo 4. Kenevir Tohumunun Besin İçeriği(Callaway, 2004, Onay vd.,2020)

	Tohum	**Tohum unu**
Yağ (%)	35,5	11,1
Protein(%)	24,8	33,5
Karbonhidratlar(%)	27,6	42,6
Nem(%)	6,5	5,6
Kül(%)	5,6	7,2
Enerji(kj/100g)	2200	1700
Toplam diyet lifi(%)	27,6	42,6
Sindirilebilir lif(%)	5,4	16,4
Sindirilemeyen lif(%)	22,2	26,2



Şekil 18. Kenevir Tohumu Yağından Elde Edilen Doymamış Yağ Asitleri (Zugic vd.,2024)

Colic vd., (2024)'nin yaptığı çalışmada yağsız süt tozunun kenevir tohumu pres keki ile değiştirilmesinin dondurmanın kalite özellikleri üzerindeki etkisini araştırmışlar. Kenevir pres kekinin dondurma üretiminde işlevsel ve sürdürülebilir bir bileşen olarak kullanılabileceğini, ek besinsel faydalar sağlayabileceğini söylemişler (Şekil 19).



Şekil 19. Kenevir tohumu pres keki esaslı dondurma örnekleri

Kozmetik ve Kişisel Bakım Ürünleri; Kenevir yağı atıkları, kozmetik ürünlerde (sabun, krem, losyon) kullanılabilir. Yağın işlenmesi sırasında ortaya çıkan atık yağlar, genellikle doğal bakım ürünlerinde hammadde olarak değerlendirilir (Crini vd., 2020). Son zamanlarda piyasaya sürülen bir dizi kenevir özlü güzellik ürünü, cilt faydalarına ilişkin mevcut bilimsel veriler sınırlı da olsa, kenevirin yaşlanma karşıtı veya gençleştirme ürünlerine dahil edilmeye uygun faydalı özelliklere sahip olabileceğini göstermektedir (Şekil 20) (Zugic vd., 2024).

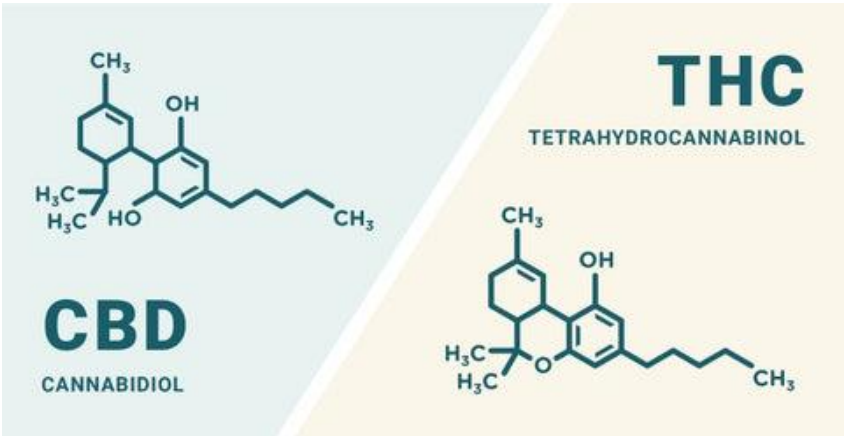


Şekil 20. Kenevir Esaslı Kozmetikler

Kenevir, dünya çapında çeşitli dermatolojik rahatsızlıkları tedavi etmek için de kullanılmaktadır. Konu ile ilgili çalışmalar, akne, atopik dermatit, sedef hastalığı, cilt kanseri, pruritus ve ağrı gibi çeşitli cilt rahatsızlıklarını tedavi etmek için kanabinoidlerin farmakolojisi ve kullanımını kapsamaktadır. Kanabinoidler, cildin yeni bulunan endokannabinoid sistemiyle etkileşime girerek çeşitli mekanizmalarla anti-inflamatuar, antipruritik, yaşlanma karşıtı ve antimalignite özellikleri göstererek geleneksel tedavilere umut verici bir alternatif sağlamaktadır (Sheriff vd.,2020). Palmieri vd., (2019)'nin yapmış olduğu çalışmada toplam 20 yetişkin hastadan oluşan ve 5'inde sedef hastalığı, 5'inde atopik dermatit ve 10'unda yara izi bulunan bu retrospektif çalışmaya dahil edilmiş ve üç aylık bir süre boyunca cilt lezyonlarına günde iki kez CBD ile zenginleştirilmiş bir merhem (THC içermeyen) uygulamaları istenmiştir. Biyofiziksel cilt parametreleri (TEWL, hidrasyon ve elastikiyet) önemli ölçüde iyileşirken, çalışma sırasında herhangi bir yan etki tespit edilmemiştir. Vincenzi, (2020)'nin aktardığına göre iki hafta boyunca kullanılan CBD ve ketokonazol içeren iltihap önleyici şampuan, iltihap ve eritem belirtilerinde önemli bir azalmaya, kaşıntı ve yanma hissinin hafiflemesine neden olmuştur.

Kenevir Çiçek ve Reçine Atıkları

Kenevir bitkisinin çiçeklerinden ve reçinesinden Şekil 21'de gösterilen CBD, THC gibi kannabinoidler elde edilirken bazı bitki parçaları atık olarak kalabilir.

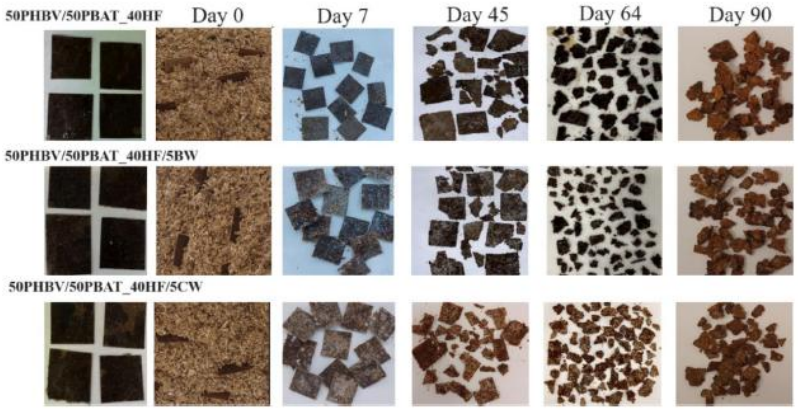


Şekil 21. CBD ve THC Kanabinoid Molekülleri (Brito vd.,2023; Mechoulam, 2019; Russo & Guy, 2006)

Biyomedikal Araştırmalar; Çiçek ve reçine atıkları, biyoteknolojik araştırmalarda veya yeni farmasötik ürünlerin geliştirilmesinde kullanılabilir. Kenevir bitkilerindeki en etkili bileşenler kanabinoidler ve terpenlerdir. Bu maddeler, terapötik potansiyelleri sayesinde metabolik, nörodejeneratif ve hareket bozukluklarının yanı sıra HIV hastalarında anoreksiya ve mide bulantısını, kanser hastalarında ise ağrıyı hafifletmek için kullanılmaktadır (Brito vd., 2023). Souza vd., (2021) yaptığı çalışmada, kenevir bileşiklerinin terapötik alandaki çeşitli uygulamalarını doğrulamıştır. Bu uygulamalar arasında, obezite ve aşırı kilo tedavisinde iştah baskılayıcı olarak kullanımı; kanser

ve AIDS hastalarında bulantı ve kusmanın giderilmesi; uykusuzluk, nöropatik ağrı, stres, spazmlar, multipl skleroz ve depresyon tedavisi; multipl sklerozla ilişkili spastisitenin yönetimi ile Lennox-Gastaut ve/veya Dravet sendromu kaynaklı nöbetlerin tedavisi bulunmaktadır.

***Biyoplastik Üretimi*;** Reçine ve çiçeklerden elde edilen bazı bileşenler biyoplastik yapımında kullanılabilir (Şekil 22). Kenevir esaslı biyoplastikler çevre dostu ve doğada çözünebilir özelliklere sahiptir (Pereira, 2024).



Şekil 22. Kenevir ve Mum Esaslı Biyokompozitlerin Parçalanma Testi (Pereira, 2024)

Lif Atıkları

Lif üretimi sırasında ortaya çıkan ince ve kısa lif parçaları, bazı üretim süreçlerinde kullanılmaz ve atık olarak değerlendirilir.

***Kâğıt Üretimi*;** Kenevirin kısa lifleri, yüksek kaliteli kâğıt üretiminde kullanılabilir. Kenevir kâğıdı, uzun ömürlü ve dayanıklıdır (Amode, 2021). Geleneksel odun kağıdına kıyasla kenevir kâğıdı daha yüksek mukavemet, uzunluk ve incelik gibi üstün niteliklere sahiptir (Şekil 23). Kenevirin uzun bast lifleri, doğal olarak asitsiz olan kaliteli bir kâğıt yapar. Kenevir kâğıdı, ağaç bazlı kâğıda göre üretimde daha az kimyasal kullanır. Geleneksel kâğıt gibi zamanla sararıp kırılganlaşmaz veya parçalanmaz (Crini vd.,2020)



Şekil 23. Kenevir kâğıdı

Uygulamalar, kenevir hamurunun yüksek fiyatı nedeniyle teknik filtreler, banknotlar, İncil kâğıdı, dielektrik ve tıbbi kâğıt ve sigara kâğıdı gibi çok az uygulama ile sınırlıdır (Crini vd., 2020; Yu vd., 2017).

Özel kağıtlar arasında çay poşeti kâğıdı, kahve filtresi, özel dokusuz kumaşlar, yağ geçirmez kağıtlar, karbon dokular ve yoğunlaştırıcı dokular da bulunur. Şu anda, kenevir hamuru için tek köklü pazar sigara kâğıdı pazarıdır (Şekil 24).

Yalıtım Malzemesi; Kenevir lif atıkları, doğal yalıtım malzemesi olarak kullanılabilir (Şekil 25). İnşaat sektöründe çevre dostu yalıtım çözümleri sunar (Kymalainen, 2008).

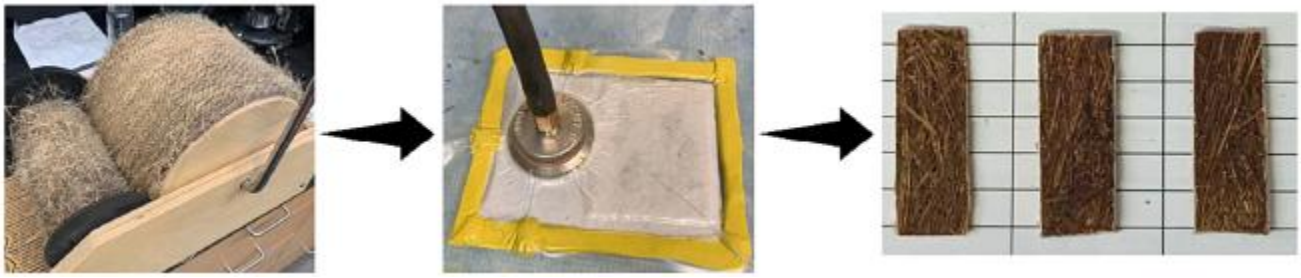
Biyokompozitler; Lif atıkları, otomotiv ve inşaat sektöründe kullanılan biyokompozit malzemelerin üretiminde hammadde olarak kullanılabilir (Şekil 26).



Şekil 24. Geleneksel (sol) ve kenevir (sağ) sigara kağıdının farklı yanma derecelerindeki kül görünümü (Yao vd., 2017).



Şekil 25. Kenevir esaslı yalıtım malzemesi



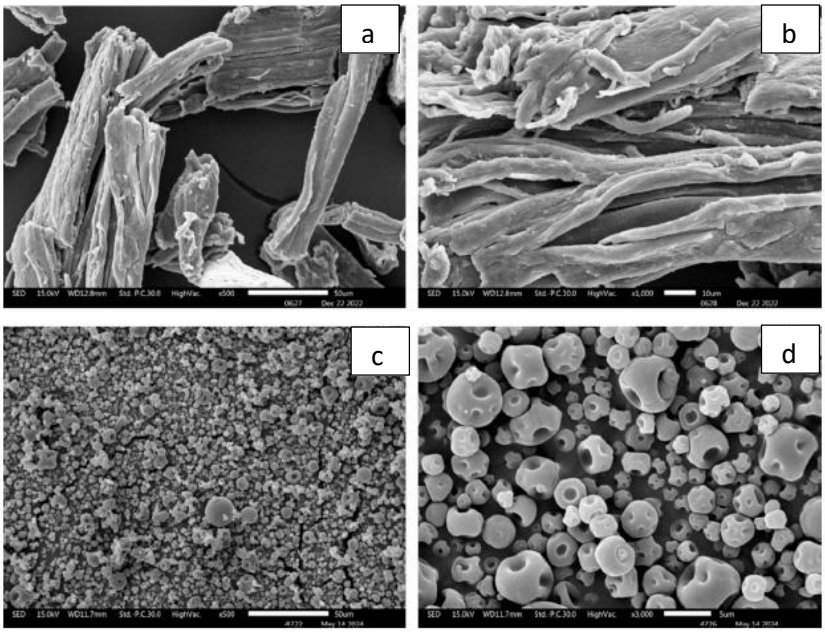
Şekil 26. Kenevir esaslı kompozit malzeme (Fei vd., 2024)

Biyopolimerler; Kenevir lif atıkları, biyopolimer üretiminde kullanılabilir. Duangrin vd., (2024) yaptığı çalışmada kenevir lifinden yeşil ve sürdürülebilir bir yaklaşımla, ultrasonik destekli hem püskürtülerek kurutulmamış hem de püskürtülerek kurutulmuş kenevir karboksimetil selülozu (CMC) üretmişler. Elde edilen CMC'nin suda iyi çözünmesi, diğer biyopolimer maddelerle daha iyi etkileşime girmesi ve film haline getirilmesinin daha kolay olması nedeniyle hem gıda hem de gıda dışı endüstrilerde daha biyouyumlu ve kullanışlı hale geldiğini söylemişler (Şekil 27).

SONUÇ

Sıfır atık, israfın önlenmesi, kaynakların verimli kullanılması, atık oluşumunun azaltılması ve etkin bir toplama sisteminin oluşturulmasını amaçlayan bir atık yönetimi yaklaşımıdır. Sürdürülebilir kalkınma modeliyle uyumlu olan bu sistem, gelecek nesillerin ihtiyaçlarını riske atmadan mevcut gereksinimlerin karşılanmasını hedeflemektedir. Kenevir bitkisi, sürdürülebilir ve sıfır atık prensiplerine uygun üretim süreçleriyle çevre dostu bir alternatif olarak öne çıkmaktadır. Şöyle ki; kenevir bitkisi, henüz üretim aşamasında bile az su tüketimi, kimyasal gübre ve pestisit ihtiyacının minimal olması ve toprağı zenginleştirici özellikleri sayesinde, çevresel etkileri en aza indirerek sürdürülebilir bir üretim modeli sunmaktadır. Kenevir atıklarının tamamının (gövde, yaprak, çiçek, tohum, kök) farklı endüstriyel alanlarda değerli malzemelere dönüştürülmesi, çevre dostu ve sürdürülebilir üretimin en somut örneklerinden biri olarak öne çıkmaktadır. Bu çalışmada, kenevir bitkisinin sürdürülebilir yönlerine dikkat çekilmek istenmiş ve kenevir atıklarının gelecekte birçok önemli ürünün yerine tercih edileceği öngörülmüştür. Bu ürünlerin bazıları;

- ✓ **Kenevir gövdesi atıklarından** elde edilen hafifliği, dayanıklılığı, düşük karbon ayak izi sayesinde öne çıkan inşaat sektöründe kullanılan hempcrete (kenevir betonu),
- ✓ **Kenevir yaprak ve sap atıklarının** biyolojik olarak parçalanabilir olması nedeniyle kenevir bazlı kompostlar,
- ✓ **Kenevir çiçek ve reçine atıklarından** üretilen biyo-malzemeler ve ilaçlar,
- ✓ **Kenevir bitkisinin lif ve gövde atıklarından**, kenevir bazlı ısı, ses ve nem yalıtımı sağlayan yalıtım malzemeleri,
- ✓ **Kenevir tohumlarından,** yüksek besin değerine sahip, protein, sağlıklı yağlar ve lif açısından zengin süper gıda ürünleri,
- ✓ **Kenevir tohumlarının** içerdiği omega-3 ve omega-6 yağ asitleri, antioksidanlar, vitaminler ve mineraller sayesinde, cilt sağlığını iyileştirmek için üretilen kozmetik ürünleri,
- ✓ **Kenevir lifinden**, uzun ve dayanıklı yapısı sayesinde üretilen kaliteli ve farklı kullanım alanlarına sahip kağıtlar olarak sıralanabilir.



Şekil 27. (a, b)Püskürtmeyle kurutulmamış kenevir karboksimetil selülozu (c,d) püskürtmeyle kurutulmuş kenevir karboksimetil selülozun SEM görüntüleri

Sonuç olarak; Türkiye'de, Sıfır Atık Projesi kapsamında atıkların azaltılması ve geri dönüşümün teşvik edilmesi hedeflenmektedir. Sürdürülebilir hammaddelerin, özellikle kenevirin, daha yaygın kullanımı bu hedeflere ulaşmada kritik bir rol oynayacaktır. Kenevirin sıfır atık projelerine entegrasyonu, çevresel sürdürülebilirliği desteklerken ekonomik ve sosyal faydalar da sağlayacaktır. Buna ilaveten sıfır atık araştırmalarının yaygınlaşması, sürdürülebilir bir gelecek için gerekli bilgi, beceri ve motivasyonu artırarak çevreye duyarlı davranışların benimsenmesine ve gelecek nesillere aktarılmasına önemli katkılar sağlayacaktır.

KAYNAKLAR

Aksoğan Korkmaz, A., Önal, Y. (2022). Kenevir Atıklarının Karbonizasyonu ve Aktif Karbon Eldesi. Konya Mühendislik Bilimleri Dergisi, c. 10, s. 1, 29-39, 2022. DOI: 10.36306/konjes.967894.

Altman, A.W., Kent-Dennis, C., Klotz, J.L., McLeod, K.R.,Vanzant, E.S. & Harmon, D.L.(2024). Review: Utilizing industrial hemp (Cannabis sativa L.) by-products in livestock rations. Animal Feed Science and Technology 307 (2024) 115850. https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2023.115850

Amaduccia, S., Scordia, D., Liu, F.H., Zhang, Q., Guo,.H., Testa, G. & Cosentino S.L.(2015). Key cultivation techniques for hemp in Europe and China. Industrial Crops and Products 68 (2015) 2–16. http://dx.doi.org/10.1016/j.indcrop.2014.06.041

Amode, N.S. & Jeetah, P.(2021). Paper Production from Mauritian Hemp Fibres. Waste and Biomass Valorization (2021) 12:1781–1802. https://doi.org/10.1007/s12649-020-01125-y

Aryal, K., Maraseni, T.,Kretzschmar, T.,Chang, D., Naebe, M.,Neary, L. & Ash, G.(2024). Knowledge mapping for a secure and sustainable hemp industry: A systematic literature review. Case Studies in Chemical and Environmental Engineering 9 (2024) 100550. https://doi.org/10.1016/j.cscee.2023.100550

Brito Siqueira, A. L.G., Cremasco, P.V.V., Bahú, J. O., Silva, A. P., Andrade, L. R. M., Gonzalez, P.G.A., Crivellin, S., Concha, V. O. C., Krambeck, K., Lodi, L., Severino, P. & Souto, E.B.(2023). Phytocannabinoids: Pharmacological effects, biomedical applications, and worldwide prospection. Journal of Traditional and Complementary Medicine 13 (2023) 575e587. https://doi.org/10.1016/j.jtcme.2023.08.006

Cabrera-Villamizar, L., Pereira, J.F., Castanedo, M., Lopez-Rubio, A., Fabra, M.J. (2025). Hemp cellulose-based aerogels and cryogels: From waste biomass to sustainable absorbent pads for food preservation. Carbohydrate Polymers 348 (2025) 122887. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2024.122887

Callaway J.C.(2004). Hempseed as a nutritional resource: An overview. Euphytica 140: 65–72, 2004. https://doi.org/10.1007/s10681-004-4811-6.

Colic, M.L., Jukic, M., Nakov, G., Lukinac, J., Antunovic, M.(2024). Sustainable Utilization of Hemp Press Cake Flour in Ice Cream Production: Physicochemical, Rheological, Textural, and Sensorial Properties. Sustainability 2024, 16, 8354. https://doi.org/10.3390/su16198354

Crini, G., Lichtfouse, E., Chanet, G., Morin-Crini, N.(2020). Applications of hemp in textiles, paper industry, insulation and building materials, horticulture, animal nutrition, food and beverages, nutraceuticals, cosmetics and hygiene, medicine, agrochemistry, energy production and environment: a review. Environmental Chemistry Letters (2020) 18:1451–1476. https://doi.org/10.1007/s10311-020-01029-2

Cognitive Market Research. Hemp Market Report. (2024). https://www.cognitivemarketresearch.com/hemp-market-report/ Erişim: 21.10.2024

Çalgeriş, İ. (2010). Fındık Kabuğundan Lignin İzolasyonu ve Lignin/Nişasta Biyoçözünür Polimerlerin Elde edilmesi. Marmara Üniversitesi. Yüksek Lisans Tezi.

Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı (CSB) (2025). https://cygm.csb.gov.tr/sifir-atik-ile-geri-kazanim-orani-35e-ulasti.-haber-286897/Erişim:27.03.2025

Dresboll, D.B. & Thorup-Kristensen, K.(2005). Structural differences in wheat (Triticum aestivum), hemp (Cannabis sativa) and Miscanthus (Miscanthus ogiformis) affect the quality and stability of plant based compost. Scientia Horticulturae 107 (2005) 81–89. doi:10.1016/j.scienta.2005.06.006

Duangrin, M., Pisutpiched, S., Deenu, A., Kamthai, S.(2024). Ultrasonic-assisted synthesis for the production of green and sustainable hemp carboxymethyl cellulose. International Journal of Biological Macromolecules 280 (2024) 135610. https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.135610.

Enarevba, D.R. & Haapala, K.R.(2024). The Emerging Hemp Industry: A Review of Industrial Hemp Materials and Product Manufacturing. AgriEngineering 2024,6, 2891–2925. https://doi.org/10.3390/agriengineering6030167

Farinon, B., Molinari, R., Costantini, L. & Merendino, N.(2020). The Seed of Industrial Hemp (Cannabis sativa L.):Nutritional Quality and Potential Functionality for Human Health and Nutrition. Nutrients 2020, 12, 1935. doi:10.3390/nu12071935.

Fei, M., Liu, W., Shao, L., Cao, Y., Bliss, B. J., Zhao,B. & Zhang, J.(2024). Hemp fiber reinforced dual dynamic network vitrimer biocomposites with direct incorporation of amino silane. Chemical Engineering Journal 480 (2024) 148091. https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.148091

Food and Ariculture Organization of the United Nations (FAO). (2024). https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL/visualize/ Erişim: 23.10.2024.

Gizlenci, Ş., Acar, M., Yiğen, Ç. & Aytaç, S.(2019).Kenevir Tarımı. Karadeniz Tarımsal Araştırma Enstitüsü Müdürlüğü.

Helvacı, N.O. & Korkmaz, Y.(2024). Çevre Dostu Hammaddelerden Üretilen Aktif Karbonlar ve Uygulama Alanları. Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 27(4), 1514-1528. https://doi.org/10.17780/ksujes.1459927.

Hossain, Z. Md., Wu, W., Xu, W.Z., Chowdhury, M. B. I., Jhawar, A.K. Machin, D., Charpentier, P.A.(2018). High-Surface-Area Mesoporous Activated Carbon from Hemp Bast Fiber Using Hydrothermal Processing. C 2018, 4, 38. doi:10.3390/c4030038.

Grand View Research. Industrial Hemp Market Size, Share & Trends Analysis Report By Application (Animal Care, Textiles, Food & Beverages), By Product (Seeds, Fiber, Shivs), By Region (North America, Asia Pacific), And Segment Forecasts, 2024 – 2030. (2024). https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/industrial-hemp-market/ Erişim: 21.10.2024

Jingjing, L. (2011). Isolation of Lignin from Wood, 57 pages, 3 appendices Saimaa University of Applied Sciences, Imatra Unit of Technology, Degree Programme in Paper Technology Bachelor's Thesis.

Kamle,M., Mahato, D.K.,Sharma, B., Gupta, A., Shah, A.K., Mahmud, M.M.C.,Agrawal, S., Singh, J., Rasane, P., Shukla, A.C. & Kumar, P.(2024). Nutraceutical potential, phytochemistry of hemp seed (Cannabis sativa L.) and its application in food and feed: A review. Food Chemistry Advances 4 (2024) 100671. https://doi.org/10.1016/j.focha.2024.100671

Kaya, S. & Öner, E.(2020). Kenevir Liflerinin Eldesi, Karakteristik Özellikleri ve Tekstil Endüstrisindeki Uygulamaları. Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 11(1): 108-123 (2020). https://doi.org/10.29048/makufebed.693406

Kymalainen, H.R. & Sjoberg A.M.(2008). Flax and hemp fibres as raw materials for thermal insulations. Building and Environment 43 (2008) 1261–1269. doi:10.1016/j.buildenv.2007.03.006.

Manaia, J.P., Manaia, A.T. & Rodriges, L.(2019). Industrial Hemp Fibers: An Overview. Fibers 2019, 7, 106; doi:10.3390/fib7120106.

Markets and Markets. Indusrial Hemp Market. (2024). https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/industrial-hemp-market-84188417.html/ Erişim: 21.10.2024.

McPartland, J.M. (2018). Cannabis Systematics at the Levels of Family, Genus, and Species. Cannabis and Cannabinoid Research Volume 3.1, 2018. http://online.liebertpub.com/doi/10.1089/can.2018.0039

Mechoulam, R.(2019). Cannabinoids as Therapeutic Agents. CRC Press; 2019.

Muhit, I.B., Omairey, E.L. & Pashakolaie v.G.(2024). A holistic sustainability overview of hemp as building and highway construction materials. Building and Environment 256 (2024) 111470. https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.111470.

Onay, A., Yıldırım H. & Ekinci, R.(2020). KENEVİR (Cannabis sativa L.).Palme Yayınları. Ankara. https://www.researchgate.net/publication/347916067_KENEVIR_Cannabis_sativa_L.

Palmieri, B., Laurino, C. & Vadala, M.(2019). A therapeutic effect of cbd-enriched ointment in inflammatory skin diseases and cutaneous scars. Clin Ter 2019; 170 (2):e93-99. doi: 10.7417/CT.2019.2116.

Prade, T., Svensson, S.E. & Mattsson, J.E.2012. Energy balances for biogas and solid biofuel production from industrial hemp. Biomass and Bioenergy 40(2012) 36-52. doi:10.1016/j.biombioe.2012.01.045

Pereira, J.F., Núnez, E., Reyes, A., Mali, S., Lopez-Rubio, A. & Fabra, M.J.(2024). On the use of lignocellulosic hemp fibers to produce biodegradable cost-efficient biocomposites. Future Foods 10 (2024) 100507. https://doi.org/10.1016/j.fufo.2024.100507

Russo, E. & Guy, G.W.(2006).A tale of two cannabinoids: the therapeutic rationale for combining tetrahydrocannabinol and cannabidiol. Med Hypotheses.2006;66(2):234-246. doi:10.1016/j.mehy.2005.08.026.

Sangalang, R.H.(2021). Kapok Fiber- Structure, Characteristics and Applications: A Review. Orient. J. Chem., Vol. 37(3), 513-523 (2021). http://dx.doi.org/10.13005/ojc/370301

Sarno, L.D., Albuhairi, D. & Peres Medeiros, J.M.(2024). Exploring innovative resilient and sustainable bio-materials for structural applications: Hemp-fibre concrete. https://doi.org/10.1016/j.istruc.2024.107096.

Souza, A.A.F., Silva, A.F.M., Abreu, L.R. (2021). Medicinal uses of Cannabis sp. Res Soc Devel. 2021;10(7):e58010716930-e58010716930. https://doi.org/10.33448/rsd-v10i7.16930.

Şakiroğlu, M.(2023). A brief introduction to hemp cultivation, processing, trade, and publication in the ottoman era. Turkish Journal of Scientific Reviews E-ISSN: 2146-0132 16(1): 1-9, 2023. https://derleme.gen.tr/index.php/derleme/article/view/453.

Sheriff, T., Lin, M.J., Dubin, D. & Khorasani, H.(2020). The potential role of cannabinoids in dermatology. J Dermatolog Treat. 2021 Feb;32(1):128-129. doi: 10.1080/09546634.2019.1690620.

Sıfır Atık Yolculuğu. (2025). https://sifiratik.gov.tr/guncel/s%C4%B1f%C4%B1r-at%C4%B1k-yolculugu /Erişim: 25.03.2025.

Stenius, P.(2000). Forest Products Chemistry. Helsinki: Fapet Oy.

Tiret, J.S. (2002). Kuzey-Orta Türkiye'de Kenevir (Cannabis sativa L.) Yetiştiriciliği. Endüstriyel Kenevir Dergisi *7* (2), 73–81. https://doi.org/10.1300/J237v07n02_07

Trade statistics for international business development (TRADEMAP). (2024). https://www.trademap.org/Country_SelProduct_TS.aspx?nvpm=1%7c%7c%7c%7c%7c5302%7c%7c%7c4%7c1%7c1%7c2%7c2%7c1%7c2%7c2%7c1%7c1/Erişim: 22.10.2024.

Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK). (2024). https://data.tuik.gov.tr/Kategori/GetKategori?p=Tarim-111/ Erişim:28.10.2024.

Vincenzi, K. & Tosti, A.(2020). Efficacy and Tolerability of a Shampoo Containing Broad-Spectrum Cannabidiol in the Treatment of Scalp Inflammation in Patients with Mild to Moderate Scalp Psoriasis or Seborrheic Dermatitis. Skin Appendage Disord (2020) 6 (6): 355–361.https://doi.org/10.1159/000510896

Viscusi, G., Adami, R.,Gorrasi, G.(2021). Fabrication of rice flour films reinforced with hemp hurd and loaded with grapefruit seed oil: A simple way to valorize agro-waste resources toward low cost materials with added value. Industrial Crops & Products 170 (2021) 113785. https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2021.113785

Yao, Y., Jian-bo, Z., Hao, W., Ying, Z., Li-wei, L., Jiang, Y., Ting-ting, Y., Jiao,X. & Bao-shan,Y.(2017). Manufacturing technology and application of hemp cigarette paper with dense ash integration. Earth and Environmental Science 61(2017) 012078. doi:10.1088/1755-1315/61/1/012078

Yu, Y., Zhan, J.B., Wan, H., Zhang, Y., Li, L.W., Yu, J., Yu, T.T., Xie, J., Yue, B.S. (2017). Manufacturing technology and application of hemp cigarette paper with dense ash integration. In: 3rd international conference energy material environmental engineering. Book series: IOP conference series earth and environmental science 61. UNSP 012078. https ://doi.org/10.1088/1755-1315/61/1/012078

Zugic, A., Martinovic, M., Tadic, V., Rajkovic, M., Racic, G., Nesic, I. & Koren, A.(2024). Comprehensive Insight into Cutaneous Application of Hemp. Pharmaceutics 2024, 16, 748. https://doi.org/10.3390/pharmaceutics16060748