



KAHRAMANMARAŞ SÜTÇÜ İMAM ÜNİVERSİTESİ

e-ISSN 1309-1751

Mühendislik Bilimleri Dergisi Journal of Engineering Sciences

2024

SAYI / NUMBER : 4

CILT / VOLUME : 27



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.



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
eserver@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. Zeynep KILIÇ
Civil Eng.
Adıyaman Univ. TURKEY
zkilic@adiyaman.edu.tr

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

Res. Assist. Elif ÇELİK
Technical Manager
KSU Univ. TURKEY
elifcelik@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

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. Ayhan ÖZDEMİR

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

Prof. Dr. Hüseyin AKILLI

Dep. of Mechanical Eng.
ÇU Univ.
Adana, TURKEY
hakilli@cu.edu.tr

Prof. Dr. Mehmet KORÜREK

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

Prof. Dr. Yasemin KORKMAZ

Dep. of Textile Eng.
KSU Univ.
TURKEY
ykorkmaz@ksu.edu.tr

Prof. Dr. Ahmet PINARBAŞI

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

Prof. Dr. S. Serhat ŞEKER

Dep. Of Elect. Eng.
İTU Univ. İstanbul.
TURKEY
sekers@itu.edu.tr

Prof. Dr. Şerafettin EREL

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

Assoc. Prof. Dr. Mustafa ONAT

Dep. of Computer Eng.
Marmara Univ.
İstanbul. TURKEY
monat@marmara.edu.tr

Prof. Dr. Eyüp DEBİK

Dep. of Environmental Eng.
Yıldız Technical Univ.
İstanbul. TURKEY
debik@yildiz.edu.tr

Prof. Dr. Fan MIZI

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

Prof. Dr. A. Fevzi BABA

Dep. of Elect. & Elcn. Eng.
Marmara Univ. İst.,
TURKEY
fbaba@marmara.edu.tr

Dr. Amit CHAUDHRY

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

Assoc. Prof. Dr. Nazmi EKREN

Dep. of Elect. & Elcn. Eng.
Marmara Univ.
İstanbul, TURKEY
nekren@marmara.edu.tr

Prof. Dr. Mustafa YAZICI

Dep. of Physics Education.
KSU Univ.
K.Maras. TURKEY
yazici@ksu.edu.tr

Prof. Dr. Selim AY

Dep. Of Elect. Eng.
YTU Univ.
İstanbul. TURKEY
selimay@yildiz.edu.tr

Prof. Dr. Musa GÖĞEBAKAN

Dep. of Physics
KSU Univ.
K.Maraş, TURKEY
gogebakan@ksu.edu.tr

Prof. Dr. Murat PALA

Dep. of Civil Eng.
Adıyaman Univ.
Adıyaman. TURKEY
pala@adiyaman.edu.tr

Prof. Dr. İ.Taner OKUMUŞ

Dep. of Computer Eng
KSU Univ.
K.Maraş. TURKEY
iokumus@ksu.edu.tr



Kahramanmaraş Sütçü İmam University Journal of Engineering Sciences



BU SAYIYA (CİLT 27 SAYI 4) KATKI VEREN HAKEMLER

- | | |
|--------------------------------|-----------------------------|
| Habib DOĞAN | Furkan DİNÇER |
| Hilal KOÇ POLAT | Ayhan YAZGAN |
| Mustafa TEKİN | Serhat Berat EFE |
| Ercan İZGİ | Fuad Alhaj OMAR |
| Hakan İŞIKER | Burak ÖZTAŞ |
| Esra KARACA | Halil İbrahim ÇELİK |
| Halil İbrahim FEDAKAR | Hanif ÇANAKÇI |
| Arzu OKUCU | Murat ÇEVİKBAŞ |
| Cenk ÖCAL | Selma DEMER |
| Sertaç TUHTA | Zeki KARACA |
| Zeliha TONYALI | Cengizhan DURUCAN |
| Adem SOLAK | İlker Bekir TOPÇU |
| Meral OLTULU | Neyran ALTINKAYA |
| Tufan ÖZTÜRK | Barış CELBEK |
| Duygu ERTÜRKMEN | Şahin SÖZEN |
| Gökhan Barış SAKCALI | Sadık Alper YILDIZEL |
| Mustafa Haluk SARAÇOĞLU | Fahri BİRİNCİ |
| Evren SEYREK | Mehmet Emin ÖNCÜ |
| Murat YAKAR | Taner TUNCER |
| Mustafa Alptekin ENGİN | Özlem POLAT |
| Ahmet SAYGILI | Nihat Eren ÖZMEN |
| Metin YANGIN | Kaplan KAPLAN |
| Sercan YALÇIN | Erdal ÖZBAY |
| Fatma AKALIN | Hakan AKTAŞ |
| Ali ÇETİNKAYA | Eyüp ERÖZ |
| Öznur ŞENGEL | Ahmet Ali SÜZEN |
| Esra SÖĞÜT | Rabia KORKMAZ TAN |
| Duygu ÇELİK ERTUĞRUL | Mansur BEŞTAŞ |

Sefa TUNÇER
Hasan BADEM
Bayram KÖSE
Abdullah ÇALIŞKAN
Fahriye GEMCİ
Ayşe BÜYÜKÜNSAL
Ümit ÜNVER
Rükan GENÇ ALTÜRK
Uğur DEMİR
Gökhan CEYHAN
Eyüp ATMACA
Mehtap TANYOL
Dilek Nur ÖZEN
Neslihan AYDIN
Burak HÜLAGÜ
M. Fatih ŞAHAN
Ahmet ÇETİN
Ahmet Hayrullah SEVİNÇ

Fatih ÇALLI
Kübra KAYSAL
Fatma Gülşah TAN
Nurullah ÇALIK
Selen AYAS
Safa NAYIR
Meliz Özge ALAŞ ÇOLAK
Dilek ANGIN
Mustafa DOLAZ
Kevser CIRIK
Sefa KOCABAŞ
Gülşad USLU ŞENEL
Ayşe Uğurcan ATMACA
Zerrin SERT
Latif Tibet AKTAŞ
Oğuz DOĞAN
Mete Han BOZTEPE
Muhammed Yasin DURGUN



İÇİNDEKİLER

- Investigation Of The Effects Of Different Feed Line Structures On Uwb Antenna Performance By Characteristic Mode Analysis**
Farklı Besleme Hattı Yapılarının Uwb Anten Performansı Üzerine Etkilerinin Karakteristik Mod Analizi İle İncelenmesi 1117-1127
Miraç Dilruba GEYİKOĞLU
- Hidroelektrik Santrallerde Türbin-Generatör Ünitesinde Verim İzleme Sisteminin Kurulması-Saha Çalışması**
Establishment Of Efficiency Monitoring System In Turbine-Generator Unit In Hydroelectric Power Plants-Case Study 1128-1144
Gökhan ÖZBEK, Sabir RÜSTEMLİ
- Da-Da Gerilim Yükselten Dönüştürücünün Kayan Kipli Kontrolünün Tasarım Ve Simülasyonu**
Design And Simulation Of Sliding Mode Control For Dc-Dc Boost Converter 1145-1161
Ömer Faruk ÇİRİŞ, Süleyman ADAK, Hasan CANGİ, Ramazan TAŞALTİN
- Prototype Manufacturing Of A New Dynamic-Based Pressure Measurement Test Device For Medical And Textile Applications**
Medikal Ve Tekstil Uygulamalarına Yönelik Yeni Bir Dinamik Tabanlı Basınç Ölçüm Test Cihazının Prototip İmalatı 1162-1172
Nazime SEYREK KURBAN, Osman BABAARSLAN
- The Effect Of Asphalt Waste And Afşin-Elbistan Fly Ash On The Engineering Features Of Sandy-Clay Soils**
Asfalt Atığı Ve Afşin-Elbistan Uçucu Külünün Kumlu-Kil Zeminlerin Mühendislik Özellikleri Üzerindeki Etkisi 1173-1184
Muhammet ÇINAR
- Assessment Of Environmental Impacts And Environmental Flow For River Type Hydroelectric Power Plant: The Case Of Korkuteli Stream (Antalya)**
Nehir Tipi Hidroelektrik Santrali İçin Çevresel Etkilerin Ve Çevresel Akışın Değerlendirilmesi: Korkuteli Çayı Örneği (Antalya) 1185-1196
İbrahim İskender SOYASLAN
- The Effects Of The Earthquake Incident Angle On An Rc Building**
Deprem Yönlendirme Açısının Betonarme Bir Bina Üzerinde Etkileri 1197-1211
Soukaina MELLOUK, Ebru HARMANDAR

- Isı Ve Ses Yalıtımında İnovatif Çözüm Olarak Perlit: Derleme Ve İnceleme
Perlite As An Innovative Solution In Heat And Sound Insulation: A Review And Analysis 1212-1231
Necim KAYA, Berfin RAMAZANOĞLU
- İnşaat Sektörü Yapım İşlerinde Ergonomik Riskler Ve Önlemler: İstanbul Metro Şantiyesi Örneği
Ergonomic Risks And Precautions In Construction Works: Example Of Istanbul Metro
Construction Site 1232-1247
Gülizar HOŞTEN, Canan AYDOĞDU
- Effect Of Mechanical Properties Of Filling Material On Static And Dynamic Behavior Of Masonry
Arch Bridges 1248-1266
Dolgu Malzemesinin Mekanik Özelliklerinin Yığma Kemer Köprülerin Statik Ve Dinamik Davranışı
Üzerindeki Etkileri
Ali Ekber SEVER
- Farklı Boyutlarda Cam Lifi Takviyeli Alçı Esaslı Kompozit Harçların Mekanik Ve Termal
Performanslarının Karşılaştırılması Üzerine Teknik Bir İrdeleme 1267-1284
A Technical Evaluation On The Comparison Of The Mechanical And Thermal Performances Of
Different Size Glass Fibers Reinforced Gypsum Based Composite Mortars
Ali KAYA, Lütfullah GÜNDÜZ
- Coğrafi Bilgi Sistemleri Ortamında Deprem Riskinin Değerlendirilmesi Diyarbakır Örneği
Assessment Of Earthquake Risk In Geographic Information Systems Environment Diyarbakir
Example 1285-1296
Ali EM, Burak GÜL
- Diagnosis And Classification Of Diabetic Retinopathy With Yolov8-Based Deep Learning Model
Yolov8 Tabanlı Derin Öğrenme Modeli ile Diyabetik Retinopati Teşhisi ve Sınıflandırılması 1297-1305
Ömer ŞANVER, Ahmet SAYGILI
- Diagnosis Of Prostate Cancer With Enhanced Efficiency Using Fine-Tuned CNN And Transfer
Learning 1306-1319
İnce-Ayar İle Etkinliği Artırılmış ESA Ve Transfer Öğrenme Yöntemleriyle Prostat Kanserinin
Tespiti
Murat SARIATEŞ, Erdal ÖZBAY
- Diyabet Risk Durumunun Belirlenmesinde Sınıflandırma Algoritmalarının Performanslarının
Kapsamlı Bir Şekilde Karşılaştırılması 1320-1333
A Comprehensive Comparison Of The Performance Of Classification Algorithms In Determining
Diabetes Risk Status
Rukiye UZUN ARSLAN, İrem ŞENYER YAPICI, Okan ERKAYMAZ
- Deprem Seviye Sınıflandırması İçin Hibrit Bir ConvLstm Modeli: Karşılaştırmalı Bir Analiz
A Hybrid ConvLstm Model For Earthquake Level Classification: A Comparative Analysis 1334-1349
Anil UTKU
- Enhancing Deep Learning Performance Through A Genetic Algorithm-Enhanced Approach:
Focusing On Lstm 1350-1360
Genetik Algoritma Destekli Bir Yaklaşım İle Derin Öğrenme Performansının Geliştirilmesi: Lstm
Odaklı
Tarık Üveys ŞEN, Mehmet Gökhan BAKAL

Kök Şifre Algoritma Tasarımı Ve Performans Analizi Root Password Algorithm Design And Performance Analysis Çağlar AKTÜRK, Ahsen GÖKBOĞA, Zeynep YEKELER	1361-1374
Siberuzamda Suç Tipolojileri Ve Siber İletişim Tabanlı Çözümleme Modelinin Analizi Typologies Of Crime In Cyber Space And Analysis Of Cyber Communication Based Analysis Model Mustafa AYDEMİR	1375-1400
İstem Mühendisliğinin Büyük Dil Modellerinin Performansındaki Rolü: Analiz Ve Uygulama Örnekleri The Role Of Prompt Engineering In The Performance Of Large Language Models: Analysis And Application Examples Fatma Gülşah TAN, Asım Sinan YÜKSEL, Muhammed Abdulhamid KARABIYIK	1401-1420
A Secure Online Examination System Using Smart Contracts Akıllı Sözleşmeler Kullanımıyla Güvenli Bir Çevrimiçi Sınav Sistemi Özgür ÖKSÜZ	1421-1436
Farklı Çaprazlama Teknikleri Kullanan Dağınık Arama Algoritması İle Evrişimli Sinir Ağlarında Hiper Parametre Optimizasyonu Hyperparameter Optimization In Convolutional Neural Networks With Scatter Search Algorithm Using Different Crossover Techniques Hediye ORHAN, Dilara Sevim POLAT, Hüseyin HAKLI	1437-1450
Detection Of Dust On Solar Panels With Deep Learning Güneş Panelleri Üzerindeki Tozun Derin Öğrenme İle Tespiti Tuba SEFER, Mahmut KAYA	1451-1464
Kan Hücrelerinin Optimum Odaklı Görüntülenmesi İçin Derin Öğrenme Tabanlı Yaklaşımın Geliştirilmesi Development Of A Deep Learning-Based Approach For Optimal Focused Imaging Of Blood Cells Fatma Tuana DOĞU, Zeinab DANAEİ, Hülya DOĞAN, Ramazan Özgür DOĞAN, Feride Sena SEZEN	1465-1476
Kokleogram Özellikleri İle Derin Öğrenme Tabanlı Ses Birleştirme Sahteciliği Tespiti Detection Of Audio Splicing On The Basis Of Deep Learning With Cochleogram Features Arda ÜSTÜBİOĞLU	1477-1489
Bina Enerji Performansı Artırma Uygulamalarının Isıl Geçirgenlik Katsayısına Etkisi Effect Of Building Energy Performance Increasing Applications On Thermal Transmittance Value Rukiye KOÇKAR TUĞLA	1490-1500
Examining Carbon Quantum Dots Research In Turkey: A Scientific Mapping Analysis Türkiye'deki Karbon Kuantum Noktaları Araştırmalarının İncelenmesi: Bilimsel Bir Haritalama Analizi Hasan ESKALEN, Mustafa KAVGACI, Şükrü ÖZĞAN	1501-1513
Çevre Dostu Hammaddelerden Üretilen Aktif Karbonlar Ve Uygulama Alanları Active Carbons Produced From Eco-Friendly Raw Materials And Their Applications Naciye Olcay HELVACI, Yasemin KORKMAZ	1514-1528

Espey Kolemanit Atıklarının Mikrodalga Yöntemiyle Zenginleştirilmesinde Cevap Yüzey Yönteminin (Rsm) Uygulanması Application Of The Response Surface Methodology (Rsm) To The Enrichment Of Espey Colemanite Wastes By Microwave Arzu KAHVECİOĞLU, Kırali MÜRTEZAOĞLU, Zehra ZEYBEK, Ahmet AYDIN	1529-1543
Atıksudan Boya Giderimindeki Gelişmeler: Adsorpsiyon Teknolojisi Ve Geleceğe Yönelik Beklentiler Advances In Dye Removal From Wastewater: Adsorption Technology And Future Prospects Hakan YILDIZ	1544-1556
Sürdürülebilir Kentsel Biyoatık Yönetimi Sustainable Management Of The Municipal Biowastes Süreyya ALTIN	1557-1570
Direct Hf Etching-Derived $Ti_3C_2T_x$: A Potent Adsorbent For Basic Red 46 Dye Doğrudan Hf Aşındırmasıyla Elde Edilmiş $Ti_3C_2T_x$: Basic Red 46 Boyası İçin Güçlü Bir Adsorban Yunus AKSOY	1571-1581
Energy And Environmental Analysis Of Transcritical CO_2 Supermarket Refrigeration Cycles With Dedicated Mechanical Subcooler Özel Mekanik Aşırı Soğutuculu Transkritik CO_2 Süpermarket Soğutma Çevrimlerinin Enerji Ve Çevresel Analizi Oğuz ÇALIŞKAN, H. Kürşad ERSOY	1582-1601
Elips Şekli Boru Demeti Isı Değiştiricisinde Akış Ve Isı Transferi Flow And Heat Transfer In Ellipse-Shaped Tube Bank Heat Exchangers Muhammet Nasif KURU, Mehmet ÖZKARAKOÇ, Şaban ÜNAL, Mehmet Tahir ERDİNÇ, İlyas KARASU, Orhan AYDIN	1602-1620
Hardox 450, Alüminyum Balpeteği Ve Aramid/Epoksi Tabakalı Hibrit Zırh Plakalarının Balistik Davranışının İncelenmesi Investigation Of Ballistic Behavior Of Hardox 450, Aluminium Honeycomb And Aramid/Epoxy Layer Hybrid Armour Plates Mehmet ÖZER, Kaan FERİKEL, İbrahim Kutay YILMAZÇOBAN, Tayfur Kerem DEMİRCİOĞLU, Fatih BALIKOĞLU, Can ÇİVİ	1621-1632
Enhancing Thermal Properties Of Fiber-Reinforced Polymer Composites To Be Used In Battery Casings: A Review Batarya Muhafazalarında Kullanılabilen Elyaf Takviyeli Polimer Kompozitlerin Isıl Özelliklerinin İyileştirilmesi Hakkında Bir Derleme Orhun Cem GÖKCİLER, Necdet GEREN	1633-1646
Kocaeli Kandıra Babaköy Bazaltının Asfalt Agregası Olarak Kullanılabilirliği Ve Çorlu Karatepe Bazaltı İle Karşılaştırılması The Usability Of Kocaeli Kandıra Babaköy Basalt As Asphalt Aggregate And Comparison With Çorlu Karatepe Basalt Cansu Beren KUZLU, Ahmet KARAKAŞ	1647-1659



Kahramanmaraş Sütçü İmam University

Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 13.06.2023
Kabul Tarihi : 18.09.2024

Received Date : 13.06.2023
Accepted Date : 18.09.2024

INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF DIFFERENT FEED LINE STRUCTURES ON UWB ANTENNA PERFORMANCE BY CHARACTERISTIC MODE ANALYSIS

FARKLI BESLEME HATTI YAPILARININ UWB ANTEN PERFORMANSI ÜZERINE ETKİLERİNİN KARAKTERİSTİK MOD ANALİZİ İLE İNCELENMESİ

Miraç Dilruba GEYİKOĞLU¹ (ORCID: 0000-0003-2399-4741)

¹ Atatürk University, Electrical - Electronics Engineering, Erzurum, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Miraç Dilruba GEYİKOĞLU, dilruba_mdk@hotmail.com

ABSTRACT

This study investigates the effect of various feed topologies on the parameters of a novel ultra-wideband (UWB) antenna using characteristic mode analysis. The proposed design is guided by characteristic mode analysis, commencing with a basic square structure. Initially, a closed-form estimate of the resonance frequencies of the primary modes is provided for the square-shaped structure. Subsequently, the characteristic modes that resonate in the frequency spectrum are modified by introducing symmetrical square slots. To excite these modes and achieve a wideband antenna that encompasses the relevant spectrum, the geometry of the feeding line is altered and its effects are examined. The study incorporates two fundamental feed line geometries: tapered and traditional feed impedance lines. The proposed UWB antennas are fabricated and measured to validate their performance. According to the measurement results a wide impedance bandwidth of 147.82% at -10 dB reference ((0.9–6 GHz)) and stationary radiation patterns across the operating frequency band are obtained for the tapered feed line. The results demonstrate a significant advantage of the tapered feed line over the traditional impedance line. The results for the fabricated prototypes exhibit high similarity to the simulated results. The findings confirm the applicability of the mode analysis method.

Keywords: Characteristic modes analysis, UWB antenna, traditional feed line, tapered feed line

ÖZET

Bu makalede, farklı besleme topolojilerinin yenilikçi bir UWB anteninde performans üzerindeki etkisi, karakteristik mod analizi kullanılarak araştırılmaktadır. Önerilen tasarım, basit bir kare yapıdan başlayarak karakteristik mod analizi ile yönlendirilmiştir. İlk olarak, kare biçimli yapı için birincil modların rezonans frekanslarının kapalı form tahmini sağlanmıştır. Daha sonra, simetrik kare yuvalar eklenerek frekans spektrumunda rezonans durumunda olan karakteristik modlar değiştirilmiştir. Bu modları uyarmak ve ilgili spektrumu kapsayan geniş bantlı bir anten elde etmek için besleme hattının geometrisi değiştirilmiş ve etkileri incelenmiştir. İki temel besleme hattı geometrisi, konik ve geleneksel besleme empedans hattı içermektedir. Önerilen UWB antenin performansı doğrulamak için prototipleri üretilmiş ve gerçek zamanlı ölçümleri yapılmıştır. Ölçüm sonuçlarına göre, konik besleme hattı için -10 dB referansta (0,9–6 GHz) %147,82'lik geniş bir empedans bant genişliği ve çalışma frekans bandında sabit radyasyon desenleri elde edilmiştir. Sonuçlar, geleneksel empedans hattına göre konik besleme hattının açık avantajını göstermektedir. Üretilen prototiplerin sonuçları, simüle edilen sonuçlara son derece benzerlik göstermiştir. Sunulan sonuçlar, mod analizi yönteminin uygulanabilir olduğunu kanıtlamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Karakteristik mod analizi, UWB anteni, geleneksel besleme hattı, konik besleme hattı

INTRODUCTION

In the rapidly evolving wireless communication landscape, the utilization of antennas, which constitute a critical component of communication systems, has increased substantially in wireless applications such as Wi-Fi, WiMax, WLAN, LTE, 4G, and 5G. To adapt to available technology and integrate into emerging technologies, antennas must possess broadband properties. Broadband antennas also exhibit high data rates, stable radiation patterns, and compatibility with increased impedance bandwidth in practical applications. Various structures, including spiral antennas (Tran and Le, 2019), conical antennas (Dastranj and Bornapour, 2019), and log-periodic antennas (Amini and Oraizi, 2015), have been employed to achieve wide impedance bandwidth. However, these antennas (Tran and Le, 2019; Amini and Oraizi, 2015) often possess complex and sizable geometric structures. These characteristics present challenges in manufacturing and device integration. Due to their simple construction, patch antennas have been extensively studied, and their impedance bandwidths have been expanded using techniques such as slot coupling feed (Singh et al., 2020) and U-shaped slot feed (Ghimire and Choi, 2019). An alternative approach to designing wideband antennas is characteristic modes analysis (CMA) (Perli and Rao, 2019; Mohanty and Behera, 2021; Jabire et al., 2021). Characteristic mode theory provides profound insights into the potential propagation properties that occur on conductor structures. Desired antenna properties are obtained through systematic analysis of resonance modes on radiating elements. For each characteristic mode, information regarding mode resonance and resonance behavior is derived from characteristic angle, eigenvalue, and modal significance parameters. The antenna's characteristic modes are dependent on the size and structure of the radiating element. Characteristic mode theory has recently been applied to various antenna designs (Khan and Chowdhury, 2020). It is a frequently employed method for creating additional resonances (Behdad, and Sarabandi, 2004; Lu and Zhu, 2014), size minimization (Azadegan and Sarabandi, 2003), generating circular polarization (Mir et al., 2022), and increasing bandwidth (Bohannon and Bernhard, 2014; Lin and Chu, 2018).

In the working procedure, firstly, the main construction of the radiated factor is optimized at the design frequency, and the natural resonance modes are estimated. Secondly, a suitable supply shape is selected to activate the requested modes (Cabedo-Fabres et al., 2007). Furthermore, including the feeding construction alters the antenna radiating geometry and the characteristic modes, subsequently affecting the radiated mode. The mode analysis of the feed structure can be examined for changes in antenna performance parameters without modifying the main radiation pattern. One of the primary design objectives for high bandwidth is 50-50 impedance matching. Numerous miniaturization and matching techniques have been reported in the literature. These techniques include feed gap optimization (John and Ammann, 2005), beveling technique (Ammann, 2001), ground plane slots and DGS (Chakraborty et al. 2012), multiple feed configurations and orientations (Ul Haq et al. 2018). Additionally, the effect of dielectric substrate and antenna dimensions on input impedance and radiation beam width in tapered antennas is presented in (Sri-fi et al. 2011). Techniques such as exponential tapering (Manohar et al. 2013) and triangular tapering (Manohar et al. 2013) are utilized to increase the impedance bandwidth.

In this study, a novel ultra-wideband antenna with an omnidirectional radiation pattern is proposed, and its effects are presented in the literature by analyzing it in three different scenarios with CMA: 1) the antenna structure before including the feed structure (obtaining the overall antenna configuration), 2) the antenna operating parameters after including the traditional linear feed, and 3) the antenna operating parameters after including the tapered line feed. The following two benefits are achieved with the proposed method: first, the influence of feed structures is taken into account, and second, the CMA solved from the radiation and scattering problem is consistent, which provides the possibility of optimizing antenna radiation and scatter performance with the same CM set. All simulations are performed using CST Microwave Studio. The remainder of this paper is organized as follows. In Section II, the antenna configurations and an analysis of their CMA are presented. Section III describes the measurement results. Finally, section IV presents the results of this study.

CHARACTERISTIC MODE ANALYSIS

In recent years, characteristic mode analysis has been used to present the natural modes of the radiation structure in the field of antenna engineering. CMA is independent of material properties and feed type. By means of the impedance matrix, the eigenvalue problem is solved and the characteristic modes are obtained (Eq. 1). These eigenvalues potentially provide physical information about antenna structure and analysis (Shu and Zhang, 2022).

$$X(J_n) = \lambda_n R(J_n) \quad (1)$$

Here, the real and imaginary parts of the impedance matrix are denoted by R and X, respectively. By solving this equation, n. for mode is obtained eigenvalue λ_n and characteristic current (J_n). If the eigenvalue is zero at any frequency point, that frequency is considered resonance. The eigenvalue is used to comment on the energy and diffusion efficiency of the modes. There are two important parameters in CMA;

1) Modal Significance (MS): This shows how close all modes are to resonance at all frequencies. It reaches a maximum value of 1 at the resonant frequency λ_n . It decreases as the eigenvalue increases which is defined as (Eq. 2) (Shu and Zhang, 2022);

$$MS_n = 1/(1 + j(\lambda_n)) \quad (2)$$

2) Characteristic angle (α_n); the phase difference between the Eigen current and Eigen fields is modeled by the characteristic angle. If the characteristic angle is 180, there is an effective radiator condition and is calculated by (Eq. 3) ;

$$\alpha_n = 180^\circ - \tan^{-1}(\lambda_n) \quad (3)$$

In case of resonance, $\lambda_n = 0$, $MS=1$ ve $\alpha_n = 180^\circ$ (Shu and Zhang, 2022)

Antenna Design

The proposed antenna designs are shown in Figure 1. The current distribution is directed to the outer frame, by adding 3 symmetrical slots on a simple square monopole (Antenna 1). The square monopole structure is calculated with traditional equations (Balanis, 2016). The effect of the added slots is followed through the CMA. More modes need to be excited to achieve higher impedance matching at lower frequencies. For this reason, a ring was formed on the patch (Singh et al., 2022). The traditional feed line is added to the main configuration structure (Antenna 2). Additionally, the rectangular ground structure helps achieve 50- ohm impedance matching and a wider bandwidth. The next step converts the traditional feed line structure to a tapered line structure feed. This causes improved impedance matching (Antenna 3). The tapered feed line is calculated with E q. 4 and 5 (Manohar et al. 2013). Where L_f is the feed height, r_c is the effective area of the tapered feed line, gap is the feed gap and k is the regulation coefficient, which was experimentally selected as 1.18 for a dielectric layer with a dielectric constant ($\epsilon_r = 4.4$). The gap between the ground plane and the radiating patch plays an important role in impedance matching. The result will be an antenna with UWB characteristics. The geometry parameters of the proposed antenna are given in Table 1.

$$f = \frac{7.2}{(L_f + r_c + gap) \times k} \text{ GHz} \quad (4)$$

$$r_c = \frac{\left(\frac{W_{f2} + W_{f3}}{2}\right)}{2 \times \pi} \quad (5)$$

Table 1. The Geometry Parameters of the Proposed Antenna

Parameters	L_1	L_2	L_3	L_f	W_g	W_{g1}	W_{g2}	W_1	W_2	W_{f1}	W_{f2}	W_{f3}
Dimensions (mm)	4	35.9	3.5	4.4	0.5	1.5	0.05	17.5	35.5	0.38	0.38	0.12

Feed Structure Modifications

The feed structure is an important design factor in antennas (Adams et al., 2022). It contributes to the performance analysis as the choice of feed affects radiation, power transfer, and impedance matching. In this study, Characteristic Mode Analysis (CMA) studies are presented for tapered and traditional impedance feed line geometries. The objective is to examine the changes in antenna performance parameters with CMA by combining the antenna configuration with the feed lines. Initially, CMA analysis is performed on Antenna 1. The surface current distribution, modal significance, characteristic angle, and radiation pattern for the first four modes are examined, respectively. According to the 0.707 modal significance resonance condition, four distinct resonance points have formed in Antenna-1 within the bandwidth range (Figure 2-a). At 0.707 MS, it corresponds to the half-power bandwidth. Above this threshold value, the antenna is considered to radiate significant modes.

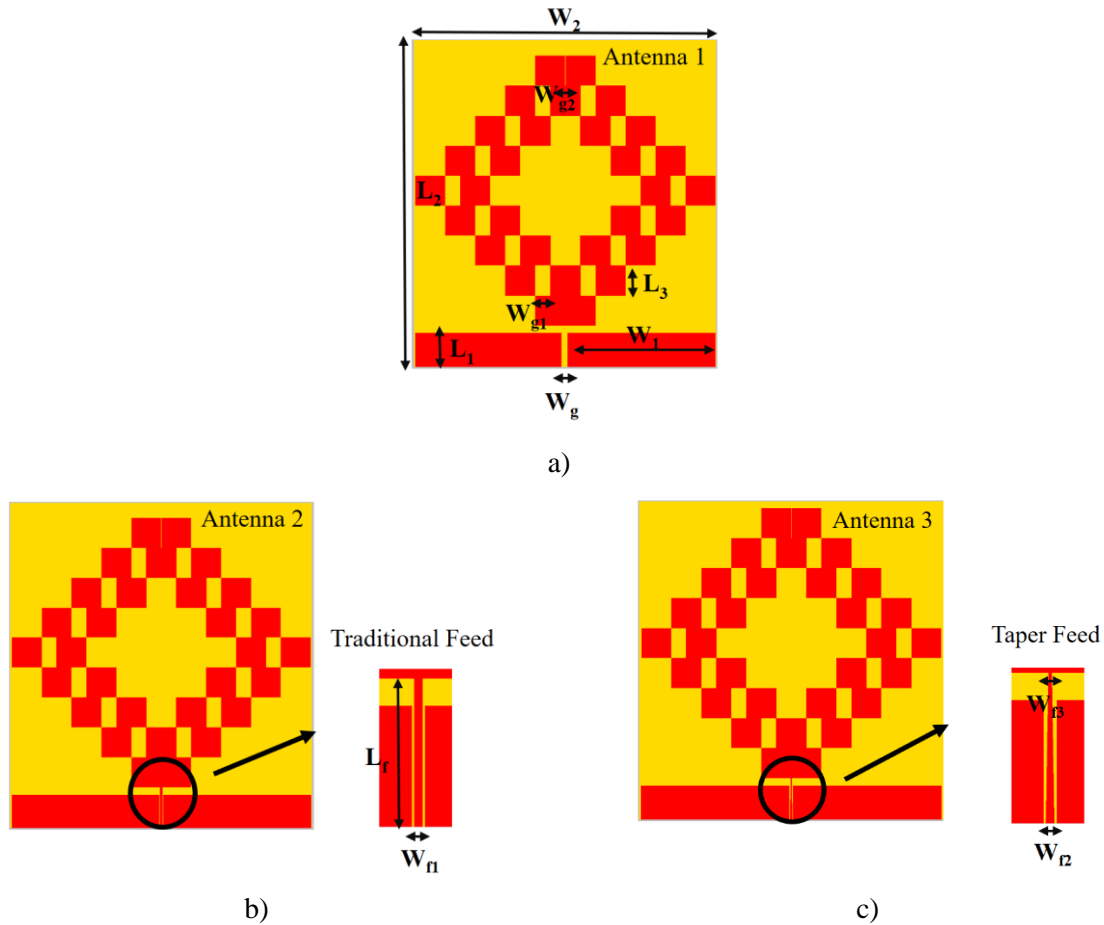


Figure 1. Geometry of Antennas a) Antenna 1, b) Antenna 2, and c) Antenna 3

Examining α_n graph of Antenna-1 (Figure 3-a), four different resonance formations have been observed at points consistent with MS. Additionally, the surface current distribution and radiation patterns are by these four resonances (Figure 4-a). The traditional feed (Antenna 2) and tapered feed (Antenna 3) have been added to the main configuration (Antenna 1), respectively, and the changes made to antenna characteristics have been examined. According to the MS results, with the addition of the traditional feeding structure (Figure 2-b), it has been observed that the bandwidth increased in the resonances. Examining the α_n graph of Antenna-2 (Figure 3-b), it has been observed that the dominant modes increased the bandwidth to the 3-6 GHz range. The linearly varying surface current distributions also showed variations in radiation patterns (Figure 4-b). For Antenna 3, when examining the MS (Figure 2-c) and α_n (Figure 3-c) graphs, it is observed that resonance frequency occurs in the range of 0.9-6 GHz. A wide bandwidth has been obtained through the Antenna-3 structure. A higher efficiency radiation pattern has been obtained with circularly varying surface current distributions (Figure 4-c).

MEASUREMENT RESULTS

The prototypes of the proposed antennas are produced on FR-4 ($\epsilon_r = 4.4, h = 1.55 \text{ mm}$) substrate using a PCB scraper, and real-time measurements are taken. The produced antenna prototypes are given in Figure 5. The antenna parameters are measured with an N9928A Field Fox vector network analyzer in a semi-anechoic chamber (Figure 6). The reflection coefficient, efficiency, peak gain, and axial ratio parameters are examined. The results are given in Figure 7 and Figure 8, respectively. According to these results, the antenna fed with the tapered feed line shows a perfect resonance with 147.82% BW at -10 dB reference. In addition, gain between 1.2-6.9 dB and efficiency above 85% are measured. According to the axial ratio values, it is linear polarization. It is seen that the simulation and measurement results are compatible. In addition, the radiation patterns obtained for 2.45 GHz are given in Figure 9.

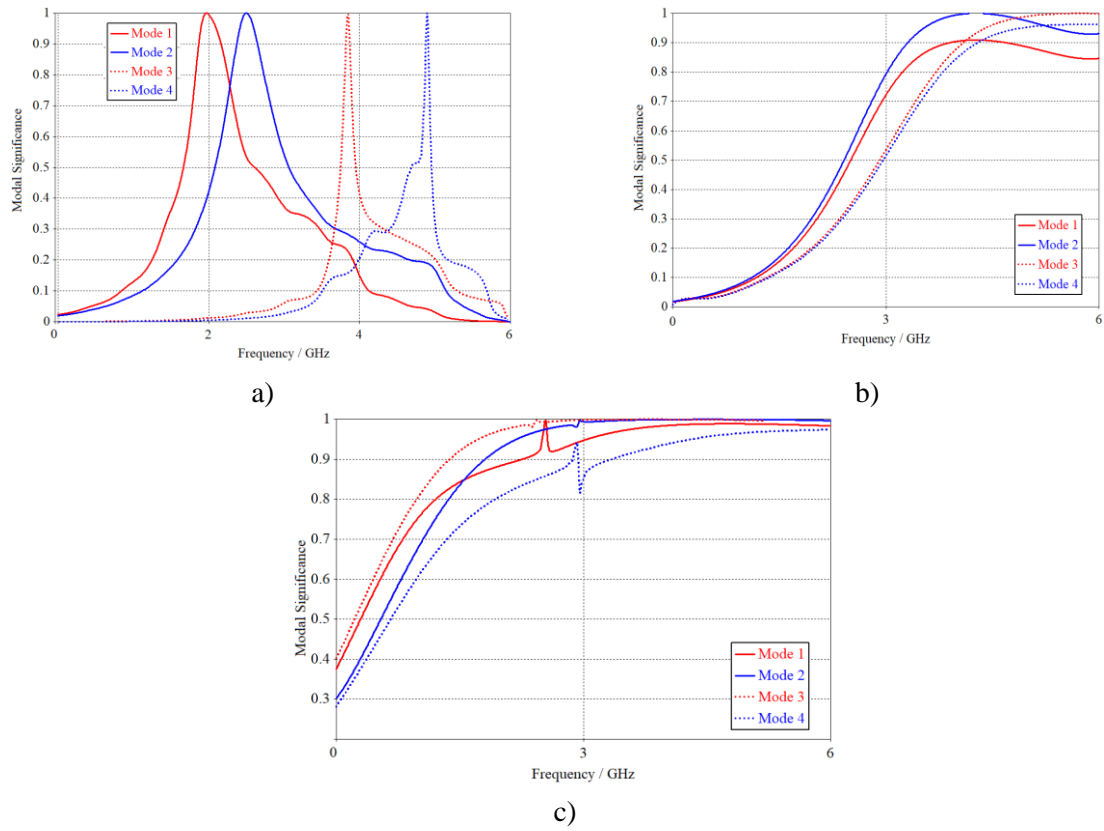


Figure 2. The MS of CMA Analysis Results for Four Modes a) Antenna 1, b) Antenna 2, c) Antenna 3

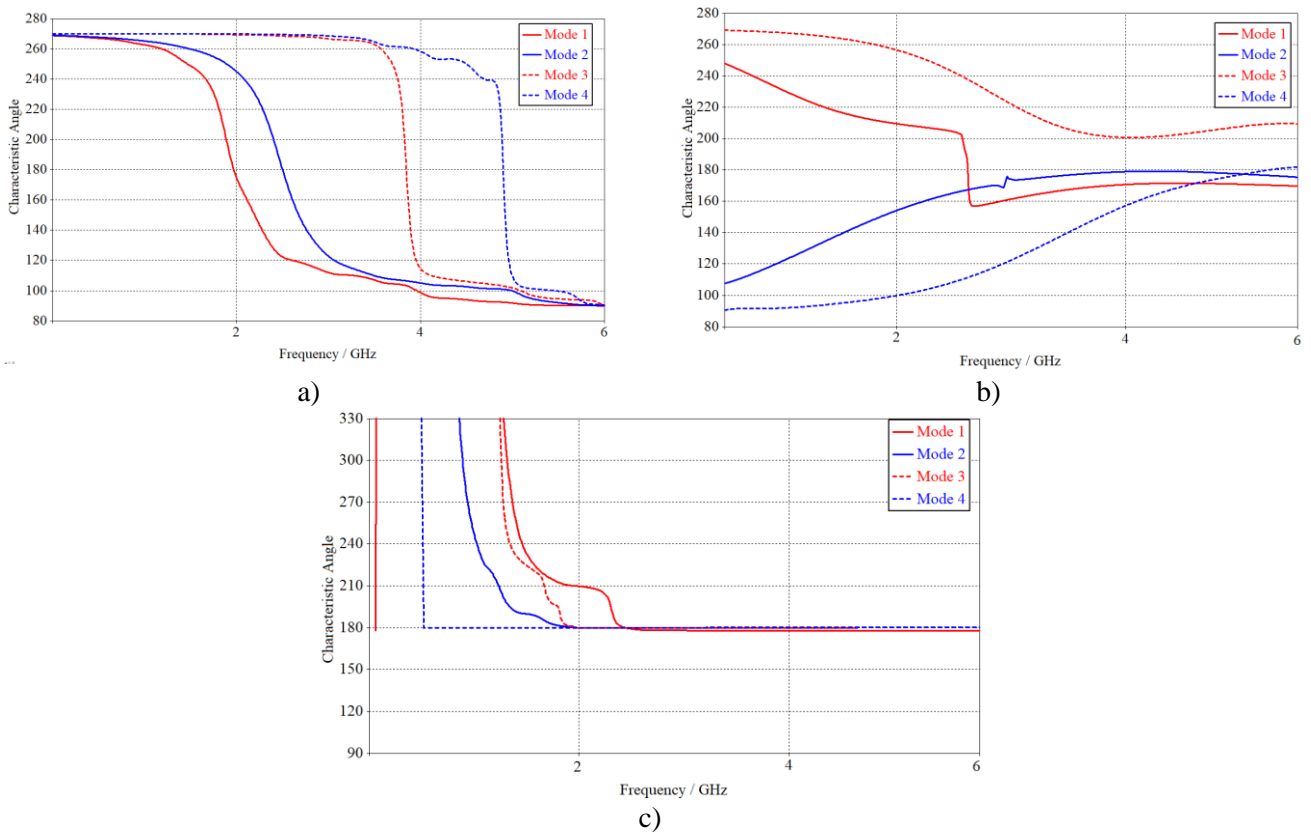


Figure 3. The α_n of CMA analysis results for four modes a) Antenna 1, b) Antenna 2, c) Antenna 3

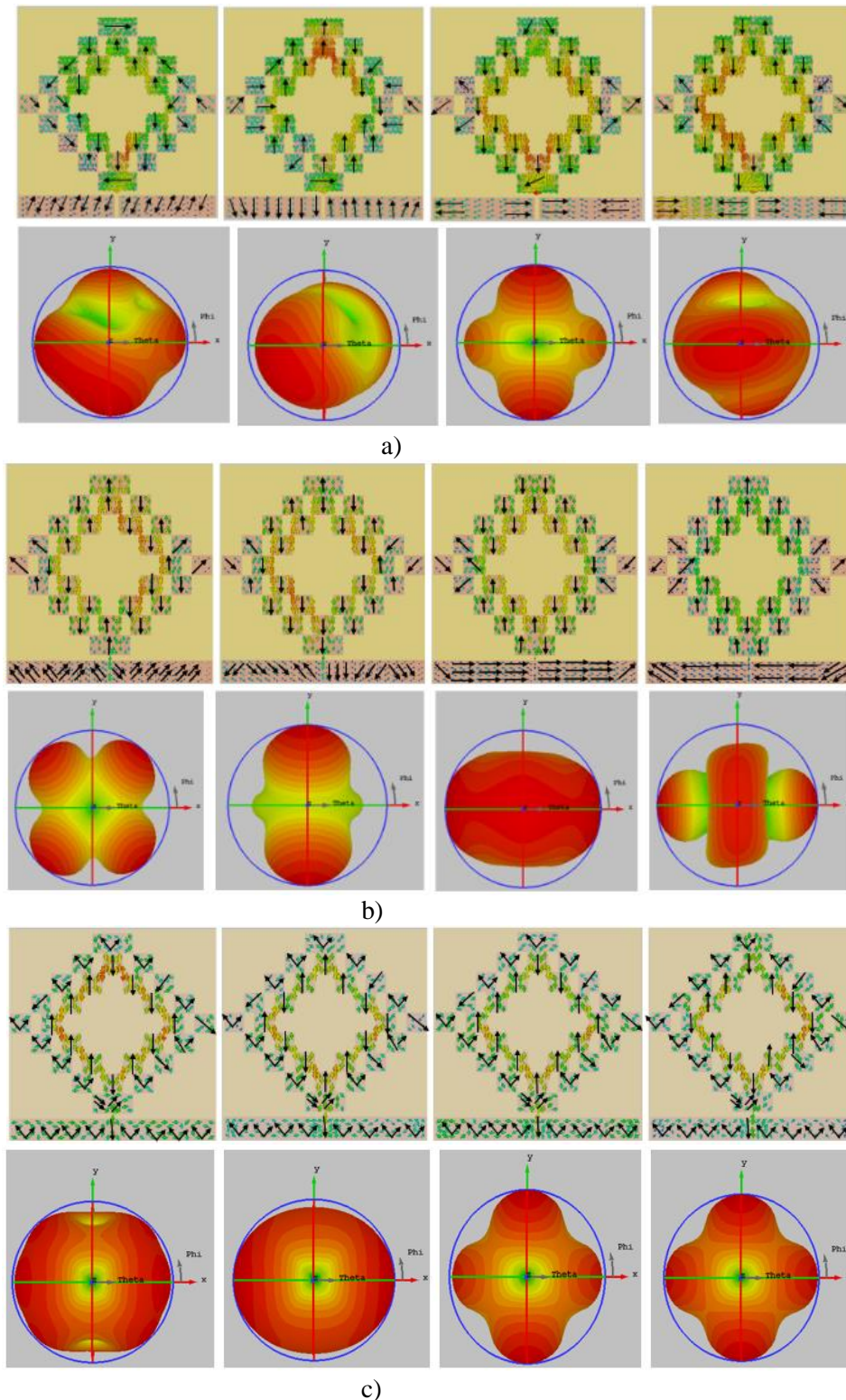
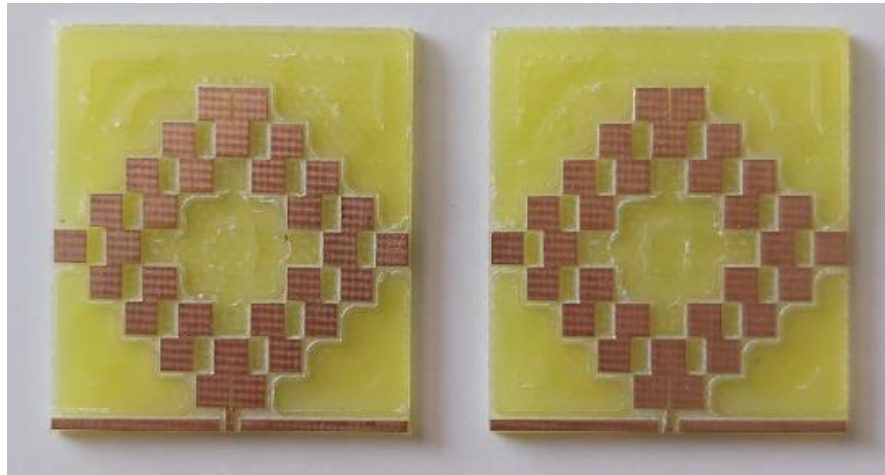


Figure 4. The Radiation Patterns and the Surface Current Distributions Results of CMA Analysis a) Antenna 1, b) Antenna 2, c)Antenna 3

The effects of conventional and tapered feed line structures on the radiation pattern are examined. The conventional feed line has a unidirectional radiation pattern in the xz plane, while the tapered feed line, the side lobe, and the back lobe levels decrease and an omnidirectional radiation pattern occurs. The cross-pol level of the conventional feed is higher in the xz plane, while the cross-pol level increases with the tapered feed. In the yz plane, while there is a unidirectional radiation pattern with a back lobe in the conventional feed, an omnidirectional radiation pattern is obtained with the decrease of the unwanted lobes in the tapered feed line. In addition, a stable radiation pattern is observed in both E-Field (xz) and H-Field (yz) planes for the 0.6-9 GHz frequency range. The results clearly show

the advantage of the tapered feed line over the traditional feed line. In addition, it has been observed that the electrical performance of the antennas does not decrease due to the application of different feed line topologies. The difference in the results is due to the effect of the supply cable.



Antenna 2 Antenna 3
Figure 5. Prototypes of the Fabricated Antennas



Figure 6. The Semi-Anechoic Chamber Measurement Environment

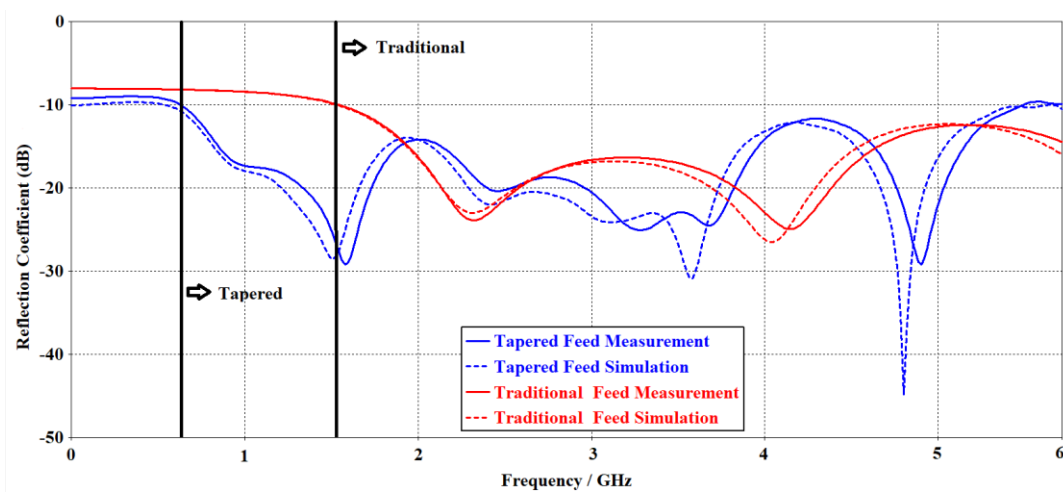


Figure 7. The Simulation and Measurement Result in terms of the Reflection Coefficient

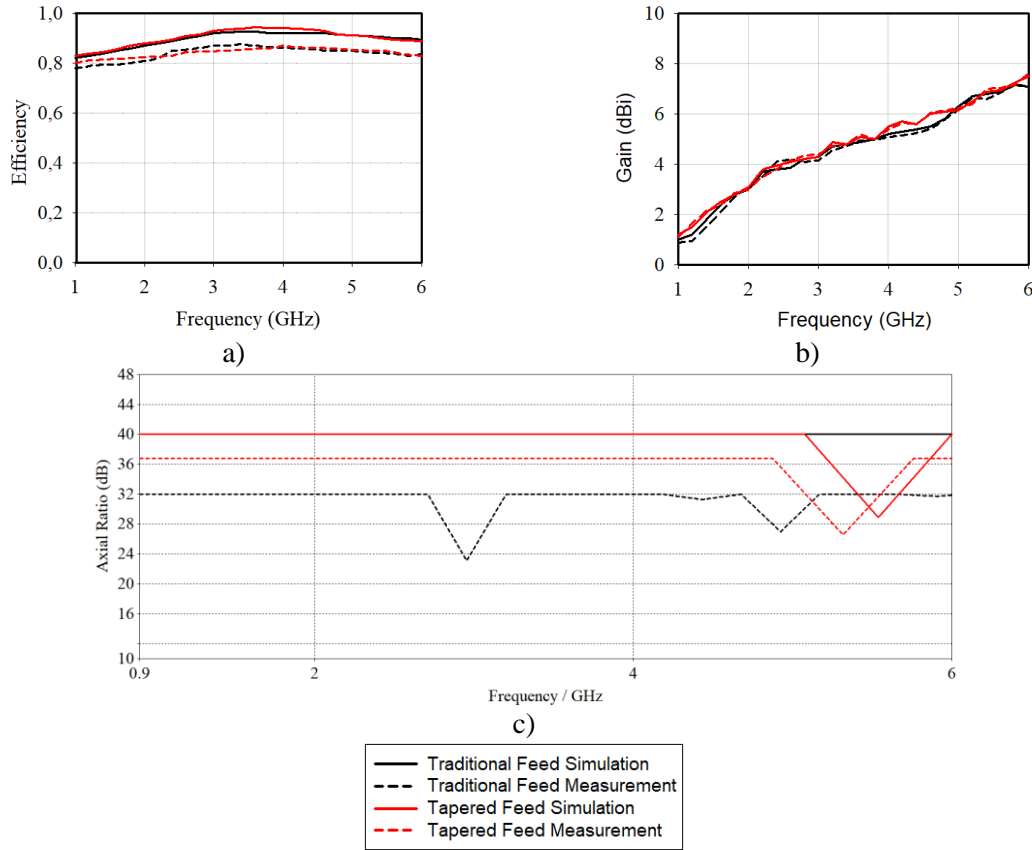


Figure 8. The Results in terms of a) the Efficiency, b) the Gain, c) the Axial Ratio

The comprehensive performance comparison of the proposed antenna with similar studies is given in Table 2. According to the literature, the effects of different feed structures such as conventional, tapered, exponential, and multi-section feed lines on different antenna configurations have been investigated. As can be seen, some of the designs have a bandwidth-limit effect despite having high gain and efficiency values. In other designs, the bandwidth is above the ultra-wide range, but empirical background theory has been preferred for different feed line investigations. On the other hand, the proposed antenna configuration provides communication in the sub-6 GHz band, which has a widespread use area. To investigate the effects of conventional and tapered feed line structures on antenna performance, CMA analysis, which is a more precise approach rather than a heuristic or trial-and-error approach, has been used.

Table 2. Performance Comparison of the Proposed Antenna with Studies on Different Feed Structures

	This work	Manohar et al. 2014	Ul haq et al.2018	Aktar et al. 2020	Newton et al.2022	Firmansyah et al. 2023
Frequency (GHz)	0.9-6	2.5-80	3.1-10.6	3.1-10.6	3.3-3.65	14.65-22.7
Bandwidth	Ultra wideband	Super wideband	Ultra wideband	Ultra wideband	Narrowband	Wideband
Peak Gain (dBi)	6.9	5.9	4.1	10.2	7	9.5
Efficiency (%)	85	-	95	-	86	98.2
Background Theory	CMA	Heuristic	Heuristic	Heuristic	CMA	Heuristic
Method Feature	Comparison of the conventional and tapered feed lines	Comparison of the exponential and tapered feed lines	Comparison of the Stepped-impedance and multi-section taper feed lines	Comparison of the balun antenna and Step Constant Tapered feed line	Comparison of the conventional and stepped feed lines	Investigation of the quasi tapered feed line

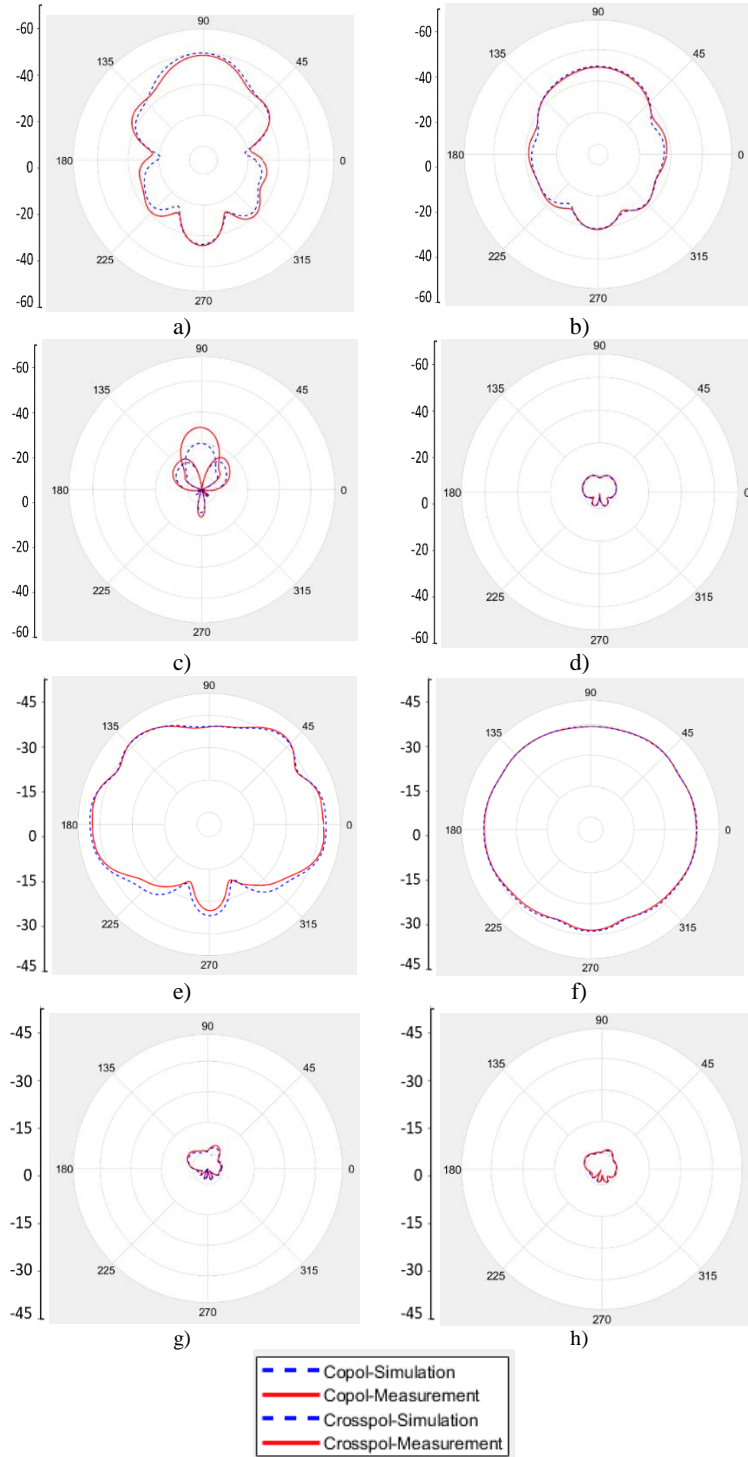


Figure 9. The Simulation and Measurement Result in terms of the Radiation Pattern for the 2.45GHz Frequency. a) XZ Plane Co-Pol Antenna 2 (Traditional Feed), b) XZ Plane Co-Pol Antenna 2 (Tapered Feed), c) XZ Plane Cross-Pol Antenna 2 (Traditional Feed), d) XZ Plane Cross-Pol Antenna 2 (Tapered Feed), e) YZ Plane Co-Pol Antenna 3 (Traditional Feed), f) YZ Plane Co-Pol Antenna 3 (Tapered Feed) g)YZ Plane Cross-Pol Antenna 3 (Traditional Feed), h) YZ Plane Cross-Pol Antenna 3 (Tapered Feed)

CONCLUSION

This article proposes a compact novel ultra-wideband (UWB) antenna. The effects of the feed line geometry are presented. The influence of different feed line structures on the modes was analyzed by characteristic mode analysis (CMA) without altering the main radiation structure. Two distinct feed line topologies are employed: traditional feed line and tapered feed line. The proposed antenna is fabricated with two different feed line

structures, and the simulation results are validated. It is observed that parameters such as S11, efficiency, gain, and radiation pattern demonstrate high agreement between the results. The findings indicate the superiority of the tapered feed line over the traditional feed line. Furthermore, it has been noted that the electrical performance of the antennas does not deteriorate due to the application of different feed line topologies. The proposed novel UWB antenna may be a suitable candidate for 5G wireless communication systems, as it encompasses the Sub-6 GHz frequency range.

REFERENCES

- Adams, J. J., Genovesi, S., Yang, B., & Antonino-Daviu, E. (2022). Antenna Element Design Using Characteristic Mode Analysis: Insights and research directions. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 64(2), 32-40.
- Aktar, M., Rana, M. M., Sarker, N., & Hossain, M. S. (2020). Comparative analysis on antenna balun and feeding techniques of step constant tapered slot antenna. *Journal of Sensor Technology*, 10(3), 31-45.
- Ammann, M. J. (2001). Control of the impedance bandwidth of wideband planar monopole antennas using a beveling technique. *Microwave and Optical Technology Letters*, 30(4), 229-232.
- Amini, A., & Oraizi, H. (2015). Miniaturized UWB log-periodic square fractal antenna. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 14, 1322-1325.
- Azadegan, R., & Sarabandi, K. (2003). A novel approach for miniaturization of slot antennas. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 51(3), 421-429.
- Balanis, C. A. (2016). Antenna theory: analysis and design. John Wiley & Sons.
- Behdad, N., & Sarabandi, K. (2004). Coupled Sectorial Loop Antenna (Csla) For Ultra-Wideband Applications. *This Technical Report Has Been Reviewed And Is Approved For*, 15, 159.
- Bohannon, N. L., & Bernhard, J. T. (2014). Design guidelines using characteristic mode theory for improving the bandwidth of PIFAs. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 63(2), 459-465.
- Cabedo-Fabres, M., Antonino-Daviu, E., Valero-Nogueira, A., & Bataller, M. F. (2007). The theory of characteristic modes revisited: A contribution to the design of antennas for modern applications. *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, 49(5), 52-68.
- Chakraborty, M., Rana, B., Sarkar, P. P., & Das, A. (2012). Size reduction of a rectangular microstrip patch antenna with slots and defected ground structure. *International Journal of Electronics Engineering*, 4(1), 61-64.
- Dastranj, A., & Bornapour, M. (2019). UWB planar conical horn-shaped self-complementary bow-tie antenna. *Journal of Communication Engineering*, 8(1), 20-33.
- Firmansyah, T., Praptodiyono, S., Permana, J., Alam, S., Supriyanto, T., Paramayudha, K., ... & Kondoh, J. (2023). Modeling of quasi-tapered microstrip antenna based on expansion-exponential tapered method and its application for wideband MIMO structure. *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, 169, 154745.
- Ghimire, J., & Choi, D. Y. (2019). Design of a compact ultrawideband U-shaped slot etched on a circular patch antenna with notch band characteristics for ultrawideband applications. *International Journal of Antennas and Propagation*, 2019.
- Jabire, A. H., Ghaffar, A., Li, X. J., Abdu, A., Saminu, S., Alibakhshikenari, M., ... & Limiti, E. (2021). Metamaterial base design of compact UWB/MIMO monopoles antenna with characteristic mode analysis. *Applied Sciences*, 11(4), 1542.
- John, M., & Ammann, M. J. (2005). Optimization of impedance bandwidth for the printed rectangular monopole antenna. *Microwave and Optical Technology Letters*, 47(2), 153-154.
- Khan, M., & Chowdhury, M. (2020). Analysis of modal excitation in wideband slot-loaded microstrip patch antenna using theory of characteristic modes. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 68(11), 7618-7623.
- Lin, J. F., & Chu, Q. X. (2018). Increasing bandwidth of slot antennas with combined characteristic modes. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 66(6), 3148-3153.

- Lu, W. J., & Zhu, L. (2014). Wideband stub-loaded slotline antennas under multi-mode resonance operation. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 63(2), 818-823.
- Mir, R., Dashti, H., & Ahmadi-Shokouh, J. (2022). Design and analysis of circularly polarized circular patch antenna with multiple shorting pins using characteristic mode theory. *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, 146.
- Mohanty, A., & Behera, B. R. (2021). Characteristics Mode Analysis: A review of Its Concepts, Recent Trends, State-of-the-Art Developments and Its Interpretation with a Fractal UWB MIMO Antenna. *Progress In Electromagnetics Research B*, 92.
- Manohar, M., Kshetrimayum, R. S., & Gogoi, A. K. (2014). Printed monopole antenna with tapered feed line, feed region and patch for super wideband applications. *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, 8(1), 39-45.
- Newton, M. E., Ma, K., Luo, Y., Yan, N., & Tang, B. (2022). Dual-mode wideband slotted patch antenna using characteristic mode analysis and low-cost SISL technology. *Microwave and Optical Technology Letters*, 64(3), 583-588.
- Perli, B. R., & Rao, A. M. (2019). Characteristic mode analysis of wideband microstrip antenna. *Progress In Electromagnetics Research C*, 97, 201-212.
- Shu, J., & Zhang, Y. (2022). Design of a liquid crystal beam-steerable antenna with characteristic mode analysis. *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, 16(1), 29-36.
- Singh, A., Mehra, R. M., & Pandey, V. K. (2020). Design and optimization of microstrip patch antenna for UWB applications using Moth-Flame optimization algorithm. *Wireless Personal Communications*, 112(4), 2485-2502.
- Singh, G., Kanaujia, B. K., Pandey, V. K., & Kumar, S. (2022). Quad-Band multi-polarized antenna with modified electric-inductive-capacitive resonator. *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*, 14(1), 65-76.
- Srifi, M. N., Podilchak, S. K., Essaaidi, M., & Antar, Y. M. (2011). Compact disc monopole antennas for current and future ultrawideband (UWB) applications. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 59(12), 4470-4480.
- Tran, H. H., & Le, T. T. (2019). Ultrawideband, high-gain, high-efficiency, circularly polarized Archimedean spiral antenna. *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, 109, 1-7.
- Ul Haq, M. A., Koziel, S., & Cheng, Q. S. (2018). Miniaturisation of wideband antennas by means of feed line topology alterations. *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, 12(13), 2128-2134.



Kahramanmaraş Sütçü İmam University

Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi :01.02.2024
Kabul Tarihi : 11.09.2024

Received Date : 01.02.2024
Accepted Date : 11.09.2024

HİDROELEKTRİK SANTRALLERDE TÜRBİN-GENERATÖR ÜNİTESİNDE VERİM İZLEME SİSTEMİNİN KURULMASI-SAHA ÇALIŞMASI

ESTABLISHMENT OF EFFICIENCY MONITORING SYSTEM IN TURBINE- GENERATOR UNIT IN HYDROELECTRIC POWER PLANTS-CASE STUDY

Gökhan ÖZBEK^{1*} (ORCID: 0000-0003-1160-1955)
Sabir RÜSTEMLİ² (ORCID: 0000-0002-4957-1782)

^{1*}EÜAŞ Alpaslan-1 Hidroelektrik Santrali, Elektrik Bakım Başmühendisliği, Muş, Türkiye
²Bitlis Eren Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Bitlis, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Gökhan ÖZBEK, gokhanozbek1986@gmail.com

ÖZET

Hidroelektrik santrallerinde verim kaybının en fazla gerçekleştiği yer, türbinlerdir. Bu kayıpların sebepleri ve oranları santrallere ve hatta türbin-generatör ünitelerinin karakteristiklerine bağlı olarak değişmektedir. Türbinlerdeki verim kaybının tespit edilebilmesi, kestirimci bakımların veya optimizasyon çalışmalarının zamanında, doğru bir şekilde yapılabilmesi türbinin mevcut durumunun bilinmesine bağlıdır. Bu çalışmada, türbin veriminin anlık hesaplanması için Alpaslan-1 Hidroelektrik Santraline ait bir türbin-generatör ünitesinde gerçek zamanlı akış ve verim izleme sistemi kuruldu. Boya seyreltme metodu ile debi ölçümü ve türbin performans testlerinden olan mutlak testler yapıldı. Ölçülen debi değeri ile Winter-Kennedy akış sabiti bulundu ve böylece bir diğer performans testlerinden olan endeks testleri, Winter-Kennedy metodu kullanılarak yapıldı. Ayrıca testlerde santral, ünite, generatör verimleri de hesaplandı. Verim izleme sistemi kullanılarak yapılan testlerde türbin veriminde %3,5 oranında bir düşüşün olduğu görüldü. Winter-Kennedy metodu kullanılarak anlık debi hesabı ve anlık verim hesabı yapılacak şekilde nihai olarak ayarlanan sistem, çalışır vaziyette bırakıldı.

Anahtar Kelimeler: Verim izleme sistemi, hidrolik türbinler, debi ölçümü, Winter-Kennedy metodu, endeks testleri

ABSTRACT

In hydroelectric power plants, the place where the most efficiency loss occurs is the turbine. The reasons and rates of these losses vary depending on the characteristics of the power plants and even the turbine-generator units. Determining the efficiency loss in turbines, performing predictive maintenance or optimization studies in a timely and accurate manner depends on knowing the current status of the turbine. In this study, a real-time flow and efficiency monitoring system was installed in a turbine-generator unit belonging to Alpaslan-1 Hydroelectric Power Plant for instantaneous calculation of turbine efficiency. Flow measurement and absolute tests, which are turbine performance tests, were performed with the dye dilution method. The Winter-Kennedy flow constant was found with the measured flow value and thus, index tests, which are another performance test, were performed using the Winter-Kennedy method. In addition, power plant, unit and generator efficiencies were also calculated in the tests. In the tests performed using the efficiency monitoring system, it was observed that there was a 3.5% decrease in turbine efficiency. The system, which was finally set to calculate instantaneous flow and instantaneous efficiency using the Winter-Kennedy method, was left in operation.

Keywords: Efficiency monitoring system, hydraulic turbines, flow measurement, Winter-Kennedy method, index tests

ToCite: ÖZBEK, G., & RÜSTEMLİ, S., (2024). HİDROELEKTRİK SANTRALLERDE TÜRBİN-GENERATÖR ÜNİTESİNDE VERİM İZLEME SİSTEMİNİN KURULMASI-SAHA ÇALIŞMASI. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 27(4), 1128-1144.

GİRİŞ

Enerji, sürdürülebilir büyümenin ekonomik ve toplumsal boyutlarıyla yakından ilişkili olup, aynı zamanda iç ve dış politikaların şekillenmesinde son derece önemli bir parametredir (Demir Onay&Aydın, 2021). Modern dünyada enerji; devletlerin, toplumların varoluşlarını devam ettirebilmesi için sahip olması gereken zorunlu unsurdur (Pekmezci, 2020). Son yüzyılda dünyada meydana gelen hızlı değişim, toplumlar için enerjinin her çeşidini vazgeçilmez kılmuş; enerjiyi hayat kalitesi, refah düzeyi, teknolojik ve sosyal gelişim açısından çok önemli bir faktöre dönüştürmüştür (Mumlu, 2008). Farklı türlerde ortaya çıkan enerji, doğrudan kullanılabilirdiği gibi uygun yöntemler ile dönüştürülerek de kullanılabilir (Koç&Şenel, 2013). Yapılan işe, kullanıldığı alana göre tariflerin yapılması, enerjinin tek veya kapsamlı bir tanımını yapmayı zorlaştırmaktadır (Çengel&Boles, 1996). Ancak genel olarak enerji, bir sistemin harici faaliyet üretmesi (Uzun&Değirmenci, 2018), işin ortaya çıkmasına götüren tek yol, maddede bulunan ve uygun parametre ve şartlarda açığa çıkıp dönüşebilen kaynak, tabiiatta bulunan maddelerden bazılarında bulunan özel kuvvetlerin bir şekilde açığa çıkartılarak işe dönüştürülmesi vb. (Hepbaşlı, 2001; Özbakır, 2006; Kırılı&Kulu, 2016) şeklinde ifade edilir.

Ülkelerin uyguladığı sürekli ekonomik büyüme modeline bağlı olarak sanayi ve endüstri alanındaki gelişmeler, nüfus artışı, kentleşme oranındaki yükseliş gibi faktörler küresel enerji talebini artırmaktadır (Dyrstad vd., 2019). Dünya Enerji Ajansına göre, 2021’de küresel enerji talebi %5,4 artmış, karbondioksit salınımları %5,3 ve elektrik üretim sektörü yatırımları %7 artış göstermiştir (IEA, 2022b; IEA, 2022a). Bunun yanında talep tarafında ham petrol %6,4, kömür %5,1, doğalgaz %5,0 ve elektrik %6,1 civarında artmıştır (IEA, 2022b). Dünya nüfusu, 1974 yılında yaklaşık 4 milyar iken, 2021 yılı itibari ile yaklaşık %100 artışla 7,9 milyara ulaşmıştır. Nüfusun 2040’da ise 9,2 milyara, 2050’de de 9,7 milyara yükselmesi beklenmektedir (UN DESA, 2022). Dünya nüfusunun kentleşme oranının ise 2050’de %68’e yükseleceği hesaplanmaktadır (UN DESA, 2018; EÜAŞ, 2023a).

Dünyada enerji kaynağı olarak kömür, petrol, doğalgaz gibi fosil yakıtlar uzun zamandır kullanılmaktadır (Tekel, 2006). Ancak yapılan araştırmaların sonuçları, fosil yakıtların kullanılmasının dünyayı çevresel bir yıkıma doğru sürüklediği yönündedir (Kocaman, 2015). Ayrıca enerji arzının büyük bir kısmını karşılayan konvansiyonel kaynakların rezervlerinin, yeni keşifler olmaması halinde yakın zamanda tükeneceği, dolayısı ile enerji arzında açık oluşmaması için alternatif kaynak bulma arayışlarının desteklenmesi gerektiği ifade edilmektedir (BP, 2023). Diğer taraftan enerji kesintileri, tedarikteki zorluklar, enerji arz güvenliğindeki endişeler, enerjinin oluşturduğu maliyetler ve dışa bağımlılık giderilmesi gereken başlıca sorunlar olarak ele alınmaktadır (Hardcastle&Waterman-Honey, 2009; Heffner vd., 2010). Bu bağlamda, ihtiyaç duyulan enerjinin ucuz, güvenli ve hızlı olarak sağlanması; kaynakların enerji arz güvenliği içinde çeşitlendirilmesi zaruret arz etmektedir. Aynı zamanda, çevreye duyarlı temiz enerji kullanımının da artırılmasına yönelik planlamaların yapılması gerekmektedir (Flavin&Lenssen, 1994).

Bir politika hedefi olarak enerji verimliliği, bir taraftan ticari ve endüstriyel rekabet gücünü, enerji güvenliğini ifade ederken, aynı zamanda CO2 emisyonunun azaltılıp çevresel kirliliğin en aza indirilmesini de ifade etmektedir (Patterson, 1996). Bu iki hedef, enerji verimliliği politikalarının temel motivasyonu olarak kabul edilmektedir (Bolla vd., 2011). Enerji verimliliği, bir sistemin çıkışından elde edilen enerjinin, sistemdeki sürecin başlanması için kullanılan enerji ile oranlamasını ifade etmektedir. Enerjinin etkin kullanımı olan enerji verimliliği, enerji tasarrufunu artırıcı yöntemleri, kayıp ve kaçakları azaltıcı önlemleri, işletme maliyetlerini düşüren tasarım çalışmalarını ve yatırım maliyetlerinin en kısa sürede karşılanması gibi konuları içermektedir (Meral vd., 2009). Genel bir ifade ile enerji verimliliği, daha az enerji harcayarak aynı işin yapılmasını veya aynı oranda enerji kullanarak daha çok işin yapılmasını amaçlamaktadır.

Araştırmalar, enerji israfının ve enerjinin verimsiz kullanımının enerji krizlerinin meydana gelmesine neden olan başlıca faktörlerden olduğunu göstermektedir (Cui vd., 2014). Enerji israfını engellemek ve var olan kaynak potansiyelini optimum seviyede kullanmak, enerji kaynağı noktasında büyük bir açığı kapatacaktır. Sürdürülebilir kalkınmanın tesisi için enerji kaynaklarına ihtiyaç olduğu kadar, bu kaynakların etkin ve verimli kullanımı da büyük önem arz etmektedir (Aydın&Esen, 2018). Yeni enerji kaynaklarının arzda yerini alması gerçekleşene kadar verimliliği artırıcı önlemler alınması, bu yönde yatırımlar yapılması akılcı çözümler üretecektir (Akhtar vd., 2020). Verimlilik yatırımları en az maliyetli ve en kolay uygulanabilir yaklaşımlar olarak planlanmaktadır. Bu da ekonomik olarak enerjide maliyet girdilerinin azaltılmasını, ilave fosil yakıt tesislerine olan ihtiyacın azalmasını ve karbon salınımlarında düşüşün yaşanmasını sağlayacaktır (Wei vd., 2010; Marques&Pitarma, 2017).

Ülkelerin gelişimi için temel gereksinimlerinden biri elektrik enerjisidir (Pamir, 2003). Birçok alanda meydana gelen gelişmeler, elektrik enerjisine olan ihtiyacı artırmaktadır. Dünya nüfusunun yaklaşık %10'nun hala elektrik kullanmadığı göz önüne alındığında bu ihtiyacın her geçen gün daha da artacağı öngörülmektedir (EÜAŞ, 2023a). Diğer taraftan hassas cihazların kullanımının artması, elektriğin iletiminde ve dağıtımında yüksek oranlarda oluşan teknik kayıplar vs. elektrik enerjisinin kesintisiz, güç kalitesi problemlerinden arındırılmış, kayıp oranının minimize edilmiş olmasını zorunlu kılmaktadır (Düzgün, 2023). Elektrik talebinin verimli bir şekilde karşılanması için ülkelerde kaynak çeşitliliğine sahip yeni elektrik üretim santrallerinin kurulması; ekonomik koşullara, coğrafi ve jeopolitik konuma, enerji sektörünün mevcut yapısına uygun enerji politikalarının hayata geçirilmesi öncelikli konular arasında olmalıdır (Meral vd., 2009).

Dünyadaki en büyük elektrik enerjisi kaynaklarından biri, hidroelektrik santralleridir. Yenilenebilir enerji kaynakları statüsünde bulunan hidroelektrik santraller (HES), ülkemizde de yaygın olarak kullanılmaktadır. Uluslararası Hidroelektrik Derneği'nin verilerine göre Türkiye, hidroelektrik santralleri kurulu gücü bakımından dünyada 9., Avrupa'da ise 2. sırada bulunmaktadır (İHA, 2022). 2022 yılı verilerine göre Türkiye'nin kurulu gücü 104.055 MW iken bunun %30,4'ü, yani 31.586 MW'lık kısmı HES'lere aittir. Diğer taraftan yıllık 325.887.572 MWh'lık elektrik üretiminin %20,48'i, yani 66.752.993 MWh'lık kısmı bu santrallerden karşılanmaktadır. Ancak ülkemizde elektrik üretimindeki en büyük pay %58,05 ile hala fosil yakıtlarıdır (EÜAŞ, 2023b). Bu nedenle, enerji üretimi için alternatif kaynaklar bulmanın yanı sıra, mevcuttaki santrallerde enerji verimliliğinin, en büyük enerji kaynağı kabul edilerek yapılacak verimlilik çalışmalarının ülkemizin kalkınmasına ve güçlenmesine büyük katkıları olacaktır. Bu bağlamda, endüstriyel verimlilik izleme ve enerji yönetim sistemi, enerji israfının azaltılmasına yardımcı olabileceği gibi ekonomik, sosyal ve çevresel iyileştirmelere de öncülük edecektir (Martirano vd., 2019).

Bir elektrik üretim tesisinde enerji verimlilik stratejilerinin uygulanabilmesi güç üretimi ve performans kayıp verilerinin düzenli olarak alınmasına bağlıdır. Verimlilik izleme ve veri kayıt sisteminin kurulması günlük, aylık ve yıllık bazda verimlilik değerlendirme raporları sağlayarak, ünite performans iyileştirme politikalarının planlanmasına, kestirimci bakım çalışmalarının yapılmasına yardımcı olacaktır. Endüstriyel ve sanayi tesislerinde enerji yönetiminde verimliliğin izlenebilir bir olguya dönüştürülmesi ile performans takipleri sürdürülebilir enerji politikalarına yön verecektir.

Bu çalışmada, Alpaslan-1 HES'te boya seyreltme (dye delition) ve Winter-Kennedy (W-K) debi ölçüm metotları uygulanarak yapılması planlanan türbin performans testlerinde kullanılmak üzere Efficiency Monitoring System (EMS), yani Verim İzleme Sistemi (VİS) kurulumu yapıldı. Mutlak ve endeks testleri yapıldıktan sonra VİS'te herhangi bir değişiklik yapılmadı ve sistem aralıksız çalışacak şekilde bırakıldı. Böylece ilgili ünite bazlı verim izlemenin aralıksız yapılmasına imkân sağlandı. Sistem kurulurken verilerin toplanması için santraldeki mevcut ölçüm aletlerinin bir kısmından faydalandı, herhangi bir ölçü aleti olmayan lokasyonlarda ve gerek duyulan yerlerde ise harici olarak yerleştirilen enerji analizörleri, basınç sensörleri/transmitter üzerinden veriler toplandı. Sistemin kurulumunda gerekli olan sabit değerlerin hesaplamaları yapılarak sisteme yüklendi. Değişken değerlerin hesaplamalarının yapılabilmesi için toplanan veriler ise modüller üzerinden PLC sunucusuna aktarıldı. Böylece gerçek zamanlı verimliliğin hesaplanması ve verilerin kayıt altında tutulması sağlandı. Çalışmada uygun maliyetli, yenilikçi ve gerçek zamanlı bir sistem tasarımı hedeflendi. Sistem, kendiliğinden verileri toplayabilecek ve verilere uzaktan erişime imkân sağlayabilecek şekilde tasarlandı. Sistemden çekilen verilerle ünitenin performansı takip edilebilecek, performanstaki değişimler ve yaşanan verimlilik kayıpları anlık olarak görülebilecektir. Bu da işletmeye yapacağı çalışmalar için yol gösterici olacaktır.

Çalışmanın birinci bölümünde, Veri İzleme Sistemi kurulumu anlatılmıştır. Kurulum için verilerin alındığı lokasyonlar, gerekli olan ölçü aletlerinin ve diğer ekipmanların yapıları, bu ekipmanların yerleşim şekilleri, çalışma prensiplerinden bahsedilmiştir. Ayrıca yapılan hesaplamalar ve bu hesaplamalarda kullanılan formüller verilmiştir. İkinci bölümde sistemin çalışması için gerekli olan sabit ve değişken değerlerin, toplanan veriler üzerinden yapılan hesaplamalarına yer verilmiştir. Ayrıca VİS kullanılarak yapılan ve başka çalışmalarımızda ayrı ayrı konu olan mutlak ve endeks testlerinin özet sonuçları birlikte verilerek çalışma bağlamında değerlendirmelerde bulunulmuştur. Yapılan literatür taramalarında, enerji üretim santrallerinde ekipman performansının takibi için VİS'in kurulması ile ilgili herhangi bir çalışmaya rastlanılmamıştır. Enerji verimliliği modelleme sistemleri, enerji

tüketiminde tasarruf, personel verimliliği, ekonomik anlamda üretim verimliliği gibi sanayi ve endüstriyel kuruluşların farklı alanlar için yapılan izleme sistemlerine yönelik çalışmalar bulunmaktadır. Bu çalışmalara atıf yapılarak, kaynakçada yer verilmiştir. Bu bağlamda çalışmamız bundan sonraki çalışmalar için kaynak oluşturabilecek bir niteliğe sahiptir.

MATERYAL ve YÖNTEM

Verim İzleme Sistemi (VİS) yani Efficiency Monitoring System (EMS), 2019 yılında nisan ayı içerisinde Alpaslan-1 Hidroelektrik Santrali (HES)'te kurulmuştur. Santral, Muş'ta Murat nehri üzerinde kurulmuş olup Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı Elektrik Üretim A.Ş. bünyesinde 2012 yılından beridir faaliyetlerini yürütmektedir. Santralde bulunan generatörler 45 MVA gücünde %98,3 verimli olarak imal edilmiştir. Yarı batık, baraj tipi su depolamalı olan santral, orta düşüklüdü. Santral, nominal brüt düşüsü 82,5 m, nominal net düşüsü 80,6 m olacak şekilde tasarlanmıştır. Santraldeki bütün ünitelerde 41,75 MW gücünde, 55,4 m³/s nominal debide, %95,4 verim ile imal edilmiş olan dikey Francis tipi türbin bulunmaktadır.

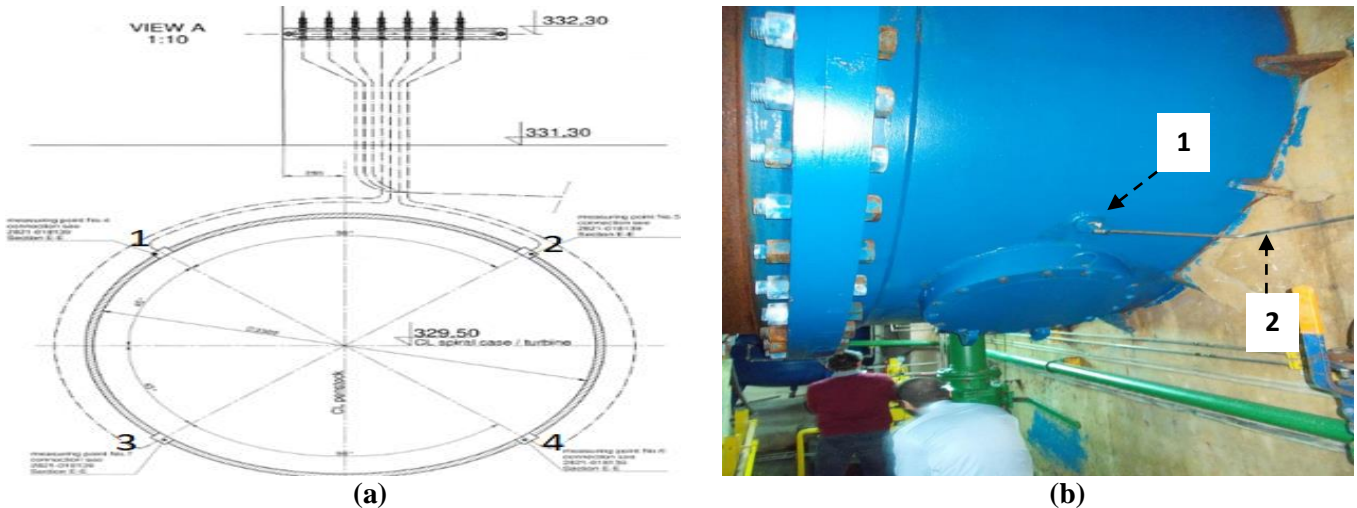
Verim izleme sistemi kullanılarak Nisan 2019 tarihi içerisinde hidrolik türbin performans testleri gerçekleştirildi. Performans testlerinde mutlak test olarak boya seyreltme metodu, endeks test olarak Winter-Kennedy metodu kullanıldı. Verim izleme sisteminin kurulumu ve türbin performans testleri Elektrik Üretim A.Ş.'in (EÜAŞ) koordinasyonunda ve yürütücülüğünde, yabancı ülke menşeli HATCH Ltd. şirketi ile Türkiye menşeli SU-ENER Mühendislik ve Enerji Hizmetleri San. ve Tic. Ltd. Şti. firmalarının çalışma bazlı katkıları ile gerçekleştirilmiştir (ETKB vd., 2020a).

Kurulumda Kullanılan Araçların Fonksiyonları

Giriş Basınç Sensörü

Santrallerde kurulum aşamasında salyangoz girişlerine, aralarında 90 derecelik açı olacak şekilde 4 adet basınç tapası yerleştirilmektedir. Bu tapalar net düşü hesabında gerekli olan giriş basınç değerinin bulunması için kullanılırken, doğrudan debi ölçüm metodu olan boya seyreltme metodunda örnek numunenin alınmasında da kullanılabilir.

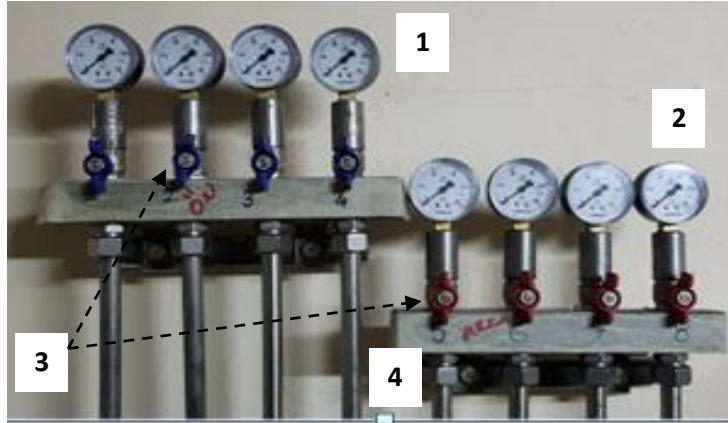
Tapaların olmadığı santrallerde, sonradan yapılacak çalışmalar ile bu tapalar yerleştirilmektedir. Örnek bir salyangoz giriş dikey kesit planı üzerinden basınç tapalarının yerleşim yerlerinin 1-2-3-4 numaraları ile gösterimi, basınç tapasının ve tapaya bağlı piyezometre borusunun görünümü Şekil 1'de verilmiştir (ETKB vd., 2020b).



Şekil 1. a. Salyangoz Giriş Basınç Tapalarının Yerleşim Planı (1-2-3-4) b. (1)Tapa, (2)Piyezometre Borusu

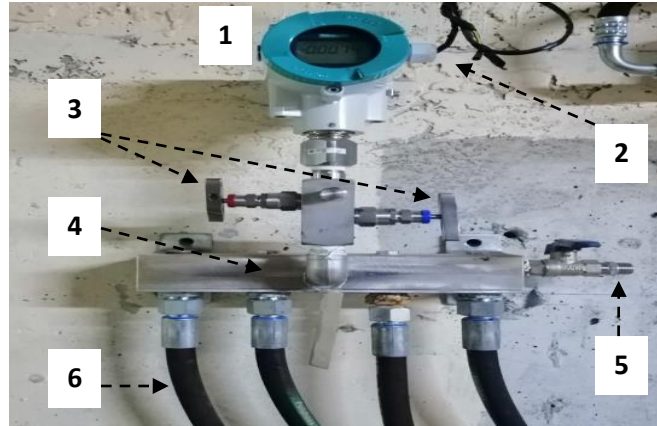
Basınç tapaları salyangoz girişine, dışarıdan piyezometre borularına bağlı olacak şekilde yerleştirilmektedir. Her bir tapadan çıkan piyezometre borusu memba tarafında ve ilgili ünitenin türbin çukurunun dışında yer alacak şekilde yerleştirilen kapama vanalarına gitmektedir. Normalde bu vanaların uçlarında manometreler bulunmaktadır.

Bu manometreler aracılığı ile salyangoz girişindeki suyun basınç değerleri her bir nokta için ayrı ayrı görülmektedir. Manometrelerin, piyezometre borularının, kapama vanalarının çalışmadan önceki görünümünü gösterir örnek, Şekil 2’de verilmiştir.



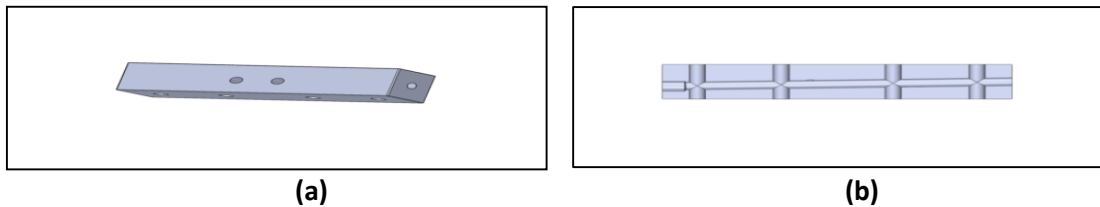
Şekil 2. (1)Giriş Basınç Manometreleri, (2)Fark Basınç Manometreleri, (3)Kapatma Vanaları, (4)Piyezometre Boruları

Sistemin kurulumunun yapılabilmesi için piyezometre borularının sonlandırıldığı kapama vanalarına bağlı olan bütün manometreler söküldü ve yerlerine giriş basınç sensörüne/transmitter ait kollektör yerleştirildi. Şekil 3’te yeni sistemde kullanılan görüntülü giriş basınç sensörü, bu sensöre ait kollektör gösterilmiştir.



Şekil 3. (1)Giriş Basınç Sensörü, (2) Veri Kablosu Bağlantı Yeri, (3)Açma-Kapama Vanaları, (4)Giriş Basınç Kollektörü, (5)Drenaj Vanası, (6)Bağlantı Hortumu

Kollektörler, farklı noktalardan alınan basınç değerlerini bir araya getirerek tek bir ölçüm cihazında toplamaya yarayan araçlardır. Giriş basınç ölçümünde kullanılan kollektörün dış ve iç yapısını gösteren teknik çizim Şekil 4’te sunulmuştur (Gezer, 2021).



Şekil 4. Giriş Basınç Sensörü Kollektörünün; (a)Dış Yapısı, (b)İç Yapısı

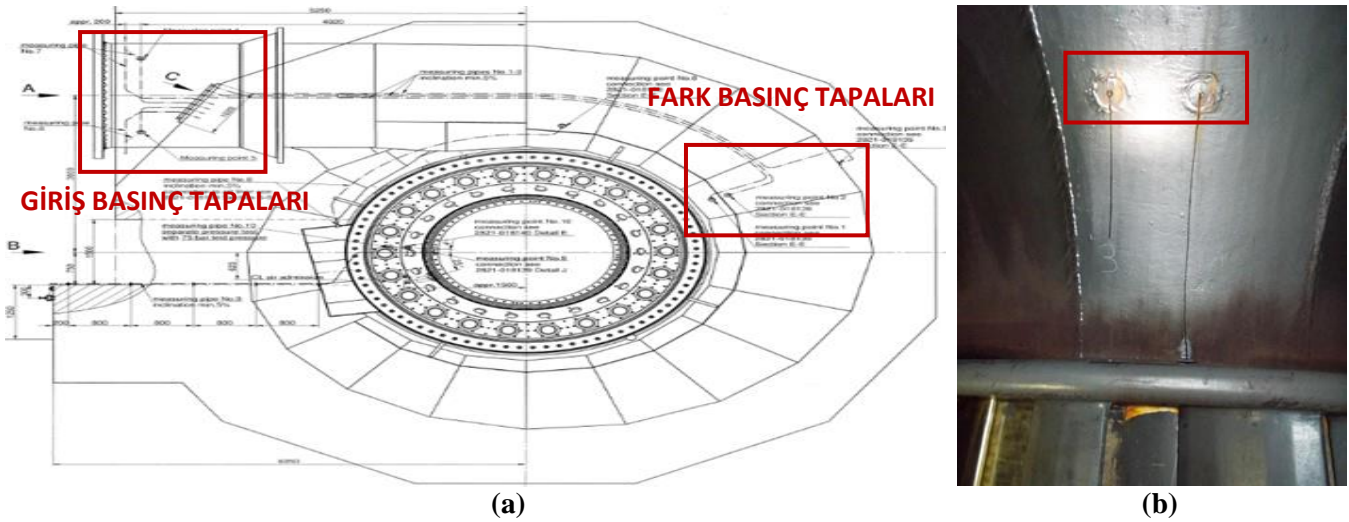
Salyangoz giriş basınç ölçümünde kullanılan kollektörün dış ve iç yapısı tek parça halindedir ve iç yapıda herhangi bir ayrı bölme bulunmamaktadır. İç yapı, drenajı kolaylaştırmak amacı ile eğimli imal edilmektedir. Kollektörün

üst kısmında 2 tane çıkış ucu bulunmaktadır. İhtiyaç olmaması halinde uçlardan bir tanesi köreltilmekte, diğer uç ise basınç sensörü bağlantısında kullanılmaktadır. Kolektörün alt kısmında basınç tapası sayısına uygun olacak şekilde 4 adet giriş bulunmaktadır. Kolektörde 4 adetten fazla giriş bulunması halinde, fazla girişler köreltilmektedir. Salyangoz girişinde yedek basınç tapaları mevcut ise bunlar kolektörün köreltilmiş uçlarına bağlanmakta ve ihtiyaç duyulması halinde kullanılmaktadır. Kolektörün yanlarında birer tane giriş ucu bulunmaktadır. Bu uçlardan biri ihtiyaç duyulmaması halinde köreltilirken, diğer uç kolektörün içini temizlemek amacıyla selenoid drenaj valfi veya drenaj vanası atılması için açık bırakılmaktadır. Kolektörün üstünde bulunan açma-kapama vanaları, basınç sensörünün güvenli bir şekilde takılıp çıkarılması ve herhangi bir arıza durumunda sensöre müdahale edilebilmesi için kullanılmaktadır.

Çalışmada, piyezometre kapama vanalarının çıkışlarından kolektörün alt kısmında bulunan 4 girişine hortumlar aracılığı ile bağlantı yapıldı. Kolektörün üst kısmındaki çıkışlarından biri köreltilmiş olduğundan diğer ucuna görüntülü basınç sensörü yerleştirildi. Böylece dört farklı noktadan kolektöre gelen su deşarj basınçları, giriş basınç değeri olarak 'bar' seviyesinde ölçüldü. Kolektörün yanlarındaki uçlarından biri köreltilmiş olduğundan sağdaki uca manuel açılıp kapanan bir drenaj vanası atıldı. Giriş basınç sensöründen elde edilen veriler VİS panosuna analog giriş modüller aracılığı ile toplandı. Şekil 3'te piyezometre kapama vanaları ile kolektör arasındaki bağlantıyı sağlayan hortumlar, sensör ile analog modül arasında veri akışı sağlayan kablonun bağlantı yeri, drenaj vanası, kolektörün üstünde bulunan açma kapama vanaları gösterilmiştir.

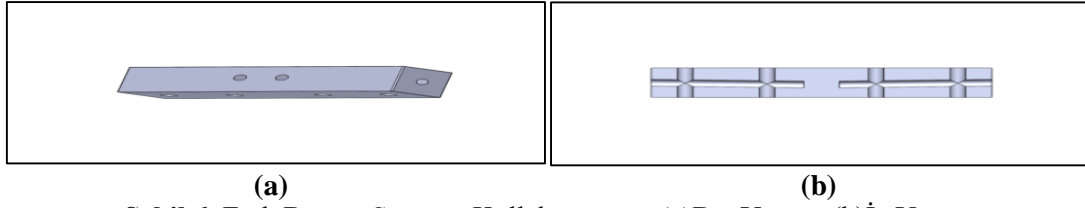
Fark Basınç Sensörü

Akışkanlarda hız ile basınç arasında ters orantı vardır. Salyangoz içerisinde suyun hızının yüksek olduğu yerlerde basınç daha düşük, suyun hızının düşük olduğu yerlerde basınç daha yüksektir. Suyun hızının farklı olmasından dolayı salyangoz içerisinde oluşan basınç farkı kullanılarak, ünitelerin elektrik üretiminde sarf ettiği suyun debisi hesaplanabilmektedir. Bu nedenle santrallerde kurulum aşamasında salyangozun içerisinde farklı noktalara basınç tapaları yerleştirilmektedir. Atılacak olan tapaların sayısı santralin durumuna, salyangozun çapına, ölçümün hassasiyetine vs. etkenlere bağlı olarak değişmektedir (Özbek, 2022). Tapalar mevcut değil ise, sonradan yapılacak çalışmalarla salyangoza yerleştirilebilirler. Aynı şekilde, gerek duyulması halinde mevcut tapaların sayısı da artırılabilir. Şekil 5.a'da örnek bir salyangoz yatay kesit planı üzerinden giriş basınç ve fark basınç tapalarının yerleşim yerleri, Şekil 5.b'de ise fark basınç tapalarının görünümü verilmiştir.



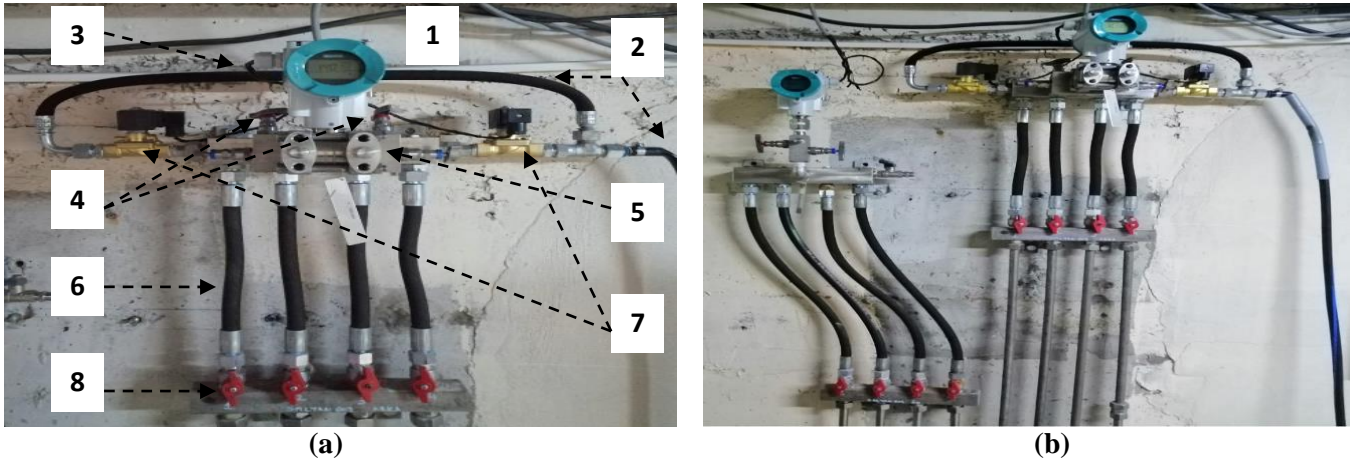
Şekil 5. a. Giriş Basınç ve Fark Basınç Tapalarının Yerleşim Yeri b. Fark Basınç Tapaları

Fark basınç sensörüne ait kolektörün altında, kapama vanalarından gelen hortumların bağlandığı girişler, üstünde ise 2 tane çıkış bulunmaktadır. Bu çıkışlara doğrudan fark basınç sensörü bağlanmaktadır. Kolektörün dış yapısı tek parça olarak imal edilmiştir. Ancak iç yapısı orta kısmı doldurularak iki eşit parçaya ayrılmıştır. Böylece kolektörde birbirinden bağımsız, ayrı giriş ve çıkışları olan iki bölme olmaktadır (Gezer, 2021). Şekil 6'da fark basınç sensörleri için kullanılan kolektörün teknik çizimi verilmiştir.



Şekil 6. Fark Basınç Sensörü Kollektörünün; (a)Dış Yapısı, (b)İç Yapısı

Alpaslan-1 HES'e ait salyangozlarda 2 tanesi alçak basınç bölgesinde, 2 tanesi yüksek basınç bölgesinde olmak üzere toplamda 4 tane fark basınç tapası bulunmaktadır. Şekil 2'de gösterildiği üzere, bu tapalara bağlı olan piyezometre boruları ilgili ünitenin türbin çukurunun dışına kadar çekilmiş, kapama vanaları ile sonlandırılmıştır. Çalışma kapsamında bu manometreler söküldü ve yerlerine fark basınç sensörünün bağlanacağı kollektör yerleştirildi. Kullanılan kollektörün 4 girişi ve 2 çıkışı bulunmaktadır. Kollektörün sağ tarafındaki bölmede bulunan 2 girişine, yüksek basıncın tapaları; sol tarafındaki bölmede bulunan 2 girişine ise alçak basınç tapaları bağlandı. Bağımsız bölmelerin drenajının sağlanması için kollektörün yanlarına selenoid drenaj valfleri yerleştirildi. Kurulumda kullanılan görüntülü fark basınç sensörü ve kollektörü, bağlantı hortumları, selenoid drenaj valfleri, veri kablosu bağlantı yeri, açma kapama vanaları, piyezometre borusu kapama vanaları Şekil 7.a'da gösterilmiştir.



Şekil 7.a. (1)Fark Basınç Sensörü, (2)Kollektör Drenaj Hortumu, (3)Veri Kablosu Bağlantı Yeri, (4)Sensör Açma-Kapama Vanaları, (5)Kollektör, (6)Bağlantı Hortumu, (7)Selenoid Valf, (8)Kapama Vanaları b. Giriş ve Fark Basınç Sensörlerinin Nihai Yerleşim Şekli

Kollektörün üst kısmında sağ bölmeye ait olan çıkış, yüksek basınç değerlerini; sol bölmeye ait olan çıkış ise alçak basınç değerlerini sensöre taşımaktadır. Böylece basınç tapaları ile farklı bölgelerden alınan değerler sensörde tek değer olarak, 'mbar' seviyesinde ölçüldü. Bu değer fark basıncı olarak kabul edilerek, debi hesaplamalarında kullanılmak üzere VİS'e iletildi. Şekil 7.b.'de, yapılan çalışmanın nihayetinde giriş ve fark basınç sensörlerinin ünite-3 türbin çukurunun dışındaki yerleşim şekli gösterilmiştir. Salyangoz içerisine yerleştirilen tapalara, *Winter-Kennedy diferansiyel basınç tapaları* veya *Winter-Kennedy muslukları*; fark basınç sensörüne ise *Winter-Kennedy diferansiyel basınç transmitter* da denilmektedir (Özbek, 2022). Winter-Kennedy metodu, debi hesaplamalarında büyük bir kolaylık sağlamaktadır. Bağlı bir yöntem olan W-K metodu ile debi hesaplamasının yapılabilmesi için öncelikle W-K akış sabitinin bulunması gerekmektedir. Bunun için doğrudan debi ölçüm metodlarından birisi kullanılarak ünitenin debisi ölçülür. Daha sonra ölçülen debi ile fark basınç sensöründen gelen değer denklem (1) de kullanılarak akış sabiti bulunur ve VİS'e yüklenir. VİS ise Winter-Kennedy akış sabiti değerini ve fark basınç sensöründen gelen değeri yine denklem (1) üzerinden kullanır ve anlık bazda türbinin debisini hesaplar. Alpaslan-1 HES'te boya seyretlme metodu ile ünitenin debisi ölçülmüş, bu değer kullanılarakta W-K akış sabiti bulunmuştur. Winter-Kennedy metoduna ait denklem aşağıda verildiği gibidir;

$$Q = (K_1)\Delta P^{K_2} \quad (1)$$

Burada; K_1 : Akış Sabiti, Q : Debi (m^3/s), ΔP : Fark Basıncı (mbar)

Hesaplanan K_1 , W-K akış sabiti, sadece ölçüm yapılan üniteye ait bir değerdir ve değişmemektedir. ΔP , fark basınç sensörünün okuduğu değerdir. K_2 üs değeri ise IEC-41 standartlarına göre genel olarak 0,5 alınır. Uygulamada 0,48-0,52 arası kullanımı mevcuttur (Gezer, 2021; Westermann, 2021).

Selenoid Drenaj Valfi

Verim izlem sistemi sürekli faal halde bulunduğundan dolayı, kolektörler içerisinde zamanla kir, çakıl, kum gibi malzemeler birikebilmekte, hava boşlukları oluşabilmektedir. Kolektörde biriken kirin dışarı atılması gerekmektedir. Sensörlerin ölçüm hassasiyetine göre valflerin kullanımı değişmektedir. Giriş basınç sensörleri 'bar' seviyesinde ölçüm yaptıkları için burada kullanılan kolektörlere selenoid valf takmak gerekmez. Nitekim, Şekil 3'te gösterildiği üzere, Alpaslan-1 HES'te giriş basınç kolektörün temizleme uçlarından biri köreltildi diğerine ise drenaj vanası bağlandı. Fark basınç sensörlerinde ise durum değişmektedir. Bu sensörler 'mbar' seviyesinde hassas ölçümler yapmaktadırlar. Kolektörün içinde biriken kir veya hava basınç ölçümünü ciddi oranda etkileyeceğinden dolayı periyodik aralıklarla drenajın sağlanması gerekmektedir. Şekil 7.a'da görüldüğü üzere, santralde kullanılan kolektörün her iki bölümündeki drenajın sağlanması için selenoid valf takıldı. Valflerin çalışma periyotları sistemin durumuna göre belirlendi ve her saat başı 10 sn çalışacak şekilde ayarlandı.

Daldırma Tipi Basınç Sensörü

Türbin çarklarından çıkararak işlevini tamamlamış olan su, emme borusu aracılığı ile santralin dışına iletilmektedir. Santralin çıkışındaki bu suya, *mansap* denildiği gibi, *kuyruk suyu* da denilmektedir. Verimlilik hesaplamalarında brüt düşüyü ölçmek ve net düşüyü bulmak için kuyruk suyu seviyesinin ve türbin çıkış suyunun basıncının bilinmesi gerekmektedir. Kuyruk suyuna yerleştirilen basınç sensörleri/transmitter yardımı ile su seviyesi ve çıkış basıncı ölçülebilmektedir. Ölçümlerde daldırma tipi sensör veya ultrasonik tipi sensör kullanılmaktadır. Çalışmada, daha sağlıklı sonuçlar vermesi nedeni ile daldırma tipi basınç sensörü tercih edilmiştir. Santrallerde bu ölçümler için kuyruk suyunun dip kısmına kadar indirilmiş borular bulunmaktadır. Türbinler çalışmadığında, mansap havuzunda bulunan enerji kırıcı kuyuya borular vasıtası ile sensör yerleştirildi. Sensör yerleştirilirken, sensörün havuzun dibine ulaşmamasına dikkat edildi. Çünkü kuyruk suyunun dip kısmında bulunan çamur, çakıl, kil vs. gibi maddeler, sensörün tıkanarak çalışmamasına veya yanlış değerler vermesine neden olmaktadır. Seviye sensörünün daldırılacağı noktanın belirlenmesinde, santralde mevcut olan projelerden faydalanıldı. Sensörün bağlı olduğu kablunun üzerinde ise metrajlar bulunmaktadır. Bu metrajlara bakılarak, mansapta daldırılmış olan sensörün hangi mesafede olduğu belirlenebilmektedir. Seviye ve çıkış basınç ölçümü, üniteler çalışmaya başladığında yapılmaya başlandı. Kuyruk suyuna daldırılmış olan sensörler, 0-1 bar aralığında basınç ölçümü yapabilmektedirler. Dalgıç tipi sensör, sensörün daldırıldığı yer ve daldırma şekli Şekil 8'de gösterilmiştir (ETKB vd., 2020b).

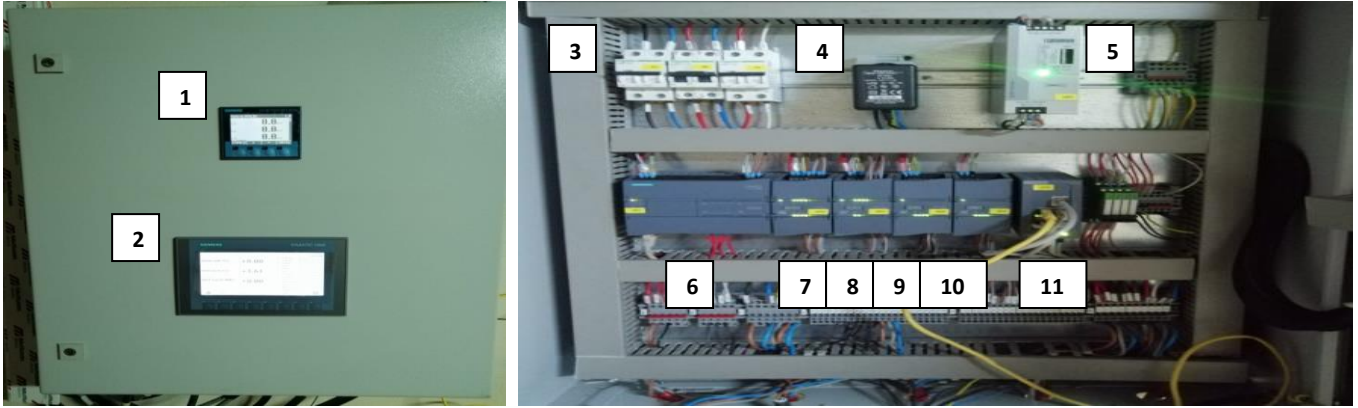


Şekil 8. a. Dalgıç Tipi Sensör b. Sensörün Daldırılma Şekli c. Sensörün Daldırıldığı Yer

Pano

VİS kapsamında kurulumu yapılan pano bütün verilerin toplandığı, hesaplamaların yapıldığı, verimin izlendiği ve uzaktan erişimin sağlandığı yerdir. Veri toplama sistemi, VİS için gerekli sinyalleri gerçek zamanlı olarak toplamak için kullanılır. Veri toplama sistemi analog giriş modülleri olan bir PLC, bir enerji analizörü ve analog çıkış modüllerinden oluşur. Sinyallerin çoğu fiziksel bağlantılı analog giriş modüllerinden elde edilir. Sadece güçle ilgili

sinyaller ethernet tabanlı protokoller üzerinden enerji analizöründen aktarılır. PLC sunucusu, enerji analizörü ve dokunmatik ekranın hepsi bir ağ anahtarı aracılığıyla oluşturulmuş Ethernet'e dayalı bir ağa bağlandı. İzleme Sistemine uzaktan bağlantılar için bir Ethernet portu tahsis edildi. VİS'e ait dataların bilgisayar ortamına indirilmesi işlemleri PLC sunucusuna ait IP adresi üzerinden yapıldı. Panonun dış kapak ve iç kısmının görünümü ve panodaki teçhizatların tanımı Şekil 9'da verilmiştir.



Şekil 9. (1)Enerji Analizörü, (2)Dokunmatik Ekran Paneli, (3)Sigortalar, (4)Adaptör, (5)24 V DC Güç Kaynağı, (6)PLC-Sunucu, (7- 8-9-10)Giriş ve Çıkış Modülleri, (11)Ethernet Switch

Dokunmatik Ekran Paneli

Panoda bulunan dokunmatik ekran panelinde üniteye ait verim, debi, aktif güç değerleri, hesaplamaları yapılarak VİS'e yüklenmiş olan sabit değerler ile santral işletmesine bağlı olarak değişen değerlere ait bütün parametreler anlık olarak görülebilmektedir. Sistem için gerekli skala ayarları ve sistemin kontrolü bu panel üzerinden yapılmaktadır. Panele manuel olarak da değer girişi yapılabilmektedir.

Enerji Analizörü

VİS'te okunması gereken en önemli parametrelerden biri generatör çıkış gücüdür. Çıkış gücünü doğru şekilde okuyabilmek için, generatör çıkış hücrelerinde mevcut olan akım ve gerilim transformatörlerden yararlanıldı. Bu ölçü trafolarında yapılan seri ve paralel bağlantılar üzerinden veriler, kalibre ayarları yapılarak VİS panosuna yerleştirilmiş olan enerji analizörüne iletildi. Analizörünün ölçtüğü değer ile santrale ait hız regülatörü paneli üzerinden okunan değer eşleştirilerek, herhangi bir sapma olmadığı belirlendi.

Manyetostriktif Transdüser

Servo motorların pozisyon ölçümü için bir manyetostriktif transdüser kullanılır. Ayar kanadı pozisyonu, %1-100'lük bir gerçek aralık ile 0-10'luk bir sinyal aracılığıyla kontrol odasına iletir. Sistem, bu sinyali bir analog giriş modülü aracılığıyla alarak ayar kanadı pozisyonu bilgilerini toplamaktadır. Her bir testte VİS ve hız regülatörü panelinde gösterilen ayar kanadı pozisyonu kaydedildi.

Böylece, yukarıda bahsedilen araçlar kullanılarak verim izleme sistemi tarafından eş zamanlı olarak türbin giriş basıncı, Winter-Kennedy diferansiyel basıncı, ayar kanadı servomotor pozisyonu, generatör çıkış gücü, kuyruk suyu seviyesi ve çıkış basıncı okumaları gerçekleştirilmiştir. Buralardan elde edilen veriler ile debi, net düşü, generatör kayıpları, su yoğunluğu ve türbin verimliliği hesaplamaları yapılmaktadır.

KurulumdaYapılan Hesaplamalar

Net Düşü Hesabı

Hidroelektrik santrallerinde net düşünün hesaplanmasında *Bernoulli denklemi* kullanılmaktadır. Kayıpların ihmal edildiği bu denklem ile ilk defa basınç, kinetik enerji ve potansiyel enerji arasında bir bağlantı kurulmuştur. Enerjinin korunum yasasına dayanan bu denklem, bir kanal içerisinde akan bir akışkanın sahip olduğu mekanik enerjinin, kanalın bütün noktalarında aynı olduğu mantığına dayanmaktadır. Akışkanın hızlanması ile suyun dinamik basıncı ve kinetik enerjisi artarken, potansiyel enerjisi ve statik basıncı azalır ancak kanal içerisindeki toplam enerji miktarı değişmez. Buna göre denklem şöyledir;

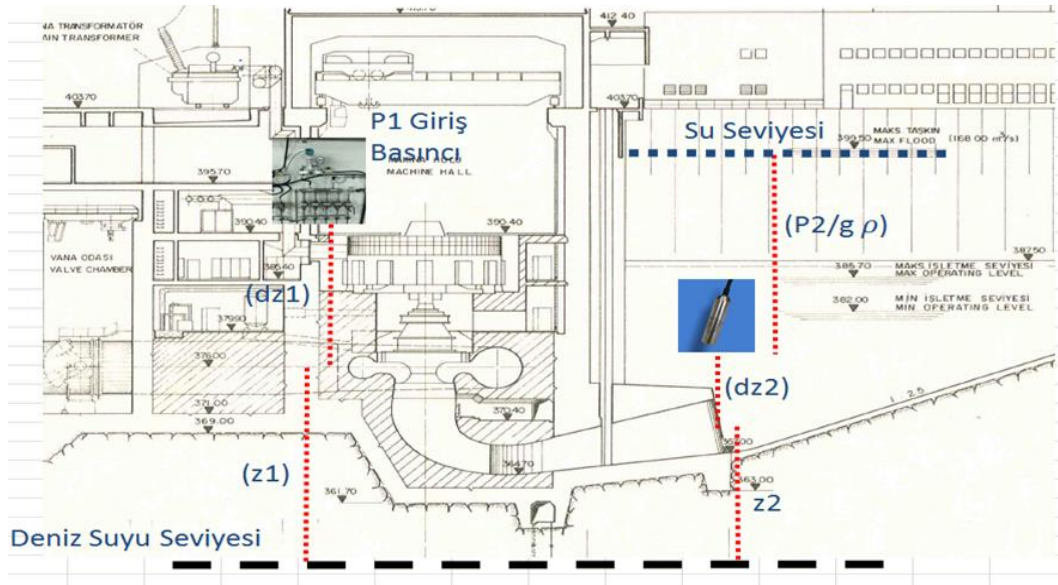
Girişteki Toplam Enerji = Çıkıştaki Toplam Enerji

$$P_1 + \frac{1}{2}\rho V_1^2 + \rho gh_1 = P_2 + \frac{1}{2}\rho V_2^2 + \rho gh_2 \quad (2)$$

Bu denklemde net düşüyü metre cinsinden bulabilmek için bütün parametreler ρg 'ye bölünür ve böylece denklem aşağıdaki gibi olur;

$$\frac{P_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} + h_1 = \frac{P_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g} + h_2 \quad (3)$$

Hidroelektrik santrallerinde daldırma tipi basınç sensörünün kullanımı, kuyruk suyu seviyesi ve çıkış basıncının ölçülmesi, giriş suyu seviyesi ve basıncının ölçülmesi şematik olarak Şekil 10'da gösterilmiştir (Gezer, 2021).



Şekil 10. Net Düşü Hesabı

Buna göre, Bernoulli denklemi kullanılarak, santralin net düşüsü aşağıdaki denklemle hesaplanır;

$$H_{net} = \frac{P_1 - P_2}{\rho g} + \frac{V_1^2 - V_2^2}{2g} + z_1 - z_2 + dz_1 - dz_2 \quad (4)$$

$\gamma = \rho g$ olarak alınırsa, denklem aşağıdaki gibi yazılır.

$$H_{net} = \frac{P_1 - P_2}{\gamma} + \frac{V_1^2 - V_2^2}{2g} + z_1 - z_2 + dz_1 - dz_2 \quad (5)$$

Burada;

P_1 : Salyangoz giriş basıncı (bar)

P_2 : Emme borusu çıkış basıncı (bar)

g : Yer çekim kuvveti (m/s^2)

ρ : Suyun yoğunluğu (kg/m^3)

γ : Suyun özgül ağırlığı (N/m^3)

z_1 : Salyangoz giriş merkezinin deniz suyu seviyesi arasındaki mesafe (m)

z_2 : Emme borusu çıkışı merkezinin deniz seviyesi arasındaki mesafe (m)

dz_1 : Salyangoz giriş merkezinin basınç sensörü arasındaki mesafe (m)

dz_2 : Emme borusu çıkışı merkezinin daldırma tipi sensörü arasındaki mesafe (m)

V_1 : Suyun salyangozdaki giriş hızı olup, Q/A_1 (m/s) formülü ile bulunur.

V_2 : Suyun emme borusundaki çıkış hızı olup, Q/A_2 (m/s) formülü ile bulunur.

Q: Debi, A_1 : Salyangoz giriş kesit alanı, A_2 : Emme borusu çıkış kesit alanı

Hidrolik santrallerde salyangoz giriş borusu yuvarlaktır ve alan hesabı $\pi d^2/4$ formülü kullanılarak; emme borusu dikdörtgendir ve alan hesabı borunun yüksekliği ile genişliği kullanılarak yapılmaktadır.

Yer Çekimi İvmesi Hesabı

Yer çekimi ivmesi santralin bulunduğu konuma göre değişiklik gösterir. Her santralin yer çekimi ivmesi ayrı ayrı hesaplanmak zorundadır. Buna göre yer çekim ivmesi aşağıdaki denklem kullanılarak hesaplanır.

$$g = 9,7803(1 + 0,0053\sin^2\varphi) - 3 \cdot 10^{-6} \cdot z \quad (6)$$

Burada; φ : Enlem (radyan), z: Rakım (m)

Su Yoğunluğu Hesabı

Her santralin enerji üretiminde kullandığı suyun yoğunluk değeri farklılık gösterir. Bunun için hesaplamalara katılan yoğunluk değerinin her santral için ayrı ayrı bulunması gerekmektedir (ETKB vd., 2020a). Buna göre su yoğunluğu aşağıdaki denklem ile bulunur;

$$\rho = 1000[(1 - A \cdot P_1) + 8 \cdot 10^{-6}(\vartheta - B + C \cdot P_1)^2 - 6 \cdot 10^{-8}(\vartheta - B - C)^3]^{-1} \quad (7)$$

Burada; A, B, C sabit değerler olup; $A = 4.6699 \cdot 10^{-10}$, $B = 4.0$, $C = 2.1318913 \cdot 10^{-7}$

ϑ : Sıcaklık(°C), P_1 : Giriş Basıncı (bar)

Türbin Verimlilik Hesabı

Türbin verimliliği, türbinin girişindeki hidrolik güç ile türbinden şafta geçen gücün oranlanması ile bulunur. Santallerde türbin çıkışındaki yani şaft milindeki aktif gücü okumanın bir yolu mevcut değildir. Ancak verimlilik izleme sisteminde generatör çıkışındaki aktif güç, anlık olarak okunabilmektedir. Generatör çıkışında okunan değere, generatörde oluşan kayıplar eklenirse türbin çıkışı/şaft milindeki aktif güç hesaplanabilir (Westermann, 2021). Tersine hesaplama yöntemi ile şaft milindeki aktif güç;

$$P_{\text{şaft}} = P_{\text{gen}} + P_{\text{kayıp}} \quad (8)$$

$$P_{\text{kayıp}} = A + BP_{\text{gen}} + CP_{\text{gen}}^2 + DP_{\text{gen}}^3 + EP_{\text{gen}}^4 \quad (9)$$

formülü ile bulunur. Burada; A, B, C, D, E generatör tasarım verimlilik eğrisinden elde edilen katsayılar olup, her santral için farklıdır. Buna göre türbin verimliliği aşağıdaki formülle hesaplanır.

$$\eta_{\text{türbin}} = \frac{P_{\text{şaft}}}{\rho g H_{\text{net}} Q} \quad (10)$$

Verim izleme sisteminde, hesaplanan ve ekranda gözüken verim, türbin verimidir. Türbin veriminin hesaplanması için formülde bulunan;

g: Yer çekim kuvveti (m/s^2), yukarıda verilen denklem ile bulunur.

ρ : Suyun yoğunluğu (kg/m^3), yukarıda verilen denklem ile bulunur.

H_{net} : Net düşü (m), Bernoulli denklemi kullanılarak bulunur.

Q: Debi (m^3/s), Winter-Kennedy metodu kullanılarak bulunur.

Böylece, yapılan bütün çalışmalar ve hesaplamalar neticesinde VİS sistemi ile türbin verimi anlık olarak takip edilmektedir. Türbin verimini bulmak için hesaplanan parametreler kullanılarak diğer verimlerde harici olarak hesaplanabilmektedir. Verim hesabında kullanılan bütün güçler, aktif güçtür ve birimi 'Watt' tır. Santralde, generatör çıkışındaki aktif güç ile türbin girişinde net düşüye bağlı oluşan hidrolik gücü oranladığımızda ilgili ünitenin verimini hesaplayabiliriz.

$$\eta_{\text{ünite}} = \frac{P_{\text{gen}}}{P_{\text{giriş}}} = \frac{P_{\text{gen}}}{\rho g H_{\text{net}} Q} \quad (11)$$

Generatör çıkışındaki aktif güç ile türbin çıkışında, shaft milinde olan gücü oranladığımızda generatör verimini hesaplayabiliriz.

$$\eta_{\text{gen}} = \frac{P_{\text{gen}}}{P_{\text{shaft}}} \quad (12)$$

Generatör çıkış gücü ile santralin kurulu gücünü yani brüt düşüye bağlı olarak hesaplanan gücü oranlarsak santralin verimini hesaplayabiliriz. Brüt düşünün hesaplanması için gerekli olan göl kodu değeri, santralde öncesinde yerleşik olan seviye sensörü üzerinden alınmıştır

$$\eta_{\text{santral}} = \frac{P_{\text{gen}}}{\rho g H_{\text{brüt}} Q} \quad (13)$$

BULGULAR ve TARTIŞMA

Alpaslan-1 HES'te Verim İzleme Sisteminde kullanılan ve dokunmatik ekran panelinde görülen sabit ve değişken değerler Tablo 1' de verilmiştir.

Tablo 1. Hesaplamalarda Kullanılan Sabit ve Değişken Değerler

Sabit Değerler	Değişken Değerler
K_1 : Akış Sabiti,	ΔP : Fark Basıncı
K_2 üs değeri	P_1 : Salyangoz giriş basıncı
z_1 : Salyangoz giriş merkezinin deniz suyu seviyesi arasındaki mesafe (m)	P_2 : Emme borusu çıkış basıncı
z_2 : Emme borusu çıkışı merkezinin deniz seviyesi arasındaki mesafe (m)	ϑ : Sıcaklık
A_1 : Salyangoz giriş kesit alanı	P_a : Generatör çıkış gücü
A_2 : Emme borusu çıkış kesit alanı	Q : Debi,
dz_1 : Salyangoz giriş merkezinin basınç sensörü arasındaki mesafe	H_{net} : Net düşü
dz_2 : Emme borusu çıkışı merkezinin daldırma tipi sensörü arasındaki mesafe	g : Yer çekim kuvveti
φ : Enlem	ρ : Suyun yoğunluğu
z : Rakım	γ : Suyun özgül ağırlığı
A, B, C, D, E generatör tasarım verimlilik eğrisinden elde edilen katsayılar	V_1 : Suyun salyangozdaki giriş hızı
	V_2 : Suyun emme borusundaki çıkış hızı
	P_{loss} : Generatör kayıpları
	Efficiency: Türbin verimi

Oluşturulan sabit ve değişken değerler özelde ünite-3'e ait değerlerdir. Enlem, rakım, salyangoz giriş alanı ve emme borusu çıkış alanları gibi değerler bütün üniteler için aynı olsa da diğer değerler farklılık gösterecektir. Sıcaklık bütün ünitelerde farklılık göstermekle beraber, çalışmanın kolaylığı için sabit bir değer olarak alınabilir. Ünite-3 verimlilik hesaplamalarında gerekli oldukları için ölçülerek veya hesaplanarak bulunan ve verim izleme sistemine yüklenen değerler Tablo 2'te verilmiştir.

Tablo 2. Alpaslan-1 HES Karakteristikleri

Karakteristikler	Sembol	Değer	Birim
Giriş Alanı	A_1	8,549	m^2
Çıkış Alanı	A_2	24,354	m^2
Salyangoz Giriş Merkezinin Deniz Suyu Seviyesi İle Arasındaki Mesafe	z_1	1366,000	m
Emme Borusu Çıkışı Merkezinin Deniz Seviyesi İle Arasındaki Mesafe	z_2	1360,375	m
Salyangoz Girişi Merkezinin Basınç Sensörü Arasındaki Mesafe	dz_1	5,300	m
Emme Borusu Çıkışı Merkezinin Daldırma Tipi Sensörü Arasındaki Mesafe	dz_2	4,715	m
Enlem	Φ	39.000	derece
Rakım	Z	1366,000	m
Sıcaklık	Θ	14.000	
Yer Çekim İvmesi	G	9,824	m/s^2
Su Yoğunluğu	P	999,7	kg/m^3

Çalışmalarda W-K akış sabitinin hesaplanması için boya seyreltme metodu ile debi ölçümü gerçekleştirildi ve ünitenin debisi, $Q=57,45 m^3/s$ olarak bulundu. Fark basınç sensöründen alınan değer ile ölçülen debi kullanılarak bulunan W-K akış sabiti değeri, $K_1 = 3,47 m^3/s/\sqrt{kPa}$ dır. W-K debi hesaplama formülündeki K_2 üs değeri 0,5 alındı. Fark basınç sensörünün okuduğu 'mbar' değeri, VİS'te pascal (pa) değerine dönüştürülerek kullanıldı. Verim izleme sistemi kurulduktan sonra, türbin ayar kanat açıklığı %50-100 arasında olacak şekilde, Winter-Kennedy metodu ile 10 farklı açıklıkta endeks testleri, boya seyreltme metodu ile 4 farklı açıklıkta mutlak testler yapıldı (ETKB vd., 2020a). Testlerde ölçülen net düşü değerine göre bulunan sonuçlar, yakınlık yasaları kullanılarak santralin nominal düşü değerine göre normalleştirildi.

W-K metodu kullanılarak yapılan testlerde en yüksek türbin verimi %91,9 olarak ölçüldü. Bu değere %80,42 ayar kanadı açıklığında ulaşıldı. Bu ayar kanat açıklığında ünitenin debisi 54,64 m^3/s olurken, ölçülen net düşü değeri 73,68 m oldu. Yapılan testlerle türbin veriminin en iyi değerlerde olduğu noktada, ünite ve santral veriminin de en iyi değerde olduğu teyit edildi. Buna göre ünite verimi %90,1 olarak hesaplandı. Santral verimi ise %89 bulundu. Testlerde en yüksek generatör verimi, maksimum çıkış gücünde %98,2 olarak hesaplandı. Bu değere %99,2 ayar kanat açıklığında ulaşıldı. Bu noktada ünitenin debisi 65,88 m^3/s olurken, net düşü 73,18 m olarak gerçekleşti. Bu düşü değerinde elde edilen 40,9 MW'lık en yüksek generatör çıkış gücü nominal net düşü değeri olan 80,6 m'ye göre normalleştirildiğinde, 47,28 MW olarak bulundu. Aşağıda verilen generatör verimlilik katsayıları kullanılarak generatördeki kayıpların hesaplamaları yapıldı ve bu generatör verimine göre shaft milindeki güç yani türbin çıkış gücü 48,34 MW bulundu (Özbek&Rüstemli, 2022).

$$P_{kay\ p} = AP_{gen}^2 + BP_{gen} + C$$

Burada $A = -4,167 \times 10^{-4}$, $B = 8,583 \times 10^{-2}$, $C = 93,9$ dir.

Boya seyreltme (dye delition) testlerinde en yüksek türbin verimliliği %91,9 olarak ölçüldü. Bu değere %74,96 ayar kanat açıklığında ulaşıldı. Bu noktada ünitenin debisi 51,09 m³/s olurken, ölçülen net düşü değeri 73,81 m oldu. Generatör çıkışının 37,88 MW olduğu bu ayar kanat açıklığında gerçekleşen generatör verimi %97,9 olmuştur. Santral ve ünite veriminin en yüksek çıktığı bu noktada, santral verimi 89,1 bulunurken, ünite verimi %90,0 olarak bulundu. Testlerde en yüksek generatör verimi %98,2 olarak gerçekleşti ve bu değere %95,11 ayar kanat açıklığında ulaşıldı. Bu noktada ünitenin debisi 63,07 m³/s olarak ölçüldü. Ölçülen net düşü değeri 73,19 m dir. Bu değer 80,6 m olan santralin nominal net düşü değerine normalleştirildiğinde ise generatör çıkış gücü 46,23 MW olarak bulundu. Buna göre bu generatör veriminde shaft milindeki aktif güç 47,07 MW olarak hesaplandı. (Özbek&Rüstemli, 2023). Alpaslan-1 HES'te ünite-3'te yapılan türbin saha performans testleri sonuçlarının özeti Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3. Performans Test Sonuç Özetleri

TESTLER	Winter-Kennedy		Boya Seyreltme	
	En İyi Verimde (Türbin)	Maksimum Çıkış Gücünde	En İyi Verimde (Türbin)	Maksimum Çıkış Gücünde
Türbin Verimi (%)	91,9	88,3	91,9	90,3
Kanat açıklığı (%)	80,42	99,22	74,96	95,11
Generatör Çıkış Gücü (MW)	40,56	47,28	37,88	46,23
Ünite Debisi (Normalleştirilmiş)	57,14	69,15	53,39	66,19
Ünite Debisi (Ortalama Ölçülen)	54,64	65,88	51,09	63,07
Net Düşü (normalleştirilmiş)	80,60	80,60	80,60	80,60
Net Düşü (Ortalama Ölçülen)	73,68	73,18	73,81	73,19
Generatör Verimi (%)	98,0	98,2	97,9	98,2
Ünite Verimi (%)	90,1	86,8	90,0	88,6
Santral Verimi (%)	89,0	85,3	89,1	87,1

En yüksek türbin verimin bulunduğu düşü değerinin, santralin tasarımdaki nominal düşü değerinin yaklaşık %10 altında olmasına rağmen, türbinin hala nominal gücüne yakın değerler alması dikkat çekmektedir. Bu durum, gelecekte kullanılacak ek türbin gücünün bulunduğu sonucuna bizi götürmektedir. Ancak güç artırımının yapılabilmesi için generatör ve diğer bileşenlerin değiştirilmesi, yeni güce uygun hale getirilmesi gerekmektedir.

Yapılan testlerde generatör veriminde ciddi bir düşüşün oluşmadığı görülmüştür. 2012 yılından beridir faaliyette olan ünite sadece %0,1 lik bir verim kaybının olduğu tespit edilmiştir. Bu da geçen süre zarfında generatörde beklenen verim kayıpları dışında, beklenilmeyen veya nedeni bilinmeyen bir verim kaybının olmadığı anlamına gelmektedir. Türbinde gerçekleşen kayıpların yıllık bazda %0-0,15 olması beklenen bir durumdur. Alpaslan-1 HES'te yapılan her iki testte de türbin verimi %91,9 olarak bulunmuştur. Bu duruma göre türbin ve türbin bileşenlerinde %3,5 oranından bir performans düşüklüğü yani verim kaybı söz konusudur. Bu verim kayıpları elbette ki santrale göre değişmektedir. Hatta aynı santraldeki ünitelerde bile bu kayıpların oranı ve nedenleri değişebilmektedir. Kavite hasarı, türbin çarkı kanadında kaynağa bağlı bozulma, su geçişlerindeki yüzey pürüzlülüğü ve türbin çarkı conta boşluğu, korezyon, vorteks, metal yorgunluğu, tortu erezyonu gibi sebepler, performans düşüklüğünün nedeni olarak sunulabilir. Santral veriminin izlenmesiyle esas olarak ünite veriminde gerçekleşecek kayıpların takip edilmesi ve bakım ekibinin doğru karar almasına yardımcı olunması amaçlanmaktadır.

SONUÇ

Hidroelektrik santrallerde en büyük verim kaybı türbin ve türbin bileşenlerinde meydana gelmektedir. Coğrafi ve teknik şartlara bağlı olarak santralin ve türbin-generatör ünitesinin yıllık verim kaybı oranı değişmektedir. Ünitenin yıllara göre performans değişikliğinin bilinmesi santraldeki optimizasyon çalışmalarına yol göstereceği gibi enerji

yönetiminde de kolaylık sağlayacaktır. Ölçülebilen ve izlenebilen bir sisteme sahip olmak, teknik anlamda performans ile ilgili bilinmezlikleri ve belirsizlikleri ortadan kaldırma, üniteye zamanında ve doğru müdahaleler yapma imkânı sağlayacaktır. Böylece daha yüksek oranda ünite ve santral kullanılabilirliği, iyileştirilmiş enerji verimliliği ve daha fazla enerji üretimi tesis edilmiş olacaktır. Ayrıca böyle bir sistem, ünitelerin kapasitesini, enerji verimliliğini ve güvenilirliğini artırma fırsatlarını değerlendirme imkanı da sunacaktır.

Bu çalışma kapsamında, Alpaslan-1 HES'e ait bir üniteye performans testleri yapılabilmesi için gerçek zamanlı bir akış ve verimlilik izleme sistemi kuruldu. Testler bittikten sonra da sistem çalışır vaziyette, anlık olarak türbin verimliliğini hesaplayacak şekilde bırakıldı. Kurulum esnasında elektrik ve mekanik teçhizatın mevcut durumu değerlendirildi, bütün ölçü aletleri kontrol edildi. Kurulumda gerekli olan basınç sensörleri/transmitter, analizör, PLC sunucusu, modüller, dokunmatik ekran vs. gibi teçhizat temin edilerek kritik noktalarda veri toplanması için kullanıldı. VİS için gerekli olan bütün parametreler belirlendi, hesaplandı, ölçüldü ve sisteme yüklendi. Debi hesabının W-K metodu ile sürekli yapıldığı sistemde, endeks testleri metodu ile türbin verimliliği anlık olarak ölçüldü. Neticede, VİS kullanılarak yapılan performans testlerinde generatörde ciddi bir verim kaybının olmadığı, türbinde ise %3,5'lik bir kaybın olduğu tespit edildi. Santraldeki teçhizatın ve ölçü aletlerinin genel olarak iyi durumda olduğu gözlemlendi. İki farklı metot kullanılarak yapılan performans testlerinde elde edilen değerlerin paralellik göstermesi, testlerin başarılı kabul edilebileceğini anlamına gelmektedir. Ancak yine de farklı bir metot kullanarak bir performans testinin yapılması ve sonuçların teyit edilmesi tavsiye edilmiştir.

Santrallerde verim izlem sisteminin kurulması ile ilgili akademik bir çalışmaya rastlanılmamıştır. Bu yönü ile alan, daha fazla çalışma yapılmasına ihtiyaç duymaktadır. Diğer taraftan ülkemizde bu sistemi kullanan santrallerin olup olmadığına dair bir bilgi bulunmamaktadır. Bu nedenle, enerji verimliliği ve yönetimi kapsamında VİS'in ülkemizdeki bütün santrallerde ve bu santrallerde bulunan bütün ünitelerde kurulması tavsiye edilmektedir. Sadece verimlilik kayıplarının değil, bu kayıplara neden olan tortu erezyonu, vibrasyon, balanssızlık, kavitasyon gibi olayların takip edilmesi, santral izlenebilirliğinin en alt bileşenlere kadar indirilmesi çok değerli sonuçlar verecektir. Santrallerin belli periyotlarla farklı metotlar kullanılarak mutlak testleri yapmaları, hem VİS üzerinden sürekli gerçekleşen endeks testleri sonuçlarını kıyaslama açısından, hem de geçmiş değerlerle karşılaştırma imkânı vermesi açısından faydalı olacaktır. Santrallerin verim kayıplarının giderilmesi amacı ile yapılacak olan çalışmalara, büyük revizyonlara başlanılmadan önce maliyet analizi yapılması tavsiye edilmektedir.

KAYNAKLAR

- Akhtar T., Rehman A.U., Jamil M., & Gilani S.O. (2020). Impact of an energy monitoring system on the energy efficiency of an automobile factory: A case study. *Energies*, 13(10), 1-20. <https://doi.org/10.3390/en13102577>
- Aydın, C., & Esen, Ö. (2018). Does the level of energy intensity matter in the effect of energy consumption on the growth of transition economies? Evidence from dynamic panel threshold analysis. *Energy Economics*, 69, 185-195. <https://doi.org/10.1016/j.eneco.2017.11.010>
- Bolla, R., Bruschi, R., Davoli, F., & Cucchiatti, F. (2011). Energy efficiency in the future internet: a survey of existing approaches and trends in energy-aware fixed network infrastructures. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 13(2), 223-244. <https://doi.org/10.1109/SURV.2011.071410.00073>
- British Petroleum (BP). (2023). *BP Energy Outlook 2022 Edition*. <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/energy-outlook/bp-energy-outlook-2022.pdf> Accessed 21.12.2023
- Cui, Q., Kuang, H., Wu, C., & Li, Y. (2014). The changing trend and influencing factors of energy efficiency: The case of nine countries. *Energy*, 64(C), 1026-1034. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.11.060>
- Çengel, Y. A., & Boles, M. A. (1993) Mühendislik yaklaşımıyla termodinamik. *Taner Derbentli (Çev.), İstanbul: Literatür Yayıncılık*.
- Demir Onay, R. & Aydın, C. (2021). Enerji-sermaye arasındaki değişken ikame esnekliğinin ekonomik büyümeye etkisi. *JOEEP: Journal of Emerging Economies and Policy*, 6(2), 196-204.
- Düzgün, B. (2018). Türkiye elektrik iletim ve dağıtım şebekesinin enerji verimliliğinin değerlendirilmesi ve 2023 projeksiyonları. *Politeknik Dergisi*, 21(3), 621-632. <https://doi.org/10.2339/politeknik.389604>

- Dyrstad, J.M., Skonhøft, A., Christensen, M.Q., & Ødegaard, E.T. (2019). Does economic growth eat up environmental improvements? Electricity production and fossil fuel emission in OECD countries 1980–2014. *Energy Policy*, 125,103–109. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.10.051>
- Enerji Tabii Kaynaklar Bakanlığı(ETKB), Hatcd Ltd., & Dünya Bankası. (2020a). Elektrik üretiminde enerji verimliliği-Alpaslan-1 HES türbin performans testleri. Test Raporu. Ankara 73s.
- Enerji Tabii Kaynaklar Bakanlığı (ETKB), Hatcd Ltd., & Dünya Bankası. (2020b). Elektrik üretiminde enerji verimliliği-Alpaslan-1 HES ölçü cihazları değerlendirme raporu. Değerlendirme Raporu. Ankara 57s.
- EÜAŞ, Elektrik üretim Anonim Şirketi. (2023a). *Elektrik üretimi ve ticareti sektör raporu 2022*. <https://www.euas.gov.tr/raporlar> Erişim tarihi 24.12.2023
- EÜAŞ, Elektrik Üretim Anonim Şirketi. (2023b). *Yıllık faaliyet raporu 2022*. <https://www.euas.gov.tr/raporlar> Erişim tarihi 24.12.2023
- Flavin, C., & Lenssen, N. (1994). Enerjide arayışlar. *Yaman Köseoğlu (Çev.). İstanbul: Tema Vakfı Yayınları*
- Gezer, O. (2021, Nisan). Verim izleme sistemi kurulumu ve operasyonlar. EÜAŞ IPA Eğitim Programı (s: 2-30). EÜAŞ.
- Hardcastle, A., & Waterman-Hoey, S. (2009). Energy efficiency industry trends and workforce development in washington state. Study Report Phaes 1. University of Washington State University, Washington 67s.
- Heffner, G., Maurer, L., Sarkar, A., & Wang, X. (2010). Minding the gap: World Bank's assistance to power shortage mitigation in the developing world. *Energy*, 35 (4), 1584–1591. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2009.05.027>
- Hepbaşlı, A. (2001). Sanayide Enerji Yönetim Programının Temeller. *Termoklima Dergisi*, 106, 63-75.
- IEA, International Energy Agency. (2022a, June). *World energy investment 2022*. <https://www.iea.org/reports/world-energy-investment-2022> Accessed 25.12.2023
- IEA, International Energy Agency. (2022b, October). *World energy outlook 2022*. <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022> Accessed 25.12.2023
- IHA, International Hydropower Association (2022, July). *2022 Hydropower Status Report*. <https://www.hydropower.org/publications/2022-hydropower-status-report> Erişim tarihi 25.12.2023
- Kırlı, M., & Kulu, T. (2016). Enerji yönetimi ve enerji muhasebesi. *Journal of Human Sciences*, 13(3), 4891-4905. <https://doi.org/10.14687/jhs.v13i3.4244>
- Kocaman, B. (2015). Yenilenebilir enerji kaynaklı mikro şebekelerde enerji yönetimi. Doktora Tezi. Kocaeli Üniversitesi Fen bilimleri Enstitüsü Elektrik Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Kocaeli 178s.
- Koç, E., & Şenel, M. C. (2013). Dünyada ve Türkiye’de enerji durumu - Genel değerlendirme, *TMMOB Mühendis ve Makine Dergisi*, 54 (639), 32-44.
- Marques, G., & Pitarma, R. (2017). Monitoring energy consumption system to improve energy efficiency. In: A. Rocha, A.M. Correia, H. Adeli, L.P. Reis, & S. Costanzo (Eds.), *Recent Advances in Information Systems and Technologies Volume 2* (pp. 3-11). Guarda:Polytechnic Institute of Guarda – Unit for Inland Development, <https://doi.org/10.1007/978-3-319-56538-5>
- Martirano, L., Bua, F., Cristaldi, L., Grigis, G., Mongiovì, L.G., Polverini, S., Tironi, E. (2019). Assessment for a distributed monitoring system for industrial and commercial applications. *IEEE Transactions on Industry Applications*. 55(6), 7320-7327. <https://doi.org/10.1109/TIA.2019.2939507>
- Meral, M.E., Teke, A., & Tümay, M. (2009). Elektrik tesislerinde enerji verimliliği. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 14(1), 31-37. <https://doi.org/10.17482/uuufe.79724>
- Mumlu, G. (2008). Enerji yönetim sistemi ve bir sanayi tesisinde enerji yönetimi uygulaması. Yüksek Lisans Tezi. Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Sakarya 116s.

- Özbakır, P. (2006). Enerji yönetimi. Yüksek Lisans Tezi. Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul 157s.
- Özbek, G. (2022). Hidroelektrik santrallerinde enerji verimliliğine türbinin etkisi. Yüksek Lisans Tezi. Bitlis Eren Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Elektrik Elektronik Anabilim Dalı, Bitlis 126s.
- Özbek, G., & Rüstemli, S. (2022). Hidrolik türbin performans testlerinin yapılmasında Winter-Kennedy metodunun kullanılması. *Euroasia Journal of Mathematics, Engineering, Natural & Medical Sciences*, 9 (22), 41-61. <https://doi.org/10.5281/zenodo.6948331>
- Özbek, G., & Rüstemli, S. (2023). Hidrolik türbin performans testlerinin yapılmasında boya seyreltme metodunun kullanılması-saha çalışması. *Yüzüncü Yıl Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 28(3), 973-992. <https://doi.org/10.53433/yyufbed.1190992>
- Pamir A. N. (2003). Dünyada ve Türkiye’de enerji, Türkiye’nin Enerji kaynakları ve enerji politikaları. *Metalurji Dergisi*, 134, 73-100.
- Patterson, M.G. (1996). What is energy efficiency? Concepts, issues and methodological issues. *Energy Policy*, 24(5), 377–390. [https://doi.org/10.1016/0301-4215\(96\)00017-1](https://doi.org/10.1016/0301-4215(96)00017-1)
- Pekmezci, Z. (2020). Nükleer santrallere yönelik yerel halkın bakışı: Sinop ili örneği. Yüksek lisans Tezi. Ondokuz Mayıs Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Kamu Yönetimi Ana Bilim Dalı, Samsun 173s.
- Tekel, E. (2006). Termik santrallerin enerji ve ekserji analizi. Yüksek Lisans Tezi. Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Denizli 99s.
- UN DESA, Population Division of the Department of Economic and Social Affairs of the United Nations. *World population prospects 2022*. <https://population.un.org/wpp/> Accessed 24.12.2023
- UN DESA, Population Division of the Department of Economic and Social Affairs of the United Nations. *World urbanization prospects 2018*. <https://population.un.org/wup/> Accessed 24.12.2023
- Uzun, A., & Değirmen, M. (2018). Endüstriyel işletmelerde enerji verimliliği ve enerji yönetimi. *International Journal of Economic Studies*, 4(2), 83-97.
- Wei, M., Patadia, S., & Kammen, D.M. (2010). Putting renewables and energy efficiency to work: how many jobs can the clean energy industry generate in the US? *Energy Policy*, 38(2), 919-931. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2009.10.044>
- Westermann, J. (2021, March). Efficiency Improvement. EÜAŞ IPA Training Program (pp. 10-55). EÜAŞ.



Kahramanmaraş Sütçü İmam University

Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 15.06.2024
Kabul Tarihi : 18.09.2024

Received Date : 15.06.2024
Accepted Date : 18.09.2024

DA-DA GERİLİM YÜKSELTEN DÖNÜŞTÜRÜCÜNÜN KAYAN KIPLI KONTROLÜNÜN TASARIM VE SIMÜLASYONU

DESIGN AND SIMULATION OF SLIDING MODE CONTROL FOR DC-DC BOOST CONVERTER

Ömer Faruk ÇIRIŞ^{*1} (ORCID: 0009-0004-6236-9546)
Süleyman ADAK² (ORCID: 0000-0003-1436-2830)
Hasan CANGİ³ (ORCID: 0000-0001-6954-7299)
Ramazan ALTINTAŞ¹ (ORCID: 0000-0002-0573-8456)

^{1,4}Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Kahramanmaraş, Türkiye
²Mardin Artuklu Üniversitesi, Meslek Yüksekokulu, Elektrik ve Enerji Bölümü, Mardin,
³Hasan Kalyoncu Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Gaziantep, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Ömer Faruk ÇIRIŞ, cirisomer@hotmail.com

ÖZET

Güç elektroniği devre elemanları kullanılarak tasarlanan doğru akım-doğru akım (DA-DA) dönüştürücüler, DA gerilimi başka bir gerilim değerine dönüştüren devrelerdir. DA-DA dönüştürücüler elektronik cihazlarda, cep telefonu, dizüstü bilgisayarın şarj devrelerinde, DA motorların beslemesinde ve güneş enerji santrallerine kadar geniş bir uygulama yelpazesine sahiptirler. DA-DA dönüştürücülerde kullanılan anahtarlama elemanlarından dolayı bu sistemler doğrusal olmayan bir özellik gösteren yapısal sistemlerdir. Kontrollerinde doğrusal olmayan sistemleri kontrol eden yöntemler kullanılmalıdır. Bundan dolayı kaymalı kip kontrolü DA-DA dönüştürücüler için uygun bir kontrol yöntemidir. Bu çalışmada, kayan kipli kontrol yöntemi kullanılarak DA-DA yükseltici dönüştürücünün kontrolüne ait analiz işlemleri yapılmıştır. Kayan kipli kontrol yöntemi ile kontrolü sağlanan DA-DA gerilim yükselten dönüştürücüler diğer dönüştürücü türlerine göre daha iyi performans gösterirler. Kayan kipli kontrolün geleneksel kontrol sistemlerine göre en önemli avantajı ; yük, hat ve parametrik belirsizliklere karşı uygulanabilir olmasıdır. Bu çalışmada, DA-DA yükselten dönüştürücünün MATLAB/Simulink ile modellenmesi yapılmış olup simülasyonu gerçekleştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Kayan kipli kontrol, gerilim yükselten dönüştürücü, kontrol tekniği, DA-DA çevirici, doğrusal olmayan kontrol

ABSTRACT

DC-to-DC converters designed using power electronic circuit elements are circuits that convert DC voltage to another voltage value. DC-DC converters have a wide range of applications, from electronic devices to charging circuits for cell phones and laptops, powering DC motors, and solar energy plants. Due to the switching elements used in DC-DC converters, these systems display nonlinear characteristics, making them structural systems that require the use of methods for controlling nonlinear systems. Therefore, sliding mode control is a suitable control method for DC-DC converters. In this study, analysis procedures related to the control of the DC-DC boost converter using the sliding mode control method have been carried out. DC-DC voltage boost converters controlled by sliding mode control method exhibit better performance compared to other types of converters. The most significant advantage of sliding mode control over traditional control systems is its applicability against load, line, and parametric uncertainties. In this study, the DC-DC voltage boost converter has been modeled using MATLAB/Simulink, and simulations have been carried out.

To Cite: ÇIRIŞ, O. F., ADAK, S., CANGİ, H., & ALTINTAŞ, R., (2024). DA-DA GERİLİM YÜKSELTEN DÖNÜŞTÜRÜCÜNÜN KAYAN KIPLI KONTROLÜNÜN TASARIM VE SIMÜLASYONU. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 27(4), 1145-1161.

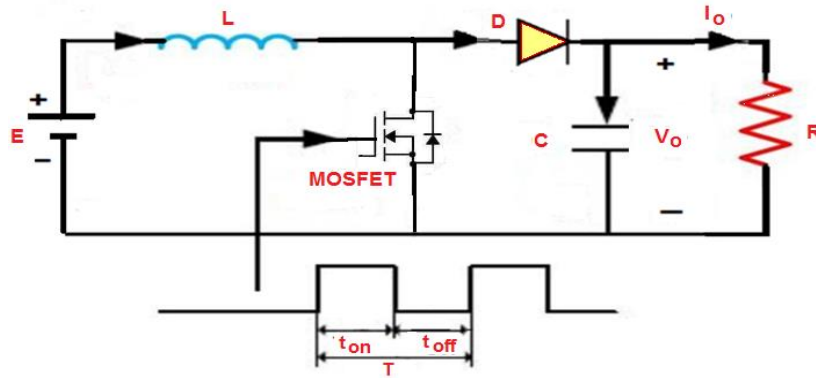
Keywords: Sliding mode control, voltage boost converter, control technique, dc-dc converter, nonlinear control

GİRİŞ

DC-DC gerilim yükselten dönüştürücüler, enerji dönüşümü ve güç yönetimi alanlarında önemli bir rol oynamaktadır. Bu tür dönüştürücüler, düşük bir gerilim kaynağından daha yüksek bir gerilim seviyesine çıkarma işlevi yaparak geniş bir uygulama yelpazesine sahiptirler. Özellikle taşınabilir elektronik cihazlardan endüstriyel güç sistemlerine kadar birçok alanda kullanılmaktadırlar. Ancak DC-DC gerilim yükselten dönüştürücülerin istikrarlı ve etkili bir şekilde çalışmalarını sağlamak için uygun kontrol tekniklerinin kullanılması önemlidir. Kayan kipli kontrol, bu tür dönüştürücülerde genellikle tercih edilen bir kontrol stratejisidir. Bu kontrol sonucu sistemin belirli bir hedefe ulaşmasını sağlamak için kontrol sinyali parametrelerini sürekli olarak ayarlayarak istikrarlı bir performans elde etmeyi amaçlar (Sachin ve Nayak, 2017). Bu makalede, DC-DC gerilim yükselten dönüştürücülerin kayan kipli kontrolü yöntemi incelenecek ve bu yöntemin dönüştürücü performansı üzerindeki etkisi araştırılacaktır. Ayrıca, bu kontrol stratejisinin avantajları ve dezavantajları da ele alınarak, DC-DC dönüştürücülerin verimliliği, güvenilirliği ve kararlılığı üzerindeki potansiyel etkileri değerlendirilecektir. Bu çalışma, DC-DC gerilim yükselten dönüştürücülerin kontrolünde kayan kipli kontrolün önemini vurgulayarak bu alandaki araştırmalara yeni bir bakış açısı sunmayı amaçlamaktadır.

DC-DC GERİLİM YÜKSELTEN DÖNÜŞTÜRÜCÜNÜN MODELLEMESİ

DC-DC gerilim yükselten dönüştürücünün modellenmesi, genellikle matematiksel ve devre teorisi prensiplerine dayanır. Bu modelleme işlemi, dönüştürücünün davranışını açıklayan bir matematiksel model oluşturmayı amaçlar. Bu model dönüştürücünün giriş ve çıkış gerilimleri arasındaki ilişkiyi, akım akışını ve genel sistem davranışını tanımlar (Özçelik ve Yılmaz, 2015). Bu dönüştürücüler genellikle bir indüktör, bir anahtar ve bir çıkış kapasitörden oluşur. Anahtar, genellikle bir transistor veya Mosfet gibi bir yarı iletken cihazdır. Ayrıca güneş panellerinden veya araç akülerinden elde edilen düşük gerilimli enerjiyi yüksek gerilimli sistemlere entegre etmek için güneş enerjisi uygulamalarında ve araç elektroniğinde de kullanılırlar.



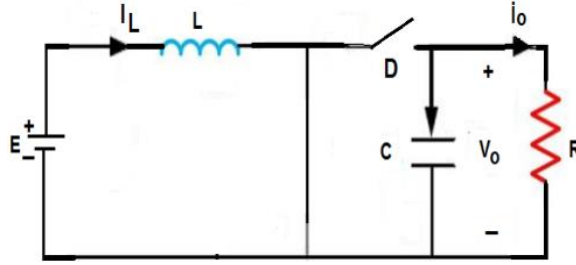
Şekil 1. DA-DA Gerilim Artırıcı Dönüştürücü

Modelleme işlemi, dönüştürücünün fiziksel yapısını ve bileşenlerini anlamayı ardından devre denklemlerini ve kontrol denklemlerini türetmeyi içerir. Bu genellikle devre teorisi, elektromanyetik teori ve kontrol teorisi prensipleri kullanılarak yapılır (Wai ve Shih, 2011). DA-DA gerilim artırıcı konvektörler genellikle verimliliği artırmak ve istenen çıkış gerilimini elde etmek için modülasyon teknikleriyle birleştirilir. Darbe genişlik modülasyonu (PWM) ve Darbe frekansı modülasyonu (PFM) gibi teknikler sıkça kullanılır (Guldemir, 2005).

Devre elemanlarının (indüktör, kondansatör, anahtar, diyot vb.) devre denklemleri yazılır. Bu, dönüştürücünün anahtarlamalı veya doğrusal olup olmadığına bağlı olarak değişir. Dönüştürücünün kontrol stratejisi belirlenir. Bu stratejiye göre kontrol denklemleri yazılır (Ardhenta ve Rusli, 2021). Elde edilen devre denklemleri ve kontrol denklemleri kullanılarak dönüştürücünün matematiksel modeli oluşturulur. Matematiksel model genellikle diferansiyel denklemler veya transfer fonksiyonları şeklinde ifade edilir. Oluşturulan model, simülasyon yazılımı veya diğer araçlar kullanılarak simüle edilir ve dönüştürücünün gerçek davranışıyla karşılaştırılır. Modelin doğruluğu ve güvenilirliği doğrulanır (Chincholkar vd., 2018).

DA-DA yükselten (artırıcı) dönüştürücüde anahtarın iletim (ON) durumunda olduğu eşdeğer devre, tipik olarak

bir yarı iletken anahtar (genellikle bir Mosfet) kullanılarak gerçekleştirilir. Anahtarın iletim durumunda giriş voltajı, indüktör ve çıkış devresi üzerinde bir yol oluşturulur; böylece indüktör enerji depolar ve çıkış gerilimi yükseltilir. Şekil 2. ve Şekil 3. artırıcı (boost) dönüştürücünün anahtarın açık ve kapalı durumlarını göstermektedir; burada L, C, R, ve sırasıyla indüktör, kapasitör, dirençli yük, giriş ve çıkış voltajını temsil eder. Burada yük, indüktör ve kapasitör akımlarını gösterir. Artırıcı dönüştürücünün anahtarın açık ve kapalı durumlarından denklemler elde edilir. Gerilim artıran dönüştürücüde anahtarın kapalı olduğu durumda (switch ON), enerji kaynağından indüklenen gerilim indüktör (L) üzerinde bir manyetik alan oluşturur (Cavallo ve Guida, 2012). Bu durumda indüktör, enerjinin bir kısmını depolar ve çıkış (yük) devresine aktarır.



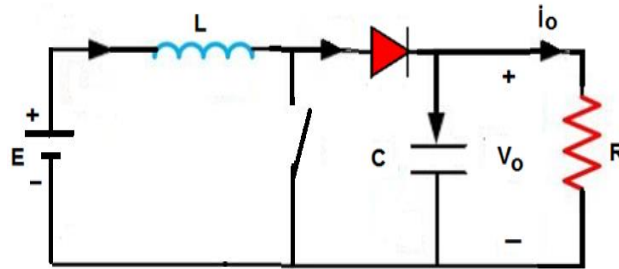
Şekil 2. Anahtarın İletimde Olmasına İlişkin Eşdeğer Devre

Mosfet, anahtarı temsil eder ve iletim durumunda olduğu için giriş gerilimi (E), indüktör (L) ve çıkış devresi arasında bir yol oluşturur. Bu yol boyunca indüktör enerjiyi depolar ve çıkış gerilimini artırır. Gerilim artırıcı dönüştürücünün anahtarın açık olması durumunda aşağıdaki denklemler elde edilir.

$$i_L = \int_{t_{on}}^T E u dt \quad (1)$$

$$\frac{dV_0}{dt} = -\frac{V_0}{RC} \quad (2)$$

Anahtarın açık durumda (switch OFF), indüktörün manyetik alanı enerjiyi çıkış devresine aktarmaya devam eder. İndüktör üzerinde oluşan manyetik alan, diyot (D) üzerinde ters yönlü bir voltaj indükler. Bu, çıkış voltajının artırılmasına yardımcı olur. Bu eşdeğer devre, anahtar kesildiğinde bile çıkış voltajının artırılmasını sağlar. DA-DA yükselten (boost) dönüştürücüde, anahtarın kesim (off) durumunda eşdeğer devre aşağıdaki gibidir. Formun Üstü



Şekil 3. Anahtarın Kesimde Olmasına İlişkin Eşdeğer Devre

$$L \frac{di_L}{dt} = E - V_0 \quad (3)$$

indüktör akımı :

$$i_L = \frac{1}{L} \int (E - V_0) u dt \quad (4)$$

olarak ifade edilir. Yükseltici dönüştürücünün çıkış gerilimi :

$$V_0 = \frac{1}{C} \int (i_L - i_R) dt \quad (5)$$

şeklinde ifade edilir. İndüktör akımının ifadesi :

$$i_L = \frac{1}{L} \int [(Eu) + (E - V_0)\bar{u}] dt \quad (6)$$

olarak elde edilir. Burada, u'nun değeri S anahtarını pozisyonuna bağlı olarak bir veya sıfır değerini alır. \bar{u} ise u'nun lojik olarak tersidir. Burada u aşağıdaki gibi temsil edilir:

$$u = \begin{cases} 1 & S > 0 \\ 0 & S < 0 \end{cases} \quad (7)$$

YÜKSELTEN DA-DA DÖNÜŞTÜRÜCÜNÜN DURUM DEĞİŞKENLERİ YÖNTEMİ İLE MODELLENMESİ VE KONTROLÖR TASARIMI

Yükselten DA-DA dönüştürücüsünün durum değişkenleri yöntemiyle modellenmesi, sistemin dinamik davranışını matematiksel olarak ifade etmek için kullanılır. Bu, sistem analizi, kontrol tasarımı ve performansın tahmin edilmesi gibi amaçlar için önemlidir. Yükselten DA-DA dönüştürücünün durum değişkenleri modellenmesi için durum değişkenlerinin belirlenmesi gerekir. Sistemdeki önemli değişkenler belirlenir. Bunlar durum değişkenleri olarak seçilir (Lopez-Santos vd. 2015). Durum değişkenleri olarak kondansatördeki şarj miktarı, indüktör akımı ve anahtarlama elemanlarının durumu seçilebilir. Daha sonra durum değişkenlerinin zamana göre değişimlerini ifade eden diferansiyel denklemler oluşturulur. Bu denklemler, sistemin dinamik davranışını tanımlar. Sistemin çıkışını, genellikle yük akımını veya gerilimini ifade eden denklemler oluşturulur. Bu, kontrol hedeflerinin belirlenmesine yardımcı olur (Zhang vd., 2015). Oluşturulan diferansiyel denklemler matris formuna dönüştürülür. Bu, sistem denklemlerinin daha kolay analiz edilmesini ve çözülmesini sağlar.

Bu adımların tamamlanmasıyla yükselten DA-DA dönüştürücünün durum değişkenleri modeli elde edilmiş olur. Bu model sistem davranışının analiz edilmesi, kontrol tasarımı ve performansın tahmin edilmesi gibi birçok uygulamada kullanılır (Martínez-Treviño vd., 2019). $x(t)$ durum değişkenlerini göstermek üzere $u(t)$ denetim girişi işareti göstermesi durumunda durum denklemlerinin vektör matris formunda aşağıda verildiği gibi gösterilebilir:

$$\frac{dx_n(t)}{dt} A_n(t) + B_n u(t) \quad (8)$$

$$y_n(t) = C_n(t) \quad (9)$$

dT_s çalışma modu ve $n=1$ için durum denklemleri aşağıdaki şekilde yazılabilir:

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} i_L(t) \\ V_c(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{RC} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_L(t) \\ V_c(t) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \end{pmatrix} E \quad (10)$$

Kaynak fonksiyonu:

$$Y_1(t) = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_L(t) \\ V_c(t) \end{pmatrix} \quad (11)$$

Olarak bulunur. (1-d)Ts modu ve $n=2$ için durum denklemleri aşağıda verilmiştir:

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} i_L(t) \\ V_c(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{RC} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_L(t) \\ V_c(t) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \end{pmatrix} E \quad (12)$$

kaynak fonksiyonu :

$$y_2(t) = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_L(t) \\ V_c(t) \end{pmatrix} \quad (13)$$

olarak belirlenir. Kontrol değişkenleri için durum uzayı oluşturulabilir. Gerilim yükselten çevirici için durum değişkenlerine ait matrisel formun gösterimi aşağıdaki gibidir (Malla vd., 2013). Genellikle kayan kip kontrolünde çıkış gerilimi (V_o) belirli bir referans değerinde (V_{ref}) tutulmaya çalışılır. Bu, geri beslemenin sağlanması ve hata sinyalinin hesaplanmasıyla gerçekleştirilir (Repecho vd., 2018). Hata sinyali, çıkış gerilimi ile referans gerilim arasındaki farktır. Bu hata sinyali, kontrol algoritması tarafından işlenir ve u 'nun değerinin ayarlanmasına neden olur. e_1 , e_2 ve e_3 gerilim hatalarını göstermek üzere :

$$e_1 = V_{ref} - \beta V_o \quad (14)$$

$$e_2 = \frac{d}{dt}(V_{ref} - \beta V_o) \quad (15)$$

$$e_3 = \int (V_{ref} - \beta V_o) dt \quad (16)$$

olarak bulunur. Şeklinde yazılır. $e_1=x_1$, $e_2=x_2$ ve $e_3=x_3$ dönüşümü yapılırsa durum değişkenleri matrisi aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$\begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_{ref} - \beta V_o \\ \frac{d}{dt}(V_{ref} - \beta V_o) \\ \int (V_{ref} - \beta V_o) dt \end{pmatrix} \quad (17)$$

V_{ref} referans gerilimini, β geri bildirim ağı oranını ve V_o çevirici çıkış gerilimini göstermektedir. Durum değişkenleri elektrik devrelerinde çeşitli elemanlarla ilişkilendirilebilir (Keçecioglu vd. 2019). Örneğin bir devredeki durum değişkenleri şunlar olabilir: kondansatörlerin şarj durumu (Volt-saniye cinsinden yük), indüktörlerin akımı (ampere cinsinden), dirençlerdeki gerilim veya akım (Volt veya Amper cinsinden). Anahtarlama elemanları (transistörler, Mosfet'ler vb.) ve durumları (açık/kapalı). Sistemdeki enerji depolama bileşenlerinin (örneğin batarya) şarj durumu. Bu durum değişkenleri, bir elektrik devresinin dinamik davranışını açıklamak için kullanılabilir. Bu bilgileri kullanarak sistemdeki değişimleri zamanla izleyebilir ve kontrol algoritmaları oluşturabiliriz (Marouani vd., 2012). Kayma kipli kontrol geri besleme ağı oranı (β), genellikle sistemin istenilen performans özelliklerini sağlamak için dikkatle seçilir. Bu oran, kontrol sisteminin istikrarını, hassasiyetini ve hızını etkiler. Genellikle deneyimli kontrol mühendisleri tarafından sistemin dinamik davranışı ve istenen performans kriterleri göz önünde bulundurularak belirlenir (Giral vd. 2015). β Kayma kipli kontrolde geri besleme ağı oranı, kayma yüzeyi tasarımıyla ilişkilidir (Mishra vd., 2020).

Kayma yüzeyi, kontrol hedeflerini ve istenen davranışı tanımlar. Bu nedenle geri besleme ağı oranı, kayma yüzeyinin doğru şekilde oluşturulmasıyla birlikte dikkatlice seçilmelidir (Lopez-Santos vd., 2015). Sistemin istenen performans özellikleri, geri besleme ağı oranının seçiminde belirleyici olabilir. Örneğin kararlılık, hızlı cevap, düşük geçici aşırı vuruş gibi performans kriterleri dikkate alınmalıdır (Muktiadji vd., 2018). Sonuç olarak kayma kipli kontrol geri besleme ağı oranı sistem özellikleri, kontrol hedefleri ve tasarım tecrübesi göz önünde bulundurularak dikkatlice seçilmelidir (Al Zawaideh ve Boiko, 2022). Doğru oran, istenen performansı sağlamak ve istikrarlı bir kontrol sağlamak için önemlidir. Kondansatör gerilimi ile indüktör akımının karşılığı (17) denkleminde yerleştirirsek aşağıdaki ifade elde edilir:

$$\begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_{ref} - \beta V_o \\ \frac{\beta V_o}{R_L C} + \frac{\beta}{L C} \int (V_o - E) \bar{u} dt \\ \int (V_{ref} - \beta V_o) dt \end{pmatrix} \quad (18)$$

Denklem (18)'deki ifadelerin türevlerini aldığımızda durum uzayı değişkenleri elde edilir. bu da gerilim artırıcı dönüştürücünün kontrol tasarımı için gereklidir:

$$\frac{dx_1}{dt} = \frac{d}{dt}(V_{ref} - \beta V_o) = x_2 \quad (19)$$

$$\frac{dx_2}{dt} = -\beta \frac{dV_o}{dt} = x_3 \quad (20)$$

$$\frac{dx_2}{dt} = \frac{\beta}{R_1 C} \frac{dV_0}{dt} + \frac{\beta}{LC} (V_0 - E) \bar{u} \quad (21)$$

$$\frac{dx_2}{dt} = \frac{-e_2}{R_L C} + \left(\frac{\beta V_0}{LC} - \frac{\beta E}{LC} \right) \bar{u} \quad (22)$$

$$\frac{dx_3}{dt} = V_{ref} - \beta V_0 = e_1 \quad (23)$$

Yükselten dönüştürücü için durum uzayı aşağıdaki genel formla gösterilir:

$$\frac{dx}{dt} = Ax + B\bar{u} \quad (24)$$

Durum uzayı açıklamaları, gerilim yükselten dönüştürücüsünün kontrol tasarımı için gereklidir. Durum uzayı değişkenlerini matrisel formda yazarsak aşağıdaki ifadeler elde edilir:

$$\begin{pmatrix} \frac{dx_1}{dt} \\ \frac{dx_2}{dt} \\ \frac{dx_3}{dt} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1/R_L C & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ (\beta V_0 - \beta E)/LC \\ 0 \end{pmatrix} \bar{u} \quad (25)$$

(25) denkleminde A ve B matrislerinin karşılığı:

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1/R_L C & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (26)$$

olarak bulunur. B matrisinin karşılığı:

$$B = \begin{pmatrix} 0 \\ (\beta V_0 - \beta E)/LC \\ 0 \end{pmatrix} \quad (27)$$

olarak bulunur. Durum uzayı değişkenleri, bir sistemdeki önemli dinamik bilgileri temsil etmek için kullanılır. Bunların önemi şu şekilde özetlenebilir:

- Sistem davranışının tam temsili: Durum uzayı değişkenleri, bir sistemdeki tüm dinamik bilgileri içerir. Bu nedenle, sistem davranışını tam olarak temsil etmek için gereklidirler.
- Kontrol Tasarımı: Durum uzayı değişkenleri, kontrol sistemleri tasarlarırken kullanılır. Bir sistemdeki durum değişkenlerinin kontrolü, istenilen hedeflere ulaşmak için gerçekleştirilen girişleri yönlendirmeye yardımcı olur.
- Gözleme: Durum uzayı değişkenleri, sistemdeki durumun gözlenmesi veya tahmin edilmesi için kullanılabilir. Bu, gerçek zamanlı kontrol ve sistem izleme için önemlidir.
- Modelleme ve Analiz: Durum uzayı değişkenleri, sistemin matematiksel modellenmesi ve analizi için kullanılır. Bu, sistem davranışını daha derinlemesine anlamak ve sistem üzerinde değişiklikler yapmak için önemlidir.
- Çözümleme Kolaylığı: Durum uzayı değişkenleri, diferansiyel denklemleri bir dizi ilk dereceden denkleme dönüştürerek çözümlenmeyi kolaylaştırır.

Bu nedenlerden dolayı, durum uzayı değişkenleri, sistemlerin analizi, tasarımı ve kontrolü için temel bir kavramdır (Cavallo ve Guida, 2012).

Kayan Kipli Kontrolde Denetleyici Tasarımı

Kayan kipli kontrol yükselten dönüştürücü sistemin modellenmesi, bir güç elektroniği devresinin matematiksel bir ifadesidir. Bu dönüştürücü, giriş gerilimini daha yüksek bir çıkış gerilimine yükseltmek için kullanılır (El Fadil vd., 2006). Sistemin matematiksel modelini oluşturmak için, devredeki bileşenlerin özellikleri ve çalışma prensipleri dikkate alınır (Chincholkar vd., 2022). Kayan kipli kontrol edilen dönüştürücüsünün temel bileşenleri,

anahtarlar (genellikle Mosfetler), indüktör, kondansatör ve çıkış yüküdür (Lopez vd., 2004). Devrenin çalışma prensibi, anahtarlardan birinin (genellikle Mosfet) zamanlama ile açılıp kapanmasıyla indüktörde bir akım akışının oluşturulması ve bu akımın ardından bir çıkış gerilimi oluşturulmasıdır (Arulselvi vd. 2005).

Sistemin matematiksel modelini oluştururken, devredeki indüktör ve kondansatör gibi pasif bileşenlerin dinamik davranışları ifade edilir. Ayrıca, anahtarların (Mosfet'lerin) iletim ve kesim durumları da dikkate alınır (Panda v., 2015). Matematiksel modelleme süreci, genellikle devredeki bileşenlerin voltaj ve akım ilişkilerini ifade eden diferansiyel denklemlerle başlar. Bu denklemler, devrenin dinamik davranışını tanımlar (Qamar vd. 2015). Ardından sistemdeki bileşenlerin özelliklerine ve çalışma koşullarına dayanarak bu denklemler çözülür.

Sonuç olarak kayan kipli kontrol gerilimini artıran dönüştürücünün modellemesi, devredeki bileşenlerin matematiksel ifadesini içeren bir dizi diferansiyel denklem ve doğrusal olmayan denklemlerden oluşur (Qi vd., 2021). Bu model devrenin performansını analiz etmek, tasarımını optimize etmek ve kontrol stratejilerini geliştirmek için kullanılabilir.

Gerilim artıran (yükselten) çeviricilerde çıkış gerilimini izlemek için bir kontrol yüzeyi, geri besleme devresi olarak adlandırılır. Bu geri besleme devresi, çıkış gerilimini ölçer ve kontrol algoritmasına geri bildirim sağlar. Böylece çıkış geriliminin istenilen değerde kalmasını sağlar (Al-Baidhani ve Kazmierczuk, 2018). Gerilim artıran çeviricilerde çıkış gerilimini izlemek için kullanılan bu kontrol yüzeyi, çıkış geriliminin istenilen değere hassas bir şekilde ayarlanmasını sağlar. Bu sayede çıkış gerilimi değişen yük koşullarına veya giriş gerilimi dalgalanmalarına rağmen istikrarlı kalabilir (Tan vd. 2018).

$$u = \begin{cases} 1 & S > 0 \\ 0 & S < 0 \end{cases} \quad (28)$$

Anlık durum ait yörünge:

$$S = \alpha_1 X_1 + \alpha_2 X_2 + \alpha_3 X_3 = J^T x \quad (29)$$

şeklinde ifade edilir. Burada $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ kayan kipli kontrolün katsayılarını, jakobyen (J) matrisi göstermektedir. Bu katsayıların değerleri doğru seçilerek kayan kipli kontrolde üç koşul gerçekleştirilebilir (Ling vd., 2008). Vurma, var olma ve kararlılık koşullarıdır. (29) denklemi $S > 0$ değerleri için aşağıdaki gibi tanımlanabilir:

$$\frac{dS}{dt} = J^T A x + J^T B v + J^T D < 0 \quad (30)$$

(29) denkleminde, $S < 0$ değerleri için:

$$\frac{dS}{dt} = J^T A x + J^T B v + J^T D > 0 \quad (31)$$

$$\frac{dS}{dt} = \alpha_1 \frac{d}{dt} \left(V_{ref} - \frac{\beta}{C} \int i_C dt \right) + \alpha_2 \frac{d}{dt} \left(\frac{\beta V_0}{C R_L} + \frac{\beta}{LC} \int (V_0 - E) \bar{u} dt \right) + \alpha_3 \frac{d}{dt} \int (V_{ref} - \beta V_0) dt \quad (32)$$

Birinci koşul:

$$S > 0, \quad \frac{dS}{dt} < 0 \quad (33)$$

$$-\alpha_1 + \left(\frac{\beta i_C}{C} \right) + \alpha_2 \left(\frac{\beta i_C}{R_L C^2} \right) + \alpha_3 (V_{ref} - \beta V_0) < 0 \quad (34)$$

İkinci koşul:

$$S < 0, \quad \frac{dS}{dt} > 0 \quad (35)$$

$$-\alpha_1 \left(\frac{\beta i_C}{C} \right) + \alpha_2 \left(\frac{\beta i_C}{R_L C^2} + \frac{\beta V_0}{LC} - \frac{\beta E}{LC} \right) + \alpha_3 (V_{ref} - \beta V_0) > 0 \quad (36)$$

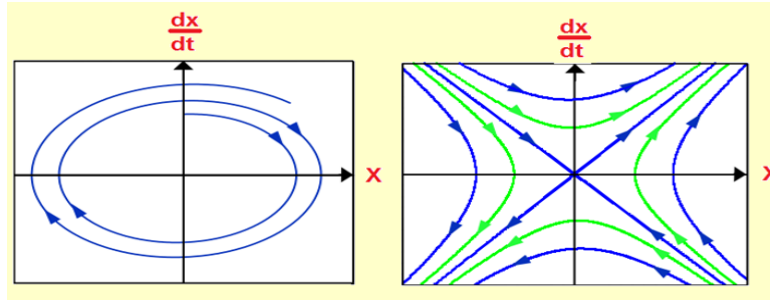
(34) ile (36) denklemlerinde hareketle :

$$0 < \beta L \left(\frac{\alpha_1}{\alpha_2} - \frac{1}{R_L C} \right) i_c - LC \frac{\alpha_3}{\alpha_2} (V_{ref} - \beta V_0) < \beta (V_0 - E) \quad (37)$$

eşitliği elde edilir. Kayan kipli kontrolde denetleyici tasarımı, genellikle dinamik sistemlerin kararlılığını sağlamak, performansını artırmak veya belirli bir takım hedeflere ulaşmak için kullanılır (Asma vd., 2017). Kayan kipli kontrol, sistem parametrelerindeki belirsizlikler veya değişkenliklerle başa çıkabilen bir denetleme stratejisi sunar. Bu tasarım, gerçek zamanlı uygulamalarda özellikle otomatik kontrol sistemlerinde yaygın olarak kullanılır (Vijayakumar vd., 2014).

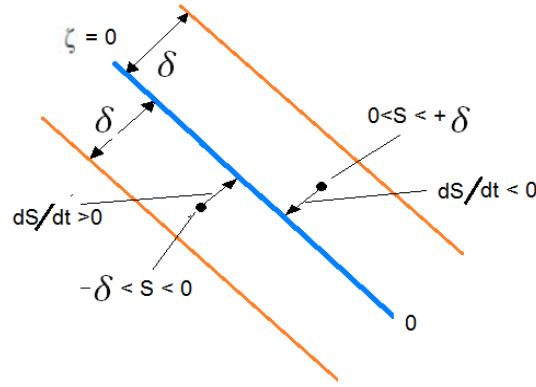
KAYAN KIPLİ KONTROLDE KARARLILIK KOŞULU

Bir kontrol sistemini tasarlarken kararlılık için gereken bir kriterlerdir. Genellikle mühendislik ve kontrol teorisi bağlamında kullanılırlar. Tasarlanan sistem dış etkilere karşı dayanıklı olmalıdır. Bu, değişen parametreleri gürültü veya dış etkenlerden kaynaklanan dalgalanmaları tolere edebilmelidir. Yani sistem, girdi değişikliklerine veya dış etkilere karşı esnek olmalıdır. Sistem, herhangi bir başlangıç durumundan sonra zamanla kararlı bir duruma ulaşmalıdır. Başka bir deyişle kontrol edilen değişkenler zamanla belirli bir değere yakınsamalı veya istikrarlı bir şekilde davranmalıdır. Bu özellikler, genellikle matematiksel denklemler veya belirli durumlarla ifade edilir. Örneğin bir kontrol sistemi tasarlarken sistemin matematiksel modeli üzerinde belirli denge koşullarını veya kararlılık koşullarını sağlaması gerekebilir. Bu, tasarım sürecinde kullanılan kritik parametrelerin belirlenmesine yardımcı olur. Bu şartlar, genellikle kontrol mühendisliği disiplininde kontrol sistemlerinin analiz ve tasarımında önemli bir rol oynar. Sistemlerin istikrarlı, dayanıklı ve etkili bir şekilde çalışmasını sağlamak için kayan kipli kontrolde kararlılık koşulu gibi koşulların dikkate alınması önemlidir.



Şekil 4. Karasız Sistemler

Kayan kipli kontrol, bir sistemdeki belirli bir değişkenin istenilen değerde tutulması için kullanılan bir kontrol yöntemidir. Bu sistemlerde, kontrol edilen değişkenin istenilen değere yakın tutulması için bir geri besleme döngüsü kullanılır. Kararlılık, bu tür sistemlerin istenilen değere hızlı bir şekilde ulaşması ve bu değeri sürdürmesi yeteneğidir. Ancak, bazı durumlarda sistemin kararlılığı zorlayıcı olabilir ve bu durum karasızlık olarak adlandırılır. Karasız sistemler, kontrol edilen değişkenin istenilen değere yakın durmayı başaramadığı veya istenilen değeri aşırı derecede sık dalgalanma gösterdiği durumlarda ortaya çıkar. Bu durumlar genellikle sistem parametrelerindeki yanlışlık, kontrol algoritmasındaki hatalar veya dış etmenlerin ani değişimleri gibi faktörlerden kaynaklanabilir. Karasız sistemler genellikle istenmeyen sonuçlara yol açar ve bu nedenle kontrol sistemlerinin tasarımı ve analizi büyük önem taşır. Kararlılık analizi ve kararlılık artırma teknikleri, kontrol mühendislerinin bu tür sistemleri optimize etmelerine ve istenilen performansı elde etmelerine yardımcı olur. Kayan kipli kontrolün aşağıdaki şart sağlandığında gerçekleşir.



Şekil 5. Yörüngeler Denge Durumuna Yaklaşan

Kayan kipli kontrol, bir sistemde istikrar ve kararlılık sağlamak için kullanılan bir kontrol stratejisidir. Genellikle geri besleme sistemlerinde kullanılır. Bir hedef değeri belirlenirken sistemdeki değişkenler sürekli olarak izlenir ve bu değişkenlerin hedef değere yaklaşmasını sağlayacak düzeltmeler yapılır. Bu kontrol stratejisi, sürekli olarak sistemi izleyen ve gerektiğinde düzeltme yapabilen bir geri besleme döngüsü üzerine kuruludur. Sistemdeki dalgalanmaları düzeltmek ve istikrarı sağlamak için sürekli olarak geri bildirim olarak buna göre hareket etmek esastır. Formun Üstü Kayma katsayılarının seçiminde aşağıdaki ifadeler kullanılır:

$$\frac{\alpha_1}{\alpha_2} = \frac{10}{T_s} \quad (38)$$

diğer oran:

$$\frac{\alpha_3}{\alpha_2} = \frac{25}{\delta^2 T_s^2} \quad (39)$$

olarak bulunur. Gerilim yükselten dönüştürücülerde, PWM tabanlı denetleyici için kontrol denklemlerinin aşağıda ifade edildiği gibidir:

$$\frac{dS}{dt} = J^T Ax + J^T B \bar{u}_{eq} = 0 \quad (40)$$

" u_{eq} " terimi, bu eşdeğer kayan kipli kontrol yöntemindeki eşdeğer denge durumunu ifade edebilir. Bu, kontrol sisteminin belirli bir çalışma noktasında sabit durumda olduğunu ve belirli bir giriş sinyali altında sistemin istenilen davranışı sergilediğini ifade eder. Aşağıda denklemlerle ifade edilir:

$$\bar{u}_{eq} = -[J^T B]^{-1} J^T Ax \quad (41)$$

Kayan kipli kontrolde Jacobi matrisi, genellikle bir sistemin dinamiklerini temsil etmek için kullanılan bir matematiksel araçtır. Jacobi matrisi, bir sistemin belirli bir anında çıkış değişkenlerinin giriş değişkenlerine olan duyarlılığını gösterir. Özellikle kontrol sistemleri analizinde ve tasarımında önemlidir. (41) denkleminde J ile A ve B matrislerinin değerleri yazılırsa :

$$\bar{u}_{eq} = \frac{\beta L}{\beta(V_0 - E)} \left(\frac{\alpha_1}{\alpha_2} - \frac{1}{R_L C} \right) i_c - \frac{\alpha_3 LC}{\alpha_2 \beta(V_0 - E)} (V_{ref} - \beta V_0) \quad (42)$$

ifadesi elde edilir. Burada u_{eq} süreklidir :

$$0 < \bar{u}_{eq} < 1 \quad (43)$$

olarak bulunur :

$$0 < \bar{u}_{eq} = \frac{\beta L}{\beta(V_0 - E)} \left(\frac{\alpha_1}{\alpha_2} - \frac{1}{R_L C} \right) i_c - \frac{\alpha_3 LC}{\alpha_2 \beta(V_0 - E)} (V_{ref} - \beta V_0) < 1 \quad (44)$$

$u = 1 - \bar{u}$ ifadesinden hareketle, $u_{eq} = 1 - \bar{u}_{eq}$ şeklinde yazılabilir. Bu ifade aşağıdaki şekilde yazılabilir:

$$0 < u_{eq} = 1 - \left[\frac{\beta L}{\beta(V_0 - E)} \left(\frac{\alpha_1}{\alpha_2} - \frac{1}{R_{LC}} \right) i_c - (V_{ref} - \beta V_0) \frac{\alpha_3 LC}{\alpha_2 \beta (V_0 - E)} \right] < 1 \quad (45)$$

$\beta(V_0 - E)$ ifadesi (45) denklemini ile çarpılırsa:

$$0 < u_{eq}^* = -i_c \beta L \left(\frac{\alpha_1}{\alpha_2} - \frac{1}{R_{LC}} \right) + \frac{\alpha_3}{\alpha_2} (V_{ref} - \beta V_0) LC + \beta(V_0 - E) < \beta(V_0 - E) \quad (46)$$

olarak bulunur. Yükselten dönüştürücüde doluluk oranı:

$$0 < d = \frac{V_c}{v_{m,rampa}} < 1 \quad (47)$$

şeklinde ifade edilir:

$$0 < \frac{u_{eq}^* = -i_c \beta L \left(\frac{\alpha_1}{\alpha_2} - \frac{1}{R_{LC}} \right) + \frac{\alpha_3}{\alpha_2} (V_{ref} - \beta V_0) LC + \beta(V_0 - E)}{\beta(V_0 - E)} < 1 \quad (48)$$

(46) ile (48) denklemlerinden hareketle:

$$v_c = u_{eq}^* = -\beta L \left(\frac{\alpha_1}{\alpha_2} - \frac{1}{R_{LC}} \right) i_c + LC \frac{\alpha_3}{\alpha_2} (V_{ref} - \beta V_0) + \beta(V_0 - E) \quad (49)$$

Kondansatör geriliminin ifadesi:

$$v_c = -K_{p1} i_c + K_{p2} (V_{ref} - \beta V_0) + \beta(V_0 - E) \quad (50)$$

olarak bulunur. Kayan kipli kontrolde "rampa" fonksiyonu, genellikle bir kontrol sisteminin çıkışını belirlemek için kullanılır. Bu fonksiyon, bir giriş sinyali (genellikle zamana bağlı olarak değişen) ile çıkış arasındaki ilişkiyi tanımlar. Rampa fonksiyonu, zamanla artan veya azalan bir çıkış üretmek için kullanılır. Rampa fonksiyonunun tepe değeri:

$$v_{m,rampa} = \beta(V_0 - E) \quad (51)$$

olarak ifade edilir. Kontrol edilen değişken ile kontrol sinyali arasındaki doğrusal ilişkiyi belirleyen K_{p1} ve K_{p2} 'ye ilişkin formüller aşağıdaki şekliyle ifade edilir:

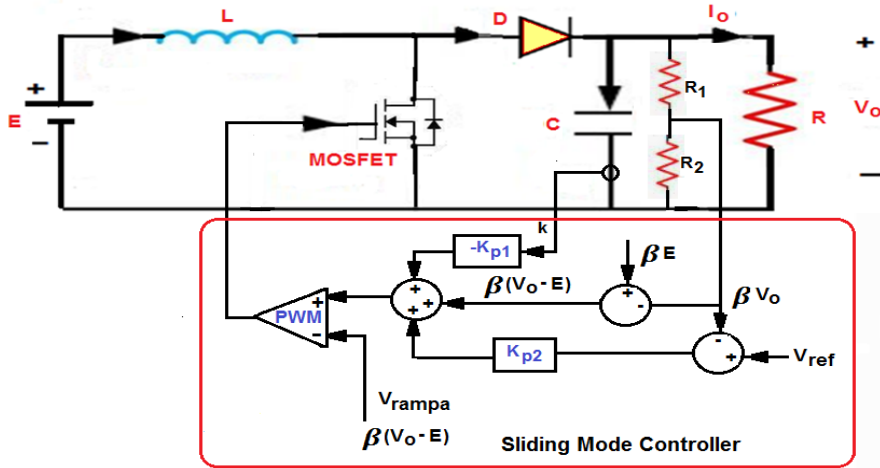
$$K_{p1} = \beta L \left(\frac{\alpha_1}{\alpha_2} - \frac{1}{R_{LC}} \right) \quad (52)$$

$$K_{p2} = \frac{\alpha_3}{\alpha_2} LC \quad (53)$$

olarak bulunur. Kayan kipli kontrolde örnekleme zamanı:

$$T_s = \frac{4}{\delta W_n} \quad (54)$$

şeklinde ifade edilirler. Gerilim yükselten çeviricilerin kayan kipli kontrolü, genellikle endüstriyel uygulamalarda kullanılır ve birçok farklı devre yapısıyla gerçekleştirilebilir. Prensip şeması, temel işlevleri ve bileşenleri açıklayan bir diyagramdır. Şekil 6'da sisteme ilişkin prensip şeması verilmiştir.



Şekil 6. Gerilim Yükselten Çeviricinin Kayan Kipli Kontrolü

Bu prensip şemasında E , giriş gerilimini temsil eder. PWM kontrol bloğu, genellikle bir mikrodenetleyici veya özel bir kontrol entegresi tarafından sağlanan kayan kipli kontrol sinyalini (ueq) alır. Bu kontrol sinyali, güç anahtarlarının (genellikle Mosfet'lerin) anahtarlama frekansını ve döngü oranını belirleyerek çıkış gerilimini regüle eder.

Yükselten Dönüştürücünün Kayan Kipli Kontrolünün Simulink Eşdeğeri

Kayan kipli kontrol sistemlerinde kullanılan parametreler; kontrol edilen sürecin doğası, istenilen performans kriterleri ve kontrol stratejisi gibi faktörlere bağlı olarak değişebilir. Genellikle kayan kipli kontrolde K_p (oransal kazanç) kullanılır. Bu, kontrol edilen değişken ile kontrol sinyali arasındaki doğrusal ilişkiyi belirler. Yüksek bir K_p değeri, hızlı bir cevap sağlayabilir ancak aşırı yanıt ve kararlılık sorunlarına neden olabilir. Kontrol edilen sürecin istenilen hedef değeri set noktasıdır. Kayan kipli kontrol sistemi, set noktasına ulaşmaya çalışır. Bir başka parametre örnek zaman (örnekleme zamanı) ifadesidir. Bu, kontrol algoritmasının ne sıklıkla güncellendiğini belirler. Örnek zamanı, sistemin dinamiklerine ve kontrol gereksinimlerine bağlı olarak ayarlanır.

Tablo 1. Yükselten Dönüştürücü Parametre Değerleri

Açıklama	Çevirici parametreleri	Nominal değerleri
Dönüştürücü giriş gerilimi	E	12 V
Yük direnci	R	52 Ω
İndüktans	L	15.9 Mh
Kapasitans	C	50 μF
Anahtarlama frekansı	F_s	20 KHz
Dönüştürücü çıkış gerilimi	V_o	24 V

Frekans değeri anahtarlama frekansının yirmide biri olarak seçilir. Sistemle ilgili bir bozulma varsa parametre değerleri değişir ve zaman içinde kararlı bir hal alır.

$$f = \frac{1}{20} f_{sw} \quad (55)$$

(55) denkleminde frekansın değeri ::

$$f = 20000 * \frac{1}{20} = 1000 \text{ Hz}$$

olarak bulunur. Açılal frekansın değeri ::

$$W_n = 2 * \pi * f = 2 * 3.14 * 1000 = 6280 \text{ (rad/s)}$$

Olarak bulunur. (54) denkleminde örnekleme zamanı ::

$$T_s = \frac{4}{\delta W_n} = \frac{4}{0.2 * 6280} = 3.18 \text{ ms}$$

şeklinde hesaplanır. (38) nolu denklemden kontrol katsayılarının oranı :

$$\frac{\alpha_1}{\alpha_2} = \frac{10}{T_s} = \frac{10}{3.18 * 10^{-3}} = 3141.6$$

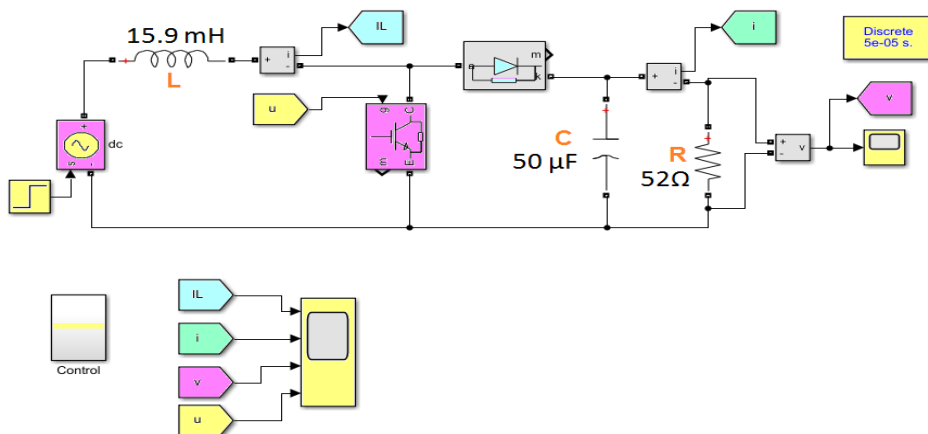
Olarak bulunur. Bu bağlamda (39)'nolu denklemden diğer kontrol katsayılarının oranı:

$$\frac{\alpha_3}{\alpha_2} = \frac{25}{\delta^2 T_s^2} = \frac{25}{0.2^2 (3.1 * 10^{-3})^2} = 61800 * 10^3$$

olarak hesaplanır. Kayan kipli kontrolün Matlab/Simulink ile analizi oldukça yaygın bir uygulamadır ve genellikle güç elektroniği sistemlerinin tasarımı ve analizinde kullanılır. Kayan kipli kontrol özellikle invertörler, doğrultucular ve yükselten/azaltan çeviriciler gibi güç elektroniği sistemlerinin çeşitli tiplerinde simülasyon ve analiz uygulamalarında kullanılır. Matlab/Simulink kullanarak kayan kipli kontrolün analizi için temel adımlar:

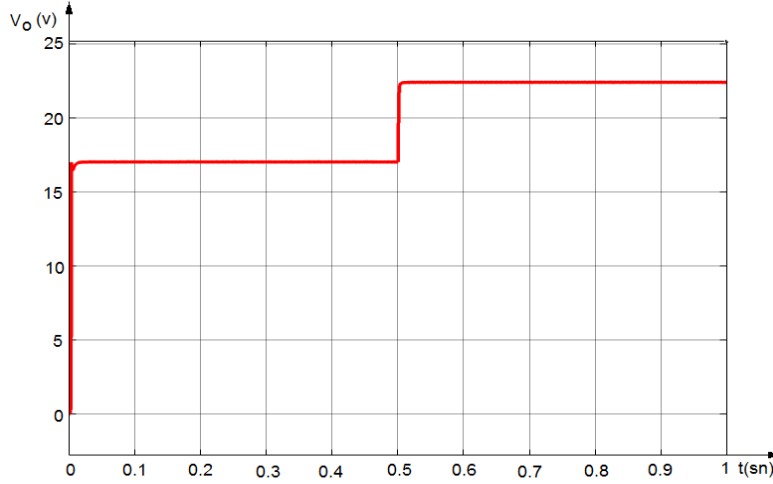
- Modelleme işleminde kullanma: İlk olarak, analiz edilecek güç elektroniği devresinin Simulink modelini oluşturmanız gerekir. Bu genellikle blok diyagramı şeklinde yapılır ve giriş gerilimini, çıkış yükünü, güç anahtarlarını ve kontrol devrelerini içerir.
- Kontrol algoritması oluşturma: Kayan kipli kontrol algoritmasını tasarlamamız gerekir. Bu algoritma, güç anahtarlarının açma/kapama zamanlarını belirler ve çıkış gerilimini istenen değerde tutar. PID denetleyicileri veya daha karmaşık kontrol stratejileri kullanılabilir.
- Sistemin simülasyonu gerçekleştirme: Tasarlanmış modeli kullanarak Simulink'te simülasyon çalıştırın. Bu, kontrol algoritmasının performansını değerlendirmenize ve çeşitli koşullar altında devrenin davranışını gözlemlemenize olanak tanır. Simülasyon sonuçları, çıkış gerilimi, akımı, güç kaybı gibi çeşitli performans metriklerini içerebilir.
- Analiz ve optimizasyon işlemlerinde kullanma: Simülasyon sonuçlarını analiz edin ve kontrol algoritmasını gerektiği şekilde ayarlayın veya optimize edin. Bu adım, sistem performansını iyileştirmek ve istenen davranışı elde etmek için önemlidir.
- Doğruluk Testini gerçekleştirme: Tasarlanan kontrol algoritmasının gerçek dünya koşullarında nasıl çalışacağını doğrulamak için daha ileri düzeyde testler yapın. Bu, donanım prototipleri kullanarak veya gerçek zamanlı simülasyon platformlarıyla yapılabilir.

Matlab/Simulink, kayan kipli kontrol ve diğer güç elektroniği sistemlerinin analizi için güçlü ve esnek bir araçtır. Bu adımları takip ederek dönüştürücülerin kayan kipli kontrolü tasarımını ve analizini gerçekleştirebilir ve istenen performansı elde edilebilir. Şekil 7'de kayan kipli DA-DA yükselticinin kontrolüne ilişkin simulink devresi verilmiştir.



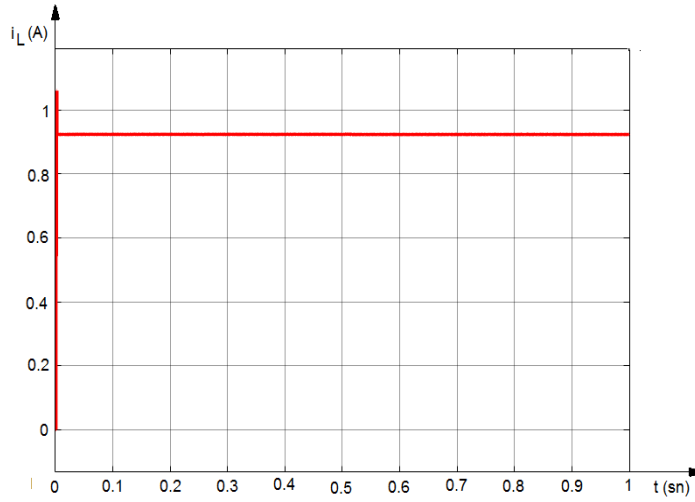
Şekil 7. Gerilim Artıran Çeviricinin Kayan Kipli Kontrolüne Ait Simulink Devresi

Gerilim artıran çeviricilerin çıkış geriliminin değişimi genellikle çıkış yükü, giriş gerilimi ve kontrol stratejisi gibi birçok faktöre bağlıdır. Çıkış geriliminin değişimi, çoğu zaman çıkış geriliminin sabit tutulması veya belirli bir profilin izlenmesi için kayan kipli kontrol stratejileri kullanılarak gerçekleştirilir.



Şekil 8. Gerilim Artıran Çeviricinin Çıkış Geriliminin Kayan Kipli Kontrolü

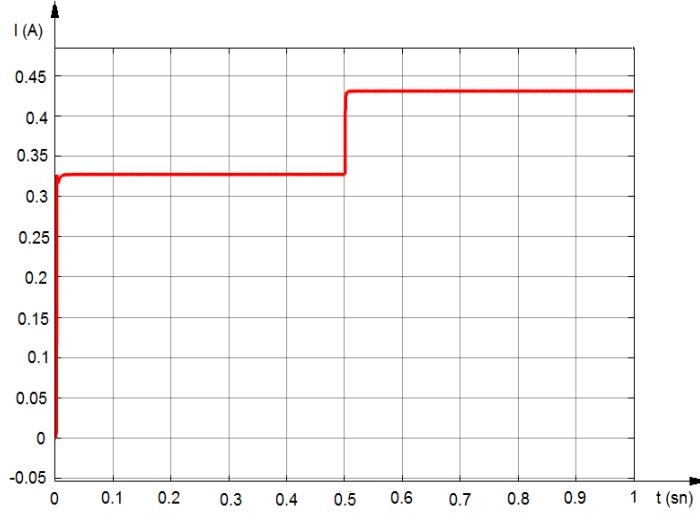
Gerilim artırıcı çeviricilerde, çıkış geriliminin kayan kipli kontrolü için genellikle darbe genişlik modülasyonu kullanılır. Bu yöntem, Mosfet transistörünün işlem süresini (darbe genişliğini) değiştirerek çıkış gerilimini ayarlar. PWM kontrolü, çıkış gerilimini istenilen düzeyde tutmak veya değiştirmek için darbe genişliğini ayarlayarak çalışır. Bu kontrol yöntemi, genellikle gerilim artırıcı çeviricilerde kullanılan bir yöntemdir. İşlem, transistörlerin iletkenlik süresini ayarlayarak gerçekleşir. Örneğin çıkış gerilimi artırılması gerektiğinde, PWM kontrolü ile darbe genişliği artırılır. Bu, transistörlerin daha uzun süre iletken olmasını sağlar dolayısıyla çıkış gerilimi artar. Tersine, çıkış geriliminin azaltılması gerektiğinde, darbe genişliği azaltılır ve Mosfet'in iletkenlik süresi kısaltılır. Bu şekilde PWM kontrolü kullanılarak çıkış geriliminin istenilen düzeyde tutulması veya değiştirilmesi sağlanır. Bu yöntem, çeşitli uygulamalarda yaygın olarak kullanılan bir kontrol stratejisidir.



Şekil 9. Gerilim Artıran Çeviricinin İndüktör Akımının Kayan Kipli Kontrolü

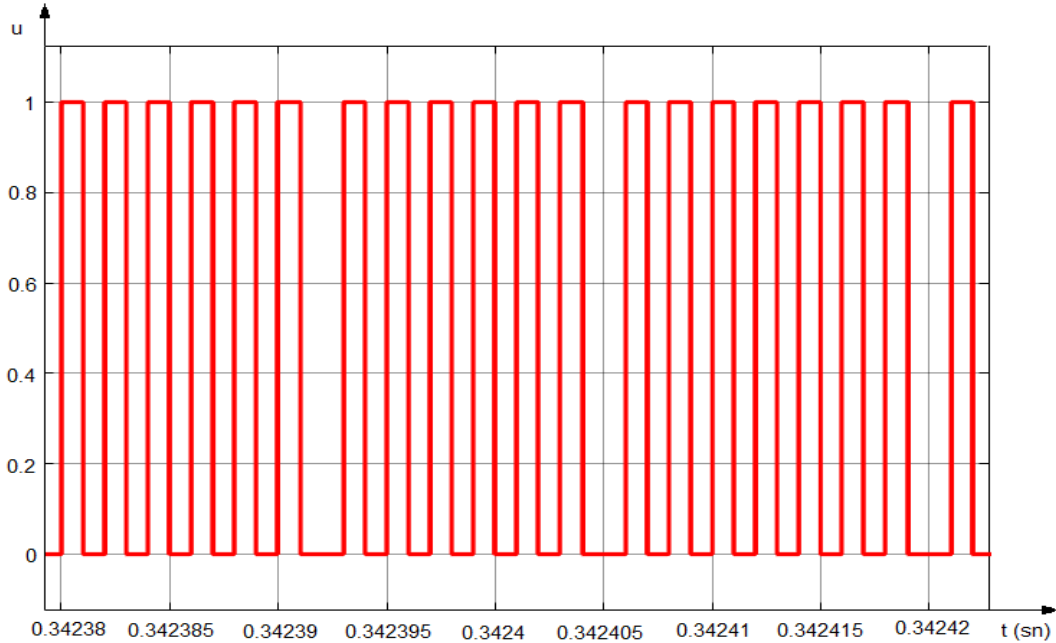
Gerilim artırıcı bir çeviricide indüktör akımının kayan kipli kontrolü, genellikle devredeki anahtarlama elemanların (transistörlerin) işlem süresinin ayarlanması yoluyla gerçekleştirilir. Bu kontrol, çıkış gerilimini belirli bir seviyede tutmak için indüktör akımının sabit kalmasını sağlar. İndüktör akımı, genellikle anahtarlama devresinin döngü süresi içinde darbeleri bir şekilde değişir. Bu akım, indüktörün enerji depolaması ve boşaltmasına bağlı olarak gerçekleşir. PWM kontrolünde, transistörlerin (genellikle Mosfet veya IGBT gibi) anahtarlama frekansı yüksek olduğu için indüktör akımı, devredeki anahtarlama elemanların işlem süresi (darbe genişliği) boyunca değişir. Bu süreç indüktörde depolanan enerjinin çıkış gerilimine dönüştürülmesini sağlar. İndüktör akımının kayan kipli kontrolü, genellikle çıkış geriliminin istenen seviyede kalması için PWM sinyalinin darbe genişliğinin (işlem süresinin) ayarlanmasıyla gerçekleşir. Bu, çıkış gerilimi veya yük değişiklikleri gibi faktörlere

yanıt olarak indüktör akımının istenilen düzeyde tutulmasını sağlar. Bu sayede çıkış gerilimi istenilen seviyede tutulabilir ve istenen çıkış gücü elde edilebilir.



Şekil 10. Gerilim Artıran Çeviricinin Yük Akımının Kayan Kipli Kontrolü

Gerilim artırıcı çeviricilerde yük akımının kayan kipli kontrolü için genellikle akım modülasyonu kullanılır. Bu teknik, çıkış akımının istenilen düzeyde tutulması veya değiştirilmesi için kullanılır. Yük akımının artırılması gerektiğinde PWM darbe genişliği veya frekansı artırılabilir. Bu, transistörlerin daha uzun süre veya daha sık çalışmasını sağlar, böylece çıkış akımı artar. Tersine yük akımının azaltılması gerektiğinde darbe genişliği veya frekansı azaltılabilir. Bu da çıkış akımının düşmesine neden olur. Bu şekilde akım modülasyonu kullanılarak çıkış akımının istenilen düzeyde tutulması veya değiştirilmesi sağlanır. Bu yöntem, gerilim artırıcı çeviricilerde yük akımının kontrol edilmesinde yaygın olarak kullanılan bir stratejidir. Burada u , büyüklüğü genellikle PWM sinyalini temsil eder. PWM sinyali, güç anahtarlarının (genellikle Mosfet'lerin) anahtarlama zamanlarını belirler. Bu, çıkış geriliminin istenilen değere ulaşmasını sağlar.



Şekil 11. Kayan Kip Kontrolü Gerilim Artıran Çeviricide u 'nun Değişimi

Kayan kipli kontrolde, kontrol sinyali genellikle bir referans gerilimiyle karşılaştırılır ve buna göre PWM sinyali üretilir. Bu PWM sinyali, transistörlerin iletkenlik süresini veya genliğini kontrol eder. Böylece çıkış gerilimini veya akımını istenen düzeyde tutar. Kontrol sinyali, bir geri besleme döngüsü aracılığıyla elde edilebilir. Bu döngü, çıkış gerilimi veya akımıyla karşılaştırılan bir referans gerilim arasındaki farkı ölçer ve bu farkı minimize

etmek için PWM sinyalini ayarlar. Genellikle u, PWM sinyalini temsil eder. PWM sinyali, güç anahtarlarının (genellikle Mosfet'lerin) anahtarlama zamanlarını belirler. Bu, çıkış geriliminin istenilen değere ulaşmasını sağlar. Kayan kip kontrolünde u'nun değişimi, çıkış geriliminin anlık olarak izlenmesi ve kontrol algoritmasının bu bilgiyi kullanarak giriş gerilimi veya anahtarlama frekansını uygun şekilde ayarlamasıyla gerçekleşir. Sonuç olarak kayan kip kontrolü, çıkış geriliminin istenilen değerde tutulması için giriş gerilimi veya anahtarlama frekansının dinamik olarak ayarlanması prensibine dayanır. Bu ayarlamalar, u'nun değerinin değişmesine ve dolayısıyla çıkış geriliminin istenilen değere ulaşmasına ve tutulmasına yol açar.

SONUÇ

Kayan kipli kontrol DA-DA gerilim yükselten dönüştürücünün genel performansını önemli ölçüde artırır. Bu çalışmada, çıkış gerilimini ve akımını istenilen değerlere daha hızlı ve hassas bir şekilde ulaşmasını sağladı. Ayrıca kayan kipli kontrolün hızlı bir şekilde dinamik koşullara uyum sağlayabilme yeteneği sayesinde sistem stabilitesini artırması ve aşırı yüklenme durumlarında dönüştürücünün korunmasını sağladı. Bu çalışma, DA-DA gerilim yükselten dönüştürücülerin daha etkin ve güvenilir bir şekilde tasarlanması ve kontrol edilmesi sağlanmıştır. Bu çalışma sonuçları enerji dönüşümü alanında daha ileri araştırmalara yol gösterebilir ve endüstriyel uygulamalarda yenilikçi çözümler sunabilir.

DA-DA gerilim yükselten dönüştürücünün kayan kipli kontrol tasarımı ve simülasyonu MATLAB/Simulink kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Gerilim yükselten dönüştürücülerin kayan kipli kontrolü, bu tür dönüştürücülerin performansını artırmak ve istikrarlı bir çalışma sağlamak için çok etkili bir yöntemdir. Yapılan bu çalışmada, kayan kipli kontrolün dönüştürücünün hedeflenen çıkış gerilimine daha hızlı ve hassas bir şekilde ulaşabildiğini göstermektedir. Ayrıca kayan kipli kontrol stratejisinin yük değişimlerine ve diğer dış etkilere karşı daha dirençli olduğu ve sistem kararlılığını artırdı. Kayan kipli kontrolün, dönüştürücü performansını artırarak enerji verimliliğini ve sistem kararlılığını iyileştirir. Bununla birlikte kayan kipli kontrolün uygulanması ve ayarlanması bazı zorluklar içerebilir ve dikkatli bir tasarım gerektirebilir. Gerilim yükselten çeviricilerde istenen çıkış gerilimini veya akımını izlemek için kullanılabilen etkili bir kontrol stratejisidir.

Genel olarak, DC-DC gerilim yükselten dönüştürücülerin kayan kipli kontrolü bu dönüştürücülerin güvenilirliği, verimliliği ve performansını artırmak için etkili bir yöntem olarak öne çıkmaktadır. Gelecekteki çalışmalar, kayan kipli kontrol stratejisinin daha da optimize edilmesi ve farklı uygulama alanlarında kullanılması üzerine odaklanabilir, bu alandaki potansiyel avantajlar daha geniş bir şekilde değerlendirilebilir.

KAYNAKLAR

Al-Baidhani, H. & Kazmierczuk, M.K. (2018) PWM-based proportional-integral sliding-mode current control of DC-DC boost converter, *2018 IEEE Texas Power and Energy Conference (TPEC)*, College Station, TX, USA, pp. 1-6. <https://doi.org/10.1109/TPEC.2018.8312062>

Al Zawaideh, A. & Boiko, I.M. (2022). Analysis of Stability and Performance of a Cascaded PI Sliding-Mode Control DC-DC Boost Converter via LPRS, in *IEEE Transactions on Power Electronics*, 37 (9): 10455-10465, <https://doi.org/10.1109/TPEL.2022.3169000>

Ardhenta, L. & Rusli, M. (2021). Sliding Mode Control of Output Voltage in DC-DC Boost Converter Using PI Sliding Surface, *2021 International Conference on Electrical and Information Technology (IEIT)*, Malang, Indonesia, pp. 228-232, <https://doi.org/10.1109/IEIT53149.2021.9587410>.

Arulselvi, S., Kumar, C.R., Uma, G. & Chidambaram, M. (2005). Design of fuzzy sliding mode control for DC-DC converter, *Proceedings of 2005 International Conference on Intelligent Sensing and Information Processing, 2005.*, Chennai, India, pp. 217-222, <https://doi.org/10.1109/ICISIP.2005.1529451>.

Asma, C., Abdelaziz, Z. & Nadia, Z. (2017). Dual loop control of DC-DC boost converter based cascade sliding mode control, *2017 International Conference on Green Energy Conversion Systems (GECS)*, Hammamet, Tunisia, pp. 1-6, <https://doi.org/10.1109/GECS.2017.8066151>

Cavallo, A. & Guida, B. (2012). Sliding mode control for DC/DC converters, *2012 IEEE 51st IEEE Conference on Decision and Control (CDC)*, Maui, HI, USA, pp. 7088-7094, <https://doi.org/10.1109/CDC.2012.6427026>.

- Chincholkar, S.H., Jiang, W. & Chan, C.Y. (2020). A Normalized Output Error-Based Sliding-Mode Controller for the DC–DC Cascade Boost Converter, in *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 67 (1) :92-96. <https://doi.org/10.1109/TCSII.2019.2899388>
- Chincholkar, S.H., Jiang, W. & Chan, C.Y. (2018). An Improved PWM-Based Sliding-Mode Controller for a DC–DC Cascade Boost Converter, in *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 65(11): 1639-1643. <https://doi.org/10.1109/TCSII.2017.2754292>
- El Fadil, H., Giri, F. & Ouadi, H. (2006). Adaptive sliding mode control of PWM boost DC-DC converters, *2006 IEEE Conference on Computer Aided Control System Design, 2006 IEEE International Conference on Control Applications, 2006 IEEE International Symposium on Intelligent Control*, Munich, Germany, pp. 3151-3156, <https://doi.org/10.1109/CACSD-CCA-ISIC.2006.4777142>
- Giral, R., Martinez-Salamero, L., Leyva, R. & Maixe, J. (2000). Sliding-mode control of interleaved boost converters, in *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications*, 47 (9): 1330-1339. <https://doi.org/10.1109/81.883328>
- Guldemir, H. (2005). Sliding Mode Control of Dc-Dc Boost Converter. *Journal of Applied Sciences*, 5: 588-592. <https://doi.org/10.3923/jas.2005.588.592>
- Keçecioglu, Ö., Kılıç, E., Gani, A., Şekkelı, M. (2019). Yükselten DA-DA Dönüştürücünün LQR Denetleyici Kullanılarak Optimal Denetimi. *Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 2(1), 83-88.
- Ling, R., Maksimovic, D. & Leyva, R. (2016). Second-Order Sliding-Mode Controlled Synchronous Buck DC–DC Converter, in *IEEE Transactions on Power Electronics*, 31(3):2539-2549. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2015.2431193>
- Lopez-Santos, O., Martinez-Salamero, L., Garcia, G., Valderrama-Blavi, H. & Sierra-Polanco, T. (2015). Robust Sliding-Mode Control Design for a Voltage Regulated Quadratic Boost Converter, in *IEEE Transactions on Power Electronics*, 30 (4) : 2313-2327. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2014.2325066>
- Lopez, M., de Vicuna, L.G., Castilla, M., Gaya, P. & Lopez, O. (2004). Current distribution control design for paralleled DC/DC converters using sliding-mode control, in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 51(2): 419-428. <https://doi.org/10.1109/TIE.2004.825273>
- Malla, S.G., Rao, M.H.L., Malla, J.M.R., Sabat, R.R., Dadi, J. & Das, M.M. (2013). SVM-DTC Permanent magnet synchronous motor driven electric vehicle with bidirectional converter, *2013 International Multi-Conference on Automation, Computing, Communication, Control and Compressed Sensing (iMac4s)*, Kottayam, India, pp. 742-747, <https://doi.org/10.1109/iMac4s.2013.6526505>
- Marouani, R., Echaieb, K. & Mami, A. (2012). Sliding mode controller for buck-boost dc-dc converter in PV grid-connected system, *2012 16th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference*, Yasmine Hammamet, Tunisia, pp. 281-284, <https://doi.org/10.1109/MELCON.2012.6196433>
- Martínez-Treviño, B. A., Aroudi, A. E., Vidal-Idiarte, E., Cid-Pastor, A., & Martínez-Salamero, L. (2019). Sliding-mode control of a boost converter under constant power loading conditions. *IET Power Electronics*, 12(3), 521-529. <https://doi.org/10.1049/iet-pel.2018.5098>
- Mishra, D., Singh, B. & Panigrahi, B.K (2020). Multi-Resonant Control in a PV-SEPIC Fed PEV Charger with Distorted Grid Conditions, *2020 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES)*, Jaipur, India, pp. 1-6, <https://doi.org/10.1109/PEDES49360.2020.9379790>
- Muktiadji, R.F., Mam, R., Hreh, B., Milyani AH, Rawa M, Seedahmed M.M.A, & Budiman, F.N. (2022). Control of Boost Converter Using Observer-Based Backstepping Sliding Mode Control for DC Microgrid, *Front. Energy Res.* 10:828978. <https://doi.org/10.3389/fenrg.2022.828978>
- Özçelik M.A. & Yılmaz A.S. (2015). Improving the performance of MPPT in PV systems by modified Perturb-and-Observe algorithm (DC side), *Journal of Engineering Research*, 3 (5) : 77-96. <https://doi.org/10.7603/s40632-015-0024-5>
- Panda, S., Banninathaya, V. K. & Sreedevi, A. (2015). Design of boost converter with Second order Sliding Mode Control to attain MPPT for stand alone PV system, *2015 Annual IEEE India Conference (INDICON)*, New Delhi, India, pp. 1-6, <https://doi.org/10.1109/INDICON.2015.7443315>

- Repecho, V., Biel, D., Olm, J.M., & Fossas, E. (2018). Robust sliding mode control of a DC/DC Boost converter with switching frequency regulation, *Journal of the Franklin Institute*, 355 (13): ,5367-5383. <https://doi.org/10.1016/j.jfranklin.2018.05.028>.
- Qamar, M.A. Feng, J. Rehman, A.U. & Raza, A. (2015). Discrete time sliding mode control of DC-DC buck converter, *2015 IEEE Conference on Systems, Process and Control (ICSPC)*, Bandar Sunway, Malaysia, pp. 91-95. <https://doi.org/10.1109/SPC.2015.7473565>
- Qi, Q. Ghaderi, D. Guerrero, J.M. (2021). Sliding mode controller-based switched-capacitor-based high DC gain and low voltage stress DC-DC boost converter for photovoltaic applications, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 125 (1). , 106496. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2020.106496>.
- Sachin, C.S., & Nayak, S.G. (2017). Design and simulation for sliding mode control in DC-DC boost converter, *2017 2nd International Conference on Communication and Electronics Systems (ICCES)*, Coimbatore, India, 2017, pp. 440-445, <https://doi.org/10.1109/CESYS.2017.8321317>
- Tan, S.C., Lai, Y.M. & Tse, C.K (2008). General Design Issues of Sliding-Mode Controllers in DC-DC Converters, in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 55(3):1160-1174, <https://doi.org/10.1109/TIE.2007.909058>.
- Vijayakumar, V., Divya, R. & Vivek A., (2014). Sliding mode controlled quadratic boost converter, *2014 International Conference on Computation of Power, Energy, Information and Communication (ICCPEIC)*, Chennai, India, pp. 189-193, <https://doi.org/10.1109/ICCPEIC.2014.6915363>
- Wai, R.J. & Shih, L.C. (2011). Design of Voltage Tracking Control for DC-DC Boost Converter Via Total Sliding-Mode Technique, in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 58(6): 2502-2511. <https://doi.org/10.1109/TIE.2010.2066539>
- Zhang, J., Dorrell, D.G., Li, L. & Argha, A (2015). A novel sliding mode controller for DC-DC boost converters under input/load variations, *IECON 2015 - 41st Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, Yokohama, Japan, pp. 001698-001703, <https://doi.org/10.1109/IECON.2015.7392346>



Kahramanmaraş Sütçü İmam University

Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 14.08.2023
Kabul Tarihi : 10.09.2024

Received Date : 14.08.2023
Accepted Date : 10.09.2024

PROTOTYPE MANUFACTURING OF A NEW DYNAMIC-BASED PRESSURE MEASUREMENT TEST DEVICE FOR MEDICAL AND TEXTILE APPLICATIONS

MEDİKAL VE TEKSTİL UYGULAMALARINA YÖNELİK YENİ BİR DİNAMİK TABANLI BASINÇ ÖLÇÜM TEST CİHAZININ PROTOTİP İMALATI

Nazime SEYREK KURBAN^{1*} (ORCID: 0000-0001-7419-7211)
*Osman BABAARSLAN*¹ (ORCID: 0000-0002-1606-3431)

¹ Cukurova University, Department of Textile Engineering, Adana, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Nazime SEYREK KURBAN, nskurban@gmail.com

ABSTRACT

Customers nowadays demand that their clothes be comfortable and suitable for their health in addition to the aesthetic features of the clothes they wear. Therefore, manufacturers following technological innovations to test their product capability are putting those devices on the market to measure the impact on health. The study describes the design, development, and prototype manufacturing stages of a new pressure measurement test device for measuring the pressure resulting from the interaction of human legs and stretch garments. The device can bend from the knee and move dynamically which has innovative aspects compared to the ones commercially available. After mass production of the device, it might be possible to measure the pressure levels of the garments to the human body, therefore, the effects of the fabrics on blood pressure in addition to body physiology can be evaluated with concrete values.

Keywords: Compression, medical textiles, pressure measuring device, dynamic pressure measurement, prototype test device

ÖZET

Günümüzdeki müşteriler giydikleri kıyafetlerin estetik özelliklerinin yanı sıra rahatlık ve sağlıkları ile uyumunu da önemsemektedirler. Bu yüzden imalatçılar, teknolojik yenilikleri takip ederek ürün yeterliliklerini test etmek ve ürünlerin sağlık üzerine etkilerini değerlendirebilmek için test cihazları imal etmekte ve pazara sunmaktadır. Çalışmada, insan bacakları ve streç giysilerin etkileşiminden kaynaklanan basıncı ölçmek için yeni bir basınç ölçüm test cihazının tasarım, geliştirme ve prototip üretim aşamaları anlatılmaktadır. Dizden bükülebilen ve dinamik olarak hareket edebilen bu cihaz piyasada bulunan cihazlarla karşılaştırıldığında yenilikçi özelliklere sahiptir. Cihazın seri üretime geçmesinin ardından giysilerin insan vücuduna uyguladığı basınç seviyeleri ölçülebilecektir. Böylelikle kumaşların vücut fizyolojisine etkisinin yanı sıra kan akışına/tansiyona etkileri de somut verilerle değerlendirilebilecektir.

Anahtar Kelimeler: Kompresyon, tıbbi tekstiller, basınç ölçüm cihazı, dinamik basınç ölçümü, prototip test cihazı

INTRODUCTION

Blood circulation in a body is provided by arteries and veins. While arteries send oxygen-rich and clean blood from the heart to the farthest tissues of the body, dirty blood in the tissues is transported back to the heart by the veins. Contractions of the calf muscles also help this process. Thanks to dynamic movements such as walking and jogging, the muscles in the leg contract and pump blood into the heart by compressing the veins. The clothes worn to accelerate blood circulation should not slow the circulation, they should provide freedom of movement and comfort (Seyrek Kurban, 2017). The mechanical properties of the fabric and the suitability of the clothes made of these fabrics affect the comfort degree of the clothes. Versatile and random forces that occur as a result of the interaction between the human body in motion and the garment create a feeling of pressure in the relevant parts of the body. It has been stated that the disturbing level of garment pressure is between 60 and 100 g/cm². Therefore, the pressure exerted by the garment is an important design criterion (Güney et al., 2016). Correct pressure application in the treatment is possible with a balanced pressure profile that decreases upwards from the ankle to the groin. Therefore, it should help the transport of dirty blood from the legs to the heart in one way in the lower body clothing such as stretch pants, tights, etc., which are very much preferred daily except for compression clothes for medical purposes (Seyrek Kurban, 2019).

When looking at the clothes preferred by young and middle-aged people in recent years, it has been noticed that stretch clothes that mostly surround the body like a second skin stand out. Depending on the extreme preference of these clothes, they should not cause any problems in terms of human health and physiology. In addition, it is not desirable any restriction on body movements for life at an increasing pace. From this perspective, it is very important to know the interaction of stretch clothing with the human body is a crucial factor. Stretch garments, which are questionable in terms of health, should be interpreted with measurable concrete data/information that can interact with the human body/leg. There is a huge research gap in the literature in that regard and evaluations are considered purely subjective. From this point of view, a new pressure measurement test apparatus that can measure the interaction of the clothes with a human leg by pressure levels was designed, developed and its prototype manufactured (Seyrek Kurban, 2019). Before moving on to research the manufacturing process, many test apparatus, many of their applications (especially related to medical compression stockings) and a variety of scientific literature have been examined in advance (Pohlen, 2023; RAL-GZ 387/1, 2008; TS ENV 12718, 2006; TS ENV 12719, 2007; TSE CEN/TR 15831, 2010; Cansunar, 2014; Swisslastic MST MK IV and MST MK V and MST Professional 2 and MST MPT-4/MPT-7, 2023; Seyrek Kurban and Babaarslan, 2017; Seyrek Kurban et al., 2016, 2017; Kuenzli et al., 2007; Hohenstein, 2023; Filodoro Calze Spa, 2001; Oğlakçioğlu, 2009; Oğlakçioğlu and Marmaralı, 2010; Yıldız Varan, 2012; Wang et al., 2011). Some of these include individual leg moulds made of wood according to different stocking sizes. The circumference and length of the leg are adjusted using these moulds. Test probes are attached to these wood moulds and the values from the probes are measured using a control system. In such devices, pressure measurement is performed by a manometer with digital output operated by pneumatic principle, some of which allow pressure measurement from seven different points. At the same time, the measurement is conducted in a static (stationary) test environment. In this case, the pressure values which occur during different movements of the leg cannot be measured. Such devices have been developed for particular use in the pressure measurement of medical stockings. The Patent Application No. US2007/0012120A1 discloses a mechanical leg developed for allowing size change in a different test apparatus used for pressure measurement of medical stockings. In this test apparatus, circumferential size expansion is ensured electronically and unidirectionally. Since the leg allows for a unidirectional expansion in this apparatus, a proper measurement can only be made in a limited region. The Patent Application No. TR2010/01394 relates to a pressure measurement apparatus. It is stated in the said invention that pressure measurement at seven different points of the leg can be performed in different types (short, mid-calf, thigh high, and pantyhose) and various groups (primarily compression stockings; as well as regular, support, and work stockings) of stockings and the pressure profile can be detected before wearing. It was also stated that this apparatus is capable of determining pressure values of the cuff portion of regular socks, at the same time allowing a pressure measurement for any type of compression product (bandages, corsets, knee pads, wrist pads, etc.) by adjusting the mechanical mould form. However, this apparatus also performs a static measurement. Also, this test apparatus is quite different from human anatomy and the surface structure thereof carries many components that may affect the test results. A European patent application with the publication number EP1118851 A2 relates a device for measuring the compression that can be exerted by a stocking, pantyhose, or the like. The device disclosed in the document is capable of displaying and recording the compression data both in a static and a dynamic condition, and uses a detection system with two-dimensional sensors, each comprising a matrix arrangement of load cells. It appears that pressure measurement apparatuses

worldwide are generally statically operating apparatuses. The moving apparatuses, on the other hand, have a limited capability of movement, but not a sufficient measurement precision (Seyrek Kurban et al., 2017).

As a result, there is a need for test apparatuses that are used for pressure measurement evaluation of textile products, especially for the end user. The dimensions must be changed by mimicking according to body movements dynamically, and the insufficiency of the existing solutions has made it obligatory to make a development in the related technical field. The present study relates to a pressure measuring test apparatus capable of performing dynamic and static measurements, which meets the mentioned requirements, eliminates all the drawbacks, and simultaneously provides additional advantages.

MATERIAL AND METHOD

Material of the Prototype Pressure Measurement Test Apparatus

The outer surface material of the prototype pressure measurement test apparatus consists of epoxy resin reinforced with fibreglass. Based on the prosthetic mould consisting of polyester material shown in Figure 1, the final mould was created by applying the measurement height values from the ground along with surrounding measurements of the points specified in the ENV 12718 standards. The operating area of the prototype pressure measurement test apparatus is a Polyester-based casting mould in full-leg format. The mould has high-strength features and is lightweight. It permits the interpretation of sanitary and comfort properties of textile products in using lower-body clothing before being presented. It is also easy handling usage and finally, its structure is compatible with the installation of the FSR (Force Sensing Resistor) type sensor. FSR-type sensors are used in pressure measurement points to measure between a range of 0-1 lb. With this sensor structure, which has a very sensitive measurement characteristic, modules have been created to provide a stable structure at the measurement points. The markings of the prosthetic mould according to ENV 12718 standards were made as in Figure 1. Then it was reduced to one leg and installed on the test device as in Figure 2.



Figure 1. Marked Prosthetic Mould According to ENV 12718 Standard

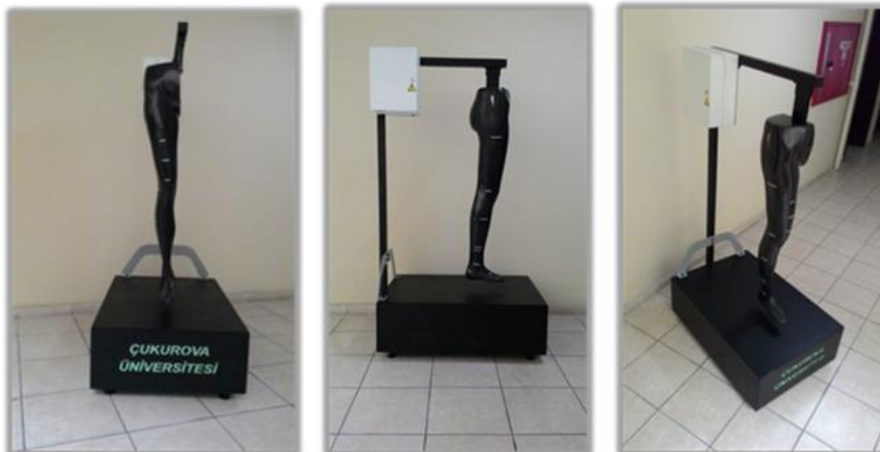


Figure 2. The State of the Prosthetic Leg on the Device Before Cutting

Method for Pressure Measurement on the Prototype Test Apparatus

In the design and developing stages of creating the dynamic-based prototype test device, the measurement points (C, G, etc.) were identified along the human leg by the standard titled ENV 12718 Medical Compression Hosiery. The circumference measurements of these points with measurement height values were taken into consideration. Given the fact that the cost of the device, the prototype device has been designed and manufactured so that measurements can be taken from 3 regions using 4 different sensor points. Those regions are located under the knee (C region), above the knee (G region), and upon the knee.

The force values obtained through the FSR sensors used in the developed device enable the pressure value to be obtained directly because the measurement surface areas of the sensors are known. The information received from the sensors is transferred to the computer by filtering through the PCB converter, which will convert the analogue data to digital, before being transported to the computer environment in the form of raw data. The values read by the sensors can be viewed numerically from the computer. The dimension/size control of the prototype device can also be adjusted on the computer. In addition, linear actuator control and sensor value reading software have been installed on the system. The methodology for the manufacturing process of the dynamic-based pressure measurement device is examined under 4 steps as follows.

Technical Calculations of the System, Mechanical Initial Designs and Creation of Automation Algorithm

At this stage, literature information, preparation of patent data for the protection of the device, etc. primary data were created, necessary technical calculations were made and theoretical findings were obtained. Units with material and dimensional properties that will meet the dynamic qualifications obtained by technical calculations have been designed in the computer environment before manufacturing, and their dimensional analysis, study simulations, and numerical models have been completed. Mechanical sections along with the intervention of the integrated system to the preliminary algorithm of the communication network in the drive section are also shaped under this title. Final designs of the system were created with CAD (Computer Aided Design) support.

The illustration of the internal mechanism and components of the pressure measurement test device is shown in Figure 3(a). The installation of the internal mechanism on the test device is also given in Figure 3(b).

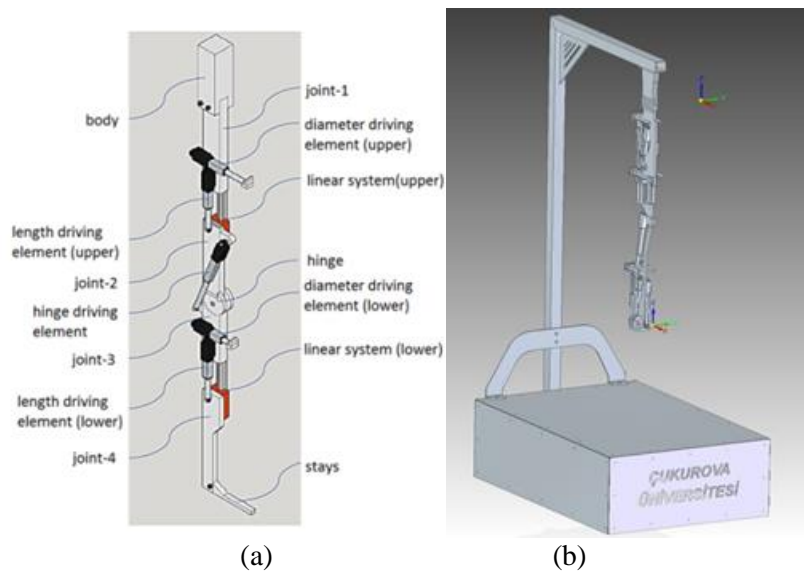


Figure 3. The Illustration of the Internal Mechanism; (a) Components of the Pressure Measurement Test Device, (b) The Installation of the Internal Mechanism on the Test Device

The circumferential diameter change of the measurement areas of the developed system has been realized with linear actuators and additional mechanical parts that will provide axial direction change. The requirement of dimensions by the standards was made with sensor controls. The diameter change takes place simultaneously with the length change by the size selection from the control computer. The length change made by the length change

actuators is shown in Figure 4(a). Also, a CAD image of the knee bending process performed by the bending actuator in the knee region is shown in Figure 4(b).

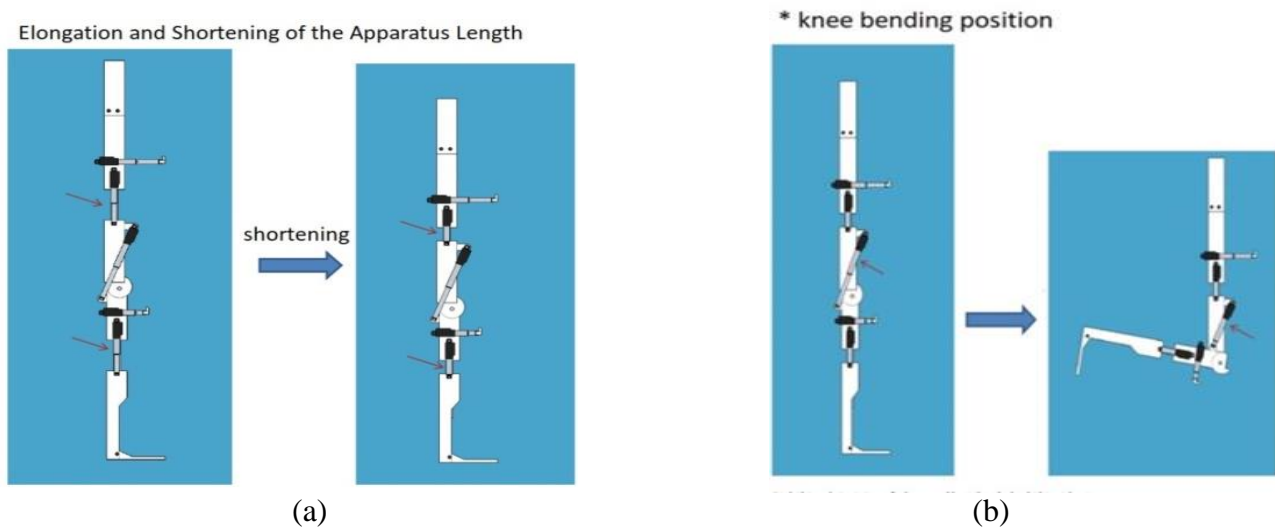


Figure 4. (a) Dimensional Change by Length Change Actuators; (b) Knee Bending Process Performed By Knee Bending Actuator

The leg structure is integrated at the shortest measuring distances obtained from the test standard and based on the software. The leg form is separated from each other at increasing measurement distances. The distance between the B-G points which is identified with the ENV 12718 standard can be adjusted to the desired length in the range of 65-83 cm with the help of linear actuators. This adjustment allows different sample sizes to be examined with the same test apparatus. The necessary settings for the required size change can be made through the computer control interface. Electromechanical motion that occurs in size/size changes is controlled simultaneously by the sensors. This control will provide millimetric precision in dimensional changes. CAD images of the removable portion of the leg form covering the internal mechanism and CAD drawings of the final version of the pressure measurement device are shown in Figure 5.

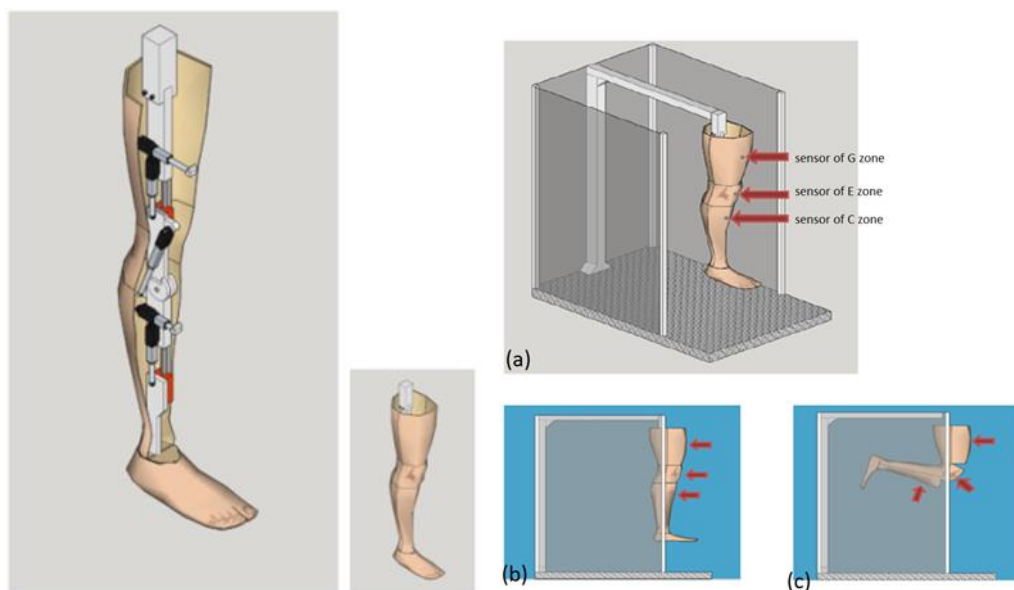


Figure 5. Internal Mechanism Covered by Leg Form, and Final Version of the Pressure Measurement Device (a) General View, (b) Side View, (c) View When the Knee is Bent

Production of Prototype Pressure Measurement System Components, Manual Tests and Creating Technical Algorithms

CAD drawings are modelled and verified in the previous title. The manufacturability stage with industrial production techniques has been explained in this section. Since the test device has a high precision capability with a low tolerance mechanism, this study needs to work with a verification method focused on the transition process from product design to manufacturing. Sensitive mechanical structures in the system were produced with high precision capacity by adding appropriate structures to CAM-computer-aided manufacturing methods. Figure 6 shows the internal mechanism structure of the device.

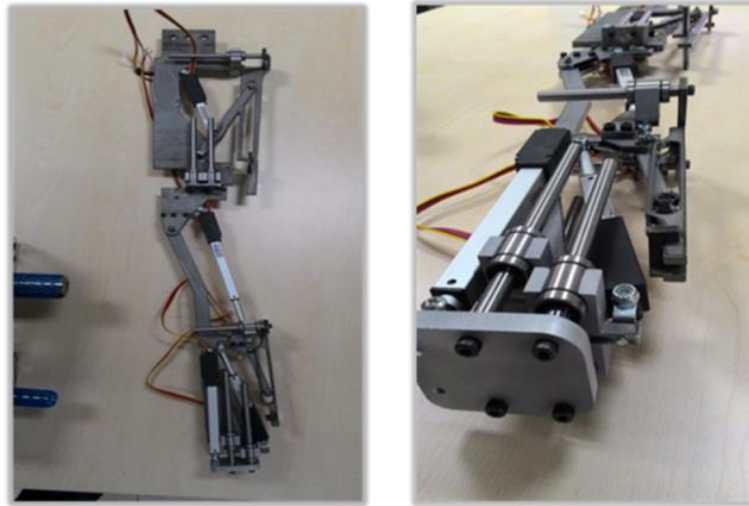


Figure 6. Internal Mechanism of the Pressure Measurement Test Device

Mechanical components with CAD designs were completed by the appropriate manufacturing methods, and have been produced with pre-design values for geometric dimensions in terms of surface quality through using machining techniques. In the production process, all parts have been manufactured under constant size control, and the risk of faulty parts is minimized by purchasing services from outside. This section is critical in the manufacturing process of the pressure measurement test device due to fact that the risk of dimensional differences between manufactured parts and their technical calculations. The components were assembled with the system chassis and other installation parts. Then, the prototype frame was created as in Figure 7(a), and the outer surface (shell) installation was carried out as in (b) in Figure 7.

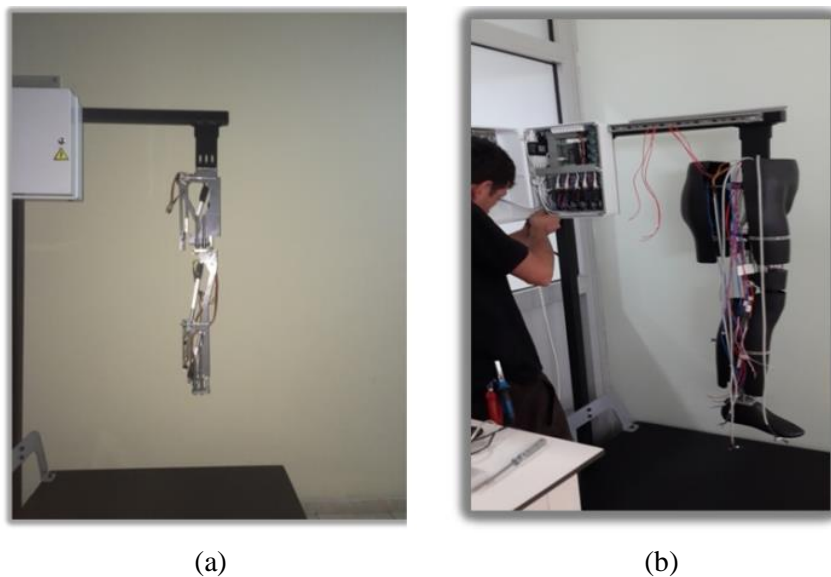


Figure 7. a) Installing the Main Frame on the Test Pressure Measurement Apparatus b) Arranging The Electrical Connection of the Pressure Measurement Test Apparatus and the Outer Surface (Shell) on the Frame

The mechanical model for the pressure measurement test device and most of the necessary engineering studies for the installation process were completed in this chapter. Controls of all components were carried out and manual tests were implemented in this chapter as well. After a series of manual tests were carried out, the amplitude motions were moved by manually the final version of the moving parts of the computer-controlled device and were followed. Manual test movement images and expansion /contraction of the frame of the prototype pressure measurement test device are shown in Figure 8.

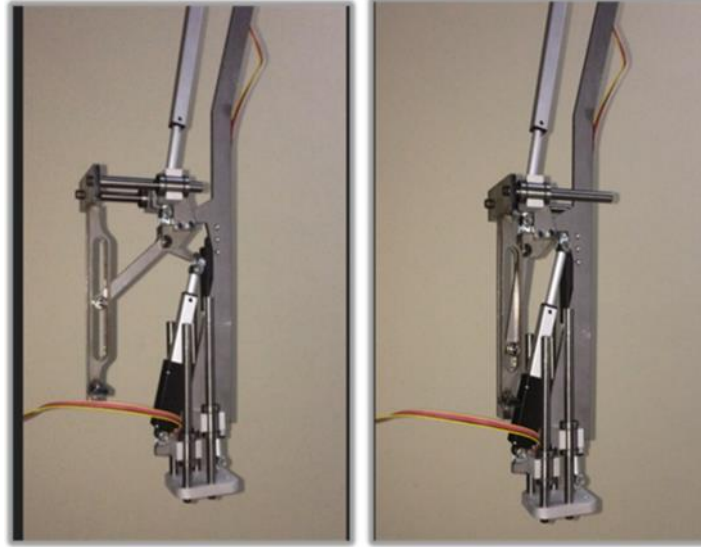


Figure 8. Manual Test Images, Expansion/Contraction of the Frame of the Prototype Pressure Measurement Test Device

Design and Manufacturing Phase of the Control Section

A whole system has been designed to work in harmony with the independent units by checking the operation desired from it in case of predetermined situations. In addition to being independent of the drive systems of different mechanisms, they are being driven by motors. In this context, electronic systems have been created to provide communication and control technics between sensors and drive systems in automation activities.

System Control Software and Calibration Studies

Since the units creating the structure of the measurement test device are based on the electric/electronic principle, they can be calibrated very quickly before each measurement phase therefore the measurement accuracy level is kept maximized. Remote access and control of the prototype manufactured device by a standard computer is important in terms of system flexibility and commercial success. Therefore, software was created with the electronic card which is installed inside the system providing a connection between the test device and the computer. This software is associated with the interface structure to provide easy control by the operator. Instant measurement test values can be directly viewed and recorded on the screen with a C# --based interface program on the computer. Also, it can be provided in the desired dimensional changes in the measurement test device with the same interface program. After the successful completion of the software in the computer and its integration with the system, the production of the prototype pressure measurement test device has been completed.

RESULTS AND DISCUSSION

The prototype stage of the pressure measurement test device, which has a dynamic movement that can be used in the textile and medical sectors, has been completed successfully. The final state of the device is shown in Figure 9.

Before placing the sample of lower-body clothing to be tested on the device, device positioning must be done according to the desired size. After the test device has reached the desired position, the sample clothing must be placed on the apparatus as shown in Figure 10, and then no position must be adjusted.

The measurement test is started by entering the appropriate values of the clothing size inside the software interface of the computer. The device is arranged in the knee-bending position as shown in Figure 11 and then becomes static, and the pressure values are read by sensors.



Figure 9. The Final Version of the Prototype Pressure Measurement Device



Figure 10. Positioning the Device and Dressing the Lower Body Clothing to be Measured on the Device



Figure 11. Knee Bending Position of the Pressure Measurement Test Device

If the pressure measurement process measured by the device is explained with an example; dressed in such a way that the marked parts of the sample shown in Figure 12 are on the sensor points on the device.

The screen setting values suitable for the sample size worn on the device and the motion motor are selected and then the test button is pressed. The device begins to bend at the knee and the test is completed when the leg form returns to its original state. The interface of the device is in Turkish. The Turkish language screenshot that appears after the pressure measurement test is completed is as in Figure 13.

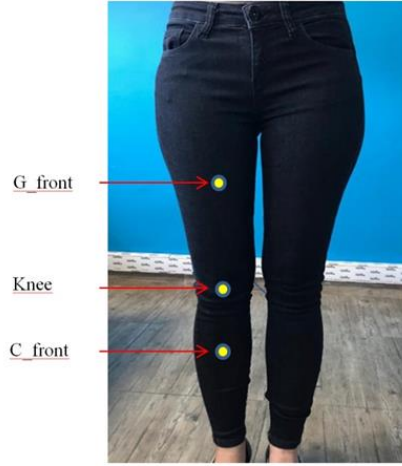


Figure 12. Sensor Points on Stretch Trousers Selected as Sample



Figure 13. The Final State of the Pressure Values Applied by the Trousers Sample When the Device Becomes Static

If the user wants, the numerical values of the test can also be taken as Excel output. The interface of the device is in Turkish. Pressure values measured by the sensors according to knee bending angles are shown in Excel format in Figure 14.

AÇI (°)	C-Ön C-front	C-Arka C-back	G-Ön G-front	G-Arka G-back	C Sensörü Ortalama	G Sensörü Ortalama
0	8,69	7,69	7,48	12,16	8,19	9,82
20	8,69	7,23	7,48	12,63	7,96	10,06
40	8,69	7,23	7,48	12,63	7,96	10,06
50	8,69	7,23	7,02	12,63	7,96	9,82

Figure 14. Excel Screenshot Showing the Instant Pressure Values Applied by the Trousers Sample According to the Knee Angles

When the scientific literature and the catalogues of the previously produced test devices were examined, it was found that the devices measured the pressure values and their compliance with the standards worked statically, but the moving devices reflected the body movement in a limited way. It has been observed that the impression test apparatuses available in the market are produced for medical compression stockings. Pressure measurements of stretch bottom garments were carried out with the device for which a prototype was produced. These results will be published as a different research article. The certification process was not included in this academic study program because it was difficult to provide the necessary budget for the calibration and certification of this prototype device. The device has been patented as EP 3417286B1. Patent validation procedures have been completed in 6 different countries (Germany, Switzerland, Italy, Spain, Netherlands, and Turkey). Necessary certification processes will be carried out to ensure data security and reproducibility during the commercialization process. However, the SWISSLASTIC Company in Switzerland which has proven its reliability worldwide, was contacted to compare the data. It was learned that eight companies they sell to in Turkey. Data comparison was made using the MST MK IV device from Beksel Sağlık Gereçleri in Istanbul, one of these companies. Since the certified devices in the Turkish market can only measure pressure in a static state, static pressure results could be compared. These results were found to be in similar pressure classes. In summary, the pressure measurement test device described in the study examines the pressure values while in motion, is in the form of a 3-dimensional body leg, and contains a technological structure that provides the desired leg circumference and lengths. Therefore, it contains important innovations compared to equivalent test apparatus available in the market.

CONCLUSION

It is important to make evaluations in medical technical textile products such as compression garments, and compression/support socks that regulate blood flow in our body and to realize production in this direction. In the medical treatments applied with medical compression stockings/garments, the correct pressure application is possible with a balanced pressure profile that decreases upwards from the ankle to the groin. Therefore, it is expected that both daily clothes and medical clothes will help to pump up the deoxygenated in other words dirty blood from the legs to the heart in one direction. Thanks to the measurement of the pressure levels of the dressed stretch garments on the body, the decision-making ability to accept daily use purposes (preventing varicose veins, facilitating blood circulation) is also gained.

After the prototype device production will be transformed into the mass production stage. This device can also be utilized for pressurized garments, which are often used in the fields of textile, medical, and health/astronomy. This device will bring a new approach to increasing product quality and technical standards. Within the scope of the study, the design of the prototype pressure measurement tester that can mimic the human leg movements and be bent from the knee, dynamically expanding / contracting, shortening/extension has been realized for all stretch lower body clothing besides compression stockings. Especially for big textile companies, it is very important to be able to embody and analyze the functional and aesthetic properties of the fabric. At this point, there is a huge gap in the literature and assessments come out purely subjective. Therefore, the design, development, and production process has been realized for a test device that can demonstrate the interaction of garments with the human leg with concrete and measurable data. Therefore, the pressure measurement tester in the study is of great importance.

With the start of mass production, stretch fabric/clothing manufacturers will gain the ability to numerically report the effects of the fabrics offered to their customers on human physiology and biology. By measuring the pressure levels that the garments will apply to the body, the effects of the fabric on blood pressure and body physiology will be able to determine. With this capability, companies will be able to support their product under the positive effects of stretch fabrics by releasing presentations with written documents.

REFERENCES

- Cansunar H.E. (2014) A Research On Medical Compression Stocking (MCS). MSc Thesis, Pamukkale University Institute of Natural and Applied Sciences, Denizli, TURKEY, 56 pages (Thesis No: 376223)
- Filodoro Calze Spa. (2001) EP 1 118 851 A2 A device for measuring the compression that can be exerted by a hosiery article. Europe Patent
- Güney,S. & Kaplan, S. (2016) Parameters Affecting Pressure Comfort Performance And Measurement Of Pressure Comfort. *Journal of Textiles and Engineer*, 23 (102), 153-163.

Hohenstein Institute, HOSY Compression Measurement System Hohenstein. Retrieved from <https://www.hohenstein.us/en-us/expertise/functionality/compression/> (accessed May 2023)

Kuenzli, D.; Braun, W.; Ruettinger, M. (2007) US 2007/0012120 Apparatus For The Testing Of Elastic Textile Leg Garments. United States Patent.

Oğlakcıoğlu, N. (2009) A Research on Compression and Comfort Properties of Medical Stockings. Ph.D. Thesis, Ege University Institute of Natural and Applied Sciences, Izmir, TURKEY, 69 pages (Thesis No: 255746)

Oğlakcıoğlu N. & Marmaralı A. (2010) TP 2010/01394 Çoraplar için basınç ölçüm cihazı. Turkish Utility Patent.

Pohlen, E. Classification of compression stockings. Retrieved from <http://www.tagungsmanagement.org/icc/images/stories/PDF/pressureranges.pdf> (accessed August 2023).

RAL-GZ 387/1 Medical Compression Hosiery. (2008). RAL Deutsches Institut für Gütesicherung und Kennzeichnung e.V, Siegburger-Straße 39 53757, Sankt Augustin, GERMANY, Retrieved from www.RAL.de

Seyrek Kurban, N. (2017, April) Sportswear Regulating Blood Flow. In Proceedings, UTIB Turkish Textile and Clothing Sector IX. International R&D Brokerage Event (pp 354-355). Bursa, TURKEY.

Seyrek Kurban, N. (2019) Development of Super Stretch Denim Fabrics and Manufacture of A New Test Device For Measuring the Pressure to Be Applied In The Body. Ph.D. Thesis, Cukurova University Institute of Natural and Applied Sciences, Adana, TURKEY, 204 pages (Thesis No: 609194)

Seyrek Kurban, N. & Babaarslan O. (2017, October) An Experimental Study on the Determination of Pressure Values Applied to Human Body by Denim Trousers Created in Different Sizes. In Proceedings. 2nd International Mediterranean Science and Engineering Congress IMSEC2017 (pp 25-27). Adana, TURKEY.

Seyrek Kurban, N.; Babaarslan, O.; Yılmaz, R.; Calık Denim Tekstil San.Tic. A.Ş. (2016) TP2016/03486 Konvansiyonel ve Teknik Tekstil Ürünleri İçin Yeni Bir Basınç Ölçüm Test Cihazı. Turkish Patent.

Seyrek Kurban, N.; Babaarslan, O.; Yılmaz, R.; Calık Denim Tekstil San.Tic. A.Ş. (2017) WO/2017/160255 A Novel Pressure Measuring Test Apparatus For Conventional And Technical Textile Products. PCT Patent.

SWISSLASTIC AG ST. GALLEN, MST MK IV Retrieved from <http://www.swisslastic.ch/files/MST-MK-IV.pdf> (accessed May 2023).

SWISSLASTIC AG ST. GALLEN, MST MK V, Retrieved from <https://www.swisslastic.ch/en/products/pressure-measuring-devices/mst-mk-iv-17> (accessed May 2023).

SWISSLASTIC AG ST. GALLEN, MST Professional-2, Retrieved from <https://www.swisslastic.ch/en/products/pressure-measuring-devices/mst-professional-2-18/> (accessed May 2023).

SWISSLASTIC AG ST. GALLEN, MST MPT-4/MPT-7, Retrieved from <https://www.swisslastic.ch/en/products/pressure-measuring-devices/mst-mpt-4/-mpt-7-33> (accessed May 2023).

TS ENV 12718: Medical Compression Hosiery, TSE Turkish Standards Institution, (2006) www.tse.org.tr

TS ENV 12719: Medical Thrombosis Prophylaxis Hosiery. TSE Turkish Standards Institution (2007) www.tse.org.tr

TSE CEN/TR 15831: Method for Testing Compression in Medical Hosiery. TSE Turkish Standards Institution (2010) www.tse.org.tr

Yıldız Varan N. (2012) Development of Novel Elastomeric Fabrics for Burn Pressure Garments Using Various Antimicrobial Technologies. Ph.D. Thesis, Istanbul Technical University Institute of Natural and Applied Sciences, Istanbul, TURKEY, 145 pages. (Thesis No: 335752)

Wang Y, Cui Y, Zhang P, Feng X, Shen J & Xiong Q. (2011) A smart mannequin system for the pressure performance evaluation of compression garments, *Textile Research Journal* 81 (11), 1113-1123.



Kahramanmaraş Sütçü İmam University

Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 10.01.2024
Kabul Tarihi : 06.04.2024

Received Date : 10.01.2024
Accepted Date : 06.04.2024

THE EFFECT OF ASPHALT WASTE AND AFŞİN-ELBİSTAN FLY ASH ON THE ENGINEERING FEATURES OF SANDY-CLAY SOILS

ASFALT ATIĞI VE AFŞİN-ELBİSTAN UÇUCU KÜLÜNÜN KUMLU-KİL ZEMİNLERİN MÜHENDİSLİK ÖZELLİKLERİ ÜZERİNDEKİ ETKİSİ

Muhammet ÇINAR^{1*} (ORCID: 0000-0001-5475-7787)

¹ Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Kahramanmaraş, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Muhammet ÇINAR, muhammetcinar@ksu.edu.tr

ABSTRACT

In this experimental study, the impact of asphalt waste (AW) generated after the Kahramanmaraş earthquake on the geotechnical features of sandy-clay soils was examined. Afşin Elbistan fly ash (AEFA), which is widely produced in the region, was also added, and its effect was determined. After determining the engineering characteristics of the sandy-clay soil, mixtures were prepared by adding AW at the rates of 5,10,15,20% by weight. Mixtures were prepared by adding 5,10,15,15,20% AW at a constant rate of 15% AEFA. Atterberg limit, standard proctor, unconfined compressive strength (UCS), shear box, and California bearing ratio (CBR) tests were conducted on the samples. According to the results of the Proctor test, it is seen that the dry density increases and the optimum water content decreases as the proportion of AW mixed into soil increases. It was found that UCS improved with the addition of AW. It was observed that the internal friction angle increased with the addition of AW, and the cohesion increased with the addition of AEFA. As a result, it was determined that the use of AW and AEFA as 15% AW and 15% AEFA by dry weight in Sandy clay soil affects improving soil geotechnical properties. It is also concluded that the disposal of earthquake and industrial by-product waste will contribute to the environment and economy.

Keywords: Asphalt waste, Afşin-Elbistan fly ash, soil stabilization, sandy clay soil, Kahramanmaraş earthquake.

ÖZET

Bu deneysel çalışmada, Kahramanmaraş depremi sonrasında oluşan asfalt atığının (AW) kumlu-kil zeminlerin geoteknik özellikleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Bölgede yaygın olarak üretilen Afşin Elbistan uçucu külü (AEFA) de ilave edilerek etkisi belirlenmiştir. Killi-kumlu zeminlerin mühendislik özellikleri belirlendikten sonra ağırlıkça %5,10,15,20 oranlarında AW ilave edilerek karışımlar hazırlanmıştır. Karışımlar, %15 AEFA sabit oranında %5,10,15,15,20 AW eklenerek hazırlanmıştır. Numuneler üzerinde atterberg limiti, standart proktor, serbest basınç dayanımı (UCS), kesme kutusu deneyi ve Kaliforniya taşıma oranı (CBR) testleri yapılmıştır. Proctor testi sonuçlarına göre, zemine karıştırılan AW oranı arttıkça kuru birim hacim ağırlığın arttığı ve optimum su içeriğinin azaldığı görülmüştür. UCS'nin AW ilavesi ile arttığı gözlemlenmiştir. AW eklendiğinde iç sürtünme açısının arttığını ve AEFA eklenmesi ile kohezyonun arttığı görülmüştür. Sonuç olarak, AW ve AEFA'nın kumlu- kil zeminlerde kuru ağırlıkça %15 AW ve %15 AEFA olarak kullanılmasının zemin geoteknik özelliklerinin iyileştirilmesinde etkili olduğu belirlenmiştir. Ayrıca deprem ve endüstriyel yan ürün atıklarının bertarafının çevreye ve ekonomiye katkı sağlayacağı sonucuna varılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Asfalt atıkları, Afşin-Elbistan uçucu külü, zemin stabilizasyonu, kumlu kil zeminler, Kahramanmaraş depremi.

INTRODUCTION

With the population growth in big cities in the last decade, existing buildings have become insufficient. Therefore, the need for new buildings and new construction sites is increasing rapidly. Construction sites with engineering features that are not suitable for new buildings are being put into use. Structures built on weak soil areas that are not sufficient in terms of engineering properties cause serious problems in the future (Güllü et. al., 2023; Abed et. al., 2023; Bilgen & Altuntas, 2023). Weak soil refers to soil that has poor engineering properties, making it less capable of supporting heavy loads or structures. The weakness of soil can result from various factors, including its composition, structure, and moisture content. Weak soils pose challenges in construction and civil engineering projects because they may require special foundation design or soil improvement techniques to provide the necessary support for structures (Seferoğlu et. al., 2020; Canakci et. al., 2018; Aksoy & Yıldırım, 2023). Engineers often use methods such as soil stabilization, compaction, or the addition of reinforcing materials to improve the engineering characteristics of weak soils. Additionally, understanding the characteristics of weak soils is crucial for designing foundations that can withstand the potential challenges posed by these soil types. Soil stabilization is a process used to improve the engineering features of soil. The primary goal is to enhance the soil's strength, durability, and load-bearing capacity, making it more suitable for construction activities and infrastructure development. There are various methods of soil stabilization, and the choice of technique depends on the specific characteristics of the soil and the requirements of the project. Today, there are many soil stabilization methods including chemical, physical, mechanical, thermal, electrokinetic, and biological (Canakci et. al., 2016; Güllü et. al., 2017; Güllü et. al., 2019; Cinar, 2023).

Since some of the soil stabilization methods are very costly, improving the geotechnical features of the soil with various additives, whose properties are less costly, has been preferred recently. The main reason for this is the emergence of serious environmental problems due to the increase in industrial by-products and waste materials in the developing world. Also, a lot of waste material is produced after major earthquake disasters. Some of the products used as additives in soil stabilization are; blast furnace slag, fly ash, bottom ash, rice husk ash, construction demolition waste, and marble dust (Çelik & Cankci, 2015; Cinar et. al., 2019; Sidhu et. al., 2024). These wastes are generally preferred due to their easy availability, continuous production, high tonnage, and low cost. As a result of the earthquake, various construction demolition wastes were produced. One of these wastes is asphalt waste from bituminous mixtures.

In this study, it was aimed to improve the geotechnical features of low-strength Sandy clay soil by mixing asphalt waste (AW) and Afşin Elbistan fly ash (AEFA) in different proportions. In 2023, there were very large earthquakes in the Kahramanmaraş province of Turkey. After the February 6, 2023 Kahramanmaraş earthquakes, it was reported that more than 350 million tons of construction demolition waste will be generated (Doğdu & Alkan, 2023). The earthquake zone consists of 11 cities and many districts. Not only buildings but also roads were affected by the earthquake. Therefore, these roads need to be repaired. 21.5 million tons of these wastes will consist of bituminous mixtures and wood waste (Doğdu & Alkan, 2023). The use of these wastes in soil improvement is both environmentally friendly and sustainable. Road damages from the earthquake are shown in Figure 1.



Figure 1. Road damages caused by the earthquake in Kahramanmaraş and Hatay.[URL1; URL 2]

AEFA refers to the fly ash (FA) generated as a byproduct of coal combustion at the Afşin Elbistan Power Plant in Turkey. FA is a fine, powdery material composed of spherical particles that are collected from the flue gas of coal-fired power plants during the combustion process. It is one of the coal combustion products and is typically composed of inorganic mineral matter. The Afşin Elbistan Power Plant, located in the Afşin-Elbistan district of Turkey's Kahramanmaraş Province, is a major coal-fired power station. FA produced at such power plants can vary in its chemical and physical characteristics based on the type of coal burned, combustion conditions, and the collection methods used. FA can be utilized in soil stabilization and as a component in the construction of embankments, road bases, and foundations. It can be used in waste stabilization and solidification processes to immobilize hazardous contaminants in certain waste materials. Utilizing FA in these ways helps to reduce the environmental impact of coal combustion by finding beneficial applications for the resulting byproducts. In previous studies (Temiz et al., 2021) Chemical analyses of the samples taken from the 1st and 2nd units of the Afşin-Elbistan Thermal Power Plant were carried out. According to the determined chemical analysis results, it is classified as W according to TS EN 197-1 because the reactive CaO ratio (53.44%) is over 10%. According to ASTM C618 standards, it was out of class because the total value of $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ (30.69%) was below 50% and the SiO_2 ratio (18.27%) was below 25%. Since AEFA does not comply with standards, it is not used in sectors with substantial use, such as concrete production. Since it does not comply with standards, its area of use is decreasing and it poses serious environmental hazards due to high tonnage production. Its use in soil stabilization will be both an environmentally friendly and sustainable solution.

Seferoğlu et al. (2020) tried to use recycled asphalt pavement as an alternative to natural aggregate in their study. They investigated the use of recycled asphalt pavement materials in road pavement layers. Recycled asphalt pavement was substituted for natural aggregate at different rates (0%, 15%, 30%, 45%, 60%, 100%). Laboratory tests such as bitumen content, modified proctor, sieve analysis, and California Bearing Ratio (CBR) were performed on the prepared mixtures and some properties of the mixtures were compared with natural aggregate. The increase in the ratio of recycled asphalt pavement in the mixtures caused the maximum dry density (MDD) to decrease. In addition, the optimum moisture content (OMC) values of the mixtures decreased with the increase in the recycled asphalt pavement ratio. It was observed that the MDD of the mixtures can be achieved if recycled asphalt pavement 1 material is used at a maximum rate of 5% and recycled asphalt pavement 2 material is used at a maximum rate of 15-20%. In terms of bearing capacity, recycled asphalt pavement material utilization rates can be increased by using various additives (pozzolanic cement, fly ash, etc.) by considering other specification criteria.

Korkmaz et al. (2023) used ladle slag (LS), electric arc furnace slag (EAF), recycled asphalt pavement (RAP), and recycled concrete aggregate (RCA) instead of natural soil used as backfill material in road construction. Experiments were carried out to determine the specific gravity, shear strength parameters, particle diameter distribution, permeability coefficients, compaction parameters, and unsoaked/soaked CBR values of waste materials mixed at different rates. Results of the test indicate that the average internal friction angle of RAP was found to be 34 degrees and the permeability coefficient was found to be 1.99×10^{-3} cm/s. In addition, the dry CBR values allowed in the highway technical specifications were found to be suitable for the sub-base layer.

Lima et al. (2023) conducted experiments with different proportions (0-80%) of RAP incorporated into sedimentary soil. Tests were performed on the mixtures to evaluate their mechanical strength, compaction features, and expansion after curing for up to 28 days. The results showed that the addition of RAP increased the splitting tensile strength and unconfined compressive strength of the mixtures.

Hakan, (2010) added FA to cohesive soils at ratios of 0 to 25 %. In the study, FA added to cohesive soil increased plasticity. In this experimental study, it was determined that MDD, OMC, and unconfined compressive stress (UCS) increased. The optimum FA content was found to be between 15% and 20% by weight.

In the study of Çimen & Keleş, (2020), FA was added to high plasticity clay at 5 to 30 wt%, and compression tests, atterberg limits tests, UCS tests, and swelling pressure tests were carried out. The same series of experiments were then repeated, keeping the lime content constant at 6 wt%. In the experiments, it was found that plasticity index, liquid limit value, and swelling pressure decreased with increasing additive content, while plastic limit value, MDD, OMC, and UCS increased. The optimum FA ratio was found to be 15 wt%.

Literature review shows that there are limited studies for AW, while for AEFA there are studies for FA in different regions. It has been observed that AW is not used to enhance the characteristics of sandy-clay soils and non-standard AEFA is not used in soil improvement.

In this study, 5, 10, 15, 20% AW, and 15% AEFA were kept constant and 5, 10, 15, 20% AW was added to the Sandy clay soil, and its effect on the engineering features of the soil was investigated. After the mixtures were prepared, consistency limits, standard proctor test, shear box test, UCS, and CBR test were performed. The primary aim of this study is to minimize environmental pollution and improve the geotechnical properties of weak soils by using the large quantities of asphalt waste generated after earthquakes. It is also aimed to utilize the high tonnages of AEFA produced. The main feature that distinguishes this study from other studies is the disposal of AW, which is earthquake waste. AEFA is used as a binary mixture to improve soil properties.

MATERIAL AND METHOD

Material

The Sandy clay soil used in the study was taken from the Kahramanmaraş Sütçü İmam University Avşar Campus. Sieve analysis and consistency limit tests were performed to determine the natural soil properties. Asphalt waste was taken from a road in the Onikişubat district of Kahramanmaraş that was damaged in the earthquake. The waste was grinded and sieved through a 2 mm sieve to be used in the experiments. After the ground asphalt waste was separated from the large pieces, the part taken to be used in the experiment was sieve analyzed, and the result was found to be SW. Afşin Elbistan Fly Ash was collected from the Afşin Elbistan Thermal Power Plant. Table 1 presents the physical characteristics of clay, AEFA, and AW and Table 2 illustrates the chemical components of AEFA.

Table 1. Physical Properties of The Sandy-Clay, AEFA, and AW.

Parameters	Sandy-Clay		
	Clay	AEFA	AW
Liquid limit (%)	47.0		
Plastic limit (%)	23.0		
Plasticity Index, %	24.0		
Maximum Dry Density (kN/m ³)	1.5	11.52	18.75
Optimum Moisture Content, %	24.5	20	11
Specific Gravity, %	2.80	2.75	2.51
Finer Component (% Passed No. 200 Mesh, %)	47.5		2
USCS Classification	SC		SW

Table 2. Chemical Components of AEFA

Chemical Composition (%)	AEFA
Al ₂ O ₃	8.40
CaO	54.30
Cl	0.01
Fe ₂ O ₃	2.36
K ₂ O	0.45
MgO	1.54
Na ₂ O	0.09
P ₂ O ₅	0.54
SO ₃	11.20
SiO ₂	18.50
TiO ₂	0.25
LOI	2.36

Method

Before starting the experimental work, AW was taken from the field and crushed. The AW and soil samples were then dried in an oven for 24 hours. AEFA was added to the soil at the rates of 5%, 10%, 15%, and 20% by weight, taking into account the studies in the literature. Then, similarly, 5%, 10%, 15%, and 20% AW were added while keeping 15% AEFA constant (Cinar, 2024). Consistency limits, standard Proctor test, shear box test, UCS, and CBR test were performed on the prepared specimens. The tests were performed first on natural soil, then on natural soil + AEFA (5, 10, 15, 20%) as a binary mixture, and then on natural soil + 15% AEFA + AW (5, 10, 15, 20%) as a ternary mixture.

In the study, firstly, a consistency limits test was performed. Consistency limits tests are laboratory tests used to determine the moisture content at which a soil exhibits specific consistency states. These tests are crucial in soil mechanics and geotechnical engineering to classify soils based on their plasticity and to understand their behavior under different moisture conditions. The two primary consistency limits determined by these tests are the liquid limit (LL) and plastic limit (PL). These two limits, along with the natural water content of the soil, are used to calculate the plasticity index (PI) of the soil, which is a measure of its plasticity. The plasticity index is calculated as follows: $PI = LL - PL$

The consistency limits and plasticity index are key factors in the classification of soils according to systems such as the AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials) or the Unified Soil Classification System (USCS) classification system. Various soil types (e.g., sand, silt, clay,) and their engineering properties can be assessed based on these consistency limits, helping engineers make informed decisions about soil suitability for construction projects. Consistency limits tests were conducted in accordance with ASTM D4318-10 standard.

The standard proctor test is a laboratory test used to determine MDD and OMC of soil. It is an especially important test for the placement of soil backfill materials at the appropriate density and moisture content. This test is used to evaluate the workability properties and bearing capacity of the soil. The standard proctor test in this study was performed according to ASTM D698-12.

Samples were prepared with MDD and OMC values determined from the standard proctor test, and UCS was carried out according to ASTM D2166-16 standard. The prepared samples were carefully removed from containers with a diameter of 50 mm and a length of 100 mm. The length to diameter ratio of the samples must be between 2 and 2.5. Before the experiment starts, device information is entered so that the axial deformation rate is 1.2% per minute. Loading continues until the deformation rate in the samples reaches 15% and the test device automatically stops when fracture occurs.

The specimens for the CBR test were prepared at MDD and OMC values. The specimens were placed in the CBR mold and compressed layer by layer according to ASTM D1883-21. The percentage CBR value obtained by proportioning the load applied as a result of the piston sinking 2.5 mm and 5 mm into the specimen to the load specified in the standard was determined as the CBR value. The higher of the two values is considered as the final CBR value.

The shear box test is a test performed to evaluate the shear resistance of the soil and to understand the durability of the soil. This test is used to evaluate the bearing capacity, durability, and behavior of the soil, especially in soil engineering and construction projects. The prepared mixtures were placed in a 60x60x25 mm test mold. The test was performed at a loading rate of 0.002 mm/sec and in accordance with ASTM D3080M-11 standards.

RESULTS AND DISCUSSION

In this study, AW was added to the Sandy clay soil at 5%, 10%, 15%, and 20% by weight. Then, similarly, 5%, 10%, 15%, and 20% AW were added while keeping 15% AEFA constant. Consistency limits, standard Proctor test, shear box test, CBR, and UCS tests were performed on the prepared specimens.

Consistency limits test results are illustrated in Figure 2. The Sandy clay soil LL value was 47%, PL value was 23% and PI value was 24%. According to the PL, the value increased as the waste ratio increased. Therefore, it was seen that the plasticity index decreased as the AW waste ratio increased. The main reason for this is that AW holds more water due to its larger grain size. It was also found to increase workability by reducing the plasticity index. (Bhatt & Suman, 2022) The lowest plasticity index was determined in a 15% AW mixture. In the literature, Bhatt & Suman, (2022) found similar results in their study. In the ternary mix, the LL value decreased as the waste ratio increased, the PL value increased and the PI decreased until the mixture with 15%GB addition and then increased. In the consistency limits experiment, it was observed that the 15% AW mixture gave the best results in both binary and ternary mixtures. An increase in the PL of soil usually has an impact on the durability and stability of the soil. A decreasing PI can mean that soils generally tend to be more durable and stable. This property is important in soil engineering projects, as a lower PI can often be associated with better bearing capacity of soils and less tendency to deform.

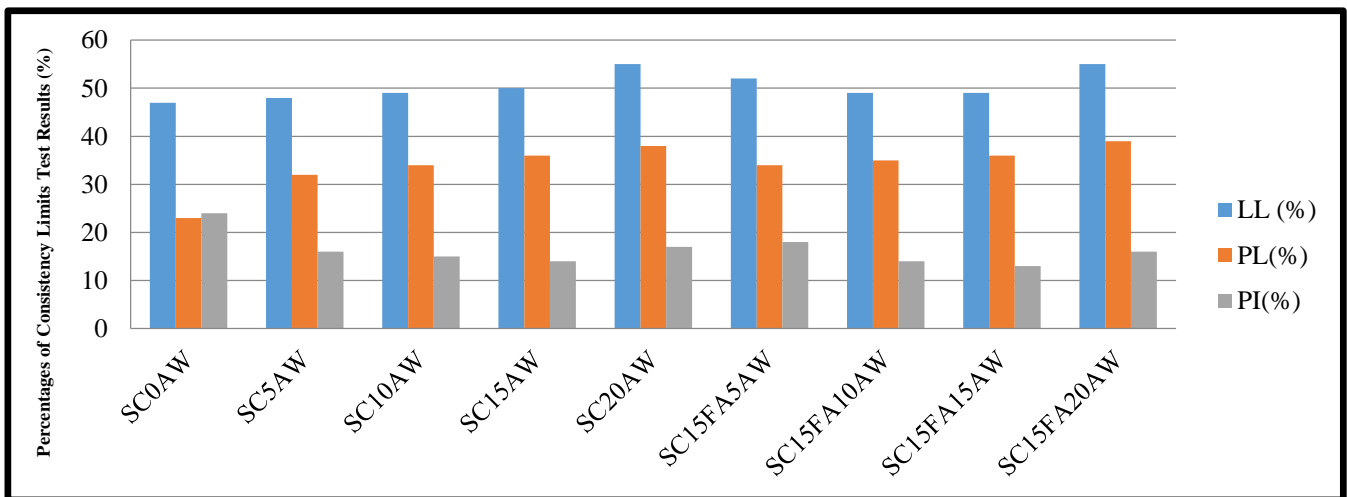
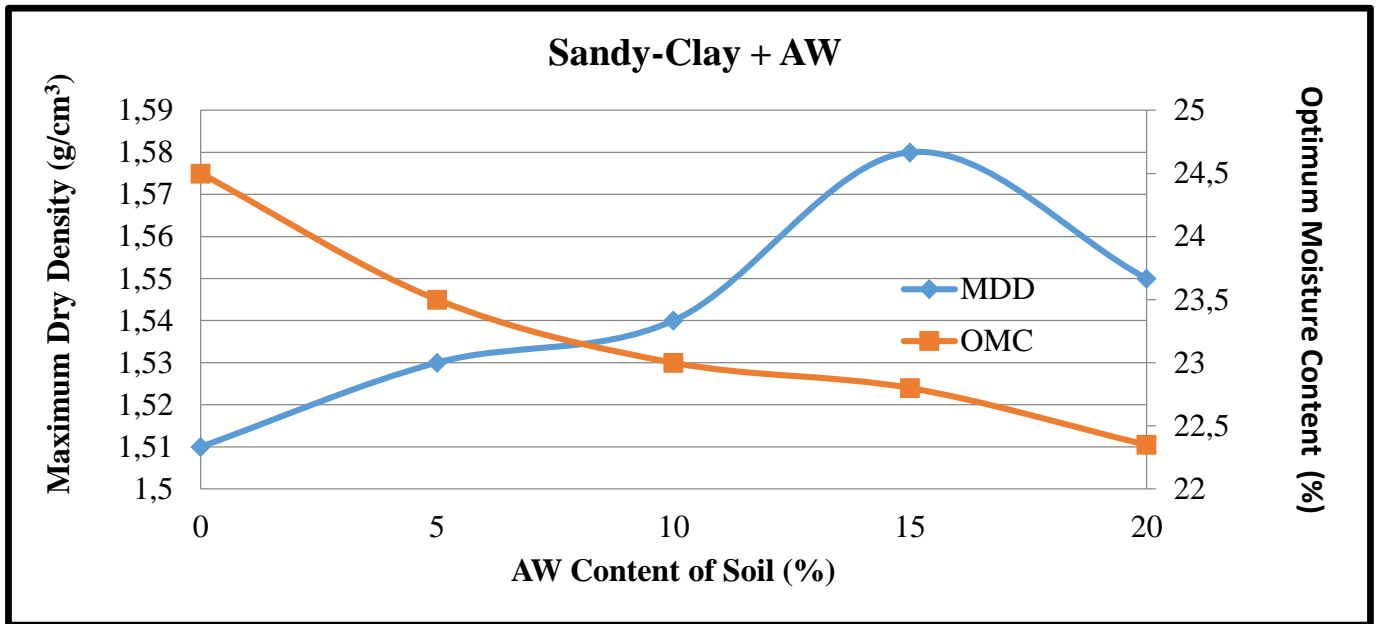
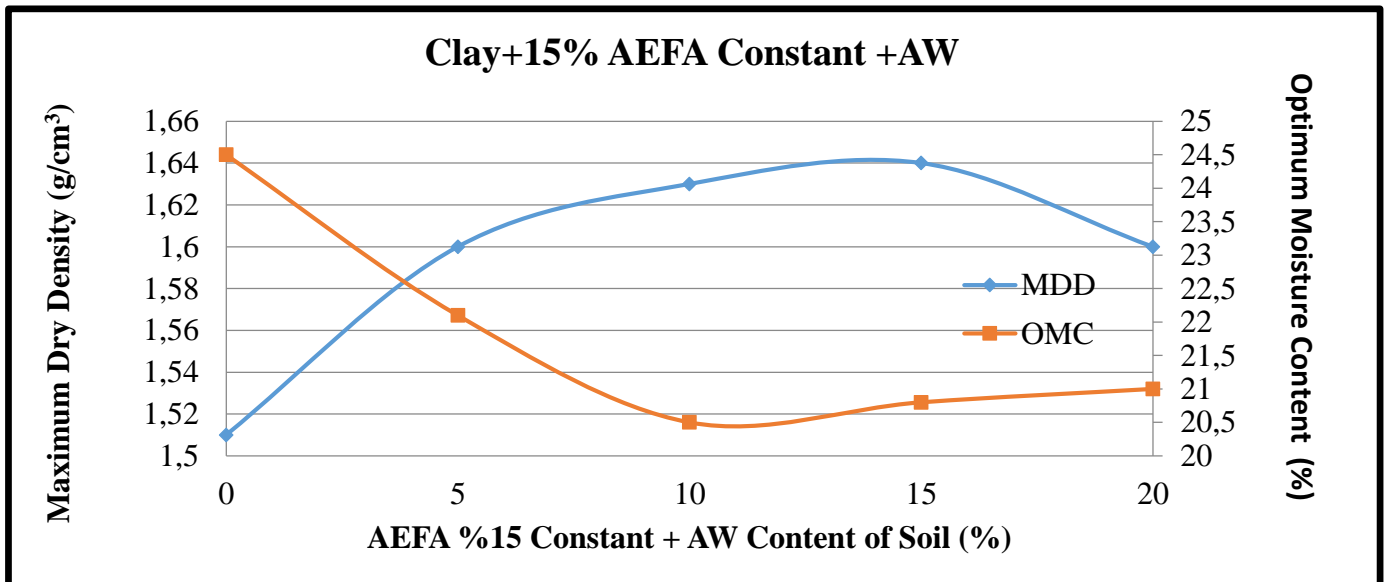


Figure 2. Changes in The LL, PL, and PI by Adding AW and AEFA to The Sandy Clay Sample.

The standard proctor test was performed on natural soil and binary and ternary mixture samples respectively and the MDD and OMC were found. The experimental results are illustrated in Figure 3. When Figure 3a binary mixture and Figure 3b ternary mixture figures are analyzed, it is seen that the MDD increases and the OMC decreases as the proportion of AW mixed into the natural soil increases. This is due to the filler effect on the natural soil with the increase in AW. When Figures 3a and 3b are observed, the highest value of MDD was found in the AW mixture with 15% addition. Also in Figure 3b, higher MDD was obtained in mixtures with AEFA addition. The reason for this is that AEFA has a smaller particle structure and is considered to hold the soil particles. Similar results have been observed in previous studies. (Cinar, 2024a)



a.



b.

Figure 3. Standard Proctor Compaction Test Result of **a.** Sandy-Clay + AW and **b.** Sandy-Clay + AW+ AEFA

UCS test results are shown in Figure 4. Three of each specimen were prepared for the UCS test. The tests were performed for curing times of 7 and 28 days. Since the natural soil is sandy clay soil, the compressive strength was found to be 255 kPa for 7 days curing time and 278 kPa for 28 days curing time. It was seen that the compressive strength increased with the addition of AW waste. The highest values of 390 kPa and 548 kPa were obtained in the 15% AW mixture. Compared to the natural soil strength value, a 41% increase was observed for 7 days of curing time and a 97% increase was observed for 28 days of curing time. Since the natural soil is a Sandy clay soil, the clay in the soil holds the soil together, but with the increase in the addition of AW, brittle behavior was observed (Hakan, 2010; Çimen&Keleş, 2020). With the effect of AEFA in ternary mixtures, it was seen that the UCS test results were better than the specimens made with AW only. The highest values of 430 kPa and 580 kPa were obtained from a 15% AW + 15% AEFA mixture for 7 and 28 days of curing time. In addition, when compared with the natural soil compressive strength value, an increase of 35% and 109% was observed. The main reason for this increase is considered to be because AEFA is a pozzolanic material. In the literature, Lima et al found similar results.

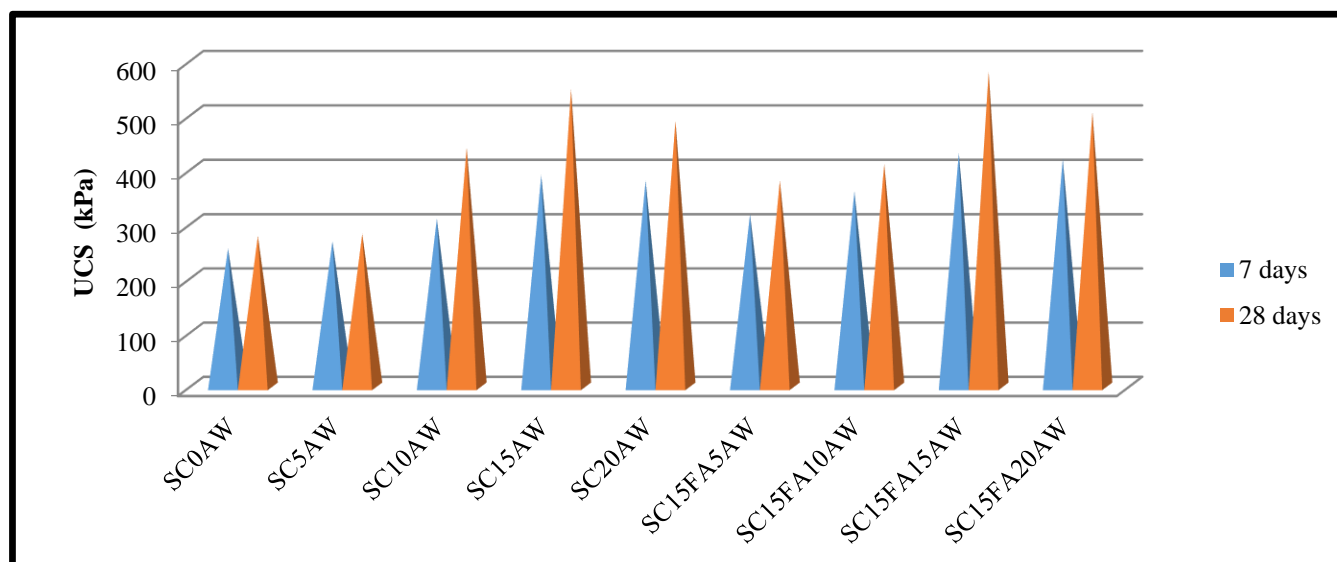


Figure 4. UCS test result of sandy-clay, AW, and AEFA for 7 and 28 days curing time

The shear box test helps in determining the shear strength parameters of soils, such as the angle of internal friction (ϕ) and the cohesion (c). These parameters are crucial for analyzing the stability of soil masses and designing retaining walls, foundations, and other geotechnical structures. The cohesion values and internal friction angle of the mixtures are shown in Table 3. The cohesion value and internal friction angle of the natural soil were found to be 40 and 19.3 kPa, respectively. Table 3 shows that the angle of internal friction increases as the AW ratio increases. The cohesion value also increased as the amount of waste increased. When compared with the angle of internal friction of the natural soil, the highest increase was calculated as 15% in the SC20AW mixture. However, in ternary mixtures (sandy clay, 15% AEFA, and AW), the angle of internal friction decreased as the AW ratio increased. It is also seen that cohesion increases significantly. It was determined that the main reason for the increase in the angle of internal friction when AW was added was due to the coarser grain size of AW. The reason for the decrease in the ternary mixture with the addition of AEFA is that AEFA grains have a finer and spherical structure, which reduces the angle of internal friction and increases cohesion (Lima et al., 2023).

Table 3. Shear strength parameters of sandy-clay, AW, and AEFA

	c (kPa)	ϕ (Deg.)
SC0AW	19.3	40
SC5AW	22	42
SC10AW	25	45
SC15AW	28	44
SC20AW	28.5	46
SC15FA5AW	35.8	42
SC15FA10AW	70	43
SC15FA15AW	70.5	32
SC15FA20AW	74	32

Since the highest results in the UCS test and other tests were obtained with 15% AW admixture in binary and ternary mixtures, sandy-clay soil, 15% AW waste + Sandy-clay soil, and 15% AW waste+15% AEFA + Sandy-clay soil specimens were prepared for CBR tests soaked and unsoaked during 28 days curing time. According to the test results, the unsoaked and soaked penetration values were found to be 3.45% and 2.34% for natural soil, 21.5% and 15.46% for 15% AW mixture and 28.5% and 20.14% for 15% AW waste + 15% AEFA. When the literature was searched, Look, (2007) conducted a study according to the previous CBR test results. According to Look, (2007), according to CBR percentages, it was evaluated whether it can be used as road sub-base material or not. According to the study, CBR results <1% is extremely weak, 1%-2% is very weak, 2%-3% is weak, 3%-10% is medium, 10%-30% is moderate, 10%-30% is strong (can be used as sub-base material), >30% is very strong (suitable for use as sub-base-foundation- material). According to the results of Look, (2007), 15% AW and 15%

AW+10%AEFA mixtures can be used as natural soil sub-base material when added (Cinar, 2024b; Ibrahim et. al., 2023).

Table 4. CBR results of sandy-clay, AW, and AEFA

	CBR (%) Unsoaked	CBR (%) Soaked
SC0AW	3.45	2.34
SC15AW	21.5	15.46
SC15FA15AW	28.5	20.14

CONCLUSION

To determine the geotechnical properties of the sandy-clay soil, the effect of mixtures prepared by adding asphalt waste and Afşin Elbistan fly ash at different ratios was investigated. The results of the consistency limits, standard proctor, shear box, unconfined compressive, and CBR tests are given below.

- The liquid limit and plastic limit values of the binary mixture increased as the AW ratio increased. Therefore, it was observed that the plasticity index also decreased as the proportion of AW increased. In the ternary mix, the LL and PL values increased as the waste ratio increased, and the PI decreased for the 15% GB mix. In the consistency limits experiment, it was observed that the 15% GB mixture gave the best results for both the binary and ternary mixtures.
- According to the results of the standard Proctor test, it is seen that the MDD increases and the OMC decreases as the proportion of AW mixed into the sandy-clay soil increases. It was also observed that MDD increased in binary and ternary mixtures up to 15% AW mixtures and then decreased.
- Unconfined compressive tests were performed for 7 days and 28 days curing times and the compressive strength was found to be 255 and 278 kPa since the natural soil is sandy clay soil. It was observed that the unconfined compressive strength increased with the addition of AW. The highest value was obtained in a 15% waste mixture with 390 and 548 kPa. Compared to the natural soil strength value, an increase of 97% was observed. With the effect of AEFA in the ternary mixtures, it was observed that the unconfined compression test results were better than the binary mixture specimens. The highest values of 430 and 580 kPa were obtained from a 15% AW + 15% AEFA mixture. In addition, an increase of 108% was observed when compared with the natural soil compressive value. When the 7 and 28-day samples were compared, it was seen that the 28-day curing time was higher.
- According to the shear box test, it was observed that the angle of internal friction increased with the addition of AW. However, in ternary mixtures, the angle of internal friction decreased with the addition of AW waste. The finer and spherical structure of AEFA grains decreased the angle of internal friction and increased the cohesion.
- According to the CBR test results, it was found as 3.45% for natural soil, 21.5% for 15% AW mixture, and 28.5% for 15% AW+15% AEFA. According to the natural soil result, the increase was found to be 523% for the mixture with the addition of AW and 726% for the 15% AEFA + 15% AW mixture. When 15%AW and 15%AW + 10% AEFA mixtures were added, it was seen that the natural soil could be used as highway sub-base material.

As a result, it was found that waste asphalt can be added up to 15% by dry weight in sandy clay soil. It was determined that the use of 15% asphalt waste and 15% Afşin Elbistan fly ash as a binary mixture has an improving effect on soil geotechnical properties. It is also concluded that the disposal of earthquake wastes and industrial by-product wastes will contribute to the environment and economy.

KAYNAKLAR

- Abed, M. H., Abbas, I. S., & Canakci, H. (2023). Effect of glass powder on the rheological and mechanical properties of slag-based mechanochemical activation geopolymer grout. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 27(12), 3628-3652. <https://doi.org/10.1080/19648189.2022.2145374>
- Aksoy, H. S., & Yıldırım, A. (2023). Geri Dönüştürülmüş Beton Agregası Katkısının Kumlu Zeminlerin Mukavemet Parametreleri Üzerindeki Etkisinin İncelenmesi. *Karaelmas Fen Ve Mühendislik Dergisi*, 13(2), 316-328. <https://doi.org/10.7212/karaelmasfen.1361805>
- ASTM C618-19. (2019). Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete. American Society of Testing Materials: West Conshohocken, PA.
- ASTM D698-12. (2012). Standart Test Methods for Laboratory Compaction Characteristic of Soil Using Standart Effort. ASTM International. West Conshohocken, PA.
- ASTM D1883-21. (2021). Standard Test Method for California Bearing Ratio (CBR) of Laboratory-Compacted Soils, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM D2166/D2166M-16. (2016). Standard Test Method for Unconfined Compressive Strength of Cohesive Soil, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM D3080/D3080M-11. (2011). Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ASTM D4318-10. (2010). Standard test methods for liquid limit, plastic limit, and plasticity index of soils, ASTM int. West Conshohocken, PA.
- Bhatt, A., & Suman, S. (2022). Evaluation of the Effect of RAP and Lime on Geotechnical Properties of Clayey Soil. *International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology*, 10,9, 2531-2541. <https://doi.org/10.22214/ijraset.2022.41839>
- Bilgen, G., & Altuntas, O. F. (2023). Sustainable re-use of waste glass, cement and lime treated dredged material as pavement material. *Case Studies in Construction Materials*, 18, e01815. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01815>
- Canakci, H., Aram, A. L., & Celik, F. (2016). Stabilization of clay with waste soda lime glass powder. *Procedia Engineering*, 161, 600-605. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.08.705>
- Canakci, H., Güllü, H., & Dwle, M. I. K. (2018). Effect of glass powder added grout for deep mixing of marginal sand with clay. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 43(4), 1583-1595. <https://doi.org/10.1007/s13369.017.2655.3>
- Celik, F., & Canakci, H. (2015). An investigation of rheological properties of cement-based grout mixed with rice husk ash (RHA). *Construction and Building Materials*, 91, 187-194. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.05.025>
- Cinar, M., Karpuzcu, M., & Çanakkı, H. (2019). Effect of waste marble powder and fly ash on the rheological characteristics of cement based grout. *Civil Engineering Journal*, 5(4), 777-788. <https://doi.org/10.28991/cej.2019.03091287>

Cınar, M. (2023). Investigation of Mechanical and Physical Features of Cementitious Jet Grout Applications for Various Soil Types. *Buildings*, 13(11), 2833. <https://doi.org/10.3390/buildings13112833>

Cınar, M. (2024a) Utilization of Earthquake Demolition Wastes and Afşin–Elbistan Fly Ash for Soil Improvement after the Kahramanmaraş Earthquake (6 February 2023). *Sustainability*, 16, 538. <https://doi.org/10.3390/su16020538>

Cınar, M. (2024b) Kahramanmaraş Depremi Sonrası Oluşan Gaz Beton Atıkları ile Stabilize Edilmiş Killi Kum Zeminin Geoteknik Özelliklerinin Araştırılması. *DÜMF MD*, 15 (1), 269-275. <https://doi.org/10.24012/dumf.1404478>

Çimen, Ö., & Keleş, E. (2020). Yüksek Plastisiteli Bir Kilin Mühendislik Özelliklerine Uçucu Kül ve Kireç Katkılarının Etkisi. *İleri Mühendislik Çalışmaları ve Teknolojileri Dergisi*, 1(2), 80-90.

Doğdu, G., & Alkan, S. N. (2023). Deprem Sonrası Oluşan İnşaat ve Yıkıntı Atıklarının Değerlendirilmesi: 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş Depremleri. *Artvin Çoruh Üniversitesi Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi*, 1(1), 38-50.

Güllü, H., Canakci, H., & Al Zangana, I. F. (2017). Use of cement based grout with glass powder for deep mixing. *Construction and Building Materials*, 137, 12-20. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.01.070>

Güllü, H., Cevik, A., Al-Ezzi, K. M., & Gülsan, M. E. (2019). On the rheology of using geopolymers for grouting: A comparative study with cement-based grout included fly ash and cold bonded fly ash. *Construction and Building Materials*, 196, 594-610. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.11.140>

Güllü, H., Yetim, M. E., & Bacak Güllü, E. (2023). On the rheological, fresh and strength effects of using nano-silica added geopolymer grout for grouting columns. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 28(5), 1183-1207. <https://doi.org/10.1080/19648189.2023.2245867>

Hakan, G. (2010). Influence of Afşin-Elbistan highly lime fly ash on engineering behavior of a cohesive soil. *Sci. Res. Essays*, 5, 1307–1316.

Ibrahim, O. R., Sinani, M. A., Sinani, I. A., Shibli, B. A., Al Badi, A., & Maghawry, S. A. (2023). Effects of Metal Waste Strips on Strength Characteristics of Road Base Material. *Sustainability*, 15(12), 9824. <https://doi.org/10.3390/su15129824>

Korkmaz, B., Taştan, Ş., Dayioğlu, A. Y., & Hatipoğlu, M. (2023). Geri Dönüştürülebilir Atık Malzemelerin Geoteknik Özelliklerinin Karşılaştırmalı Olarak İncelenmesi. *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fen Bilimleri Dergisi*, 39(1), 1-12.

Lima, D., Arrieta-Baldovino, J., & Izzo, R. L. (2023). Sustainable Use of Recycled Asphalt Pavement in Soil Stabilization. *Civil Engineering Journal*, 9(9), 2315-2329. <https://doi.org/10.28991/CEJ.2023.09.09.016>

Look, B. G. (2007). Handbook of geotechnical investigation and design tables. Taylor & Francis.

Seferoğlu, A. G., Seferoğlu, M. T., Akpınar, M. V., & Çelik, M. (2020). Plent-miks temel tabakası yapımında kazanmış asfalt kaplama (RAP) malzemesi kullanımı ve ekonomik analizi. *Politeknik Dergisi*, 23(4), 1327-1338. <https://doi.org/10.2339/politeknik.631698>

Sidhu, N., Goyal, S., & Reddy, M. S. (2024). Crack Bioremediation in Concrete by Photoautotrophic Cyanobacteria through Fly Ash–Based Cementitious Biogrout. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 36(2), 04023567. <https://doi.org/10.1061/jmce7.mteng.16301>

Temiz, H., Elbistan, K., & Paköz, B. (2021). Afşin-Elbistan Termik Santral Külünün Standarda Uygun Hale Getirilmesi ve Beton Katkısı Olarak Değerlendirilmesi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 36(3), 799-813. <https://doi.org/10.21605/cukurovaumfd.1005796>

TS EN 197-1. (2002) Çimento-Bölüm 1: Genel Çimentolar-Bileşim, Özellikler ve Uygunluk Kriterleri, Türk Standartları Enstitüsü.

URL1 <https://www.evrensel.net/haber/481994/depremde-otoyol-ve-kara-yollarinda-derin-yarik-ve-cokmeler-olustu/> Erişim Tarihi 09.01.2023

URL2 <https://www.aa.com.tr/tr/asrin-felaketi/kahramanmaras-merkezli-depremler-bazi-koy-ve-mahalle-yollarini-harap-etti/2817070> Erişim Tarihi 09.01.2023



Kahramanmaraş Sütçü İmam University

Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 23.03.2024
Kabul Tarihi : 17.09.2024

Received Date : 23.03.2024
Accepted Date : 17.09.2024

ASSESSMENT OF ENVIRONMENTAL IMPACTS AND ENVIRONMENTAL FLOW FOR RIVER TYPE HYDROELECTRIC POWER PLANT: THE CASE OF KORKUTELI STREAM (ANTALYA)

NEHİR TİPİ HİDROELEKTRİK SANTRALİ İÇİN ÇEVRESEL ETKİLERİN VE ÇEVRESEL AKIŞIN DEĞERLENDİRİLMESİ: KORKUTELİ ÇAYI ÖRNEĞİ (ANTALYA)

İ. İskender SOYASLAN^{1*} (ORCID: 0000-0001-5282-8094)

¹ Burdur Mehmet Akif Ersoy University, Department of Civil Engineering, Burdur, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: İ. İskender SOYASLAN, isoyaslan@mehmetakif.edu.tr

ABSTRACT

Considering Türkiye's morphological structure and river beds, it can be seen that it has not yet reached its equilibrium profile. This profile is an ideal structure for installing hydroelectric power plants (HPP). After renewable energy sources, the most environmentally friendly energy source for the ecosystem is HPP. When determining the amount of water to be used in hydroelectric power plants, the amount of water required for the ecosystem that should be discharged to nature should be calculated. The amount of water needed for the ecosystem to maintain its current structure without change is defined as the environmental flow. In this study, the environmental impact and environmental flow of the Korkuteli Stream HPP Project located within the borders of the Korkuteli District of Antalya Province have been determined. Wetted perimeter, flow duration index (Q25, Q50, Q75, and Q95), and base flow methods have been used to determine the environmental flow of the Korkuteli Stream. In calculating environmental flow 44 years of discharges of the Salamur Strait flow observation station (FOS) on Korkuteli Stream have been used. As a result, the optimal environmental flow was calculated at 17% using the wetted perimeter method.

Keywords: Environmental flow, Korkuteli Stream, Environmental impact, Hydroelectric power plant

ÖZET

Türkiye'nin morfolojik yapısı ve akarsu yatakları göz önüne alındığında henüz denge profiline ulaşmadığı görülmektedir. Bu profil hidroelektrik santrallerin kurulumu için ideal bir yapıdır. Yenilenebilir enerji kaynaklarından sonra ekosistem için en çevre dostu enerji kaynağı hidroelektrik santralleridir (HES). Hidroelektrik santrallerde kullanılacak su miktarını belirlerken ekosistem için gerekli olan ve doğaya deşarj edilmesi gereken su miktarı hesaplanmalıdır. Ekosistemin mevcut yapısını değiştirmeden sürdürülebilmesi için ihtiyaç duyduğu su miktarı çevresel akış olarak tanımlanmaktadır. Bu çalışmada, Antalya İli Korkuteli İlçesi sınırları içerisinde yer alan Korkuteli Çayı HES Projesi'nin çevresel etkisi ve çevresel akışı belirlenmiştir. Korkuteli Çayı'nın çevresel akışını belirlemek için ıslatılmış çevre, akış süresi indeksi (Q25, Q50, Q75 ve Q95) ve taban akış yöntemleri kullanılmıştır. Çevresel akışın hesaplanmasında Korkuteli Çayı üzerindeki Salamur Boğazı debi ölçerinin 44 yıllık deşarjları kullanılmıştır. Sonuç olarak ıslak çevre yöntemi ile optimum çevresel akış %17 olarak hesaplanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Çevresel akış, Korkuteli Çayı, Çevresel etki, Hidroelektrik santral

ToCite: SOYASLAN, İ. İ., (2024). ASSESMENT OF ENVIRONMENTAL IMPACTS AND ENVIRONMENTAL FLOW FOR RIVER TYPE HYDROELECTRIC POWER PLANT: THE CASE OF KORKUTELI STREAM (ANTALYA). *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 27(4), 1185-1196.

INTRODUCTION

Global energy demand is rising by 4-5% annually due to technological advancement, population growth, and rising standards of living (Kaygusuz, 2022; Kaya et al., 2018). Different energy sources are used to fulfill the increasing energy demand. The sources include chemical reactions from mineral resources, nuclear reactions, gravitational potential from the Earth's lunar and solar movements, chemical processes, and natural radioactive decay. Energy sources are divided into two categories: conventional and renewable. Renewable energy sources are classified as biomass, wind, solar, hydroelectric, geothermal, and tidal waves. Conventional energy sources are radioactive energy, natural gas, oil, and coal (Twidell & Weir, 2015). In recent years, the use of non-renewable energy sources to fulfill energy requirements has resulted in adverse effects. In this case, the trend toward renewable energy sources has increased worldwide (Altinkaya & Yılmaz, 2023). As a result, governments have increased their investments in renewable energy sources (Şalvarlı, 2023; Özbektaş et al., 2023; IHA, 2020). Renewable energy sources possess a sustainable cycle due to their direct production in natural environments and their continuous renewal. Because it doesn't require additional raw materials for processing and production, renewable energy is economical (Külekcı, 2009).

According to Dursun and Saltuk (2023), HPPs hold the largest share of renewable energy in the world. HPP transforms potential energy into mechanical energy by utilizing the elevation difference in the water. Mechanical energy is defined as engineering structures that transform it into electrical energy by moving turbines (Süme and Fırat, 2020; Atalay and Yılmaz Ulu, 2018; Yaşar, 2018). HPP, one of the major renewable energy sources, has a very important place in Türkiye compared to other electricity generation methods. The most important reason for this is the topographical and geological structure of Türkiye (Karadol, Avli Firiş and Şekkeli, 2023). The reason for this is the difference in elevation between the spring locations of the streams and the locations where they flow into the sea or lake. Since the rivers in Türkiye do not reach the equilibrium profile like those in Europe, this elevation difference provides favourable conditions for HPP (Cronin et al., 2000; Soyaslan, 2019; Karakoyun & Yumurtacı, 2015). Türkiye has great advantages in terms of HPP potential and the importance of hydroelectric energy, which is a clean and renewable energy source, is increasing day by day (Bobat, 2023; Soyaslan, 2019; Ateş, Doğan & Berktaş, 2016). As a developing country, Türkiye's need and demand for energy is increasing day by day. With this increase, HPP investments in the country have increased significantly in the last decade. However, an investment approach that threatens natural life assumes nature as a commercial resource and develops uncontrollably is dominant in the country (Babacan & Yüksek, 2022).

Hydroelectric power plants are systems that transform water energy into mechanical energy by transporting water from a higher elevation to a lower elevation. Before the construction of the HPP plant, all species in the surrounding environment depended on water which was the basic requirement of the HPP. Throughout the design, building, and operational stages of a hydropower plant, it is essential to determine the water requirements for the survival of every organism inside the ecosystem. Determining the water requirements is a crucial aspect of this research and all HPPs.

The advantages of HPPs are low maintenance and operating costs, the ability to be installed with domestic resources, amortization period, long operating life, renewability, environmental friendliness, no waste as a result of the process, and no need for fuel (Albayrak & Turanlı, 2022; Karakoyun & Yumurtacı, 2015). According to worldwide electricity generation statistics, the amount of electricity generation, which was 11957 terawatt-hours in 1990, reached 29165 terawatt-hours in 2022 (Fig. 1) (Statista, 2023).

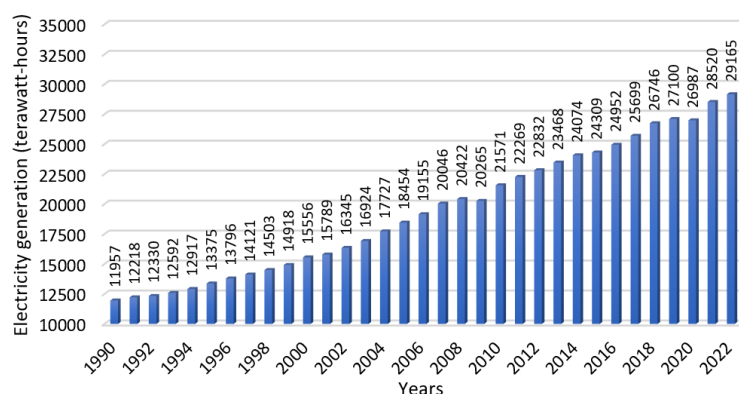


Figure 1. Electricity Generation Worldwide from 1990 to 2022 (Statista, 2023)

Conventional energy makes up 70% of the global increase in electricity generation in 2022, while renewable energy makes up 30%. The distribution of energy production rates breaks down as follows: The distribution of energy production rates is as follows: 2.4% for bioenergy, 4.5% for solar, 7.5% for wind, 15.2% for hydro, 0.4% for other renewables, 9.2% for nuclear, 22% for natural gas, 35.8% for coal and 3% for other fossil fuels (Fig. 2) (Statista, 2023).

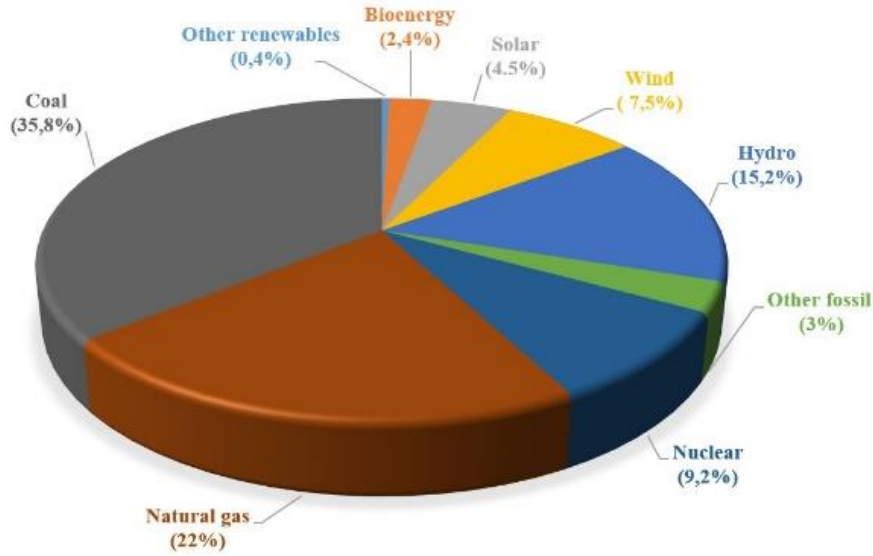


Figure 2. Distribution of Electricity Generation Worldwide in 2022 (Statista, 2023)

Since 2009, the energy industry has had a remarkable development in the total installed power capacity of Türkiye (Fig. 3). With the quick development, the total installed electricity power increased by 132% from 44761.4 MW in 2009 to 103809.3 MW in 2022 (EPİAŞ, 2024).

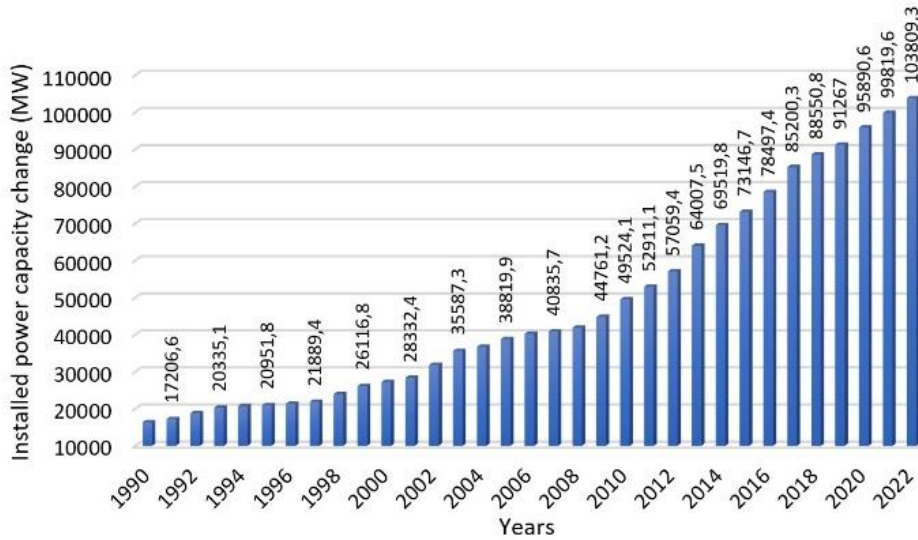


Figure 3. Installed Power Capacity Change by Years of Türkiye (EPİAŞ, 2024)

In the worldwide power generation distribution for 2022, conventional energy represented 70%, and renewable energy represented 30%. The distribution of energy production rates is as follows: bioenergy 2.4%, solar 4.5%, wind 7.5%, hydro 15.2%, other renewables 0.4%, nuclear 9.2%, natural gas 22%, coal 35.8%, and other fossil fuels 3% (Fig. 2) (Statista, 2023).

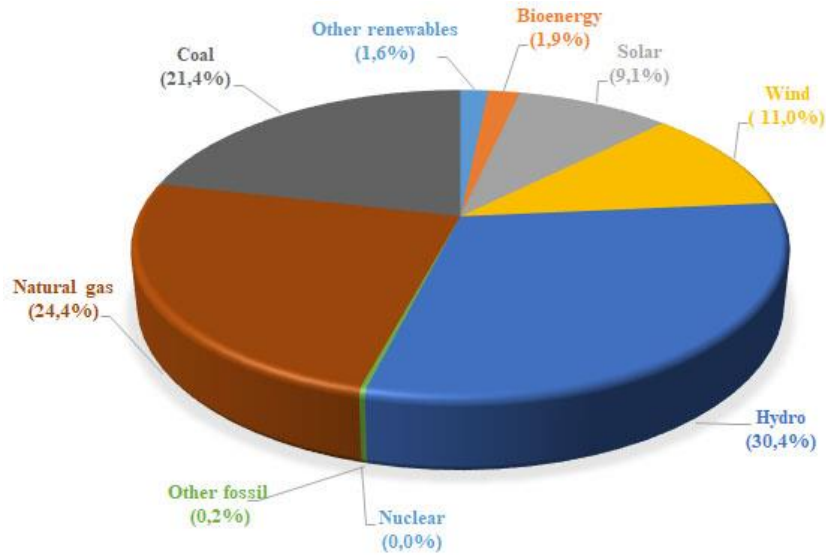


Figure 4. Distribution of Electricity Production in Türkiye in 2022 (TEİAŞ, 2023)

The percentage of renewable energy is high (54%) in relation to the global power generation rate, with hydroelectric energy accounting for the highest part (30.4%) (TEİAŞ, 2023). These statistics all highlight how crucial hydroelectric power is to Türkiye. In 2022, 30.4% (31571.5 MW) of Turkey's total electricity production was produced from HPPs. Hydroelectric energy makes up 56.3% of the total amount of renewable energy produced. Hydroelectric power plant production constitutes 22.4% of the total hydroelectric energy production. Additionally, hydroelectric plants on rivers constitute 8% (8296.3 MW) of this production. Among the different types of power plants, hydroelectric power plants (HPP), considered the primary source of renewable energy, play an important role (EPIAŞ, 2024).

Renewable energy provides an important percentage of worldwide power generation at 54%, with hydroelectric energy being the largest share at 30.4% (TEİAŞ, 2023). These statistics emphasize the significance of hydroelectric power in Türkiye. In 2022, hydroelectricity generation was the largest share of Türkiye's total power generation, producing 31,571.5 MW (30.4%). Hydroelectricity constitutes 56.3% of the total renewable energy generated. Hydroelectric energy production accounts for 22.4%, as does the entire hydro-based energy output, facilitated by 141 dams. Hydroelectric energy production is supplied by HPPs on rivers, accounting for 8% (8296.3 MW). Among the diverse types of power plants in our country, HPP, as the main renewable energy source, has an important position (EPIAŞ, 2024).

In the worldwide electricity generation ratio for 2022, conventional energy constituted 70%, while renewable energy accounted for 30%. The distribution of energy production rates is as follows: bioenergy 2.4%, solar 4.5%, wind 7.5%, hydro 15.2%, other renewables 0.4%, nuclear 9.2%, natural gas 22%, coal 35.8% and other fossil fuels 3% (Figure 2) (Statista, 2023).

MATERIAL AND METHODS

Study area

The study area is located on the Isparta N24-d1 sheet of the Turkish topographical map index at a scale of 1:25,000, within the boundaries of Antalya province in the Mediterranean Region. It is located in the Universal Transverse Mercator (UTM) WGS84 36th zone, with coordinates of 30° 00' 06"-30° 01' 57" east and 37° 09' 28"-37° 11' 13" north. The HPP Project is located in southern Türkiye, specifically between Antalya province and the Korkuteli district, adjacent to Sülekler Village to the west of both the district and the village (Fig. 5). The closest communities are Başpınar Village, located 1.5 km to the north and Sülekler Village, situated 8 km to the southeast of the project area. The water intake structure is located on Korkuteli.

Climate features

Despite the project area's approximate 50 km air distance to the Mediterranean Sea, the high elevation mountain ranges in between significantly reduce the impact of the sea. The climate is generally continental: hot and dry in the summer and snowy and cold in the winter.

Hydrology

The Korkuteli HPP project will be constructed on the Korkuteli Stream, which is charged by many springs located west of Başpınar village and runs in several directions. The explanation for this phenomenon is the existence of several karstic water springs in the northern section of the basin where limestones occur (Çakmak et al., 2021). Korkuteli Stream is mostly charged by the Değirmen and Sarısu Streams, both originating in Taşkesiği, while Değirmendere Stream flows southwest, generating a meandering flow.

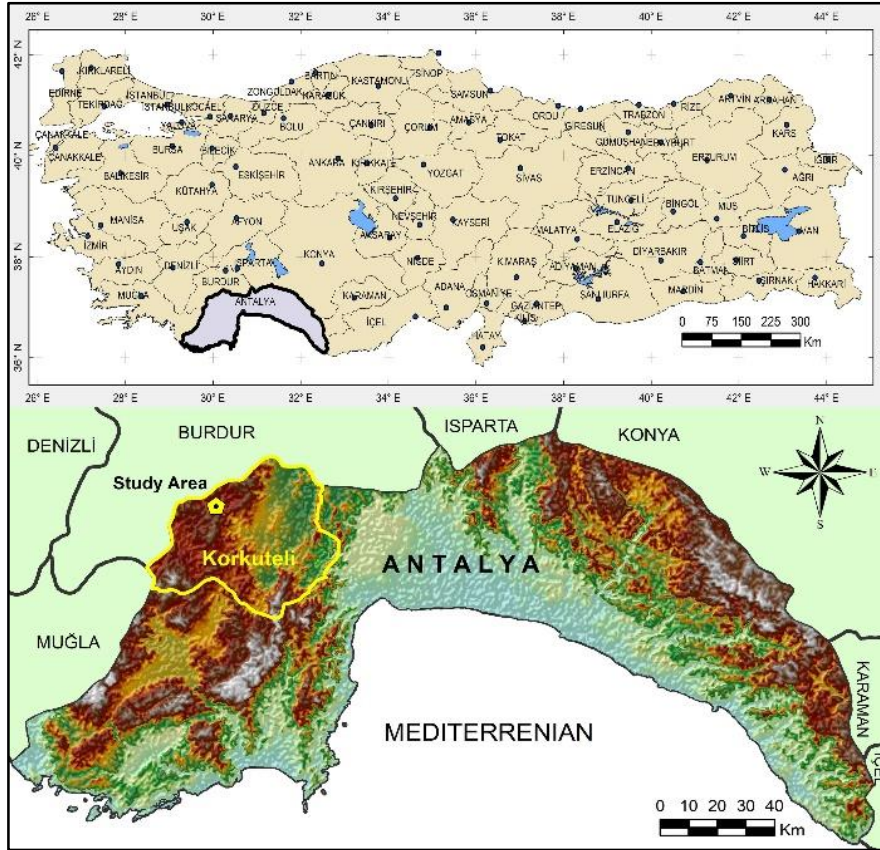


Figure 5. Study Area Location Map

The Sarısu, İbizler, Adaçay, Meneviş, Ciltas, and Ecerekler Streams converge with the Değirmendere Stream to sustain its course. The stream is designated as Korkuteli Stream after its confluence with Sarısu Stream in the Varsak Plateau and subsequently with Değirmen Stream. The design of the plant's water intake system adheres to the convergence of these streams. The Korkuteli Stream flows southeast via the Salamat Strait and into the Korkuteli Dam after the intake construction.

The catchment area in the Korkuteli Stream regulator field is 123.23 km². The HPP structure lies approximately 2.5 km beyond this point. The catchment area where the HPP structure is located was measured as 127.51 km². Korkuteli Stream - Salamat Strait Flow Observation Station (FOS) No. 09-011 is located approximately 300 m downstream of the HPP structure and Korkuteli Stream reaches Korkuteli Dam in the north of Korkuteli district after 8 km. After the dam outflow, it combines with Kargalık Stream downstream of the district and is called Marzuman Stream. Then it reaches the Bıyıklı sinkhole on the upper plateau of Antalya via the Korkuteli Diversion Channel and combines with the Düden Stream through the sinkhole.

A fish farm is located between Korkuteli Regulator and HPP, around 300 m downstream of the regulator structure. The fish farm uses 40 liters per hour of water from the Korkuteli Stream. However, there are water intake stations for agricultural lands with water rights shared by the regulator and HPP. The fish farm recycles the water and uses it to irrigate agricultural land. The Korkuteli HPP Project will obtain its water from the Korkuteli Stream. The General Directorate of State Hydraulic Works created Korkuteli Stream-Salamat Strait FOS No. 09-011, which is currently operational. No. 09-011 The Korkuteli Stream—Salamat Strait FOS, located at a height of 1190 m, has a 44-year history.

Environmental flow

The first condition for streams to maintain their ecological characteristics is to have sufficient water flow throughout the year. This flow rate is called 'life water, compensation water, environmental flow, ecological flow, and ecosystem water requirement'. Besides being natural habitats, streams are also necessary for many other uses. Determining the "environmental flow" amounts is crucial to preserving the ecological characteristics of streams and fulfilling each purpose.

The Korkuteli HPP project area lacks both protected areas and endemic species. For these reasons, wetted perimeter method (WPM), flow duration curve method (FDCM), and base flow method (BFM) were used to determine the environmental flow.

Wetted perimeter method (WPM)

WPM assumes that there is a direct relationship between a river's wetted environment and its fish habitat. This approach is appropriate for rectangular or trapezoidal sections in flat riverbeds (Zhang et al., 2021; Parker et al., 2004). WPM can only determine the minimal environmental flow. In the case of water removal from the river, this method cannot determine the river's impact, its severity, or its extent (Reinfelds et al., 2004; Marotz & Muhlfeld, 2000; King et al., 1999).

In critical sections where water velocity and water depth decrease with the widening of the river bed, WPM uses the relationship between the wetted environment and flow velocity. The non-dimensional wetted perimeter (WP/WP_{max}) and non-dimensional flow rate (Q/Q_{max}) are calculated using the basic section values (Fig. 6). The dimensionless flow value at the graph's break point determines the flow rate, which we call the environmental flow rate.

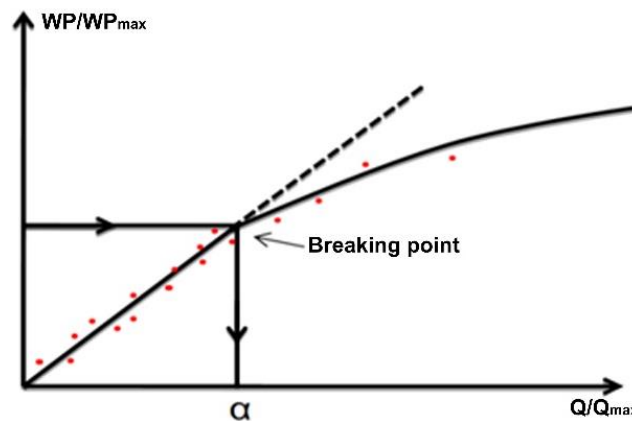


Figure 6. Dimensionless Wetted Environment (WP/WP_{max})-Dimensionless Flow Rate (Q/Q_{max}) Relationship

The flow duration curve method (FDCM) was developed based on long-term daily flow data. FDCM is a statistical approach based on the determination of the cumulative frequency distribution of flow values passing through the bed at a selected time (Rai & Jain, 2022; Searcy, 1959). Formulate the FDCM in accordance with daily flows to ensure it provides the appropriate methodology. The flow continuity curve facilitates the calculation of yearly water volume based on the proportion of time that a certain flow traverses the transmission line and the peak flow rate. Figure 7 provides a typical flow-continuity curve.

Base flow method (BFM)

A stream defines a base flow as a low flow. This flow contains both river discharge and more often groundwater discharge. This flow does not include spring discharges caused by rainfall and snowmelt. The base flow was calculated using long-year monthly average flow rates observed at the Korkuteli Stream.

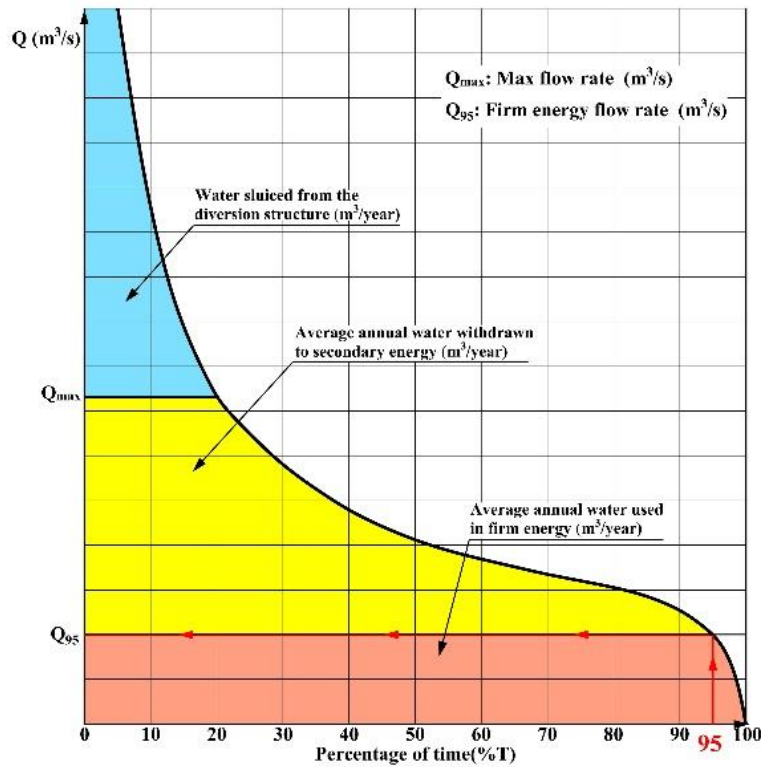


Figure 7. A Typical Flow Duration Curve

RESULTS AND DISCUSSIONS

Stratigraphy

The northwest region of the Gulf of Antalya is home to the study area. The research region encompasses the allochthonous Lycian Nappes, Yesilbarak Nappes, and the Eocene-aged Varsakyayla Formation (Senel, 1997). The summit displays Quaternary-aged alluvium and slope debris. The Jurassic-Cretaceous period's limestones make up the majority of the research region. The limestones include dolomite, dolomitic limestones, enormous thick-bedded limestones, and thin-bedded pelagic limestones, arranged from bottom to top. In the middle regions of the basin, Eocene-aged clastic rocks including a series of claystone, marl, limestone, and sandstone are present. To the south, Miocene-aged sandy-clay limestone, conglomerate, and marl lithologies are present.

Hydrogeology

The study area is situated within the Korkuteli Plain basin. The basin contains autochthonous Beydağları rocks in the south and east, as well as allochthonous Lycian Nappes rocks in the north and west. The Orhaniye formation and the Dutdere limestone are the research area's permeable units with aquifer features. Permeable units include the limestones of the Yeşilbarak Nappe's Yavuz Formation and the Yeleme olistostrome. The impermeable units are the Yavuz, Elmalı, and Varsakyayla formations. The aquifer units in the study area discharge their waters from springs.

Hydrology

The Thiessen Polygon method has determined the catchment area of the HES Project, as represented by meteorological stations (MS). Başpınar (Yeleme) MS represents 98% of the watershed area, while Sertaç (Kemer) MS represents 2%. Başpınar (Yeleme) MS has an elevation of 1500 m and according to 41 years of observations from 1963 to 2003, the annual average precipitation was calculated to be 457.9 mm. The monthly average precipitation in the project area and its surroundings has been calculated as 410.9 mm.

The yearly mean evaporation has been calculated for the Korkuteli MS (Class A Pan) and Yeleme MS within the study's area. Korkuteli MS, located at a height of 1014 m, recorded an average evaporation rate of 1192.5 mm over a 21-year observation period from 1984 to 2004. The mean annual temperature of Korkuteli MS has been determined to be 12.5 °C, derived from 34 years of data collected between 1969 and 2003. The flow measurements of Korkuteli Stream were derived from 44 years of data, covering from 1964 to 2007, obtained at Salamur Boğazı FOS (09-011). The Korkuteli Stream has an average annual discharge of 0.999 m³/s and an annual average flow volume of 31.5 hm³.

Flow duration curve (FDC)

The Korkuteli regulator developed its FDC by utilizing long-term monthly averages (Fig. 8). The Q25, Q50, Q75, and Q95 values were calculated from the FDC derived from the measurements taken at the Korkuteli Regulator. The Korkuteli Regulator FDC records flow rate values of 0.18 m³/sec 95% of the time, 0.39 m³/sec 75% of the time, and 0.57 m³/sec 50% of the time. Additionally, the system records a flow rate of 0.57 m³/sec 25% of the time and calculates a flow rate of 0.81 m³/sec and 0.016 m³/sec 100% of the time. The persistence of the aquatic habitat within the ecological system under natural conditions suggests that a long-term tolerance for a flow rate as low as 0.016 m³/s is possible.

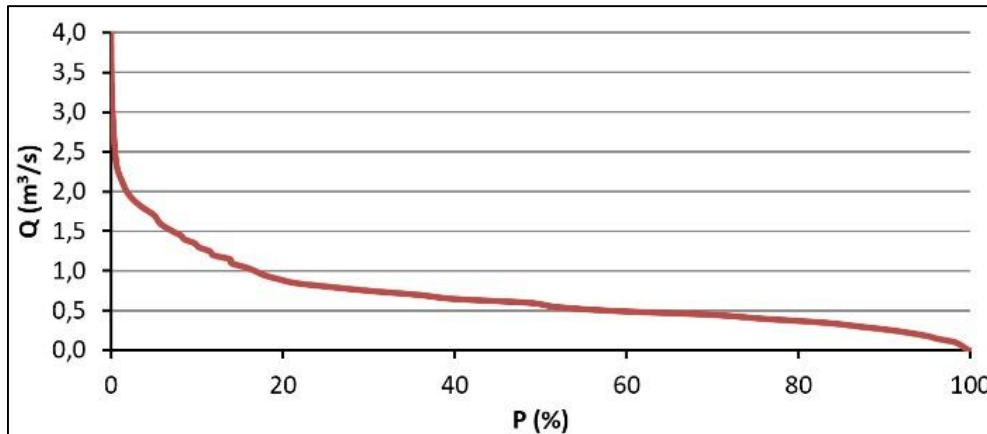


Figure 8. FDC Graph of Korkuteli Regulator

Base flow method (BFM)

The graphs showing the time-dependent variation of observed flows indicate that base flow occurs in October, November, December, July, August, and September. Furthermore, we observe higher flow values during the six-month interval from January to June. As a result, we determined the long-term base flow value at the Korkuteli HPP regulator location to be 0.77 m³/s. The unit hydrograph of the stream was constructed and the base flow value was determined from this graph (Table 3).

Table 3. Base Flow Quantities Calculated at Korkuteli HPP Regulator Location

Months	Oct.	Nov.	Dec.	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	June	July	Aug.	Sep.
Q _{mean}	0.756	0.800	0.870	0.986	1.109	1.358	1.480	1.348	1.083	0.811	0.688	0.702
Base Flow Method (Q _{ef})	0.771	0.771	0.771	0.771	0.771	0.771	0.771	0.771	0.771	0.771	0.771	0.771
Q _{ef} (%)	101.96	96.36	88.67	78.16	69.55	56.76	52.08	57.21	71.22	95.05	112.08	109.80
Q _{mean} -Base Flow Method	-	0.029	0.099	0.215	0.338	0.587	0.709	0.577	0.312	0.040	-	-

The amount of environmental water to be discharged from the Korkuteli HPP regulator each month was determined using several methodologies.

The wetted environment approach served as the foundation for determining the environmental flow for Korkuteli HPP. The monthly environmental flow to be discharged into the stream was calculated (Table 4). To ensure the continuation of natural life and ecosystems, the volume of water discharged downstream must be no less than 10% of the average flow recorded throughout the past decade of the project. If the stream flow is below 10% of the average flow over the last decade, it should be entirely discharged. The wetted environment approach determined the environmental flow to be 17% of the average flow. Consequently, we determined that the wetted environment technique accurately reflects the natural flow conditions in the study area.

Table 4. Monthly Environmental Flow Amounts That Should Be Released to The Stream Calculated by Wetted Perimeter Method at Korkuteli Hpp

Months	Oct.	Nov.	Dec.	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	June	July	Aug.	Sep.
Qmean (m ³ /s)	0.756	0.800	0.870	0.986	1.109	1.358	1.480	1.348	1.083	0.811	0.688	0.702
%10 of LTMFA*	0.099	0.099	0.099	0.099	0.099	0.099	0.099	0.099	0.099	0.099	0.099	0.099
Qef	0.129	0.136	0.148	0.168	0.188	0.231	0.252	0.229	0.184	0.138	0.117	0.119
Qef (%)	17.00	17.00	17.00	17.00	17.00	17.00	17.00	17.00	17.00	17.00	17.00	17.00
Qmean-Qef	0.63	0.66	0.72	0.82	0.92	1.13	1.23	1.12	0.90	0.67	0.57	0.58

* LYAAF: Long-Term Monthly Flow Averages

Environmental impact of HPP

HPPs are energy production facilities that have the least harmful effects on the environment. Such plants do not create air, water, soil, noise pollution, solid waste, and radioactive leakage hazards. Therefore, we analyse the effects of these plants on the basins where they collect water, not the plants themselves.

There will definitely be a change in the quality of the water coming out of the power plant. The water, originating from a high elevation, swiftly enters the turbine and exits the power plant at a low temperature. The tailwater channel receives the cold water, allows it to wait and then discharges it into the stream bed. Thus, water quality can be eliminated and the water can be made suitable for aquatic organisms that cannot adapt to cold environments. Additionally, shortly after exiting the HPP, the plant's water will attain the appropriate water quality values. The construction of the regulators has led to some changes in the natural nutrient cycle downstream. Regulators significantly change the amount and duration of natural water flow in the stream. Therefore, the amount of flow directly influences the existence of species in their natural systems.

Surface flow contributes significantly to stream flows in the study area. Considering the hydrogeological characteristics of the geological units around the stream and the slope of the stream bed, their contribution to the charging of the stream is quite limited. In some extremely dry years in the study area, the flow in the bed of the stream decreased to 0.071 m³/s monthly. This value corresponds to approximately 7.1% of the 44-year average flow (0.999 m³/s). The long-term continuity of the biological and ecological structure suggests that we can tolerate this short-term drought.

In the study area, the sedimentary units surrounding the stream have very high groundwater storage and transmission properties. Despite this, there is no natural groundwater discharge point in the HPP area. Therefore, there is no significant interaction between surface and groundwater.

CONCLUSION

Determining the volume of water to extract from and discharge into the natural environment is essential in HPP. Mistakes in these computations might result in irreversible issues and damage. The amount of environmental flow must be calculated properly and precisely using an ecologically sustainable method.

This research assessed the environmental effect and flow rate of the Korkuteli HPP, situated in the Korkuteli district of Antalya province. The subject area was analysed both stratigraphically and hydrogeologically. Upon evaluating the lithological units and hydrogeological characteristics, it was concluded that there would be no adverse effects on the hydropower plant and the environment. The data on precipitation, evaporation, and temperature in the study region were analyzed. The majority of precipitation occurs during the spring and winter months. Winter snowfall does not influence flooding. Furthermore, winter snowfall facilitates resource replenishment via melting throughout the spring months.

The calculation of water potential at the water intake structure used the daily average flow data from Korkuteli Stream-Salamur Strait FOS No. 09-011. The annual average flow rate was determined to be 0.999 m³/s and the yearly average flow was computed at 31.50 hm³. The spring discharge prevented Korkuteli Stream from transporting excessive silt. Furthermore, field investigations were conducted on the streambed to validate this condition.

Three different methodologies were used to ascertain the amount of environmental flow. Of the three ways, the wetted environment method was selected as the reference. The wetted environment approach suggested that the monthly environmental discharge into the stream should equal 17% of the average flow. The dimensions of the Korkuteli HPP study area, the lack of lateral surface flow inside the project zone, the transportation of water from an external basin by canal, and geomorphological aspects were assessed. The studies determined that the HPP project would not adversely affect hydrology, ecology, or geomorphology.

REFERENCES

- Albayrak, S. & Turanlı, M. (2022). Çok kriterli karar verme yöntemleri ile Türkiye'de HES (Hidroelektrik Santral) seçimi. *İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Dergisi*, 21(41), 68-79. <https://doi.org/10.55071/ticaretfd.1113158>
- Altinkaya, H. & Yılmaz, M. (2023). Estimation of the daily production levels of a run-of-river hydropower plant using the artificial neural network. *Academic Platform Journal of Engineering And Smart Systems (APJESS)*, 11(2), 62-72. <https://doi.org/10.21541/apjess.1223119>
- Atalay, Ö. & Yılmaz Ulu, E. Y. (2018). Hydropower capacity of Turkey and actual investments. The Eurasia Proceedings of Science, Technology, Engineering & Mathematics (EPSTEM), (4), 162-166.
- Ates, H., Dogan, S. & Berktaş, A. (2016). The effect of river type hydroelectric power plants on aquatic ecosystems: the case study of Göksu River-Eastern Mediterranean. *European Journal of Engineering and Natural Sciences*, 1(1), 39-46.
- Babacan, H. T. & Yüksek, Ö. (2022). Comparison of environmental impact assesment processes for hydropower plants. *Turkish Journal of Hydraulic*, 6(1), 12-20.
- Bobat, A. (2023). Small hydropower development in Turkey: An overview on 2021. *International Journal of Energy Studies*, 8(1), 75-85. <https://doi.org/10.58559/ijes.1195975>
- Cronin, B. T., Hartley, A. J., Çelik, H., Hurst, A., Türkmen, İ. & Kerey, E. (2000). Equilibrium profile development in graded deep-water slope: Eocene Eastern Turkey. *Journal of the Geological Society*, 157, 943-955.
- Çakmak, S., Demir, T. & Aytaç, A. S. (2021). Korkuteli Çayı'nda taşınan eriyik sediman konsantrasyonları ve verimlerinin tahmin edilmesi. *Jeomorfolojik Araştırmalar Dergisi*, (7), 19-29. <https://doi.org/10.46453/jader.893216>
- Dursun, M. & Saltuk, M. F. (2023). Reservoir effect on the hybrid solar-hydroelectric (SHE) system. *Journal of Polytechnic*, 26(4), 1505-1515. <https://doi.org/10.2339/politeknik.1074180>
- Enerji Piyasaları İşletme A. Ş. (2024). Real-Time Electrical Power Generation Reports. Retrieved from <https://webim.teias.gov.tr/file/a5ec8c53-fad2-4b3d-b056-db93a70a0fa3?download>
- IHA. (2020). *2019 Hydropower Status Report Sector Trends and Insights*. London: International Hydropower Association, Central Office.
- Karadol, İ., Avli Firiş, F. & Şekkeli, M. (2023). Seasonal assessment of run-of river hydroelectric power plant ramp events. *KSU J Eng Sci*, 26(1), 57-66. <https://doi.org/10.17780/ksujes.1172594>
- Karakoyun, Y. & Yumurtacı, Z. (2015). Hidroelektrik santral projelerinde çevresel akış miktarının ve çevresel etkinin değerlendirilmesi. *TMMOB Makine Mühendisleri Odası Tesisat Mühendisliği Dergisi*, 1-16.
- Kaya, K., Şenel, M. C. & Koç, E. (2018). Dünyada ve Türkiye'de yenilenebilir enerji kaynaklarının değerlendirilmesi. *Technological Applied Sciences*, 13(3), 219-234. <https://doi.org/10.12739/NWSA.2018.13.3.2A0152>
- Kaygusuz, K. (2022). A simple feasibility study of a small hydropower project. *Journal of Engineering Research and Applied Science*, 11(1), 2023-2031.
- King, J., Tharme, R. & Brown, C. (1999). *Definition and implementation of instream flows, Final Report*. Cape Town, South Africa: World Commission on Dams.
- Küleği, Ö. Ç. (2009). Yenilenebilir enerji kaynakları arasında jeotermal enerjinin yeri ve Türkiye açısından önemi. *Ankara Üniversitesi, Çevre Bilimleri Dergisi*, 1(2), 83-91. https://doi.org/10.1501/Csaum_0000000017
- Marotz, B. & Muhlfeld, C. (2000). *Evaluation of minimum flow requirements in the South Fork Flathead river downstream of Hungry Horse dam*. Montana: Project no: 19-19-3, Bonneville Power Administration.

- Özbektaş, S., Şenel, M. C. & Sungur, B. (2023). Dünyada ve Türkiye'de yenilenebilir enerji durumu ve kurulum maliyetleri. *Engineer and Machinery*, 64(711), 317-351. <https://doi.org/muhendismakina.1319183>
- Parker, G. W., Armstrong, D. S. & Richards, T. A. (2004). *Comparison of Method for Determining Streamflow Requirements for Aquatic Habitat Protection at Selected Sites on the Assabet and Charles Rivers*. Denver: US Geological Survey Scientific Investigation Report No:2004-5092.
- Rai, N. N. & Jain, A. (2022). *Environmental flow assessment for river valley projects*. International Conference on Hydropower and Dams Development for Water and Energy Security-Under Changing Climate (s. 1-11). Rishikesh, India: Central Board of Irrigation and Power.
- Reinfelds, I., Haeusler, T., Brooks, A. J. & Williams, S. (2004). Refinement of the wetted perimeter breakpoint method for setting cease-top-pump limits or minimum environmental flows. *River Research and Applications*, 20(6), 671-685. <https://doi.org/10.1002/rra.784>
- Searcy, J. K. (1959). *Flow-duration curves, methods, and practices of the geological*. Washington: Geological Survey Water Supply US Government Printing Office.
- Soyaslan, İ. İ. (2019). *Hidroelektrik santrallerin (HES) çevresel akış miktarının ve ekolojik etkilerinin değerlendirilmesi; Geriz (Burdur) Örneği*. Türkiye'de Mühendislik Alanındaki Akademik Çalışmalar (s. 33-58). içinde Ankara, Türkiye: Iksad Publishing House.
- Statista. (2023). Retrieved from <https://www.statista.com/statistics/270281/electricity-generation-worldwide/>
- Süme, V. & Fırat, S. S. (2020). Hidroelektrik santraller ve Rize İlinde bulunan hidroelektrik santrallerin şehir ve Doğu Karadeniz Havzası için önemi. *Türk Hidrolik Dergisi*, 4(2), 8-23.
- Şalvarlı, M. S. (2023). Some views on renewable energy marketing due to climate change impacts. *World Journal of Multidisciplinary Research (WOJMUR)*, 6(1), 161-180. <https://doi.org/10.58853/dumad.1233721>
- Şenel, M. (1997). 1/100.000 Ölçekli Türkiye Jeoloji Haritası, Isparta Paftası. Ankara: Maden Tetkik Arama Enstitüsü Genel Müdürlüğü.
- TEİAŞ. (2023). Türkiye Kurulu Gücü Araşık 2023 sonu. Retrieved from <https://www.teias.gov.tr/kurulu-guc-raporlari>
- Twidell, J. & Weir, T. (2015). *Renewable energy resources*. London: Routledge. E. F. N. Spon.
- Yaşar, M. (2018). Investigation of hydropower energy potential and policy shift from natural gas to hydropower energy in Turkey. *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, 24(6), 1014-1023. <https://doi.org/10.5505/pajes.2017.71135>
- Zhang, X., Zhang, D. & Ding, Y. (2021). An environmental Flow method applied in small and medium-size mountainous rivers. *Water Science and Engineering*, 14(4), 323-329. <https://doi.org/10.1016/j.wse.2021.10.003>



Kahramanmaraş Sütçü İmam University

Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 27.03.2024
Kabul Tarihi : 13.07.2024

Received Date : 27.03.2024
Accepted Date : 13.07.2024

THE EFFECTS OF THE EARTHQUAKE INCIDENT ANGLE ON AN RC BUILDING

DEPREM YÖNLENDİRME AÇISININ BETONARME BİR BİNA ÜZERİNDE ETKİLERİ

*Soukaina MELLOUK*¹ (ORCID: 0000-0002-2211-3722)
Ebru HARMANDAR^{2*} (ORCID: 0000-0001-9802-2993)

¹ Muğla Sıtkı Koçman Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Muğla, Türkiye

* Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Soukaina MELLOUK

ABSTRACT

Current building codes necessitate the inclusion of two ground motion acceleration components in the dynamic analysis of structures. However, researches indicate that the orientation of the chosen ground motion data can significantly impact the structural response. This study investigates the influence of the incident angle on a 10-story reinforced concrete building, considering different earthquake selection criteria. Specifically, it is aimed to identify the direction of the seismic data that yields the largest peak ground acceleration by applying rotations with specific angles. Subsequently, the dynamic analysis is performed using both the original and the rotated records that produce the highest acceleration. To ensure a comprehensive evaluation, the earthquake data is classified based on soil types, fault mechanisms, and Arias's intensity. The results of the dynamic analyses for both the original and oriented data sets are compared, focusing on parameters such as roof displacement, base shear, acceleration and displacement time histories, and acceleration and displacement spectra. Our findings reveal that the base shear and roof displacement obtained from the rotated earthquake data generally exceed those obtained from the original data. This underscores the importance of considering the influence of ground motion direction in structural analysis and design.

Keywords: Incident angle, reinforced concrete structure, time history analysis, soil types, near/far field effect

ÖZET

Mevcut bina mevzuatı, yapıların dinamik analizine iki yer hareketi ivme bileşeninin dahil edilmesini gerektirmektedir. Ancak araştırmalar, seçilen yer hareketi verilerinin yönünün yapısal davranışı önemli ölçüde etkileyebileceğini göstermektedir. Bu çalışma, sismik yer hareketinin yönlendirme açısının 10 katlı betonarme bir bina üzerindeki etkisini farklı deprem seçim kriterlerini dikkate alarak araştırmaktadır. Spesifik olarak, belirli açılarla rotasyonlar uygulayarak en büyük yer ivmesini sağlayan sismik verilerin yönünü belirleme hedeflendi. Daha sonra, hem orijinal deprem kayıtlarını hem de en yüksek ivmenin elde edildiği döndürülmüş deprem kayıtları kullanılarak dinamik analizler gerçekleştirildi. Kapsamlı bir değerlendirme yapmak için deprem verileri zemin sınıflarına, fay mekanizmalarına ve Arias şiddetine göre sınıflandırıldı. Dinamik analizden elde edilen sonuçlar; çatı deplasmanı, taban kayması, ivme-yer değiştirme verileri ve ivme-yer değiştirme spektrumları göz önünde bulundurularak her iki durumdaki deprem kayıtları için karşılaştırma yapıldı. Bulgularımız, döndürülmüş deprem verilerinden elde edilen taban kesme ve çatı deplasmanlarının genellikle orijinal verilerden elde edilen değerleri aştığını ortaya koymaktadır. Bu, yapısal analiz ve tasarımda yer hareketi yönünün etkisinin dikkate alınmasının önemini vurgulamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Yönlendirme açısı, betonarme yapılar, zaman tanım alanında analiz, zemin tipleri, yakın/uzak fay etkisi

INTRODUCTION

The creation of pressure resulting from tectonic plate movement well-known earthquakes results from the pressure created by tectonic plate movement, the instant release of this energy is transmitted as seismic waves captured by seismometers. In civil engineering, seismic data is crucial for performing time history analysis on structures to assess their response during an earthquake. Seismic data might be recorded in the east-west and north-south directions or at various angles depending on the location of the seismometer which gives another complexity because of the unknown direction in which can an earthquake hit the structure.

The effect of the orientation of seismic ground motion on structures is very important for the design of structures. Meanwhile, this will help the structural engineers to improve the design of the building and construct a more resistant building against earthquakes. Many researchers have studied the effect of the propagation of earthquake ground motion data.

Sun et al. (2016) introduced a novel approach to analyse the impact of ground motion direction on structures. Their method involves rotating earthquake data by specific angles (θ). Remarkably, they discovered that varying θ significantly affects the spectral values, peak points, and even the predominant period of the data. They demonstrated that identifying the θ angle that leads to the most significant change in ground motion can provide valuable insights into potential failure mechanisms of structures. This information, in turn, can be leveraged to enhance structural design and resilience against earthquakes. In contrast to Sun et al. (2016), Kostinakis et al. (2012) considered a different approach. They analyzed a three-story building subjected to a horizontal seismic component while systematically rotating it through various angles (θ). They aim to assess how the orientation of the ground motion (represented by θ) affects the response of the reinforced concrete structure. They proposed that, indeed, the analysis of such structures is significantly influenced by the angle of seismic shaking.

Altunışık & Kalkan (2017) suggested the response of a 5-story building under the 1994 Erzincan earthquake in nineteen directions (0 to 90 degrees). These analyses show that the response of the building is influenced by the angle of seismic input motion. For instance, the maximum differences between the X and Y directions range from 54.54% and 37.15%. Additionally, both the axial force and bending moment can exceed the normal cases of 44 %, summarizing the change of angles. This can lead to an increase in the displacements and internal forces which means that there is no specific angle that can give the maximum value. Also, the far-field and near-field effects play an important role in finding the maximum value. Ruiz-Garcia & Negrete-Manriquez (2011) examined an existing steel frame building under a mainshock and aftershock seismic sequences on a far-field and near-fault of the 1994 Northridge and 1980 Mammoth earthquakes. The investigation of the ground motion direction and duration based on 3117 horizontal motions from the PEER database has been studied by Lee (2014). They considered the relation between strong-motion duration, orientation, the magnitude of the earthquake, and the relation between the distance of source and site, by obtaining the orientations at 0, 50, and 100 percentiles.

Hong et al. (2009) provided the earthquake ground motion data in the horizontal plane, encompassing bidirectional horizontal ground motions, for both Mexican interplate and in-slab earthquake data. Extensive statistical analyses of PSA (Pseudo-Spectral Acceleration) are conducted for the assessment. The ratio of the PSA to the maximum resulting PSA is calculated as done with California data. This ratio is independent from the maximum earthquake magnitude, the focal depth, the earthquake distance, and the resulting PSA. Collections of response ratios and ground motion prediction equations are applicable for the bidirectional horizontal ground motion data for Mexican interplate and in-slab earthquakes. The analytical formula was developed by Athanatopoulou (2005) for the determination of the critical angle of seismic incidence and the consistent maximum value of a response parameter of structures with three components: two horizontal components applied along with arbitrary directions and a vertical component of earthquake ground motion. Huang et al. (2009) studied one hundred forty-seven pairs of ground motion records of the moment magnitude (M_w) greater than 6.5 and the closest distance from the site to the fault rupture plane (R_{rup}) smaller than 15 km. They analyzed to examine the alignment of maximum spectral demand in the near-fault region. The analyses were carried out across four-period ranges, clearly indicating that there is characteristically an axis where the spectral demands closely align or are equal to the maximum demands. Kostinakis et al., (2018) provided that the incident angle of the ground motion significantly impacts the seismic performance and the damage level of the structures, even when their plan view is double-symmetric and relatively straightforward. The degree to which the orientation of the seismic data influences the damage response depends on the building and the distance between the record and the fault rupture. Generally, near-fault ground motions lead to a deteriorated damage state of the

structures compared to that resulting from the utilization of far-fault records as seismic input. Ghazizadeh et al. (2013) investigated building design affected by the direction of the earthquake they noticed that the scaling factor used to account for earthquake direction doesn't change that much between different building designs. Nevertheless, the methods used to evaluate building performance and the earthquake data itself can influence the importance of directionality. Pinzon et al. (2021) investigated the response of the structures affected instantly by the direction of the Earthquake. So, this research indicates that a building response can highly change according to the angle of the earthquake waves that is proportional to its orientation, that's why containing directionality in a structural analysis is fundamental. It ameliorates the evaluation of potential earthquake damage, especially for critical structures like hospitals, schools, nuclear plants, and other facilities, cause these facilities need to carry on functional after an earthquake to ensure public safety and recovery efforts, On the other hand, Cantagallo et al (2024) examined many recent studies (up to February 2024) on how earthquakes affect buildings and still, there's no way to account for direction yet, cause earthquakes can hit from any direction, also not all directions put the same amount of stress on a building. Normally engineers often make assumptions about earthquake direction, which could underestimate the strain that the building could have. This review suggests that future codes could be improved by giving engineers clear instructions on how to account for shaking direction and teaching them how to analyse buildings for multiple earthquake scenarios. However, Bugueño et al. (2021) tested how earthquake direction affects buildings using computer models of different designs (shear walls, frames, combinations). They didn't realize the worst shaking direction, instead, the different directions of stiffness building are very important. Hence, the shaking earthquake can cause more cracks or displacement in a building's weaker direction, but combining materials seems to make buildings less sensitive to direction, and frame-only buildings might be a safe design approach based on initial tests. The study has limitations cause the used models didn't examine other details like building height, number of stories, or the intensity of the earthquake zone that's why they suggest more research using real buildings to get more information on how earthquake direction affects building response.

Due to the uncertainty regarding the epicenter location of the subsequent earthquake, the seismic data should be applicable in any direction relative to the structure under analysis. Considering the relative disparities in the incident angles of consecutive earthquakes can notably impact the resulting seismic responses, as evidenced by the findings. As aforementioned, numerous researchers have investigated how the incident angle influences the performance of structures with a single earthquake scenario. In this study, one regular building is modelled and investigated. The building is subjected to ground accelerations with different criteria. The aim here is to observe the effect of earthquake data on the building in terms of earthquake orientation with different characteristics.

In this study, a 10-story reinforced concrete building is analysed using linear time history analysis by rotating the direction of the earthquake records. Earthquake data is selected considering the effect of the near and far field; site classes (soft, stiff, rock), and fault mechanisms (normal, reverse, strike-slip).

Earthquake records are rotated at intervals of 10° , and the incident angle at which the record has the highest acceleration value will be used in time history analysis. The original earthquake records and the earthquake records in the direction giving the highest acceleration are compared as a result of dynamic analysis.

Moreover, it is aimed to examine the effect of near and far field effects, compare the effect of soil classes, to investigate the structure behaviour while considering the fault mechanism; to observe the effect of high and low Arias intensities of ground motion recordings on the structure in terms of orientation.

STRUCTURAL MODEL

The ten-story reinforced concrete (RC) structural model is designed with SAP2000 software, adhering to the specifications outlined in the Turkish Building Earthquake Code (TBEC, 2018). The model is designed as a frame system. The building stands 35m tall and features concrete with a compressive strength of 35 MPa. Steel reinforcement boasts a yield strength of 420 MPa. Beams have dimensions of 60cm x 70cm, while columns are modelled as 75cm x 60cm sections. The frame consists of five bays spaced 8m apart. The configuration of the building is represented in Figure 1 with a total weight of 337,572 kN and a fundamental period of 1.76 seconds.

GROUND MOTION DATABASE

The earthquake ground motion data are selected from the PEER database according to the criteria shown in Table 1- Table 3. Earthquake data if needed are processed to remove the noise by using baseline correction, tapering, and

filtering. This research aims to explore the influence of the angles (between 0 and 90 degrees) on structural response. To achieve this, various earthquake data sets encompassing different characteristics are considered. The data are carefully organized based on the key criteria: near-field (with pulse) and far-field recordings, site classes (soft, stiff, rock), and fault mechanisms (normal, reverse, strike-slip). In this study, the issue isn't compared based on region. Instead, the incident angle is assessed in terms of the earthquake. Therefore, the scaling isn't conducted.

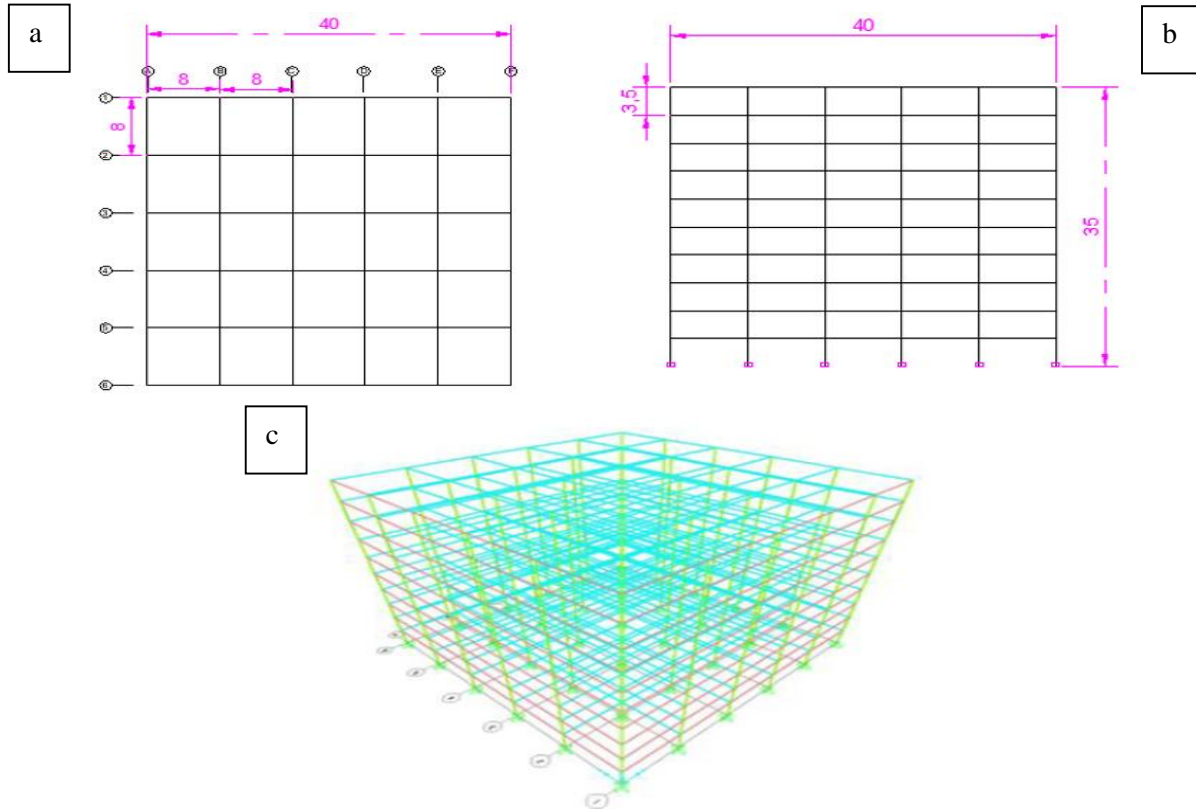


Figure 1. a. Plan View, b. Front View, c. Finite Element Model of the RC Building (the units are in m)

Table 1. General Properties of Earthquakes with Normal Fault Mechanism

				Earthquake Name	Record Sequence Number	$V_{s,30}$ (m/s)	R_{jb} (km)	Year	Station Name	Moment magnitude (M_w)	Arias Intensity (m/s)
NORMAL FAULT	Near Field (0-10 km)	Soft soil 0-400 m/s	Low Arias Intensity	Ancona-10, Italy	4262	256.0	2.94	1972	Ancona-Palombina	4.3	0.1
			Medium Arias Intensity	Kalamata, Greece	564	382.21	6.45	1986	Kalamata (bsmt)	6.2	0.7
			High Arias Intensity	Dinar, Turkey	1141	219.75	0.0	1995	Dinar	6.4	2.0
		Stiff soil 400-760 m/s	Low Arias Intensity	Oroville-03	113	634.85	0.0	1975	DWR Garage	4.7	0.1
			Medium Arias Intensity	Irpinia, Italy	300	455.93	8.81	1980	Calitri	6.2	0.5
			High Arias Intensity	L'Aquila, Italy	4480	475.0	0.0	2009	L'Aquila - V. Aterno - Centro Valle	6.3	2.8
	Far Field (50-100 km)	Rock 760-1500 m/s	Low Arias Intensity	China Lake	12675	1464.0	6.47	2007	China Lake	4.34	0.0
			High Arias Intensity	Kozani, Greece	1127	282.27	74.06	1995	Larisa	6.4	0.1
		Soft soil 0-400 m/s	Low Arias Intensity	Little Skull Mtn, NV	1745	515.4	99.44	1992	Station #6-Las Vegas Calico Basin	5.65	0.0
			Medium Arias Intensity	Irpinia, Italy	293	593.35	59.63	1980	Torre Del Greco	6.9	0.1
Stiff soil 400-760 m/s	High Arias Intensity	Pelekanada, Greece	484	527.96	154.5	1984	Pelekanada	5.0	0.2		

Table 2. General Properties of Earthquakes with Reverse Fault Mechanism

			Earthquake Name	Record Sequence Number	V_{s30} (m/s)	R_{jb} (km)	Year	Station Name	Moment magnitude (M_w)	Arias Intensity (m/s)
REVERSE FAULT	Near Field (0-10 km)	Soft soil 0-400 m/s	Low Arias Intensity Northridge	1737	370.52	6.79	1994	Sylmar - Converter Sta East	5.28	0.2
			Medium Arias Intensity Niigata, Japan	4210	331.63	7.45	2004	NIG020	6.63	3.5
			High Arias Intensity Chi-Chi, Taiwan	1513	363.99	0.0	1999	TCU079	7.62	7.7
		Stiff soil 400-760 m/s	Low Arias Intensity Coalinga	410	458.09	7.92	1983	Palmer Ave	5.77	0.6
			Medium Arias Intensity Cape Mendocino	828	422.17	0.0	1992	Petrolia	7.01	3.8
			High Arias Intensity Chi-Chi, Taiwan	1507	624.85	0.0	1999	TCU071	7.62	9.5
		Rock 760-1500 m/s	Low Arias Intensity Loma Prieta	765	1428.1	8.84	1989	Gilroy Array	6.93	1.7
			Medium Arias Intensity Loma Prieta	3548	1070.3	3.22	1989	Los Gatos - Lexington Dam	6.93	1.9
			High Arias Intensity Tabas, Iran	143	766.77	1.79	1978	Tabas	7.35	11.8
	Far Field (50-100 km)	Soft soil 0-400 m/s	Low Arias Intensity Taiwan SMART	510	314.33	56.71	1986	SMART1	6.32	0.2
			Medium Arias Intensity Loma Prieta	784	306.3	72.09	1989	Oakland - Title & Trust	6.93	0.7
			High Arias Intensity Taiwan SMART	578	285.09	57.13	1986	SMART1	7.3	1.4
		Stiff soil 400-760 m/s	Low Arias Intensity Georgia, USSR	820	432.58	51.33	1991	Zem	6.2	0.1
			Medium Arias Intensity Kern County	14	514.99	81.3	1952	Santa Barbara Courthouse	7.36	0.3
			High Arias Intensity Loma Prieta	771	584.17	79.71	1989	Golden Gate Bridge	6.93	0.5
Rock 760-1500 m/s	Low Arias Intensity Chi-Chi, Taiwan	2989	804.36	69.76	1999	CHY102	6.2	0.1		
	Medium Arias Intensity Iwate, Japan	5650	891.55	64.27	2008	IWTH18	6.9	0.4		
	High Arias Intensity Iwate, Japan	5646	816.31	99.04	2008	IWTH14	6.9	0.9		

Orientation of Strong Ground Motion Data

While earthquake ground motion is recorded in three directions (X, Y, and Z), this study focuses specifically on the horizontal components (X and Y). We aim to investigate the impact of the strongest shaking direction on structures. Instead of analysing the entire waveform in each direction, the maximum peak ground acceleration (PGA) at any angle for each horizontal component is identified. This enables us to determine the direction that would generate the most intense shaking at a specific point and to identify the angle at which the earthquake causes the largest ground displacement and acceleration.

The structure is analysed using all available earthquake data to obtain time histories for base shear, roof displacement, acceleration, as well as displacement and acceleration response spectra. The second part focuses on the original X and Y components of a single earthquake. However, the station recording the data may be positioned at any angle, meaning the maximum peak ground motion might occur at an angle different from the X or Y axes (Figure 2).

The purpose is to rotate the data with angles differing from $\theta = 0^\circ$ to $\theta = 90^\circ$ based on Equation. (1) and Equation (2):

$$E'_x = E_x \cos(\theta) + E_y \sin(\theta) \tag{1}$$

$$E'_y = -E_x \sin(\theta) + E_y \cos(\theta) \tag{2}$$

Following the calculation of earthquake data rotation along the X and Y axes at a specified angle (θ) where peak ground acceleration is elevated, subsequent linear time history analysis is conducted. Base shear, roof displacement, acceleration, and displacement time histories are derived from the rotated earthquake data.

Table 3. General Properties of Earthquakes with Strike-slip Fault Mechanism

			Earthquake Name	Record Sequence Number	V_{s30} (m/s)	R_{fb} (km)	Year	Station Name	Moment magnitude (M_w)	Arias Intensity (m/s)	
STRIKE-SLIP FAULT	Near Field (0-10 km)	Soft soil 0-400 m/s	Low Arias Intensity	Duzce, Turkey	1615	338.0	9.14	1999	Lamont 1062	7.14	1.0
			Medium Arias Intensity	Duzce, Turkey	1605	281.86	0.0	1999	Duzce	7.14	2.9
			High Arias Intensity	Tottori, Japan	3968	310.21	0.83	2000	TTRH02	6.61	11.8
		Stiff soil 400-760 m/s	Low Arias Intensity	Duzce, Turkey	1618	638.39	8.03	1999	Lamont 531	7.14	0.4
			Medium Arias Intensity	Big Bear	901	430.36	7.31	1992	Big Bear Lake - Civic Center	6.46	3.3
			High Arias Intensity	Duzce, Turkey	1617	454.2	3.93	1999	Lamont 375	7.14	10.0
	Far Field (50-100 km)	Rock 760-1500 m/s	Low Arias Intensity	Parkfield	4083	906.96	4.66	2004	Parkfield Turkey Flat	6.0	0.2
			Medium Arias Intensity	Kocaeli, Turkey	1165	811.0	3.62	1999	Izmit	7.51	0.8
			High Arias Intensity	Landers	879	1369.0	2.19	1992	Lucerne	7.28	7.0
		Soft soil 0-400 m/s	Low Arias Intensity	Hector Mine	1812	387.12	84.87	1999	Mill Creek Ranger Station	7.13	0.1
			Medium Arias Intensity	Kocaeli, Turkey	1155	289.69	60.43	1999	Bursa Tofas	7.51	0.5
			High Arias Intensity	Manjil, Iran	1634	302.64	75.58	1990	Abhar	7.37	1.9
Stiff soil 400-760 m/s	Low Arias Intensity	Chalfant Valley	557	467.62	50.92	1986	Tinemaha Res. Free Field	6.19	0.0		
	Medium Arias Intensity	Caldiran, Turkey	1627	432.58	50.78	1976	Maku	7.21	0.1		
	High Arias Intensity	Big Bear	928	564.11	63.92	1992	Sage - Fire Station	6.46	0.6		
Rock 760-1500 m/s	Low Arias Intensity	Chi-Chi, Taiwan	2759	789.18	65.26	1999	HWA002	6.2	0.0		

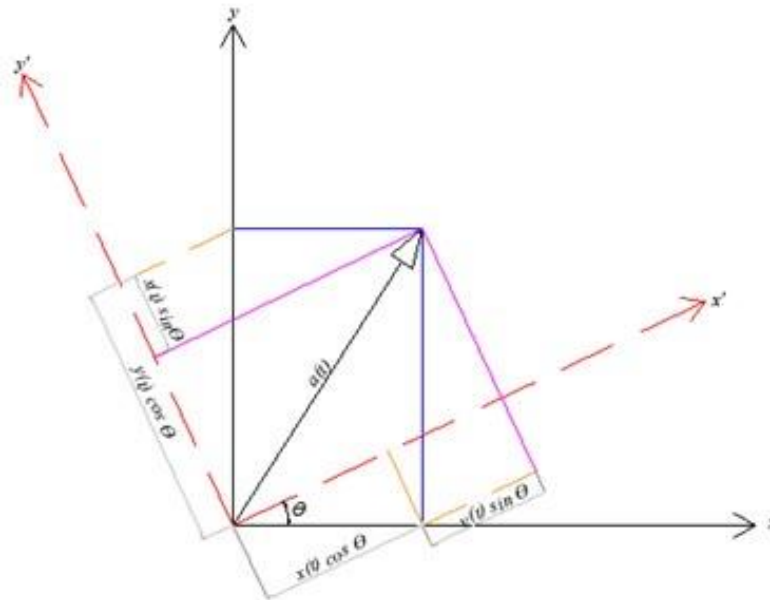


Figure 2. Orientation of the Axes with Respect to the Incident Angle.

RESULTS AND DISCUSSION

In this study, the impact of the orientation of recorded earthquake data on a 10-story RC building is investigated. Figure 3 presents the comparison of base shear results of the oriented data with original data for normal, reverse, and strike-slip faults. As it is evident that the results from the rotated data reverse, and strike-slip earthquakes dominate the results of the original data. On the other hand, the base shear based on rotated data and those based on original data share the same trend. Focusing on the rotated earthquake data reveals a substantial increase in results for reverse

and strike-slip earthquakes compared to the unrotated earthquake data. This effect is evident in earthquake data like RSN 828 (reverse) and RSN 3968 (strike-slip), where the rotated data show a clear amplification.

Figure 4 depicts the roof displacement values calculated using rotated earthquake data, which often differ from those obtained from the original, unrotated data. This discrepancy is observed across most fault types. Some earthquakes with reverse or strike-slip fault mechanisms exhibit less pronounced differences between original and rotated data. In an earthquake with strike-slip faulting, the rotated RSN3968 earthquake data produced a roof displacement calculation three times greater than the displacement calculated from the original data. This highlights the potential for substantial variation in results depending on data orientation. Typically, earthquake data concerning reverse and normal fault mechanisms are mostly influenced by rotation. In contrast, results from earthquake data of strike fault mechanism show consistent outcomes between original and converted data.

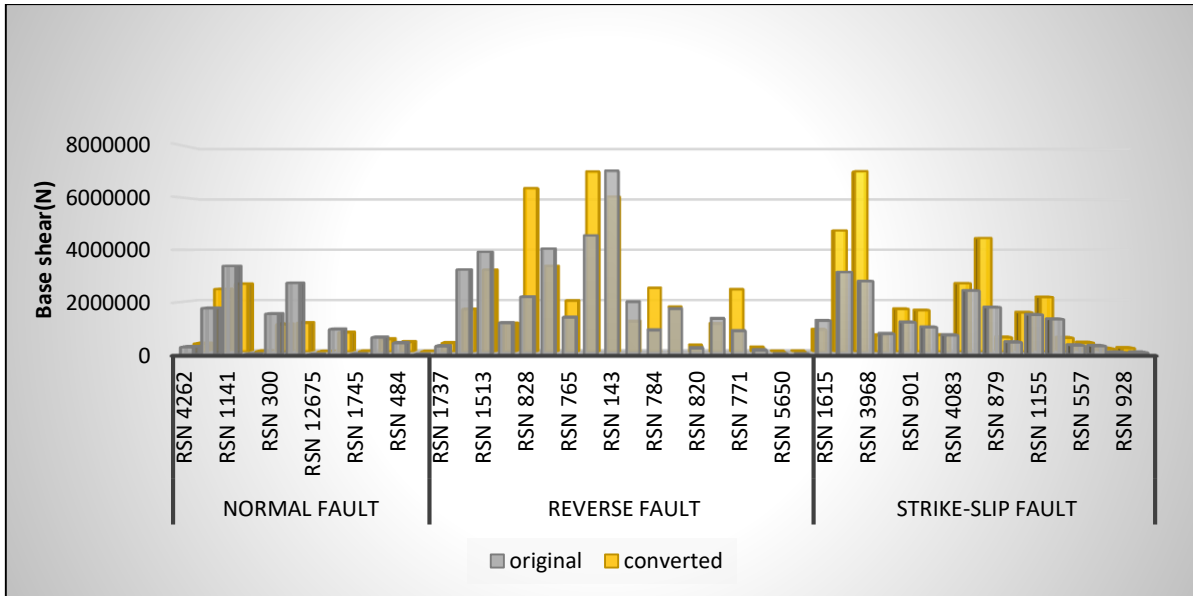


Figure 3. Comparison of Base Shear with Original Data and Rotated Data using both Horizontal Directions (Normal, Reverse, and Strike-slip Faults)

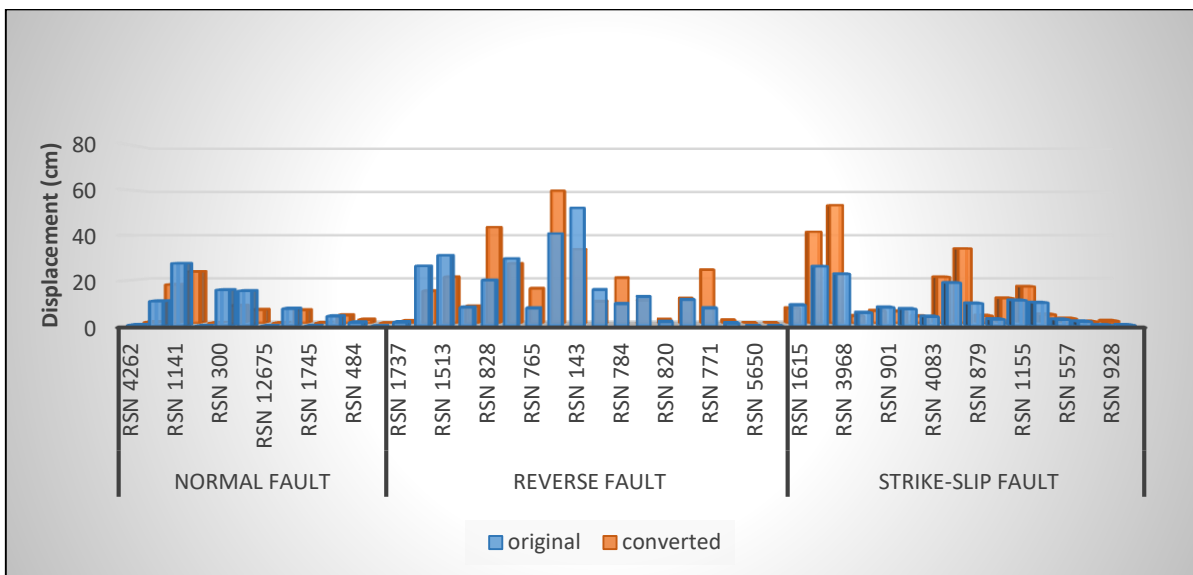


Figure 4. Comparison of Roof Displacement with Original Data and Rotated Data using both Horizontal Directions (Normal, Reverse, and Strike-slip Faults).

To better understand and interpret the results, the ratio between the roof displacement and base shear based on original data and rotated data is obtained for each station. As expected, both the ratio of roof displacement and the ratio of base shear are consistent with each other.

Table 4. The Ratio between Original and Rotated results for Roof Displacement and Base Shear.

Fault Type	Near/Far Field	Soil Type	Arias Intensity	Record Sequence Number	Displacement	Base shear
					Original/Converted	Original/Converted
Normal Fault	Near Field	Soft soil 0-400	Low Arias Intensity	RSN 4262	0.873	0.900
			Medium Arias Intensity	RSN 564	0.627	0.722
			High Arias Intensity	RSN 1141	1.178	1.268
		Stiff soil 400-760	Low Arias Intensity	RSN 113	0.534	0.878
			Medium Arias Intensity	RSN 300	1.987	1.437
			High Arias Intensity	RSN 4480	2.539	2.396
	Rock 760-1500	Low Arias Intensity	RSN 12675	0.846	0.693	
	Far Field	Soft soil 0-400	High Arias Intensity	RSN 1127	1.294	1.276
		Stiff soil 400-760	Low Arias Intensity	RSN 1745	1.081	1.126
			Medium Arias Intensity	RSN 293	1.212	1.320
			High Arias Intensity	RSN 484	1.009	1.155
		Rock 760-1500	Low Arias Intensity	RSN 16678	1.452	1.638
Reverse Fault		Near Field	Soft soil 0-400	Low Arias Intensity	RSN 1737	1.783
	Medium Arias Intensity			RSN 4210	1.805	1.936
	High Arias Intensity			RSN 1513	1.481	1.217
	Stiff soil 400-760		Low Arias Intensity	RSN 410	1.075	1.087
			Medium Arias Intensity	RSN 828	0.464	0.345
			High Arias Intensity	RSN 1507	1.094	1.201
	Rock 760-1500		Low Arias Intensity	RSN 765	0.501	0.712
			Medium Arias Intensity	RSN 3548	0.677	0.644
			High Arias Intensity	RSN 143	1.546	1.152
	Far Field	Soft soil 0-400	Low Arias Intensity	RSN 510	1.629	1.684
			Medium Arias Intensity	RSN 784	0.475	0.375
			High Arias Intensity	RSN 578	1.247	0.997
		Stiff soil 400-760	Low Arias Intensity	RSN 820	1.184	0.988
			Medium Arias Intensity	RSN 14	1.033	1.252
			High Arias Intensity	RSN 771	0.328	0.370
		Rock 760-1500	Low Arias Intensity	RSN 2989	1.014	1.009
			Medium Arias Intensity	RSN 5650	0.842	1.284
			High Arias Intensity	RSN 5646	0.884	0.907
Strike-Slip Fault	Near Field	Soft soil 0-400	Low Arias Intensity	RSN 1615	1.356	1.492
			Medium Arias Intensity	RSN 1605	0.634	0.662
			High Arias Intensity	RSN 3968	0.429	0.397
		Stiff soil 400-760	Low Arias Intensity	RSN 1618	1.790	1.224
			Medium Arias Intensity	RSN 901	1.458	0.736
			High Arias Intensity	RSN 1617	1.399	0.643
		Rock 760-1500	Low Arias Intensity	RSN 4083	1.321	1.132
			Medium Arias Intensity	RSN 1165	0.909	0.910
			High Arias Intensity	RSN 879	0.295	0.407
	Far Field	Soft soil 0-400	Low Arias Intensity	RSN 1812	0.890	0.832
			Medium Arias Intensity	RSN 1155	1.002	0.986
			High Arias Intensity	RSN 1634	0.621	0.633
		Stiff soil 400-760	Low Arias Intensity	RSN 557	0.735	0.642
			Medium Arias Intensity	RSN 1627	0.976	0.922
			High Arias Intensity	RSN 928	0.578	0.661
Rock 760-1500	Low Arias Intensity	RSN 2759	0.440	0.558		

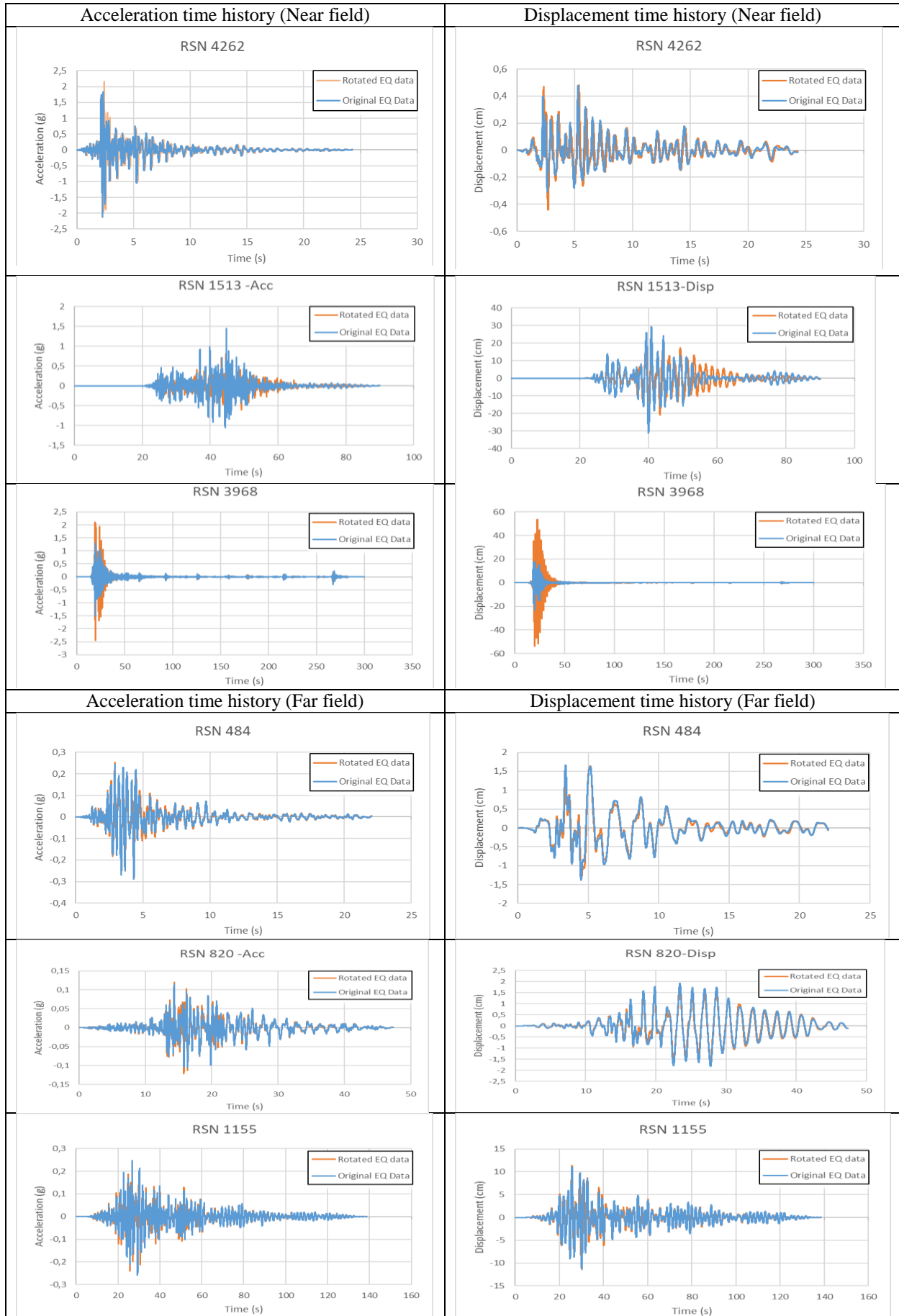


Figure 5. Comparison of Acceleration and Displacement Time Histories based on Original and Rotated Data for Near and Far Field

Figure 5 represents the acceleration and displacement time histories for the near and far fields. In the near-field acceleration and displacement data, there is a close agreement between the original and the rotated data of RSN4262 and RSN1513, unlike the acceleration and displacement of RSN3968 the rotated data overestimates the original data. There might be potential amplification effects. For the far-field in graphs of RSN1155, similar trends were observed for both data sets. Also, a distinct difference between rotated and original data, indicating a significant impact of rotation on displacement and acceleration behaviour for RSN484 and RSN820.

In Figure 5, in some cases like RSN3968, rotated data amplifies the original data. The rotated data from near-field earthquakes exhibits higher peak values indicating a potentially stronger shaking direction. However, far-field acceleration and displacement data have a similar trend for both original and rotated data.

Figure 6 represents the results for both original and rotated data align closely when examined across a range of Arias intensity values for normal, strike-slip, and reverse fault mechanisms. This suggests that data orientation might not significantly influence structural response based on arias intensity.

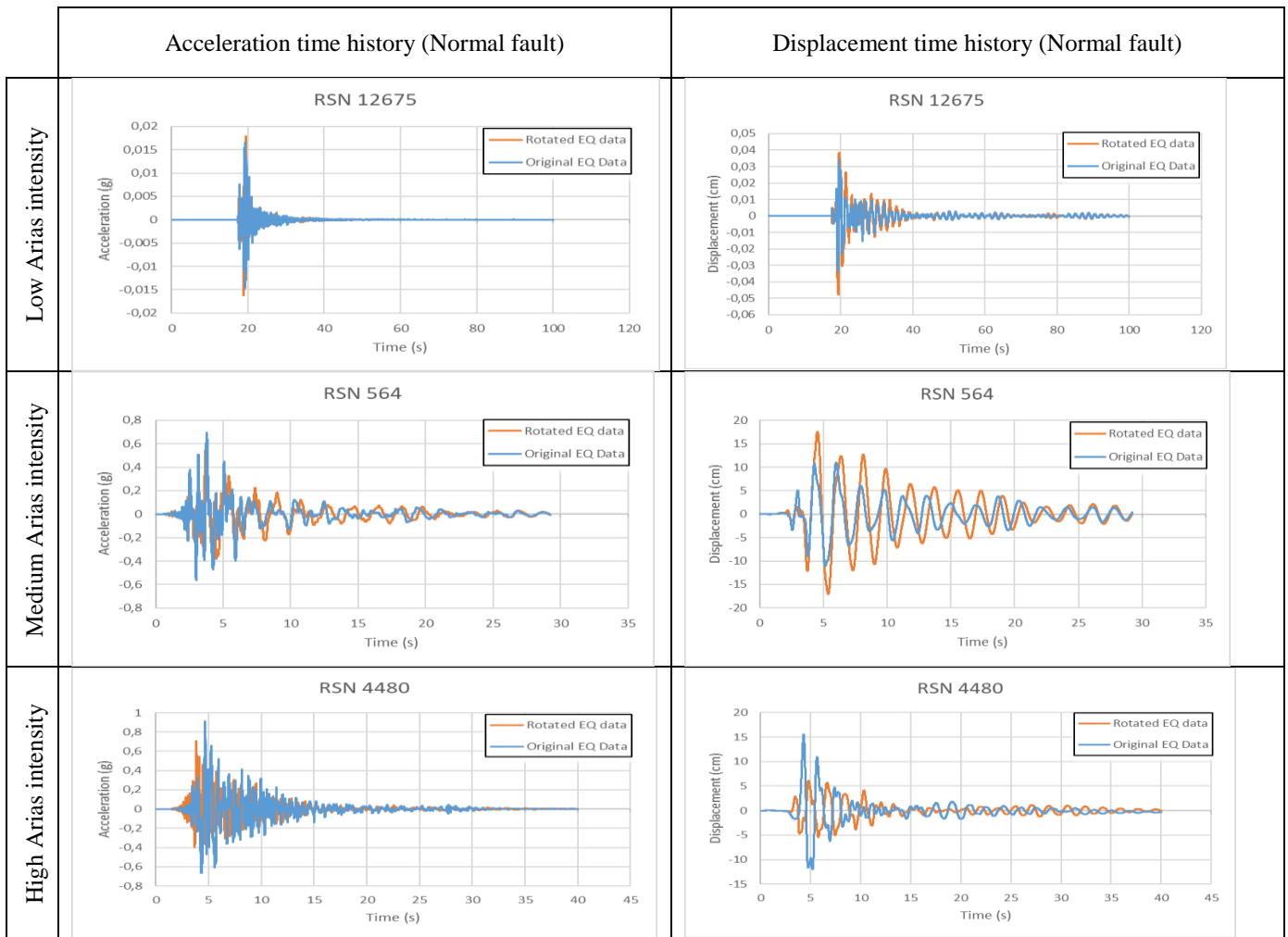


Figure 6. Comparison of Acceleration and Displacement Time Histories based on Original and Rotated Data Considering Low, Medium, and High Arias Intensity Values

In Figure 7, the acceleration and displacement time histories are represented concerning fault types. The rotated earthquake data tends to produce higher acceleration and displacement values compared to the original data (e.g. RSN113). The result in displacement from the rotated data of RSN113 reaches the maximum displacement at 1.8s. This proposes that considering data orientation is essential for a more conservative design approach. Unlikely, the results from the original data of RSN 300 show higher acceleration and displacement than those of the rotated data. This highlights the potential for specific earthquakes and fault mechanisms to exhibit unique behaviour that doesn't follow the general trend. This emphasises the importance of analysing both original and rotated data to avoid underestimating potential structural responses.

The rotated data of the record RSN828 reigns supreme in terms of acceleration. This means that analysing the earthquake with its direction shifted reveals the highest peak shaking compared to the original data. This observation underscores the potential for data orientation to sometimes amplify structural response in reverse fault scenarios. But it doesn't end there cause RSN765 flips the script, with the original data boasting a significantly higher acceleration than the rotated data. Despite this difference, both earthquakes share a remarkably similar path and shape in their acceleration time histories. This hints at a shared underlying characteristic, despite the varying peak values. Interestingly, both RSN828 and RSN765 reach their maximum displacement for the rotated data at almost the same time (3.5s). This synchronicity in peak displacement, despite differences in peak acceleration, adds another layer to understanding how reverse faults behave.

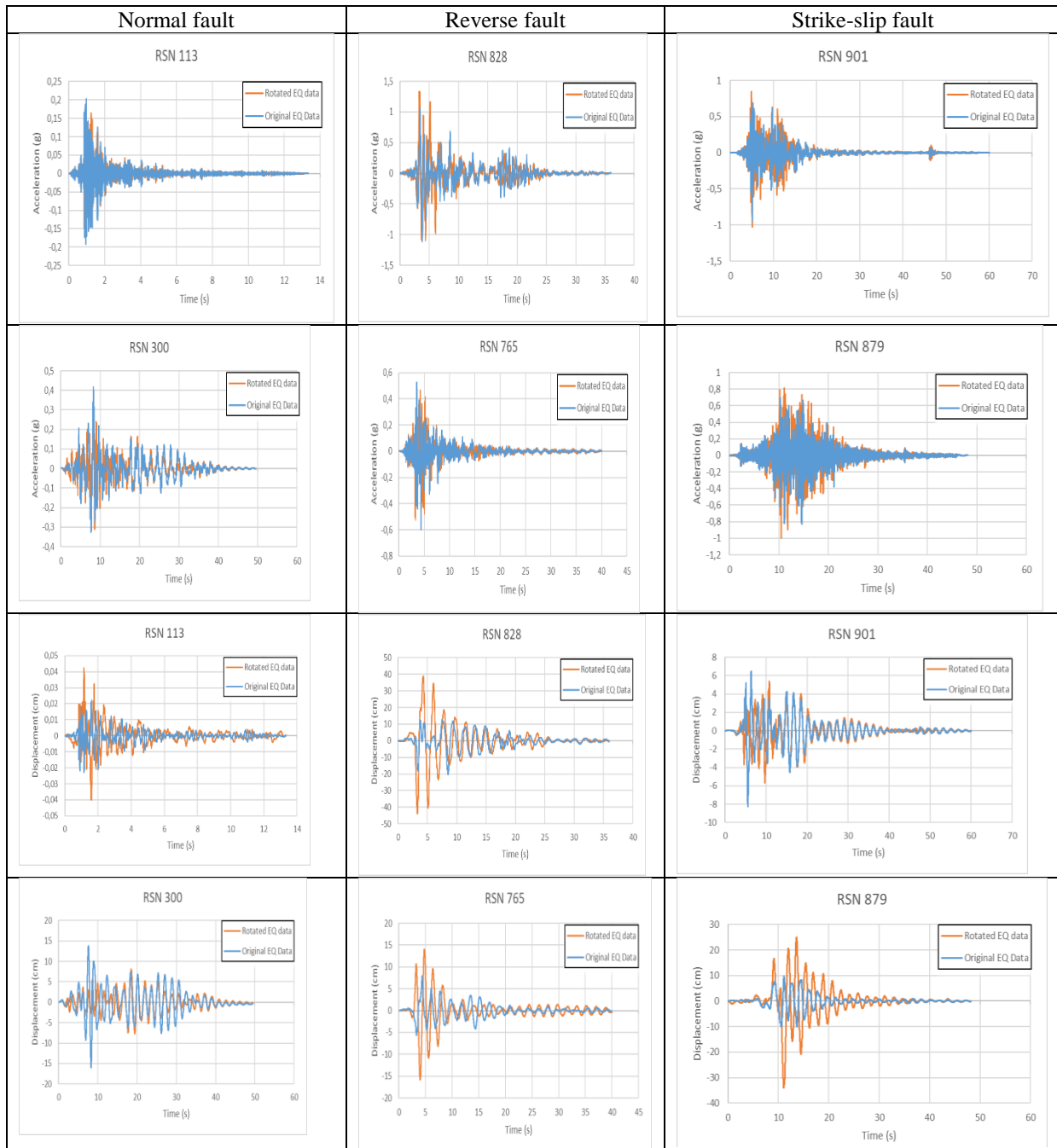


Figure 7. Comparison of Acceleration and Displacement Time Histories based on Original and Rotated Data Considering Normal, Reverse, and Strike-slip Faults

RSN879 brings us back to the familiar theme. Just like many other examples, the rotated data reigns supreme in terms of acceleration and displacement, surpassing the original version in the diagram. This reinforces the general trend that for strike-slip faults, considering data orientation might be crucial for a conservative design approach that

anticipates stronger shaking possibilities. On the other hand, RSN879, which captured the acceleration, revealed that the rotated earthquake data consistently surpassed the original data across the diagram but when we look at displacement RSN901, the original data prevails over the rotated.

Overall, for normal, reverse, and strike-slip faults, analysing rotated earthquake data generally leads to higher values compared to the original data.

The analysis compares the response of structures to near-field and far-field earthquakes by looking at their acceleration and displacement spectra in Figure 8. Notably, it highlights the contrasting behaviour between original and rotated earthquake data, particularly in the displacement spectra, where discrepancies tend to be more pronounced.

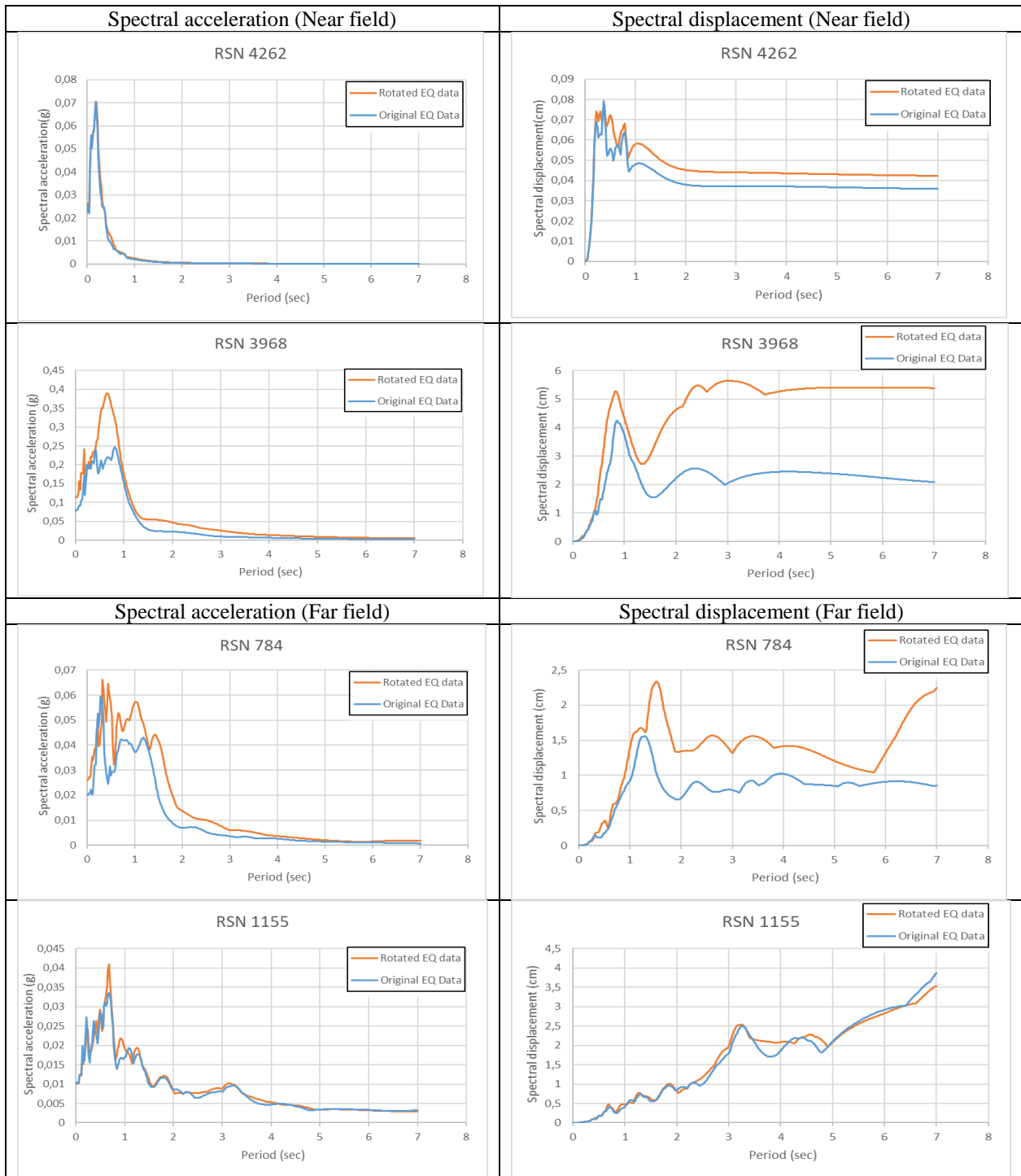


Figure 8. Comparison of Acceleration and Displacement Response Spectra based on Original and Rotated Data considering Near and Far field Effect

Figure 9 represents the comparison of acceleration and displacement response spectra based on original and rotated data. These spectra were generated for low, medium, and high Arias Intensity values ranging from 0 to 7 seconds. The rotated data generally covers the original data across all intensity levels, except for RSN484. This means that considering data orientation often leads to higher predicted values for both acceleration and displacement, suggesting a more conservative design approach might be necessary.

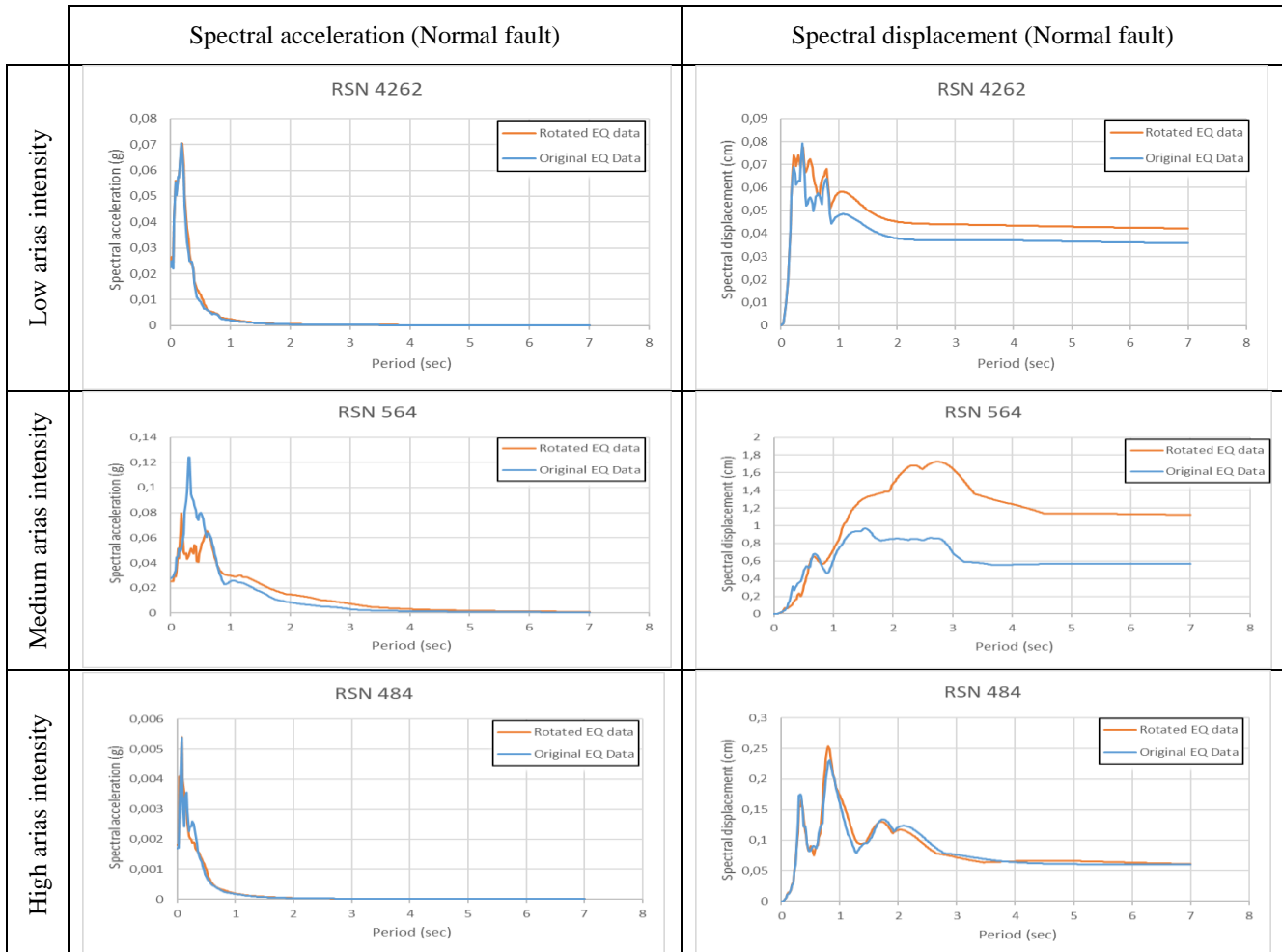


Figure 9. Comparison of Acceleration and Displacement Response Spectra based on Original and Rotated Data considering Low, Medium, and High Arias Intensity Values

The results based on the normal faults paint a similar picture in the response spectra for both the original and rotated data. Acceleration and displacement values largely agree, suggesting a good level of correspondence between how a building might react when the earthquake comes head-on or from a slightly different angle. This "harmony" can potentially simplify design considerations for structures facing normal fault mechanisms. The scene shifts with reverse faults because here, the original data often takes the reins in terms of acceleration and displacement response. Analysing the raw, unadjusted data seems to reveal the strongest potential shaking for these earthquakes. This finding highlights the importance of not solely relying on rotated data for reverse fault scenarios, as it might underestimate the structural response, but when it comes to strike-slip faults, the plot thickens. Here, a stark difference emerges between the original and rotated data. The gap between the curves widens considerably, especially for displacement. This divergence underlines the significant impact of data orientation on how structures might experience shaking from these side-sliding earthquakes. Simply analysing the original data could potentially miss the full picture of potential building movements.

Figure 10 depicts the comparison of acceleration and displacement time histories based on original and rotated data considering normal, reverse, and strike-slip faults. This analysis delves into the earthquake directionality, exploring how it influences the movement of structures through acceleration and displacement time histories, as well as response spectra (0-7 seconds). For normal faults, the original and rotated data often overlap closely, suggesting that the direction of the earthquake doesn't significantly alter the building's response. However, RSN300 stands out: a

huge difference emerges between the two datasets in both acceleration and displacement, highlighting the potential for individual earthquakes to deviate from the general trend. In reverse faults, here, the rotated data generally reigns supreme, surpassing the original in both acceleration and displacement, as exemplified by RSN1737 and RSN14. This suggests that considering data orientation is crucial for these faults, as it can reveal potentially stronger shaking scenarios. For strike-slip faults present a captivating contrast, in the displacement response spectra, RSN557 shows the rotated data soaring above the original with a substantial gap. This reinforces the importance of data orientation for strike-slip faults, as ignoring rotated data might underestimate potential building displacements. However, in RSN1627, the original data outperforms the rotated, reminding us that individual earthquakes can defy even the most established trends.

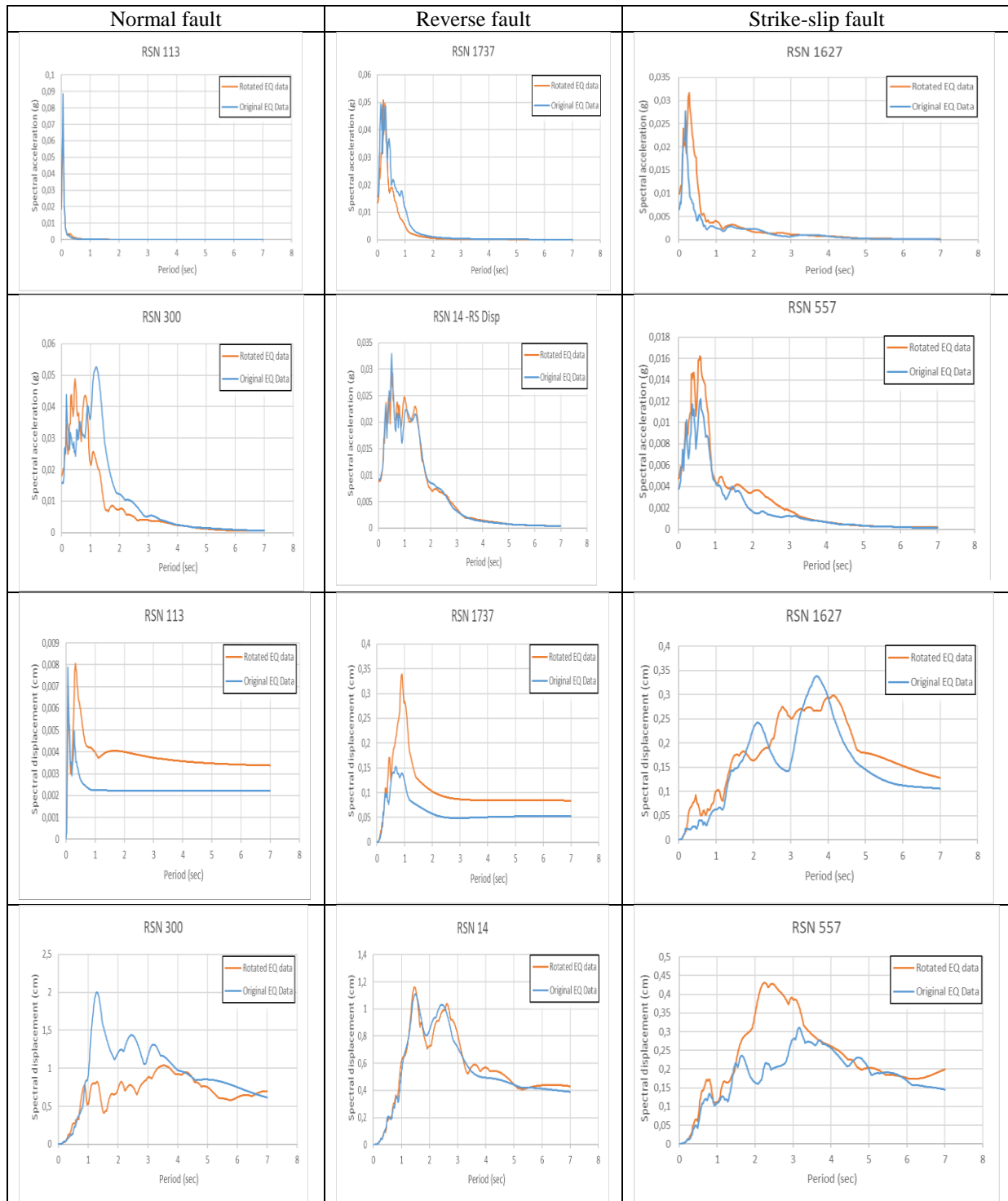


Figure 10. Comparison of Acceleration and Displacement Response Spectra based on Original and Rotated Data considering Normal, Reverse, and Strike-slip Faults

In this study, the impact of the soil type was also examined, yet no significant difference was detected.

CONCLUSION

Identifying the critical earthquake data that poses the greatest threat to a structure can be a complex puzzle. Past research has highlighted the variability of earthquake effects based on their direction, measured by the incident angle. Recognizing this, researchers have developed the concept of earthquake ground motion critical angles, which identify the angle that produces the maximum response in a structure.

This study delves deeper into this area by examining the specific impact of incident angle on a 10-story reinforced concrete (RC) building. The earthquake data is rotated around the building, simulating different shaking directions, and analyse the resulting changes in response, particularly focusing on the maximum acceleration experienced by the structure.

The foremost critical discoveries of this work can be summarized as

Analysing acceleration and displacement time histories across diverse fault types (strike-slip, normal, and reverse) revealed a consistent trend: rotated earthquake data generally yielded higher peak values than the original data. This suggests that both fault type and individual fault characteristics significantly influence structural response, highlighting the importance of considering data orientation in earthquake engineering.

Across all fault types (normal, reverse, and strike-slip), the base shear and roof displacement results consistently show that rotated earthquake data overestimates the values obtained from the original data. This trend is readily apparent in visualized time histories or overlay plots of these responses, where the rotated curves consistently lie above the original curves. The distance (near-/and far-field) of the earthquakes affects the results of acceleration and displacement time histories. As expected, the results from near-field data outweigh the results from far-field data.

The acceleration and displacement response spectra are studied for near and far-field scenarios, comparing original and rotated data. Notably, rotation amplified the long-period components, meaning both acceleration and displacement values in this range were noticeably higher compared to the original data. This suggests data orientation plays a critical role in understanding how structures might respond to long-period earthquake motions.

The examination of normal, reverse, strike-slip faults and arias intensity for acceleration and displacement response spectra exposes that some of the results of the rotated earthquake data exceed the results of the original data to hold out the maximum value. However, generally, there is no difference in terms of Arias intensity.

At the end of the study, it is concluded that a detailed examination of the direction of earthquake records leads to a proper situation for sensitive structures because finding the exact maximum point after calculation of different incident angles of θ will help the studies on the earthquake and civil engineering to ensure that structures can safely withstand against earthquakes.

REFERENCES

- Altunışık, A.C., & Kalkan, E. (2017). Earthquake incidence angle influence on seismic performance of reinforced concrete buildings. *Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences*, 35, 609-631.
- Athanatopoulou, A.M. (2005). Critical orientation of three correlated seismic components. *Engineering Structures*, 27, 301-312. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2004.10.011>.
- Bugueño, I., Carvallo, J., & Vielma, J.C. (2021). Influence of Directionality on the Seismic Response of Typical RC Buildings. Academic Editor: Maria Favvata, 12, 1534. <https://doi.org/10.3390/app12031534>.
- Cantagallo, C., Terrenzi, M., Camata, G., & Spacone, E. (2024). Historical Evolution of the Impact of Seismic Incident Angles on the Safety Assessment of Various Building Construction Typologies. *Department of Engineering and Geology*, 14, 1490. <https://doi.org/10.3390/buildings14061490>.

- Ghazizadeh, S.A., Grant, D., & Rossetto, T. (2013). Orientation dependence of ground motion and structural response of reinforced concrete space frames, Vienna Congress on Recent Advances in Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vienna, 71, (pp. 28-30).
- Hong, H.P., Pozos-Estrada, A., & Gomez, R. (2009). Orientation effect on ground motion measurement for Mexican subduction earthquakes. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 8, 1-16. <https://doi.org/10.1007/s11803-009-8155-z>.
- Huang, Y.N., Whittaker, A.S., & Luco, N. (2009). Orientation of maximum spectral demand in the near-fault region. *Earthquake Spectra*, 25, 707-717. <https://doi.org/10.1193/1.3158997>.
- Kostinakis, K. G., Manoukas, G. E., & Athanatopoulou, A. M. (2018). Influence of seismic incident angle on response of symmetric in plan buildings. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 22, 725-735. <https://doi.org/10.1007/s12205-017-1279-1>
- Kostinakis, K.G., Athanatopoulou, A.M., & Avramidis, I.E. (2012). Orientation effects of horizontal seismic components on longitudinal reinforcement in R/C frame elements. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 12, 1-10. <https://doi.org/10.5194/nhess-12-1-2012>, 2012.
- Lee, J. (2014). Directionality of strong ground motion durations, In Tenth US National Conference on Earthquake Engineering, Anchorage, (pp. 21-25).
- Pinzon, L.A., Diaz, S.A., Pujades, L.G., & Vargas, Y.F. (2021). An efficient method for considering the directionality effect of earthquakes on structures, *Journal of Earthquake Engineering*, 25, 1679-1708. <https://doi.org/10.1080/13632469.2019.1597783>.
- Ruiz-García, J., & Negrete-Manriquez, J.C. (2011). Evaluation of drift demands in existing steel frames under as-recorded far-field and near-fault mainshock–aftershock seismic sequences, *Engineering Structures*, 33, 621-634. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2010.11.021>.
- Sun, M., Fan, F., Sun, B., & Zhi, X. (2016). Study on the effect of ground motion direction on the response of engineering structure. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 15, 649-656. <https://doi.org/10.1007/s11803-016-0355-8>.
- TBEC. (2018). Turkish Building Earthquake Code. Disaster and Emergency Management Agency (AFAD).



Kahramanmaraş Sütçü İmam University

Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 26.03.2024
Kabul Tarihi : 05.09.2024

Received Date : 26.03.2024
Accepted Date : 05.09.2024

ISI VE SES YALITIMINDA İNOVATİF ÇÖZÜM OLARAK PERLİT: DERLEME VE İNCELEME

PERLITE AS AN INNOVATIVE SOLUTION IN HEAT AND SOUND INSULATION: A REVIEW AND ANALYSIS

Necim KAYA^{1*} (ORCID: 0000-0003-1478-761X)
Berfin RAMAZANOĞLU² (ORCID: 0000-0001-5263-1531)

¹ Batman Üniversitesi, İnşaat Bölümü, Batman, Türkiye
² Batman Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Batman, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Necim KAYA, necim.kaya@batman.edu.tr

ÖZET

Enerji, yaşam standartlarının yükseltilmesinde hayati bir rol oynamaktadır. Artan nüfusla birlikte enerji tüketimi de artmaktadır. İnşaat sektörü enerji tüketim performansı açısından oldukça önemli bir konumdadır. Bu durum inşaat sektöründe düşük enerjili binaların artmasına yönelik çalışmaları daha da önemli hale getirmektedir. Enerji israfının önlenmesi ve enerjinin etkin kullanılması için, yapılarda yalıtım önemli bir yere sahiptir. Ülkemiz, enerji ve yalıtım malzemeleri konusunda dışa bağımlıdır. Bu yüzden dışa bağımlılığı azaltacak, yerli malzemelerden üretilen rekabet gücü yüksek yalıtım malzemelerinin ve yeni teknolojilerin geliştirilmesi önem arz etmektedir. Bu bağlamda zengin ve kaliteli yataklara sahip olduğumuz perlit malzemesi sektör için oldukça önemli bir malzeme konumundadır. Bu çalışma, perlit malzemesinin yalıtım alanında kapsamlı bir şekilde değerlendirilmesini amaçlamaktadır. Yapılan kapsamlı literatür taraması, uygun malzemeler ve bağlayıcılar kullanılarak yapılan işlemlerin, yeni nesil perlit esaslı yalıtım malzemelerinin istenen yalıtım performansını karşılayabileceğini ortaya koymaktadır.

Anahtar Kelimeler: Enerji, ısı yalıtımı, perlit, ses yalıtımı, sürdürülebilirlik

ABSTRACT

Energy plays a vital role in raising living standards. Energy consumption increases with the growing population. The construction sector is in a very important position in terms of energy consumption performance. This makes it even more important to increase the number of low-energy buildings in the construction sector. Insulation in buildings has an important place in preventing energy waste and using energy efficiently. Our country is dependent on foreign energy and insulation materials. Therefore, it is important to develop highly competitive insulation materials produced from domestic materials and new technologies that will reduce foreign dependency. In this context, perlite material, which we have rich and high-quality deposits, is a very important material for the sector. This study aims to evaluate perlite material comprehensively in the field of insulation. The extensive literature review reveals that the new generation of perlite-based insulation materials can meet the desired insulation performance by using appropriate materials and binders.

Keywords: Energy, thermal insulation, perlite, sound insulation, sustainability

GİRİŞ

Enerji, ekonomik büyüme, gelişme ve toplumsal ilerleme bağlamında son derece kritik bir unsurdur; ülkelerin uluslararası politikalarının yönetiminde etkili bir rol oynar ve yaşam standartlarının geliştirilmesinde önemli bir faktördür. Daha fazla ürün ve hizmet üretilmesinin yanı sıra toplumun yaşam standartlarının yükseltilmesinin, enerji kullanım oranı ile doğrudan ilişkisi bulunmaktadır (Sagbaş ve Başbuğ, 2018). Dolayısıyla, gündün güne artan nüfus miktarıyla kentleşme sorunu artmakta, buna bağlı olarak enerji kullanım oranı ve çevresel sorunlar da artmaktadır (Karademir ve Dağ, 2021; Sagbaş ve Başbuğ, 2018). Artan çevresel kirlilik, doğal kaynakların hızla tükenmesi ve artan enerji maliyetleri gibi zorluklar göz önünde bulundurulduğunda; enerjinin endüstriyel, yapısal, hizmet sektörleri ve ulaşım gibi alanlarda daha etkin ve verimli bir şekilde kullanılmasını kaçınılmaz hale getirmiştir (Sagbaş ve Başbuğ, 2018).

Dünya genelinde enerji tüketiminde inşaat sektörünün oldukça önemli bir etkisi bulunmaktadır. Türkiye'nin sektörler itibarıyla enerji tüketim yoğunluğuna bakıldığında; %40'ı sanayi, %31'i konutlar, %19'u ulaşım, %5'i tarım ve %5'i diğer ihtiyaçlar şeklinde dağılmaktadır. İnşaat sektöründe konut tipi binalar büyük derecede enerji israfına yol açmaktadır. (Karademir ve Dağ, 2021). Binalardaki enerji kullanımının ise % 85'inin ısıtma için harcandığı ortaya çıkmıştır. Bu durum, enerji tasarrufu potansiyelinin büyük kısmının binalarda olduğunu açıkça göstermektedir (Arslan ve Aktaş, 2018). Ülkedeki binaların verimli tüketim tercihleri yapmaması ve teknolojiyi takip etmemesi, geleneksel yöntemlerle yapılan inşaatlar, önemli ölçüde enerji israfına yol açmaktadır (Karademir ve Dağ, 2021; Sagbaş ve Başbuğ, 2018). Örneğin, Türkiye'deki binalarda birim alanı ısıtmak için kullanılan enerji miktarı, Avrupa Birliği ülkelerine kıyasla 2-3 kat daha yüksektir. Bu veriler, binaların hem enerji tüketimi hem de sera gazı salınımı açısından küresel anlamda büyük bir öneme sahip olduğunu göstermektedir. Dolayısıyla, yaşamın ve kaynakların sürdürülebilirliğini sağlamak için gerekli önlemlerin alınması artık daha da kritik hale gelmektedir (Sagbaş ve Başbuğ, 2018). Bu hedeflere ulaşmak için, öncelikle sürdürülebilir enerji kaynaklarının kullanımı teşvik edilmeli, enerji ihtiyacı azaltılmalı ve mevcut enerji kullanımında verimliliği artırmak için çaba harcanmalıdır. Ayrıca, sürdürülebilir bina standartlarına uygun yapılar inşa edilerek, sürdürülebilir bir yaşam tarzı teşvik edilmelidir (Karademir ve Dağ, 2021; Sagbaş ve Başbuğ, 2018).

Yapı endüstrisindeki enerji tüketimi, dünya genelindeki küresel enerji tüketiminin ve CO₂ salınımının önemli bir bölümünü oluşturduğundan, binaların enerji verimliliğini artırmanın önemi giderek daha önemli hale gelmektedir. Bu bağlamda enerji tasarrufunun sağlanması için yapılarda ısı yalıtımı oldukça önemli bir faktördür (Arslan ve Aktaş, 2018; Uluer vd., 2018). Isı yalıtım uygulamalarında, düşük ısı iletim katsayısına, yanmazlık özelliğine, kolay uygulanabilirliğe ve ekonomik maliyetlere sahip olan malzemelere olan talep artmaktadır. Son zamanlarda, inşaat sektöründe araştırılan ve benimsenen önemli konulardan biri sürdürülebilirlik ve ekolojik tasarımdır. Sürdürülebilir ve sağlıklı yaşam alanlarının tasarımında dikkate alınması gereken faktörlerden biri de akustik konforudur (Arslan ve Aktaş, 2018). İnşaat sektöründeki gelişmeler nedeniyle yapıların akustik performansı ve ses yalıtımı giderek daha fazla önem kazanmıştır. Ortam gürültüsünü azaltmak, kaliteli bir yaşam seviyesi nedeniyle modern toplumlarda oldukça önemli bir konudur. Yapıların akustik özellikleri, ses iletimini azaltma yeteneğine sahip olmasıyla karakterize edilmektedir. Betonun akustik özellikleri genellikle yoğunluklarına bağlıdır ve daha hafif olan betonların ses emme kapasitesi daha yüksek yoğunluklu betonlara kıyasla daha yüksek olmaktadır. Sürdürülebilir bir yaşam için doğal malzemelerden üretilen, daha çevreci yeni nesil malzemeler araştırmacıların ilgi odağı haline gelmiştir (Amran vd. 2021). Yalıtım teknolojileri, enerji kaybını minimize etmede önemli bir rol oynamaktadır. Doğru yöntemlerle üretilen yalıtım malzemeleri, uzun ömürlü, ekonomik, çevre dostu ve sağlıklı olmanın yanı sıra yerel ve sürdürülebilir özelliklere sahiptir. Bu nedenle, konutlarda ısı ve ses yalıtımı, makul enerji tüketimi, yeterli konfor ve sağlık koşullarını sağlamak için giderek daha fazla önem kazanmaktadır ve bu tür yalıtım ürünlerine olan talep de artmaktadır (Arslan ve Aktaş, 2018). Yerli kaynaklar ve teknoloji kullanılarak geliştirilecek yeni nesil yalıtım malzemeleri, bu bağlamda büyük bir öneme sahiptir. Bu malzemeler, yerli üretim ve teknolojiyle üretilerek sürdürülebilirlik ve ekonomik açıdan önemli avantajlar sunacaklardır (Uluer vd., 2018).

İnşaat sektöründe organik ve inorganik birçok malzeme yalıtım malzemesi olarak kullanılmaktadır. Tablo 1'de hammadde kökenlerine göre sınıflandırılan ve ısı yalıtımında yaygın kullanılan bazı malzemeler belirtilmiştir. Isı yalıtımında kullanılan malzemelerin avantajlarının yanı sıra sahip oldukları bazı dezavantajlar da olabilmektedir. Stiren, polistiren, ekstrüde polistiren ve benzeri organik ısı yalıtım malzemeleri, düşük ısı iletkenlikleri ve yoğunlukları nedeniyle ısı yalıtım levhaları olarak yaygın şekilde kullanılmaktadır. Ancak, yanmaları kolaydır ve büyük miktarda zehirli gaz açığa çıkarmaktadırlar, bu da yangın kazalarına neden olmaktadır (Gao vd., 2019; Argunhan vd., 2016). Son dönemde ülkemizde birçok kamu kurumu; özellikle yurtlar, hastaneler, okullar gibi

kurumlar yangınlar nedeniyle zarar görmüştür. Bu yangınların nedenleri arasında, ısı yalıtım malzemelerinin yüksek sıcaklıklara maruz kalarak yanması ve yangının yayılmasını hızlandırması önemli bir faktördür. Mevcut ısı yalıtım malzemelerinin olumsuz bir özelliği ise zamanla ısı iletiminin artmasıdır; geliştirilmiş polistren köpük levha, ekstrüde polistren köpük levha ve poliüretan köpükler gibi malzemelerde zamanla gazların yer değiştirmesi sonucunda ısı iletim katsayısının arttığı bilinmektedir. Oysa yalıtım malzemelerinde aranan en önemli özelliklerden biri zamanla ısıl özelliklerini korumasıdır (Uluer vd., 2018). Isı yalıtım malzemelerinin sahip olması gereken birçok özellik daha vardır ve bu beklentiler malzemenin kullanılacağı yere ve amaca göre değişiklik göstermektedir.

Tablo 1. Isı Yalıtım Malzemeleri (Özer ve Özgünler, 2019)

İnorganik Kökenli Isı Yalıtım Malzemeleri	Organik Kökenli Isı Yalıtım Malzemeleri	İleri Teknoloji Ürünler
Genleştirilmiş Perlit	Ahşap yünü levhalar	Aerojel
Genleştirilmiş Perlit Levhası	Ahşap lifli levha	Vakum yalıtım paneli vs.
Genleştirilmiş Vermikülüt	Genleştirilmiş mantar levha	
Mineral Yün	Gevşek dolgu selüloz yalıtım	
Cam Köpüğü	Kenevir	
	Ekstrüde Polistren	
	Genleştirilmiş Polistren	
	Fenolik Köpük Levha	

Her anlamda mükemmel özelliğe sahip olamayan ısı yalıtım malzemelerinin sahip olduğu bazı dezavantajlar, inşaat sektöründe geniş kullanım alanını büyük ölçüde sınırlamaktadır. Bu nedenle inorganik malzemeler, yangına dayanıklılık özellikleri ve kullanımda dayanıklılıkları nedeniyle giderek daha fazla ilgi görmektedir. Bu bağlamda günümüzde yaygın kullanılan yapı yalıtım malzemesi olan perlit, inşaat endüstrisinde ısı ve ses izolasyon malzemelerinin kullanımıyla yalıtım değeri yüksek ve çevre dostu bir çözüm sunmaktadır (Gao vd. 2019). Perlit malzemesi sahip olduğu bir çok üstün özelliğinden dolayı araştırmacıların da ilgi odağında olmuş ve ısı ve ses yalıtım malzemelerinde perlit malzemesinin kullanılmasıyla ilgili birçok çalışma yapılmıştır.

Topçu ve Işıkdag (2007), farklı kil içeriklerine sahip tuğlalarda %0 ila %50 arasında perlit ilavesi yaparak mekanik ve termal özellikleri incelemiştir. Farklı oranlarda perlit içeren tuğlaların deney sonuçlarına göre, perlit içermeyen tuğlanın basınç dayanımı 5.8 MPa iken, içeriğindeki perlit miktarının artmasıyla basınç dayanımı 2.0 MPa'ya düşmüştür. Isıl iletim katsayısı sonuçlarına bakıldığında ise perlit ilavesinin olumlu katkısı görülmüş; %30 perlit içeren tuğlanın ısı iletim katsayısı 0.465 W/m.K olan normal tuğlanın ısı iletim katsayısından daha düşük, yani 0.215 W/m.K değerine düşmüştür. Bu sonuçlar doğrultusunda, ısı iletimi ve mekanik özellikler açısından optimum perlit miktarının %30 olduğu belirtilmiştir.

Topçu ve Işıkdag (2008), çeşitli çimento tiplerinin kullanım oranlarına bağlı olarak geliştirilmiş perlit ilaveli betonun özelliklerini incelemiştir. Yapılan testlerde, geliştirilmiş perlit agrega oranının artmasıyla betonların basınç ve çekme dayanımının azaldığı ancak daha hafif bir malzeme olarak kullanılabilir düzeyde olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca, çalışmada geliştirilmiş perlit agregası içeren betonların ses ve ısı yalıtımında avantajlı özelliklere sahip olduğu ve inşaat sektöründe ekonomik fayda sağlayabilecek hafif bir malzeme olarak kullanılabilirliği belirtilmiştir.

Vaou ve Pnias (2010), geopolimerizasyon teknolojisi kullanarak, perlit ham maddesiyle ısı yalıtım malzemesi üretmiştir. Hidrojen peroksit, malzemenin köpürtülmesi ve gözeneklerin oluşması için kullanılmış ve eklenen hidrojen peroksitin, üretilen ısı yalıtım malzemesinin ısıl özellikleri üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Deney sonuçları, geliştirilmemiş perlit kullanılarak üretilen geopolimer köpüklerin yalıtım malzemesi için uygun olduğunu göstermiştir. Elde edilen ısı yalıtım malzemenin ısı iletim katsayısı 0,03 W/m.K olarak ölçülürken, basınç dayanımı, 780 kPa'da %2 deformasyon göstermiştir. Malzeme, DIN4102 standardına göre A1 sınıfı yanmaz bir malzeme olarak sınıflandırılmıştır. Maksimum uygulanma sıcaklığı, 700 °C olarak belirlenmiştir.

Zukowski ve Haese (2010) tarafından yürütülen çalışmada, perlit dolgulu modern dikey delikli duvar ünitelerinin ısıl özellikleri incelenmiştir. Yapılan sayısal hesaplamalar ve ölçümlerle yeni içi boş tuğlaların ısıl özellikleri belirlenmiştir. Elde edilen verilerden perlit ile doldurulmuş tuğlaların, yüksek ısıl dayanım sağladığı ve ek bir yalıtım katmanı gerektirmeden kullanılabilirliği belirtilmiştir.

Yapıcı vd. (2011), MDF panellerin yüzeylerini farklı oranlarda perlit malzemesi ile kaplayarak bu yeni ürünün ısı iletim katsayısını incelemişlerdir. Genleştirilmiş perlit içermeyen MDF panellerin ısı iletim katsayısının 0.222 W/m.K olduğu belirlenmiştir. Yapılan çalışmada, genleştirilmiş perlit ilavesinin ürünün ısı iletim katsayısında önemli değişikliklere neden olduğu, genleştirilmiş perlit ilaveli numunelerin ısı iletim katsayılarının 0.197 ile 0.222 W/m.K aralığında değiştiği gözlemlenmiştir. %1 genleştirilmiş perlit ile kaplanan panel, en düşük ısı iletim katsayısına sahip numune olmuştur.

Şengül vd. (2011), genleştirilmiş perlit içeren hafif betonun ısı iletkenlik değerlerinin ve mekanik özelliklerinin değişimini araştırmışlardır. Yoğunluğu 700 ile 2000 kg/m³ arasında değişen genleştirilmiş perlit agregası doğal agregaya yerine kullanılmıştır. Genleştirilmiş perlit agregası oranının artmasıyla basınç dayanımı ve elastisite modülünün arttığı, doğal agregaya yerine %80 oranında genleştirilmiş perlit agregasının kullanılmasıyla ısı iletkenlik katsayısının 0.6 W/m.K değerinden 0.13 W/m.K değerine düştüğü gözlemlenmiştir.

Gandage vd. (2013), genleştirilmiş perlitin kendiliğinden sıkışan betonun ısı özelliklerine etkisini incelemiştir. Çimento yerine uçucu kül, ince kum yerine genleştirilmiş perlit kullanılmıştır. Isı iletkenlik katsayısının ölçüldüğü çalışmada uçucu kül ve perlit kullanımının malzemenin yoğunluğunu azalttığı, tüm sıcaklık aralıklarında ısı iletkenlik katsayılarını azalttığı gözlemlenmiştir. Yüksek sıcaklıklardaki ısı iletkenlik katsayısı, düşük sıcaklıklardaki ısı iletkenlik katsayısına göre daha düşük ölçülmüştür. Deneyler sonucunda en düşük ısı iletkenlik katsayısı %20 uçucu kül ve %10 perlit malzemesinin kullanıldığı karışımda 70-80°C arasında 0.715 W/m.K olarak ölçülürken aynı sıcaklık aralığında %100 çimentolu karışımlarda ısı iletkenlik katsayısı 1.14 W/m.K olarak ölçülmüştür.

Alam vd. (2014), tarafından yürütülen çalışmada, vakum yalıtım paneli dolgusu için dumanlanmış silikaya alternatif olarak daha ekonomik olan genleştirilmiş perlit kullanımının incelenmesi amaçlanmıştır. Genleştirilmiş perlitli kompozitin ısı ve fiziksel özellikleri, radyasyon iletimi, gaz iletkenliği ve ısı iletkenliği atmosferik basınçta ve 0,5 mbar basıncında incelenmiştir. VIP panel örneklerinin boyutları 100x100 mm olarak belirlenmiş ve içerdikleri farklı oranlarda genleştirilmiş perlit, silis dumanı, silikon karbür ve polyester elyaf gibi bileşenlerle kompozitler oluşturulmuştur. Panel dolgusunda %60 genleştirilmiş perlit içeriğiyle yapılan ölçümlerde, ısı iletim katsayısı atmosferik basınç altında 53 mW/m.K olarak belirlenmiştir. Genleştirilmiş perlit oranı %30'a düşürüldüğünde ise, ısı iletimi 28 mW/m.K olarak ölçülmüştür. Araştırma sonuçları, vakum yalıtım panellerinin maliyetlerinde %20'ye varan bir azalma sağlanabileceğini göstermiştir.

Lu vd. (2014), genleştirilmiş perlitin gözenekli yapısına parafinin emdirilmesiyle; iyi bir ısı enerji depolama kapasitesine, ısı kararlılığı ve güvenilirliğe sahip kararlı bir malzeme üretmişlerdir. Araştırma sonuçları, genleştirilmiş perlit ve parafin arasında kimyasal etkileşim olmadığını göstermiştir. Ayrıca, direkt emdirme yöntemi kullanılarak, kompozit içinde parafinin homojen bir şekilde dağıldığı ve sıvı sızıntısının olmadığı belirlenmiştir. Bu kompozit yapının, binalarda ısı enerjisinin depolanması için büyük bir potansiyele sahip olduğu ortaya konmuştur.

Tsaousi vd. (2015), perlit atıkların hammadde olarak kullanıldığı köpüklü jeopolimerik levhalar geliştirmişlerdir. Bu yeni hafif malzeme türü, jeopolimerizasyon teknolojisi ile köpüklendirme işleminin birleşimine dayanmaktadır. Bu çalışmada biri inorganik, diğeri organik olmak üzere iki köpürtücü maddenin ilavesi araştırılmıştır. İlk durumda köpürtücü ajan, matris farklı içeriklerde eklenen hidrojen peroksit olmuştur (H₂O₂). Ayrıca organik bir yüzey aktif madde de şişirme ajanı olarak çalışılmıştır. Üretilen gözenekli malzemeler, seçilen köpürtücü maddeye ve köpürtücü maddenin içeriğine bağlı olarak 450–1.050kg/m³ arasında etkili yoğunluklara ve 0,085–0,15W/m.K ısı iletkenliğine sahiptir. Diğer hafif köpüklü malzemelerle karşılaştırıldığında perlitten elde edilen optimum köpük levhaların, mevcut gözenekli beton bloklarla benzer görünür yoğunluğa ve daha iyi termal iletkenlik değerlerine sahip olduğu görülmüş ve bu da malzemeyi hafif inşaat malzemeleri için uygun kılmıştır.

Oktay vd. (2015), yüksek dayanımlı, hafif ve iyi ısı özelliklere sahip yeni çimento esaslı malzeme üretimine yönelik deneysel inceleme yapmıştır. Betonda doğal kum yerine kısmi olarak perlit kullanımının ısı iletkenliği azalttığını bildirmişlerdir. Hacimce %10, %20, %30, %40 ve %50 oranında perlit parçacıkları içeren betonların 28 günlük ısı iletkenliğinde %22,96, %38,01, %64,23, %74,36 ve %81,48 azalma meydana geldiği bildirilmiştir.

Binici ve Kalaycı (2015), yapmış oldukları çalışmada perlitli yalıtım malzemesi üretiminde kullanmışlardır. Kaplama dolgu malzemesi olarak kalsit yerine daha az ağırlıklı pomza, diyatomit ve vermikülit kullanılarak ısı

yalıtım katsayısı incelenmiştir. Boşluk oranını arttırmak için alüminyum, sodyum hidroklorür ve hava sürükleyici katkıların reaksiyonundan yararlanılmıştır. Çalışma sonucunda, perlit esaslı malzemenin ısı yalıtım katsayısı 0,189-0,0618 aralığında bulunmuştur. Genleştirilmiş perlit miktarı arttıkça özgül kütle yoğunluğu azalmış, betondaki hava miktarı artmış ve bunun sonucunda ısı iletim katsayısı düşmüştür. Dolgu kaplaması olarak kalsit yerine daha hafif pomza, diyatomit ve vermikülit kullanılması numunelerin ağırlıklarının azaltılmasına ve ısı iletiminin olumlu yönde sağlanmasına destek olmuştur. Kireç yerine şeker fabrikası atıklarının kullanıldığı numunelerde ısı iletim katsayısında azalmalar tespit edilmiştir. Sodyum hidroksit ve alüminyum tozu kullanılarak daha fazla porpus örneği elde edilmesi sağlanmıştır. Buna bağlı olarak yalıtım özellikleri daha iyi hale gelmiştir. Genel sonuca bakıldığında, sodyum hidroksit + alüminyum tozu ve hava sürükleyici karışım kullanılarak perlit esaslı ısı yalıtım malzemesi üretilebileceği görülmüştür.

Abidi vd. (2015), alçı kompozit malzemelerde perlit, vermikülit ve çimentonun ısıl mekanik davranışını ve yangından koruma özelliklerini deneysel ve sayısal yöntemlerle araştırmıştır. Vermikülit ilavesiyle birlikte ısı iletim katsayısı %5 ve %25 oranlarında sırasıyla 0,50 W/m.K'den 0,45 W/m.K'e ve 0,23 W/m.K'e düşerken, çimento ilavesiyle de ısı iletim katsayısının benzer şekilde azaldığı görülmüştür. Ancak, perlit ilavesiyle ısı iletim katsayısı daha belirgin şekilde düşmüştür. Perlit ilavesinin, vermikülit ve çimentoya kıyasla kompozitin ısıl yalıtım kalitesini daha fazla artırdığı görülmüştür. Ayrıca, perlit ilavesinin gözeneklilik oranını artırarak malzemenin yalıtım özelliklerini iyileştirdiği tespit edilmiştir. Perlit tabakaları arasında sıkışan suyun ise kompozitin ısı iletim katsayısını arttırdığı gözlemlenmiştir. Üç fazlı kompozit, yangına dayanıklılık testlerinde istenen sıcaklık değerlerinden önemli ölçüde daha düşük sıcaklık değerlerine ulaşarak etkili bir yalıtım malzemesi olduğunu kanıtlamıştır.

Maaloufa vd. (2016), genleştirilmiş perlit ilaveli tuğlaların ısıl özelliklerini kalsinasyon etkisi altında incelemişlerdir. Tuğlaların yoğunluğu genleştirilmiş perlit ilavesiyle 2029 kg/m³'ten 1450 kg/m³'e düşerken yoğunluktaki bu azalmadan dolayı ısı iletim katsayısı da 0.51 W/m.K'den 0.38 W/m.K'ye düşmüştür. Ardından, bu numunelere kalsinasyon işlemi uygulanmış ve yoğunluk değeri 1374 kg/m³'e, ısı iletim katsayısı değeri ise 0.258 W/m.K'ye düşmüştür. Böylece, mevcut tuğlalara genleştirilmiş perlit ilavesi yapılarak daha etkili bir ısı yalıtım malzemesi elde edilmiştir.

Argunhan ve Oktay (2016), s/ç oranı sabit 6 takım beton numuneleri hazırlamış olup normal agregaların yerine %10, %20, %30, %40, %50 ve %60 gibi farklı miktarlarda genleştirilmiş perlit agregaları koymuşlardır. Numunelerinin termal özellik değerlerini belirlemek için mekanik ve termal testlerin tümü yapılmış ve sıcak disk yöntemi kullanılmıştır. Deneysel çalışmaların sonuçları, perlit içeriğinin artmasıyla birlikte basınç dayanımının ve yoğunluğunun azaldığını, ısı ve ses yalıtım özelliklerinin ise oldukça arttığını göstermiştir. Deney sonuçlarına göre, perlit ilave edilmeden üretilen numunenin ısı iletim katsayısı 2,075 Wm⁻¹K⁻¹ iken, %60 oranında perlit agregası kullanılarak üretilen numunenin ise ısı iletim katsayısının 0,520 Wm⁻¹K⁻¹ olduğu belirlenmiştir. Perlit içermeyen beton numunesinde ultra ses geçiş hızının 4.673 km/s olduğu tespit edilirken, perlit ilave edilen betonun maksimum ultra ses geçiş hızının 3.067 km/s olduğu belirlenmiştir. Sonuçlar, üretilen numunelerin ısı iletiminde [Wm⁻¹K⁻¹] ve ultrasonik darbe hızında [km/s] %75 ve %35'e varan azalmaların olduğunu göstermiştir. Bu bağlamda, perlitin hafifliği ve yüksek ses yalıtımı özelliği dolayısıyla, yapıların iç kısımlarından dış çevreye ısı kaybının önemli ölçüde azalacağı, böylelikle enerji tasarrufu sağlanacağı ve enerjinin ithal edildiği ülkelerde daha verimli bir enerji kullanımının gerçekleştirileceği öngörülmüştür.

Kong vd. (2017), parafin ve perlit içeren yeni bir kompozit faz değişim malzemeli duvar paneli üretmiştir. Termal özellik, iç mikro yapı ve mekanik özellik dahil üzere özellikler, diferansiyel taramalı kalorimetre, taramalı elektron mikroskobu ve elektronik üniversal test makinesi ile karakterize edilmiştir. Üretilen yeni panelin kompakt ve sağlam bir mikro yapıya, iyi bir dayanıklılığa ve tokluğa sahip olduğu bulunmuştur. Elde edilen sonuçlardan üretilen duvar panelinin tatmin edici bir termal performans sergilediği görülmüştür.

Ahmadi vd. (2018), genleştirilmiş perlit, doğal zeolit, öğütülmüş granül yüksek fırın cürufu ve kilin farklı kombinasyonlarından yapılan kil tuğlaların özelliklerini araştırmıştır. Kilin %15 öğütülmüş granül yüksek fırın cürufu, %15 zeolit ve %50'ye varan miktarlarda genleştirilmiş perlit ile değiştirilmesinin tuğla özellikleri üzerindeki etkisinin araştırıldığı çalışmada, tuğlaların karışım oranı parametreleri Taguchi yöntemi kullanılarak analiz edilmiş, yoğunluk, ağırlık kaybı, büzülme, görünür gözeneklilik, su emme, donma ve çözölmeye karşı direnç, basınç dayanımı, ısıl iletkenlik ve pişmiş tuğlaların mikroyapısal analizi dahil üzere tuğlaların çeşitli özellikleri incelenmiş ve tuğlalar için standart gereklilikleriyle karşılaştırılmıştır. Genel olarak sonuçlar, yukarıda

belirtilen katkı maddelerini içeren tuğlaların standart gereksinimlerini karşılarken normal tuğlalara göre daha düşük ısı iletkenliğine sahip olduğunu ve bu nedenle ısı yalıtım malzemesi olarak kullanılabilirliğini göstermiştir.

Nechita ve Mita Ionescu (2018), geliştirilmiş perlit ve lignoselülozik kalıntıların inşaat sektöründe olası uygulamalarla kompozit malzeme olarak kullanılabilirliğini araştırmıştır. Kompozit malzeme numuneleri laboratuvarından alınmış ve yapı malzemelerinin ısı iletkenlik/direnç, su emme kapasitesi, görünür yoğunluk gibi temel spesifik özellikleri ve taramalı elektron mikroskopu ile görüntü analizleri açısından karakterize edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, kompozit numunelerin ısı iletkenlik değerlerinin, şu anda bina ısı yalıtımında kullanılan malzemelere benzer şekilde 0,05 ile 0,11 (W/mK) arasında olduğunu ortaya koymuştur.

Fenoglio vd. (2018), farklı oranlara perlit esaslı sıvaların hidrotermal performansını ve çevresel etkilerini araştırmıştır. Perlit içeriği ile termal özellikler arasındaki ilişkiyi belirlemek amacıyla, ısı akış ölçer cihazı yardımıyla malzeme ölçüğünde bir dizi analiz yapılmıştır. Dört sıva karışımının ısı iletkenlik değerleri 0,118 W/mK ile 0,059 W/mK arasında değişmekte olup, bu da perlit konsantrasyonunun ısı iletkenliğin azaltılmasında önemli bir etkiye sahip olduğunu göstermiştir. Perlit konsantrasyonunun artması ile ısı iletkenliği azalma göstermiştir.

Demir vd. (2018), geliştirilmiş perlitten yüksek ısı izolasyonlu yapı malzemeleri üretmeyi amaçlamışlardır. Ana hammadde olarak farklı tane boyutuna sahip geliştirilmiş perlit agregaları kullanılmıştır. Perlit, hafif ve gözenekli bir yapıya ve higroskopik özelliklere sahip olduğundan bu özelliklerin önlenmesi için hidrofobik polimer ve organik veya mineral asit katkı maddeleri kullanılarak püskürtme yöntemi ile yüzeyi kaplanmıştır. Çalışmanın ikinci kısmında ise perlit agregaları belirli miktarda sodyum silikat çözeltisi ile karıştırılarak kalıpta şekillendirilmiştir. Çalışmaya sonucunda kaplanmış geliştirilmiş perlit kullanılarak ısı iletkenlik sabiti 0,060 W/mK'den düşük yalıtım ürünleri üretimi başarıyla gerçekleştirilmiştir.

Alyousef vd. (2019), perlit agregası, doğal kum ve mermer atıklarından elde edilen kum esaslı yeni yalıtım hafif beton blok zeminin üretmek amacıyla çalışma gerçekleştirmiştir. Hazırlanan numunelerin, basınç dayanımı, ısı iletkenlik, özgül ısı kapasitesi, ses azaltımı gibi farklı özellikleri araştırılmıştır. Sonuçlar, mekanik özelliklerin ve ısı yalıtımının önemli ölçüde iyileştiğini, sonuçların umut verici olduğunu ve mevcut yalıtım bloğu zeminine kompozit döşemelerde kullanılma fırsatı vereceğini göstermiştir.

Raji vd. (2019), hafif kompozitlerde alternatif malzeme olarak perlit (ham ve geliştirilmiş) kullanılması ile ilgili çalışma yapıp, perlit yapısının (ham veya genişletilmiş) ve konsantrasyonunun (ağırlıkça %0-20) polipropilen bazlı kompozitlerin morfolojik, termal ve mekanik özellikleri üzerindeki etkisini incelemiştir. Kompozitler ekstrüzyon-basınçlı kalıplama yoluyla üretilmiş ve üretilen kompozitler standart yöntemler kullanılarak test edilmiştir. Takviye içeriğinin etkisi ve her bir parçacığın oranı, morfolojik (SEM), mekanik (gerilme), reolojik (kesme) ve termal (DSC) özellikler aracılığıyla incelenmiştir. Genel olarak kompozitin mekanik özelliklerinin ve termal stabilitesinin perlit malzemesinin ilavesiyle iyileştiği gözlemlenmiştir. Ham perlit takviyeli kompozitlerin Young modülü, katkısız kompozite kıyasla %41 artmıştır.

Gao vd. (2019), perlit artıkları kullanılarak enerji tasarrufu sağlayan ve çevre dostu bir yöntemle yeni bir tür hafif köpüklü ısı yalıtım malzemesi üretmişlerdir. Perlit/sodyum silikat, H₂O₂ ve setiltrimetilamonyum bromür dahil olmak üzere her bir ham maddenin etkisi ve taş yünü'nün fiziksel özellikleri (gözenek karakterleri, ısı iletkenlik ve mekanik dayanım gibi) detaylı olarak ele alınmıştır. Yapılan çalışma sonucunda optimize edilmiş köpüklü malzemeler, düşük yoğunluk (0,1–0,2 g cm⁻³) ve nispeten yüksek mekanik dayanım (0,09–0,6 MPa), düşük ısı iletkenlikleri (0,040–0,060 W/m.k) göstermiştir. Bildirilen diğer inorganik termallerle karşılaştırıldığında yalıtım malzemelerine göre bu yeni tip ısı yalıtım malzemesi çok hafif ve çok daha iyi ısı yalıtım performansı sergilemiştir. Bu nedenle, bu çalışma yalnızca umut verici yanıcı olmayan yalıtım malzemeleri elde etmek için yeni bir enerji tasarrufu yöntemi önermekle kalmayarak, aynı zamanda katı atık kullanımı sorununu da çözmüştür.

Kabay ve Kızılkant (2019), geliştirilmiş perlit kullanarak hafif ve yüksek ısı yalıtım özelliklerine sahip blokların üretimini hedeflemiştir. Bu amaçla, çimento ve uçucu kül gibi bağlayıcılar kullanılarak su/bağlayıcı oranı 0,40 olan plak elemanlar üretilmiş ve perlitin hacimce farklı oranlarda (%40, %50 ve %60) kullanıldığı bloklar elde edilmiştir. Fiziksel ve mekanik deneyler, perlit agregasının blok üretiminde etkili bir malzeme olduğunu göstermiş, aynı zamanda çimento yerine %50 oranında uçucu kül kullanımının bloğun performansını önemli ölçüde etkilemediğini ve daha az çimento kullanımıyla daha çevreci bir ürün elde edilebileceğini ortaya koymuştur. Bu

çalışma kapsamında üretilen geliştirilmiş perlit agregalı blokların fiziksel ve mekanik özellikleri incelendiğinde, gaz beton ile rekabet edebilecek nitelikte olduğu ve özellikle su emme ve ısı iletim katsayısı açısından daha üstün performans gösterdiği tespit edilmiştir.

Bozkurt ve Demirkale (2020), sıva tabakasında ses yutma katsayısının artırılmasını araştırmıştır. Bu kapsamda hafif agrega tipinin (perlit) ses yutma katsayısına etkisi, polipropilen lif katkısının, keten lifi katkısının ve kırıntı kauçuğu katkısının ses yutma katsayısına etkisi etkileri incelenmiştir. Hafif agrega tipi (perlit) kullanımının ses yutma katsayısını olumlu yönde etkilediği belirlenmiştir.

Davraz vd. (2020), ham perlitten hafif, yeterli basınç dayanımına sahip, ısı iletkenliği ve yanmazlık özelliği düşük monolitik ısı yalıtım malzemesi üretimini araştırmıştır. Bu çalışmada dolgu malzemesi olarak kaba ve ince ham perlit tozu, kimyasal katkı maddesi olarak ise sodyum hidroksit ve köpük oluşturuucu madde kullanılmıştır. Dolgu maddeleri ve kimyasal katkı maddeleri farklı oranlarda kullanılmıştır. Üretilen numunelerin basınç dayanımları ve ısı iletim katsayıları hesaplanmıştır. Yapılan çalışma sonucunda, monoper numunelerin görünür yoğunlukları ile ısı iletkenlik katsayıları arasındaki matematiksel ilişki ortaya konmuştur.

Akyüncü ve Şanlıtürk (2021), polimer kaplı ve kaplanmamış geliştirilmiş perlit agregasının, harcın fiziksel ve mekanik özelliklerine etkisini incelemişlerdir. Bu amaç doğrultusunda polimer kaplanmış ve polimer kaplanmamış geliştirilmiş perlitin sırasıyla %0, %20, %40, %60 ve %80 oranında referans kumu ile değiştirilmesiyle harç üretimi gerçekleştirilmiştir. Üretilen harç numunelerinin birim ağırlık, basınç dayanımı, eğilmede çekme dayanımı, su emme, ultrasonik darbe hızı (UPV) ve ısı iletkenlik katsayısı belirlenmiştir. Sonuçlar, harç numunelerinin birim ağırlığının geliştirilmiş perlit miktarı arttıkça azaldığını ancak fiziksel ve mekanik özelliklerinin de değiştiğini göstermiştir. Kaplamasız ve kaplamalı perlit katkılı harç numunelerinin birim ağırlığı azaldıkça basınç ve eğilme dayanımları da azalmıştır. UPV test sonuçlarına göre geliştirilmiş perlitin miktarı arttıkça ses iletimi azalmıştır. Kaplamalı perlit katkılı harç numuneleri kaplamasız harç numunelerine göre ses yalıtımı açısından daha avantajlı olduğu görülmüştür. ısı iletkenlik 0,91 ile 2,36 W/mK arasında değişiklik gösterirken, perlit oranı arttıkça ısı iletkenliği azalmıştır. Polimer kaplı seride birim ağırlık ile ısı iletkenlik arasında daha güçlü bir ilişki elde edilmiştir. Polimer kaplı geliştirilmiş perlitin kumla değiştirilmesi, harç numunelerinde daha düşük su emme, ses iletkenliği ve termal iletkenlik katsayılarıyla sonuçlanmıştır.

Altuncu vd. (2021), yüzey kaplama ve tesviye amacı ile kullanılan şap harcı üretiminde geliştirilmiş cam agregası ve geliştirilmiş perlit agregası kullanarak şap harçları üretmiş ve şap harcı malzemesinin birim hacim ağırlığının azaltılmasını, ısı ve ses izolasyon performanslarının artırılmasını hedeflemişlerdir. Bu amaçla inşaat sektöründe yaygın olarak kullanılan 4 tip çimento kullanılarak, geliştirilmiş cam agregası (0.25-0.5 mm) ve geliştirilmiş perlit agregası (0.25-0.5 mm), CEN standart kumu yerine %0, %15 ve %30 oranlarında ikame edilmiştir. Elde edilen ikameli şap numunelerinde yoğunluk, ısı ve ses izolasyon performans özellikleri deneyler ile belirlenmiştir. Yapılan deneyler sonucunda ikame oranı artışı ile örneklerin yoğunluklarının azalmasına bağlı olarak ses yutma kapasitelerinin arttığı ve ısı iletkenlik değerlerinin ise azaldığı gözlemlenmiştir. Ayrıca geliştirilmiş perlit agregalı şap harçlarının hem ses yutma kapasitelerinin hem de ısı iletkenlik performanslarının geliştirilmiş cam agregalı şap harçlarından az da olsa daha üstün olduğunu gözlemlemişlerdir.

Rashad vd. (2021), alkali ile aktive edilmiş cüruf harçlarına dayalı, herhangi bir köpürme/şişirme maddesi içermeyen, uygun basınç dayanımı ve düşük ısı iletkenliği arasında iyi bir denge sağlayan yalıtım malzemeleri üretmeye çalışmışlardır. Geliştirilmiş perlit hafif ince agrega olarak kullanılmıştır. Alkali ile aktive edilmiş cüruf hafif harçlar için hacimce 1/2, 1/4 ve 1/6 gibi farklı bağlayıcı/geliştirilmiş perlit oranları kullanılmıştır. Bağlayıcı/silisli kum oranı 1/2 olan geleneksel Portland çimentosu harcı ve bağlayıcı/silisli kum oranı hacimce 1/2 olan alkali ile aktive edilmiş cüruf harcı karşılaştırma amacıyla hazırlanmıştır. Daha yalıtkan malzemeler elde etmek için, 1/6 bağlayıcı/geliştirilmiş perlit oranı içeren karışımdaki cüruf kısmen %50 sadece metakaolin ve %50 sadece uçucu kül ile değiştirilmiştir. Tüm harç tipleri için yığın yoğunluğu, basınç dayanımı, toplam porozite, termal iletkenlik ve termal direnç ölçülmüştür. Numuneler taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile analiz edilmiştir. Sonuçlar, düşük ısı iletkenlikleri (0.995-0.158 W/mK), düşük yoğunlukları (2080-670 kg/m³), yüksek toplam gözeneklilikleri (%24.22-75.1) ve kabul edilebilir basınç dayanımları (21.6-5 MPa) olan iyi yalıtım malzemelerinin herhangi bir köpürtücü madde eklenmeden üretilebileceğini göstermiştir.

Lin vd. (2021), geliştirilmiş perlitin ahşap-magnezyum kompozitlerine doldurulmasıyla genişletilmiş perlit /ahşap-magnezyumdan oluşan yeni bir ısı yalıtım kompoziti hazırlanmışlardır. Bu kompozitlerin mekanik

özellikleri, donma direnci, ısı yalıtım performansı, alev geciktiriciliyi ve duman bastırma özellikleri taramalı elektron mikroskobu, X-ışını kırınım spektroskopisi ve koni kalorimetresi ile karakterize edilmiştir. Sonuçlar, 60-70 mesh genişletilmiş perlit ile doldurulmuş genişletilmiş perlit /ahşap-magnezyumdan oluşan kompozitler için kopma ve elastikiyet modülü ile yumuşama katsayısının belirgin bir şekilde arttığını ortaya koymuştur. Ayrıca, bu malzemelerin kalınlık şişmesi önemli ölçüde azalmıştır. Magnezyum çimentosunun hidrasyon ürünlerinin toplanmasıyla inorganik bir ağ yapısının oluştuğu ve bunun da kompozit mukavemetini ve su direncini artırdığı gözlemlenmiştir. Bu olumlu sonuçların perlit /ahşap-magnezyumdan oluşan kompozit malzemelerinin hizmet ömrünü etkili bir şekilde uzattığı ve ıslak koşullarda kullanım alanlarını genişlettiği belirtilmiştir. Gözlemlenen mükemmel alev geciktirici ve duman bastırma performanslarının, bu kompozitleri dış veya iç duvarlar için ideal yapı yalıtım malzemeleri haline getireceği belirtilmiştir.

Nastac vd. (2022), genişletilmiş perlit ve kolza sapı atığı ile güçlendirilmiş doğal polimer matris bazlı bir kompozit malzemenin ses geçirmezlik özelliklerine ilişkin deneysel bir çalışma yapmışlardır. Farklı genişletilmiş perlit oranlarına ve kolza tohumu atığına sahip dört kompozit örneğini ele almışlardır. Ses yalıtım özelliklerinin değerlendirilmesi için dört mikrofonlu akustik empedans tüpüne dayalı transfer matrisi yöntemi kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar önerilen kompozitin gerçek malzemelere kıyasla karşılaştırılabilir ses yalıtım özelliklerini sağladığını göstermiştir. Ayrıca perlit içeriğinin artmasıyla daha iyi ses emilim performansı ve su emilim özellikleri elde edilmiştir. Bu malzemelerin mevcut yalıtım malzemelerine uygulanabilir bir alternatif olarak ve ses yalıtımında olası uygulamalarla umut verici olduğu belirtilmiştir.

Petrella vd. (2022), farklı uzunluk ve dozajda buğday samanı ve agrega olarak perlit tanecikleri içeren çevresel açıdan sürdürülebilir çimento harçları hazırlamıştır. Hazırlanan harçlar reolojik, termal, akustik, mekanik, optik ve mikroyapısal testlerle karakterize edilmiştir. Geleneksel kum; tamamen saman, tamamen perlit, son olarak inorganik ve organik agrega karışımı (Perlit/Saman) ile değiştirilip kompozitler karakterize edilmiş ve geleneksel kum harcının özellikleriyle karşılaştırılmıştır. Fiziksel ve mekanik sonuçlara dayanarak, bu hafif kompozitler için yapısal olmayan iç mekân uygulamalarının (örn. paneller, sıvalar) düşünülebilir olduğu belirtilmiştir.

Çelik ve Durmuş (2022), alkali aktivatör çözeltisi kullanılarak ultra hafif genişletilmiş perlit bazlı ısı yalıtım paneli geliştirmiştir. Genleştirilmiş perlit parçacık boyutu dağılımının, NaOH konsantrasyonunun ve $\text{Na}_2\text{SiO}_3/\text{NaOH}$ oranının karışımların termal performansı üzerindeki etkileri deneysel olarak araştırılmıştır. Panellerin ısı iletkenlik katsayısı değerlerinin 49,19 ile 66,97 $\text{mW}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ aralığında değiştiği, termal iletkenlik, yoğunluk ve basınç dayanımı arasında doğrudan orantılı bir ilişki olduğu gözlemlenmiştir. Elde edilen sonuçlardan geliştirilmiş perlit bazlı ısı yalıtım panelinin, TS825 Isı Yalıtım Standardına göre inşaat sektöründe yalıtım malzemesi olarak kullanılabilirliği öngörülmüştür.

Anuja vd. (2022), perlit ilavesiyle birlikte beton numunelerinin mukavemetlerinin ve akustik davranışlarının iyileştirilebilmesi için sahip olması gereken optimum perlit dozajının belirlenmesi için çalışma gerçekleştirmişlerdir. Elde edilen sonuçlar betonda çimento yerine %5 perlit ikamesiyle betonun akustik davranışının %26,12 oranında iyileştirildiğini göstermiştir. Ayrıca betonda yeterli mukavemete sahip olmak için, %30 öğütülmüş granüle yüksek cüruf kısmen çimento yerine kullanılmış ve böylece mukavemet %12,5 oranında iyileştirilmiştir. Sadece perlit içeren panelin ses iletiminin %44,02 oranında azaldığı, geleneksel panelin ve perlit ve öğütülmüş granüle yüksek cüruf içeren panelin ise sırasıyla yaklaşık %24,04 ve %39,04 oranında azalma gösterdiği gözlemlenmiştir. Ses seviyesinde meydana gelen bu değişimin betonun artan gözenekli yapısı olduğu belirtilmiştir. Artan gözenek miktarıyla ses seviyesinde meydana gelen azalma o kadar yüksek olmuştur. Bu tip betonların yük taşımayan elemanlar için kullanılabilir olduğu, böylece yapıların maliyetini arttıran ses geçirmez elemanlar veya sıvalarla ilave kaplama yapılmasına gerek kalmayacağı, üretilen kompozitin ses yalıtımı yapmak için önceden dökülmüş yalıtım panelleri, tuğlalar, fayanslar vb. elemanlarda binalarda çeşitli uygulamalarda kullanılabilir olduğu belirtilmiştir.

Makrygiannis ve Tsetsekou (2022), tuğla numunelerinde geliştirilmiş perlit malzemesini katkı malzemesi olarak kullanarak deneysel bir çalışma gerçekleştirmiştir. Farklı oranlarda gelişmiş perlit içeren üç farklı karışım üretmişlerdir. Her karışımda, üç farklı vakum değeri kullanılmıştır. Oluşturulan tuğla numuneleri aynı koşullarda kurutulmuş, pişirilmiş ve eğilme mukavemeti, yoğunluk ve ısı yalıtımı gibi özellikleri altı farklı tepe sıcaklığı için toplanmıştır. Oluşturulan her karışımın ısı yalıtım katsayısı hesaplanmıştır. Diğer parametreler sabit tutulduğunda perlit ilavesinin ürünlerin yoğunluğunda %2,9'dan %7,1'e kadar ve ısı iletkenlik katsayısında %5,4'ten %9,5'e kadar azalmalara yol açtığı bulunmuş, gelişmiş perlitin çok iyi bir gözenek oluşturucu malzeme olduğunu

doğrulanmıştır. Eğilme mukavemeti de %18'den %28'e kadar azalmıştır, ancak tüm durumlarda kabul edilen minimum 100 kp/cm² değerinin oldukça üzerinde kalmıştır.

Benjeddou vd. (2023), mermer atıklarının ezilmesiyle elde edilen kumun ve geliştirilmiş perlit agregasının hafif betonlarda kullanılabilirliğini araştırmıştır. Bu amaç doğrultusunda perlit agregası yüzdeleri (%0, 20, 40, 60, 80 ve 100) değiştirilerek farklı beton karışımları hazırlanıp, elde edilen beton numunelerinin termal ve akustik özellikleri (ısı iletkenlik, ısı yayılım, özgül ısı kapasitesi ve farklı frekanslarda ses azaltma indeksi) araştırılmıştır. Geliştirilmiş perlit agregasının yüzdesi arttıkça beton numunelerinin toplam gözenekliliğinin arttığı, beton numunelerin birim ağırlığının düştüğü bulunmuştur. Geliştirilmiş perlitin betona ilavesiyle ısı yalıtım değeri artış göstermiştir. Test edilen beton numuneleri; %20'den yüksek geliştirilmiş perlit agregası yüzdesine sahip ısı yalıtımlı hafif beton kategorisi ve %20 geliştirilmiş perlit agregası yüzdesine sahip yalıtımsız normal betonun kategorisi olmak üzere iki kategoriden oluşmuştur. Sonuçlar, mermer atıklarının ezilmesiyle elde edilen kum ve geliştirilmiş perlit agregası kullanılarak ısı ve ses yalıtımı sağlayan hafif beton elde etmenin mümkün olduğunu, geliştirilmiş perlit agregası içeriği %20'den fazla olan beton karışımlarının, akustik yalıtım hafif beton kategorisine yerleştirilebilir olduğunu ortaya koymuştur.

Guijarro-Miragaya vd. (2023), inşaat sektöründe uygulanması amaçlanan yeni bir sıva malzemesinin fizikokimyasal ve mekanik karakterizasyonunu gerçekleştirmiştir. Geliştirilen sıva malzemesi, bileşiminde potasyum poliakrilat ve perlit içermekte olup, fiziksel ve mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi amacıyla ahşap, cam ve polipropilen elyaflarla güçlendirilmiştir. Sonuçlar, potasyum poliakrilat ve genişletilmiş perlitin bir arada kullanılmasının, geleneksel sıvalara kıyasla yoğunluk değerinde %10,5, ısı iletkenliğinde ise %47 oranında bir azalmaya yol açtığını göstermiştir. Ayrıca, takviye elyaflarının, özellikle cam elyafın, alçı matrisine dahil edilmesi, yeni malzemenin mekanik mukavemetini artırmıştır.

Bozkurt ve Ramazanoğlu (2023), sıfır enerjili bina hedeflerine yönelik olarak pomza taşı ve geliştirilmiş perlit malzemeleri kullanarak şap tasarlamışlardır. Bu amaçla günümüzde kullanılan geleneksel şap çeşidini temsil edecek ve çalışmada kontrol örneğini temsil edecek şap için dere kumu ile üretilmiş şap çeşidi üretilmiştir. Pomza taşı ve geliştirilmiş perlit malzemeleri içeren 8 farklı karışım üretilmiştir. 28 günlük kürlenme sürecinden sonra bu 9 farklı şap örneğine ultrasonik ses hızı (USH), basınç dayanımı ve ısı iletkenlik testleri uygulanarak mühendislik özellikleri belirlenmiştir. Yapılan test sonuçları sektörde kullanılan şaplara göre pomza ve geliştirilmiş perlitli şap üretiminin mümkün olduğunu göstermiştir. Ancak geliştirilmiş perlit kullanımı ile basınç dayanımı azalırken, ses ve ısı iletim katsayısı değerlerinde çok daha iyi sonuçlar elde edilmiştir. Isı iletkenlik test sonucu incelendiğinde en yüksek değer kontrol örneğinde (0,441 W/m.K), en düşük değer ise (0,191 W/m.K) ve (0,105 W/m.K) perlit serisinde elde edilmiştir.

Acar vd. (2023), ham perlit ve standart kumun alkali aktivasyonuna dayalı çimentosuz macun ve çimentosuz harçların üretilmesini amaçlamışlardır. Çimentosuz macun ve harç üretiminde bağlayıcı malzeme olarak perlit ve alkali aktivatörler (NaOH ve Na₂SiO₃) kullanılmıştır. Ayrıca köpürtücü olarak hidrojen peroksit (H₂O₂) kullanılarak hafif macunlar ve harçlar üretilmiştir. Farklı su/perlit ve H₂O₂/perlit oranlarında geopolimerler üretilerek ısı iletkenlikleri, görünür yoğunlukları, basınç ve eğilme dayanımları karşılaştırılmıştır. Deneysel bulgular, karışımlara %0,25 H₂O₂ (perlitin kütlesine göre) eklenmesinin, nihai mukavemette önemli bir kayıp olmaksızın, daha düşük yoğunluklu ve daha düşük ısı iletkenlik katsayısına sahip hafif macun ve harçların üretilmesine olanak sağladığını ortaya koymuştur. Geliştirilen perlit bazlı havalandırılmalı geopolimerin, binalara yönelik çevre dostu ve enerji tasarruflu bir çözüm olduğu belirtilmiştir. Sonuçlara göre hem macun hem de harçlarda %0,5'in üzerinde H₂O₂/perlit ve %45'in üzerinde su/perlitten kaçınılması gerektiği belirtilmiştir. İşlenebilirlik, mukavemet, yoğunluk ve ısı iletkenlik açısından optimum sonuçların alınabilmesi için tüm numunelerde H₂O₂/perlit oranının %0,25, su/perlit oranının ise %40 olması tavsiye edilmiştir.

Zou vd. (2024), önceki araştırmalara dayanarak, çeşitli malzemelerin beton bloklarla nasıl birleştirilebileceğinin ve hafiflik, ısı koruması, ses yalıtımı ve ışık geçirgenliği gibi özelliklerin detaylı araştırmasını yapmışlardır. Farklı ses yalıtım ve ısı yalıtım malzemelerinin beton bloklara eklenmesinin avantajları ve dezavantajları analiz edilerek en iyi performansa sahip ses yalıtım ve ısı yalıtım malzemesini seçmeyi amaçlamışlardır. Bu amaç doğrultusunda basınç dayanımı deneyi, hafiflik performans deneyi, ısı yalıtımı performans deneyi ve ses yalıtımı performans deneyi sonuçlarını analiz ederek farklı içeriklere sahip betonların performansları kapsamlı şekilde karşılaştırılmışlardır. Isı ve ses yalıtım deneyleri analiz edildiğinde gelişmiş perlit blokların en iyi ses yalıtım ve

ısı yalıtım etkisine sahip olduğu, ancak genişlemiş perlitin basınç dayanımının karşılaştırıldığında en düşük olduğu ve bileşen yapısının kritik noktalarında kullanımından kaçınılması gerektiği belirtilmiştir.

Çavdaroğlu vd. (2024), genişletilmiş perlitin etilen propilen kauçuk kompozitler için sürdürülebilir ve uygun maliyetli bir dolgu maddesi olarak kullanılabilirliğini araştırmışlardır. Farklı oranlarda geliştirilmiş perlit, kütleme özellikleri, fiziksel ve mekanik özellikler, çapraz bağ yoğunluğu, termal iletkenlik, termal kararlılık, yüzey pürüzlülüğü ve temas açısı gibi kompozit özellikleri üzerindeki etkisini değerlendirmek için etilen propilen kauçuk kompozitlere dahil edilmiştir. 15 phr geliştirilmiş perlit içeren kompozit yaklaşık %20 daha yüksek çapraz bağ yoğunluğu ve %12 sertlik artışı sergilerken, kopma uzamasında ve çekme dayanımında hafif azalmalar gözlemlenmiştir. Yüzey morfolojisini ve hidrofobisiteyi araştırmak için FE-SEM (alan emisyon taramalı elektron mikroskobu), atomik kuvvet mikroskobu ve temas açısı analizi yapılmıştır. Kompozitlerin termal özellikleri, termogravimetrik analiz, termal yaşlanma testleri ve termal iletkenlik ölçümleri yoluyla değerlendirilmiştir. Sonuçlar, geliştirilmiş perlitin yaşlanma direncini ve termal kararlılığı önemli ölçüde iyileştirdiğini göstermiştir. 15 phr geliştirilmiş perlit içeren kompozitler, geliştirilmiş perlit içermeyen kompozite kıyasla %21'lik bir termal iletkenlik azalması ve gelişmiş termal izolasyon özellikleri sergilemiştir. Bu çalışma, etilen propilen kauçuk kompozitlerde geliştirilmiş perlitin, kompozitlerin termal izolasyonunu ve kararlılık özelliklerini geliştirmek için sürdürülebilir bir dolgu maddesi olarak kullanılabilir olduğunu ortaya koymuştur.

Wang vd. (2024), vakum emdirme yöntemiyle kaprik-stearik asit /geliştirilmiş perlit kompoziti hazırlamak için faz değiştiren malzeme olarak kaprik-stearik asit, destek malzemesi olarak ise geliştirilmiş perlit kullanmışlardır. Enerji tasarruflu binalarda kaprik-stearik asit /geliştirilmiş perlit uygulamasının fizibilitesini araştırmak amacıyla yapılan termal ölçüm sonuçlarına bakıldığında, kaprik-stearik asit /geliştirilmiş perlit kompozitinin harca dahil edilmesinin termal özelliklerini önemli ölçüde artırdığını göstermiştir. Araştırma bulguları, bu çalışmada geliştirilen kaprik-stearik asit /geliştirilmiş perlit bazlı harcın bina enerji tasarrufu alanında önemli bir uygulama potansiyeline sahip olduğunu göstermiştir.

Diao vd. (2024), farklı yalıtım malzemelerinin içi boş duvarların enerji tüketimine olan etkilerini teorik ve deneysel olarak analiz etmişlerdir. Duvarların ısı transfer katsayılarını ölçmek için ısı akış ölçer yöntemi kullanılmış ve teorik olarak hesaplanan değerlerle karşılaştırılmıştır. Bu arada, farklı yalıtım muhafazalarının bina enerji tüketimi sayısal olarak modellenmiştir. Sonuçlar, dolgu malzemesi olmayan Dahlen tuğla boşluk duvarının ısı transfer katsayısının $1,86 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ile en büyük olduğunu göstermiştir. Dolgu malzemesi olan muhafazadaki silt pişmiş toprak boşluk duvarındaki ısı transfer katsayısı $0,89 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ olmuştur. Geliştirilmiş perlit boşluk duvarının ısı transfer katsayısı $0,88 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ olmuştur. Pirinç kabuğu boşluk duvarının ısı transfer katsayısı $0,8 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ olmuştur. Bu sonuçlar, iyi yalıtım özelliklerine sahip içi boş duvarların geliştirilmesi için bu malzemelerin kullanılabilir olduğunu ortaya koymuştur.

Balbuena vd. (2024), arojel, perlit ve vermikülinin hafif agregalar olarak kullanıldığı özel harçlar hazırlamış ve harçların sıcak ve soğuk koşullar altında termal özelliklerini incelemişlerdir. Sonuçlar, hafif agregaların dahil edilmesinin harcın termal yalıtımını iyileştirdiğini, genel olarak, hafif agregaya içeriği arttıkça termal iletkenliğin azaldığını göstermiştir. Arojel içeren numunenin en iyi performansı gösterdiği ve termal iletkenlik değerini neredeyse %75 oranında iyileştirdiği gözlemlenmiştir. Arojelin en yüksek termal ataleti gösterdiği, en iyi yalıtım performansının ise %15 iyileşme ile vermikülin içeren numunede görüldüğü belirtilmiştir. %10 perlit ve %10 arojel içeren numunede ise hem termal atalet hem de nihai yalıtım kapasitesinde en iyi performans elde edilmiştir. Tek bir hafif agregaya kullanılması durumunda yalıtım kapasitesi $3 \text{ }^\circ\text{C}$ 'ye kadar ulaşırken ve hafif agregaya karışımları durumunda iyileşme $7,2 \text{ }^\circ\text{C}$ 'ye kadar uzamıştır. Soğuk koşullar altında harçların tepkisi farklı olmuştur. Bu durumda, bileşimlerinde en yüksek hafif agregaya içeriğine sahip numuneler en iyi performansı göstererek referans harca kıyasla $4,5 \text{ }^\circ\text{C}$ 'ye kadar iyileşme sağlamıştır. Hafif agregalar mekanik dirençlerde bir azalmaya yol açmıştır; ancak tüm durumlarda sıva harcı olarak kabul edilebilecek minimum direnç sağlanmıştır.

Yapılan çalışmalar değerlendirildiğinde, uygun bağlayıcıların kullanımıyla çeşitli maddelerden kompozit yalıtım malzemeleri üretilebileceği görülmüştür. Bu malzemeler, ısı ve ses yalıtım performansını artırırken, enerji tüketimini makul düzeyde tutarak ve konforlu sağlık koşullarını sağlayarak sürdürülebilir bir niteliğe sahiptir. Ayrıca, yerel kaynaklardan elde edilen malzemelerin kullanımıyla ekolojik dengenin korunabileceği görülmektedir.

YALITIM MALZEMELERİNDEN BEKLENEN ISIL VE AKUSTİK ÖZELLİKLER**Isıl Özellikler**

Isıl performansı belirleyen temel parametreler arasında, kararlı durumdaki ısı iletim katsayısı (k) ve kararsız durumdaki ısı yayılım katsayısı (D) bulunmaktadır. Isı iletim katsayısı, homojen bir malzemenin belirli bir kalınlığında sıcaklık gradyanı başına birim alandan geçen ısı akışını ifade eder ve birimi $W/m.K$ 'dir. Öte yandan, ısı yayılım katsayısı, malzemenin ısıyı iletim kabiliyeti ile depolama kapasitesi arasındaki oranı yansıtarak, ortamdaki ısı dalgalarının yayılmasını tanımlar. Bu katsayı, malzemenin özgül ısı kapasitesi (cp), yoğunluğu (ρ) ve birimi m^2/s olarak ifade edilir. Bu açıklamalar, malzemenin kendine özgü özelliklerinden türetilmiş bir niceliği temsil eder (Arslan ve Aktaş, 2018). Isı yalıtım malzemeleri, farklı sıcaklıklardaki iki ortam arasındaki ısı transferini kontrol etmek için kullanılır. Bu malzemelerin en önemli özelliği, ısı iletkenlik katsayısının (λ) $0.1 W/m^{\circ}C$ 'nin altında olmasıdır. Düşük ısı iletkenlik, ısı yalıtım malzemelerinin temel özelliğidir ve ısı geçişini etkili bir şekilde azaltır (Özer ve Özgünler, 2019). Tablo 2'de ısı yalıtım malzemelerinin ısı iletim katsayı değer aralıkları ve yangın tepki sınıfları verilmiştir.

Tablo 2. Farklı Isı Yalıtım Malzemelerinin Özellikleri (Özer ve Özgünler, 2019; Uluer, vd., 2018; Bayraktar ve Bayraktar, 2016)

Isı Yalıtım Malzemesi	Isı İletim Katsayısı ($W/m.K$)	Yangına Tepki Sınıfı
Genleştirilmiş perlit	0,040-0,065	A1
Ekstrüde polistren köpük levha	0,030-0,040	D-E
Genleştirilmiş polistren köpük levha	0,035-0,040	D-E
Cam yünü	0,035-0,050	A1-A2*
Taş yünü	0,025-0,040	B-C-D**/D-E
Poliüretan sert köpük levha	0,030-0,045	B-C-D
Fenol köpüğü	0,045-0,060	A1-A2
Cam köpüğü	0,035-0,076	B-C-D
Ahşap yünü	0,045-0,055	C-D-E
Genleştirilmiş mantar levha	0,035-0,070	C-D-E
Ahşap lifli levha	0,042-0,050	A1
Gez beton ısı levhası	0,040-0,045	E
Gevşek dolgu selüloz yalıtım	0,040-0,050	E
Kenevir	0,022-0,040	C
Fenolik köpük levha	$\leq 0,0053$	-
Vakum yalıtım paneli		

Tablo 2'de verilen ısı yalıtım malzemelerinin ısı iletkenlik değerleri incelendiğinde inorganik kökenli doğal malzemeler, yapay olanlara kıyasla genellikle daha yüksek bir ısı iletkenlik gösterirler. Diğer taraftan, organik kökenli doğal malzemeler, yapay olanlara göre tipik olarak daha yüksek bir ısı iletkenlik sergilerler. Ancak, ileri teknoloji ürünleri arasında yer alan vakum yalıtım panelleri ve aerogeller, son derece düşük bir ısı iletkenlik gösterirler; ne var ki, yüksek maliyetleri nedeniyle yapı sektöründe pek tercih edilmezler. Yalnızca ısı iletim katsayısı değeri üzerinden ısı yalıtım malzemesi seçmek, hedeflenen sonuçlara ulaşmayı neredeyse imkânsız hale getirir. Yapı içindeki nem ve yoğuşma sorunları göz önünde bulundurulduğunda, ısı yalıtım malzemesinin diğer özelliklere de sahip olması önem kazanır. Dolayısıyla, ısı yalıtım malzemesi seçiminde, ısı performansının yanı sıra dayanıklılık, maliyet, basınç dayanımı, su buharı emilimi ve iletimi, yangına karşı dayanıklılık, uygulama kolaylığı gibi birçok faktörün dikkate alınması gerekmektedir. Tablo 3'te ısı yalıtım malzemelerinin sahip olmaları gereken özellikler listelenmiştir (Arslan ve Aktaş, 2018).

Akustik Özellikler

İnşaat malzemeleri, akustik özelliklerinin incelenmesiyle, ses iletimi ve yankılanma kapasiteleriyle tanımlanabilir. Ses iletimi sırasında, hava kaynaklı ve yapısal (darbe) ses yalıtım yetenekleri önem taşır. Diğer yandan, ses emme kabiliyeti, bir malzemenin içine yayılan akustik enerjinin bir kısmını emme kapasitesi olarak tanımlanır. Gözenekli ses emiciler çoğu zaman etkili ses yalıtımı sağlar, ancak bu her koşulda geçerli değildir. Ses emici malzemelerde, hareketli hava bulunması gerektiğinden açık gözeneklilik kritiktir. Kapalı gözeneklilik ise genellikle ısı yalıtımı için faydalıdır. Ses yalıtım performansı, malzeme kütlesiyle doğru orantılı olarak değişir. Büyük yapılarda, ses yalıtımı genellikle en ağır bileşenlerin performansına dayanır. Ses yalıtım malzemeleri, odaların akustik konforunu

artırarak yankılanma süresini azaltmak için kullanılır. Katlarda ses yalıtımı gerektiğinde, darbe sesi yalıtımı önemlidir. Tablo 4'te, ses yutma ve ses iletim kaybı için belirleyici olan ana malzeme özelliklerinin akustik performans parametrelerine etkisi görülebilir. (Arslan ve Aktaş, 2018).

Tablo 3. Isı Yalıtım Malzemelerinde Aranılan Genel Özellikler (Arslan ve Aktaş, 2018)

Fiziksel İşlevsellik	Dayanıklılık	Ekolojik Uygunluk	Uygulama Kolaylığı	Ekonomiklik
Yüksek ısı tutuculuk	Su ve neme dayanıklılık	Çevre ve ekosistem açısından zararsızlık	Kolay işlenebilirlik	Ucuz ve kolay temin edilebilirlik
Düşük birim ağırlık	Kimyasal etmenlere dayanıklılık	Sağlık açısından zararsızlık	Üzerine uygun katmanların uygulanmasına olanaklılık	
Koşullara uygun buhar geçirimsizliği	Biyolojik etkilere dayanıklılık	Az enerji tüketimi	Sıva tutuculuk	
Yeterli basınç dayanımı	Yangın emniyeti	Bakım gerektirmezlik ve kullanım sonrası değerlendirilebilirlik		
Yeterli çekme dayanımı	İnsan sağlığına ve çevreye zararlı olmaması	Kokusuzluk		
Boyutsal kararlılık	Yanmazlık ve alev geçirmezlik			
Düşük ısı iletim katsayısı	Sıcaklık dayanımı			
Yüksek ısıl direnç	Çürümezlik			
Uygun yoğunluk	Uzun ömürlülük			
	Parazitlere dayanıklılık			
	Buhar difüzyon direnci			
	Mekanik dayanım			

Tablo 4. Akustik Performansa Etki Eden Temel Malzeme Özellikleri (Arslan ve Aktaş, 2018)

Mikro yapı özellikleri	Mekanik Özellikler	Gözenekli yapı içerisindeki hava özellikleri	Malzemenin fiziksel özellikleri
Hava akış direnci	Kayıp faktörü	Havanın yoğunluğu	Uygun birim ağırlık
Gözeneklilik	Kayma modülü	Gözenek içerisindeki sesin hızı	Malzeme yoğunluğu
Kıvrımlılık	Young modülü	Havanın vizkozitesi	Kalınlık
Termal karakteristik uzunluk	Poisson oranı	Özgül ısı oranı	Boyutsal kararlılık
Vizkoz karakteristik uzunluk		Prandtl sayısı	
		Hava akış hızı	

PERLİT

Volkanik patlama sırasında lav hızla soğuyarak cam benzeri bir yapı oluşturmakta ve bu yapıya "volkanik cam" denilmektedir. Perlit, bu volkanik camın özel bir türüdür ve hafif, gözenekli bir malzeme olarak bilinmektedir (Davraz vd., 2020; Baba, 2018; Çelik vd., 2016; Karadayı ve Yüksek, 2016; Binici ve Kalaycı, 2015;). Genellikle 750 ila 1100 °C arasındaki sıcaklıklara ani bir şekilde maruz bırakılarak işlenen ham perlitin genişletilmesiyle oluşturulan genişletilmiş perlit, asidik bir yapıya sahiptir. Ham perlit tanecikleri genişletildiğinde hacimleri yaklaşık olarak 10 ila 30 kat artmakta ve yoğunluğu belirgin şekilde azalmaktadır. Perlitin hacmindeki bu genişleme, malzemenin belirgin bir şekilde artan bir ısıl direnç özelliği kazanmasına neden olmaktadır (Kabay ve Kızılkant, 2019; Oliveiraa vd., 2019; Özer ve Özgünler, 2019; Karadayı ve Yüksek, 2016). Genleştirilmiş perlitin oluşturan bileşenlerin verildiği Tablo 5 incelendiğinde bileşenler arasında nitrat, sülfat, fosfor, ağır metal, radyoaktif element ve organik madde olmadığı görülmektedir. Buradan çıkarılacak sonuç genişletilmiş perlitin

kimyasal olarak oldukça saf olduğudur. Bunun yanı sıra geliştirilmiş perlit, organik olmayan bir malzeme olduğundan uzun ömürlüdür ve sahip olduğu üstün özellikleri uzun süre koruyabilmektedir (Uluer vd.,2018).

Tablo 5. Geliştirilmiş Perlitin Bileşenleri (Uluer vd., 2018)

Madde	Oran
SiO ₂	71,0-75,0
Al ₂ O ₃	12,5-18,0
Na ₂ O	2,9-4,0
K ₂ O	4,0-5,0
CaO	0,2-0,5
Fe ₂ O ₃	0,1-1,5
MgO	0,03-0,5

Şekil 1’de görüldüğü üzere geliştirilmiş perlitin beyaz rengi birçok yapı malzemesine estetik bir görünüm kazandırmaktadır. Ayrıca, pH seviyesi 6.6 ila 8 arasında değiştiğinden, kimyasal olarak nötr bir özellik göstermekte; asit veya bazlardan etkilenmemektedir (Arslan ve Aktaş, 2018; Uluer vd., 2018). Güneş ışınlarından etkilenmeyen ve biyolojik etkilere karşı dayanıklı olan geliştirilmiş perlit, çürümeye karşı da dirençlidir (Arslan ve Aktaş, 2018). Geliştirilmiş perlit sahip olduğu bu özellikler ile birçok sektörde kullanılmaktadır. İnşaat sektöründe perlit, kiremit yapımında, gevşek dolgu malzemesi olarak, sıva, harç ve beton üretiminde, yapı bileşeni olarak blok, panel ve levha şeklinde kullanılmaktadır (Kabay ve Kızılkant, 2019; Özer ve Özgünler, 2019; Karadayı ve Yüksek, 2016).



Şekil 1. Geliştirilmiş Perlit (Ramazanoğlu, 2020)

Genleştirilmiş perlitin dikkate değer bir diğer özelliği ise yüksek sıcaklıklara dayanma ve yanmazlık kabiliyetidir (Bozkurt ve Ramazanoğlu, 2023). Beton gibi diğer yapı malzemeleri genellikle 300 °C’den sonra yapısal bozulma gösterirken, geliştirilmiş perlit yaklaşık 1000 °C (1832 °F) civarındaki yüksek sıcaklıklara kadar dayanabilmektedir. Bu özellik, ısı yalıtım malzemelerinde aranan önemli bir niteliktir (Uluer, vd., 2018). Tam dayanıklılık derecesi, perlitin özelliklerine, kullanımına ve üretim sürecine bağlı olarak değişkenlik gösterebilmektedir. Düşük ısı iletkenliği, düşük yoğunluk, yüksek ses emme kabiliyeti, yangın dayanımı şüphesiz ısı yalıtım malzemelerinde aranan en önemli özelliklerdir (Özer ve Özgünler, 2019). Düşük ısı iletim katsayısı, düşük yoğunluk, yanmazlık ve yüksek ses emme özelliği gibi üstün nitelikler, geliştirilmiş perlitin etkili bir yalıtım malzemesi olma potansiyelini arttırmaktadır. Tablo 2 ve 6 incelendiğinde, geliştirilmiş perlitin hem ısı yalıtımı hem de ses yalıtımı için uygun özelliklere sahip olduğu açıkça görülmektedir (Uluer vd., 2018).

Perlit temelli yalıtım panelleri ve teknolojileri incelendiğinde ve sektörde sıklıkla kullanılan diğer yalıtım malzemeleriyle karşılaştırıldığında, bu malzemelerin tutuşma sıcaklıkları genellikle 245°C ile 415°C aralığında değişmektedir. Öte yandan, A1 sınıfı yanmaz geliştirilmiş perlitin yapısındaki bozulma 870°C’den sonra başlarken, 1100°C’de erimektedir. Bu nedenle, yangın durumunda geliştirilmiş perlit, diğer malzemelere göre daha uzun süre dayanabilmekte ve yangının yayılmasını geciktirebilmektedir. Bazı yalıtım malzemelerinin bir diğer dezavantajı da ısı iletim katsayılarının zamanla artmasıdır. Çünkü gözeneklerinde bulunan gazlar zamanla hava ile yer değiştirmektedir. Bunun aksine, geliştirilmiş perlit doğal gözenekli bir yapıya sahip olduğundan, zamanla ısı özelliklerinde bir değişim meydana gelmemektedir. Geliştirilmiş perlit esaslı ısı yalıtım malzemelerinin ısı iletim katsayısını, kullanılan bağlayıcı ve kütleme koşulları etkileyebilmektedir. Bunlara ek olarak perlit malzemesi çevre dostu bir seçenek olduğu açıkça görülmektedir (Uluer vd., 2018).

Tablo 6. Genleştirilmiş Perlit Agrega Örneklerinin Özgün Özellikleri (Bozkurt ve Ramazanoğlu, 2023; Uluer vd., 2018)

Özellik	Genleşmiş Perlit	Birim
Renk	Beyaz	-
Sertlik	5-5,5	-
Ph	6,6-8	-
Özgül kütle	2,3	g/cm ³
Kuru birim hacim ağırlık	40-220	kg/m ³
Su emme	40-60	%
Doluluk oranı	1,80-9,60	%
Gerçek porozite	98,2-90,4	%
Zararlı maddeler analizi	Yok	-
Kükürt analizi	0,34	%
Yapısal bozunma	870	°C
Erime noktası	1100	°C
Ateşe dayanım	Yanmaz	°
Ateşe geciktirme	3	sa.
Özgül ısı kapasitesi	0,200-0,215	Kcal/kg °C
Isı iletim katsayısı	0,040-0,065	W/m.K
Ses geçiş katsayısı	0,25	-
Ses yutuculuk	35-40	dB

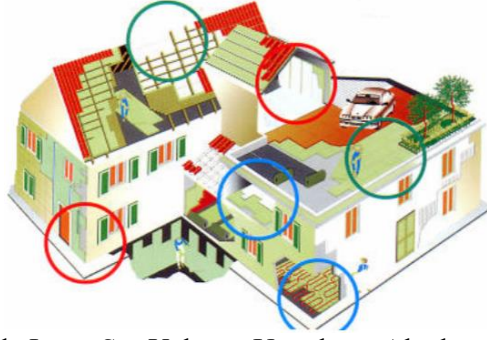
Birçok üstün özelliğe sahip olan perlit malzemesi ülkemizde oldukça bol bulunmaktadır. Dünyadaki toplam perlit rezervi 7.700 milyon ton olup, bunun 5.700 tonu (%74) Türkiye'de bulunmaktadır (Binici ve Kalaycı, 2015). Türkiye sahip olduğu perlit rezervi ile dünyanın önde gelen ülkeleri arasında yer almaktadır (Kabay ve Kızılkıran, 2019). Türkiye, dünyanın en geniş ve kaliteli perlit yataklarına sahip olmasına rağmen Dünyadaki üretimin yaklaşık %3'ünü gerçekleştirmektedir. Hammadde bolluğunun aksine kullanımı pek yaygın değildir (Argunhan ve Oktay, 2016; Karadayı ve Yüksek, 2016). Oysaki ülkemizde bulunan zengin perlit yatakları sayesinde, hammaddeye kolaylıkla erişilebilir ve yerli teknoloji kullanılarak yeni teknolojilerin üretilmesi mümkündür (Uluer vd., 2018).

Isı yalıtımındaki geleneksel malzemelerin sınırlamalarıyla başa çıkma ihtiyaçları, perlitinin yenilikçi bir çözüm olarak ön plana çıkmasını sağlamıştır. Perlit hem hafif olması hem de yalıtım malzemesi olarak etkili ve çevreci bir malzeme olmasından dolayı inşaat sektöründe dikkat çekmektedir. Bu malzemenin yapılarıdaki ölü yük miktarını emsallerine göre düşürmesi, mükemmel ses özellikleri, düşük sıcaklıkta olması ve yoğunluğu, perlitin inşaat projelerinde benzersiz bir rol oynamasını sağlayacaktır. Bunun yanı sıra yerli hammadde kullanımı da artış gösterecek ve enerji konusunda dışa bağımlılığının azalmasına olanak sağlanacaktır (Bozkurt ve Ramazanoğlu, 2023; Davraz vd., 2020).

Perlitin Isı ve Ses Yalıtımında Uygulama Alanları

Granüler yapısı, düşük yoğunluk ve düşük ısı iletkenliği, perlitin ısı dağılımında etkili bir rol oynamasını sağlarken perlit, hafif ve boşluklu bir yapısı sayesinde ses dalgalarını emebildiği ve dağıtabildiği için ses yalıtımında da etkili bir malzeme olarak kullanılmaktadır. Ses enerjisinin emilmesi, yankının azaltılması ve ortamda daha iyi akustik koşulların oluşturulması için kullanışlı olmaktadır (Başar ve Acartürk, 2022; Özer ve Özgünler, 2019; Arslan ve Aktaş, 2018; Uluer vd., 2018; Argunhan vd., 2016; Yıldız, 2014;). Genleştirilmiş perlitin ısı ve ses yalıtımı için çeşitli uygulama alanları bulunmaktadır. Şekil 2'de gösterildiği gibi çatılarda, döşemelerde, zeminde ve duvarlarda perlit malzemesi yalıtım için kullanılabilir (Uluer vd., 2018; Yıldız, 2014). Oldukça geniş bir yelpazede çözümler sunan perlit, yapı maliyetine olumlu etki etmekte, yapı yükünü hafifletmekte ve bunların yanı sıra üstün ses ve ısı yalıtımı sağlamaktadır.

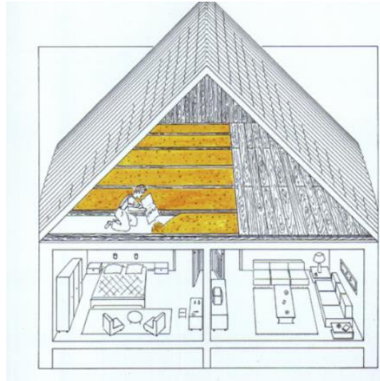
Perlit, çatılarda ısı ve ses yalıtımı için kullanılan etkili bir malzemedir. Şekil 3'te görüldüğü üzere kiremitlere, Şekil 4'te görüldüğü üzere çatı kiremit altlarına veya çatı katlarına perlit malzemesi eklenerek, dışarıdan gelen sıcaklık değişimlerine karşı bina içinde etkili bir yalıtım sağlanmaktadır. Çatılar genellikle ısı kaybının yoğun olduğu bölgeler olduğundan perlit malzemesinin çatı yalıtımında, çatı malzemesinin altına veya üstüne eklenmesiyle ısı geçişleri azaltılmaktadır (Yıldız, 2014).



Şekil 2. Yapılarda Isı ve Ses Yalıtımı Uygulama Alanları (Akıncı, 2007)



Şekil 3. Çatısı Perlit Kiremitle Örülmüş Ev (Yıldız, 2014)



Şekil 4. Çatı Döşemesinde Isı Yalıtımı İçin Perlit Kullanımı (Per ve Taş, 2023)

Şekil 5'te görüldüğü gibi duvarlarda kullanılan perlit örgü malzemeleri, dış etkenlerden kaynaklanan ısı kayıplarını engellemekte, ses izolasyonunu sağlamakta böylece iç mekanlarda daha konforlu bir yaşam ortamı sağlamaktadır. Perlit, Şekil 6 ve 7'de görüldüğü gibi iç ve dış duvarlarda kullanılarak ısı köprülerini önlemeye yardımcı olmaktadır. Duvar içi uygulamalarda, perlit malzemesi çimento ile karıştırılarak hafif yapı blokları veya paneller oluşturmakta ve bu da duvarlarda homojen bir ısı yalıtım tabakası sağlayarak ısı köprüsü oluşumunu engellemektedir. Ayrıca geleneksel sıva yerine perlitli sıvaların tercih edilmesi ses yalıtımına destek olarak akustik konfora destek sağlamaktadır (Yıldız, 2014).



Şekil 5. Perlitin Dolgu Malzemesi Olarak Kullanımı (Yıldız, 2014)



Şekil 6. Perlitli Sıva (Perlitsa, 2018)



Şekil 7. Perlitli Isı Yalıtım Levhası (Yıldız, 2014)

Perlit, Şekil 8’de görülüşü üzere zemin yüzeyinde de kullanılmaktadır. Özellikle bodrum ve kotta kalan dairelerde veya beton zeminler üzerinde perlit malzemesi kullanılarak ısı kayıpları en aza indirilebilir ve enerji verimliliğı artırılabilir. Perlit, zemin yalıtımında kullanılarak zemin altındaki ısı kaybını azaltabilir. Özellikle yerleştirilen bir perlit yalıtım tabakası, zeminin altında ısı köprülerini önleyebilir ve iç mekân sıcaklığını koruyabilir. Zemin döşemelerinin altında perlit kullanarak, binanın altında soğuk zeminin iç mekâna etkisini engelleyerek ısıtma maliyetlerini düşürebilir ve ısı yalıtımına katkı sağlanabilir. Bunun yanı sıra katlar arası ses yalıtımı da sağlanır (Yıldız, 2014).



Şekil 8. Isı ve Ses Yalıtımı İçin Döşemelerde Perlitli Şap Kullanımı (Ulusal Perlit, 2023)

SONUÇ

Enerji tüketiminin, ısı ve ses verimliliğinin inşaat sektörünün çevresel performansı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu gerçeğı araştırmacıları yeni yöntemler ve malzemeler tasarlamaya yönlendirmiştir. Daha sürdürülebilir, daha çevreci ve daha ekonomik ısı ve ses yalıtım malzemeleri geliştirmeyi amaçlayan araştırmacılar için perlit, yüksek performanslı çözüm sunan bir malzeme olmuştur. Mevcut çalışmada da belirtildiğı üzere birçok araştırmacı, perlitin yalıtım malzemelerinde kullanımıyla ilgili araştırmalar yapmış ve bu araştırmaların sonuçları, daha ekonomik, daha çevre dostu, sürdürülebilir ve daha etkili ısı ve ses yalıtım malzemelerinin geliştirilebilir olduğunu, perlitin gelecekte ısı ve ses yalıtımında önemli bir rol oynayacağını ortaya koymuştur. Araştırmacılar, sahip olduğu üstün özelliklerden dolayı oldukça etkili ısı ve ses yalıtımı sağlayan perlit malzemesinin yalıtım endüstrisinde daha etkili ve yaygın kullanılmasıyla enerji sarfiyatının önüne geçilebileceğini, böylece çevrenin korunabileceğinin belirtmişlerdir. Yapılan bu çalışma perlit malzemesinin ısı ve ses yalıtımındaki potansiyelini net bir şekilde ortaya koymaktadır. Bu nedenle gelecekte daha verimli ve çevreci yalıtım malzemelerinin geliştirilmesi için perlit takviyeli yalıtım malzemeleri üzerinde çalışmaların artırılması, enerji tasarrufuna ve çevrenin korunmasına daha fazla katkıda bulunacaktır. Bunun yanı sıra ülkemiz gibi enerjisinin büyük bölümünü ithal eden ülkelerde, perlit gibi verimli yalıtım malzemelerinin kullanımıyla enerjinin daha etkin bir şekilde kullanılması ülke ekonomisini de olumlu yönde etkileyecektir. Bu nedenle, ısı yalıtım malzemeleri alanında yapılan araştırmalara yatırım yapılması büyük önem taşımaktadır.

KAYNAKLAR

- Perlitsa. (2018). <https://www.perlitsa.com/> Erişim Tarihi 22.03.2024.
- Per & Taş. (2023). <http://www.pertas.net/Perlit.html> Erişim Tarihi 22.03.2024.
- Ulusal Perlit. (2023). <http://ulusalperlit.com/perlitli-sap/> Erişim Tarihi 22.03.2024.
- Abidi, S., Nait-Ali, B., Joliff, Y., & Favotto, C. (2015). "Impact Of Perlite, Vermiculite And Cement On The Thermal Conductivity Of A Plaster Composite Material: Experimental And Numerical Approaches. *Composites: Part B*, 68, s. 392-400. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2014.07.030>
- Acar, M. C., Çelik, A. İ., Kayabaşı, R., Şener, A., Özdöner, N. & Onuralp Özkılıç Y. (2023). Production of Perlite-Based-Aerated Geopolymer Using Hydrogen Peroxide as Eco-Friendly Material for Energy-Efficient Buildings. *Journal of Materials Research and Technology*, 24, s.81-99. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.02.179>
- Ahmadi, P. F., Ardeshir, A., Ramezani-pour, A. M., & Bayat, H. (2018). Characteristics Of Heat Insulating Clay Bricks Made From Zeolite, Waste Steel Slag And Expanded Perlit. *Ceramics International*, 44, s. 7588-7598. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.01.175>
- Akıncı, H. (2007). Günümüzde uygulanan ısı yalıtım malzemeleri, özellikleri, uygulama teknikleri ve fiyat analizleri. Yüksek Lisans Tezi. Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yapı Eğitimi Anabilim Dalı, Sakarya 218s.
- Akyüncü, V., & Şanlıtürk, F. (2021). Investigation Of Physical And Mechanical Properties Of Mortars Produced By Polymer Coated Perlite Aggregate. *Journal of Building Engineering*, 38. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102182>
- Alam, M., Singh, H., Brunner, S., & Naziris, C. (2014). Experimental Characterisation And Evaluation Of The Thermo-Physical Properties Of Expanded Perlite-Fumed Silica Composite For Effective Vacuum Insulation Panel (VIP) Core. *Energy and Buildings*, 69, s. 442-450. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.11.027>
- Alyousef, R., Benjeddou, O., Soussi, C., Khadimallah, M. A., & Jedidi, M. (2019). Experimental Study of New Insulation Lightweight Concrete Block Floor Based on Perlite Aggregate, Natural Sand, and Sand Obtained from Marble Waste. *Advances in Materials Science and Engineering*, s. 1-14. doi:<https://doi.org/10.1155/2019/8160461>
- Altuncı, Y. T., Öcal, C., Saphioğlu, K., İnce, H. K., Çevikbaş, M. (2021). Genleştirilmiş Cam Agregalı ve Genleştirilmiş Perlit Agregalı Şap Harçlarının Performans Özelliklerinin Belirlenmesi. *El-Cezeri Journal of Science and Engineering*, 8(1), s.11-20. doi:10.31202/ecjse.753475
- Amran, M., Fediuk, R., Murali, G., Vatin, N., & Al-Fakih, A. (2021). Sound-Absorbing Acoustic Concretes: A Review. *Sustainability*, 13, s.1-36. <https://doi.org/10.3390/su131910712>
- Anuja N., Priya N. A., Jeganmurugan, P. & Rameswari, A. S. (2022). Investigation on the Acoustic Behaviour of Perlite in Concrete. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1086, doi:10.1088/1755-1315/1086/1/012042
- Argunhan, Z., & Oktay, H. (2016). Investigation Of The Thermal And Acoustic Performance Of Perlite- Based Building Materials. *European Journal of Technic*, 6(1), s. 26-36.
- Arslan, M. A., & Aktaş, M. (2018). İnşaat Sektöründe Kullanılan Yalıtım Malzemelerinin Isı ve Ses Yalıtımı Açısından Değerlendirilmesi. *Politeknik Dergisi*, 21(2), s. 299-320. doi:doi: 10.2339/politeknik.407257
- Azizi, S. (2007). Perlit katkılı hafif betonların mekanik özellikleri ve ısı yalıtımı. Yüksek Lisans Tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul 83s.
- Baba, E. (2018). Hafiflik, ekonomiklik, ısı yalıtımı ve yeterli basınç dayanımı unsurları taşıyan kompozit malzeme üretimi . Yüksek Lisans Tezi.Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Kocaeli 75s.
- Balbuena, J., Sánchez, M., Sánchez, L., Cruz-Yusta, M. (2024). Lightweight Mortar Incorporating Expanded Perlite, Vermiculite, and Aerogel: A Study on the Thermal Behavior. *Materials*, 17(3), <https://doi.org/10.3390/ma17030711>

- Başar, F. S., & Acartürk, B. (2022). Perlit Katkılı Seramik Bünye Özelliklerinin Araştırılması. Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi, 22(5), s. 1149-1156. <https://doi.org/10.35414/akufemubid.1115439>
- Bayraktar, D., & Bayraktar, E. A. (2016). Mevcut Binalarda Isı Yalıtımı Uygulamalarının Değerlendirilmesi. Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 7(1), s. 59-66.
- Benjeddou, O., Ravindran, G., & Abdelzaher, M. A. (2023). Thermal and Acoustic Features of Lightweight Concrete Based on Marble Wastes and Expanded Perlite Aggregate. Buildings, 13(4), s. 992. doi:<https://doi.org/10.3390/buildings13040992>
- Binici, H., & Kalaycı, F. (2015). Production Of Perlite Based Thermal Insulating Material. International Journal of Academic Research and Reflection, 3(7), s. 47-54.
- Bozkurt, N., & Ramazanoğlu, B. (2023). The Screed Design with Pumice and Perlite Components in Zero Energy Building Targets. Zerobuild Journal, 1(2), s. 69-84. doi:Doi: 10.5281/zenodo.8200989
- Bozkurt, T. S., & Demirkale, S. Y. (2020). The Experimental Research of Sound Absorption in Plasters Produced with Perlite Aggregate and Natural Hydraulic Lime Binder. AcousticsAustralia, 48, s. 375-393 . doi:<https://doi.org/10.1007/s40857-020-00203-4>
- Celik, A., Depci, T., & Kılıc, A. (2014). New Lightweight Colemanite-Added Perlite Brick And Comparison Of Its Physicomechanical Properties With Other Commercial Lightweight Materials. Construction and Building Materials, 62, s. 59-66. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.03.031>
- Celik, S., Family, R., & Menguc, M. P. (2016). Analysis Of Perlite And Pumice Based Building Insulation Materials. Journal of Building Engineering, 6, s. 105-111. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2016.02.015>
- Çavdaroğlu, C., Olgun, U., & Altuncu, E. (2024). Use of expanded perlite as green filler for the preparation of EPDM-perlite rubber composites with improved thermal stability and insulation properties. Polymer Composites, <https://doi.org/10.1002/pc.28665>
- Çelik, D. N., & Durmuş, G. (2022). The Development Of Ultralightweight Expanded Perlite-Based Thermal Insulation Panel Using Alkali Activator Solution. Frontiers of Structural and Civil Engineering, 16(11), s. 1486-1499. doi:<https://doi.org/10.1007/s11709-022-0881-6>
- Davraz, M., Koru, M., Akdağ, A., Kılınçarslan, Ş., Delikanlı, Y., & Çabuk, M. (2020). Investigating The Use Of Raw Perlite To Produce Monolithic Thermal Insulation Material. Construction and Building Materials, 263(120674). doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120674>
- Demir, I., & Başpınar, M. S., & Kahraman, E. (2018). Production of Insulations and Construction Materials from Expanded Perlite. Proceedings of 3rd International Sustainable Buildings Symposium (ISBS 2017), s.24-32, DOI:10.1007/978-3-319-63709-9_3
- Diao, R., Cao, Y., Sun, L., Li, J. Michel, M. M., Xu, C., & Yang, F. (2024). Energy Consumption of Hollow Bucket Walls Filled With Different Insulation Materials. Applied Thermal Engineering, 250, <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.123427>
- Fenoglio, E., Fantucci, S., Serraa, V., Carbonarob, C., & Pollob, R. (2018). Hygrothermal And Environmental Performance Of A Perlite-Based Insulating Plaster For The Energy Retrofit Of Buildings. Energy and Buildings, 179, s. 26-38. doi:<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.08.017>
- Gandagea, A., Raob, V., Sivakumarc, M., Vasan, A., Venud, M., & Yaswanthe, A. B. (2013). Effect Of Perlite On Thermal Conductivity Of Self Compacting Concrete. Pr Cedia - S Cial and Behavioral Sciences, 104, s. 188-197. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2013.11.111>
- Gao, H., Liu, H., Liao, L., Lefu Mei, P. S., Xi, Z., & Lv, G. (2019). A Novel İnorganic Thermal Insulation Material Utilizing Perlite Tailings. Energy & Buildings, 190, s. 25-33. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.02.031>
- Hamza, A., & Kocserha, I. (2020, April). The effect of expanded perlite on fired clay bricks. Journal of Physics: Conference Series (Vol. 1527, No. 1, p. 012032). IOP Publishing
- Kabay, N., & Kızılkant, A. B. (2019). Mekanik ve Fiziksel Özellikleri Bakımından Genleştirilmiş Perlit Agregalı Hafif Blok. Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi, 24(3), s. 47-58. <https://doi.org/10.17482/uumfd.451045>

- Karadayı, T. T., & Yüksek, İ. (2016). Yapılarda Isı Yalıtım Malzemeleri Seçimi Üzerine Bir Araştırma. *Tesisat Dergisi*, 242, s. 90-102.
- Karademir, A. Ç., & Dağ, A. (2021). Sürdürülebilirlik Uygulaması Olarak Yeşil Bina ve LEED Sertifikasyonu Üzerine Türkiye İnşaat Sektöründe Bir Çalışma. *Akademia Doğa ve İnsan Bilimleri Dergisi*, 7(1), s. 63-83.
- Kong, X., Yao, C., Jie, P., Liu, Y., Qi, C., & Rong, X. (2017). Development And Thermal Performance Of An Expanded Perlite-Based Phase Change Material Wallboard For Passive Cooling In Building. *Energy and Buildings*, 152, s. 547-557. doi:<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.06.067>
- Liu, W., Apel, D., & Bindiganavile, V. (2014). Thermal Properties Of Lightweight Dry-Mix Shotcrete Containing Expanded Perlite Aggregate. *Cement & Concrete Composites*, 53, s. 44-51. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.06.003>
- Lin, Y., Li, X., Huang Q. (2021). Preparation and Characterization of Expanded Perlite/Wood-Magnesium Composites as Building Insulation Materials. *Energy and Buildings*, 231, s.1-9, <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110637>
- Lu, Z., Xu, B., Zhang, J., Zhu, Y., Sun, G., & Li, Z. (2014). Preparation And Characterization Of Expanded Perlite/Paraffin Composite As Form-Stable Phase Change Material. *Solar Energy*, 108, s. 460-466. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2014.08.008>
- Maaloufa, Y., Mounir, S., Khabbazi, A., & Kettar, J. (2016). Effect Of Calcination On The Thermal Properties Of Bricks Done From Clay- Expanded Perlite On Insulation Walls. *Journal Of Thermal Science and Engineering*
- Makrygiannis, I., Tsetsekou, A. (2022). Effect of Expanded Perlite in the Brick Mixture on the Physicochemical and Thermal Properties of the Final Products. *Journal of Composites Science*, 6(7), 211. <https://doi.org/10.3390/jcs6070211>
- Nastac, S., Nechita, P., Debeleac, C., Simionescu, C. & Seciureanu, M. (2022). The Acoustic Performance of Expanded Perlite Composites Reinforced with Rapeseed Waste and Natural Polymers. *Sustainability*, 14, s.1-17. <https://doi.org/10.3390/su14010103>
- Nechita, P., & Ionescu, Ş. M. (2018). Investigation On The Thermal Insulation Properties Of Lightweight Biocomposites Based On Lignocellulosic Residues And Natural Polymers. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 31(11), s. 1497-1509. doi:<https://doi.org/10.1177/0892705717738300>
- Oktay, H., Yumrutaş, R., & Akpolat, A. (2015). Mechanical And Thermophysical Properties Of Lightweight Aggregate Concretes. *Construction and Building Materials*, 96, s. 217-225. doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.08.015>
- Oliveiraa, A. G., Jrb, J. C., Rochaa, E. B., Sousaa, A. M., & Silvab, A. L. (2019). Evaluation Of Expanded Perlite Behavior In PS/Perlite Composites. *Applied Clay Science*, 181. <https://doi.org/10.1016/j.clay.2019.105223>
- Özer, N., & Özgünler, S. A. (2019). Yapılarda Yaygın Kullanılan Isı Yalıtım Malzemelerinin Performans Özelliklerinin Duvar Kesitleri Üzerinde Değerlendirilmesi. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 24(2), s. 25-48. doi:10.17482/uumfd.438738
- Patricia Guijarro-Miragaya 1, D. F., Atanes-Sánchez, E., & Zaragoza-Benzal, A. (2023). Characterization of a New Lightweight Plaster Material with Superabsorbent Polymers and Perlite for Building Applications. 13(7), s. 1641. doi:<https://doi.org/10.3390/buildings13071641>
- Petrella, A., Gisi, S. D., Clemente, M. E., & Todaro, F. (2022). Experimental Investigation on Environmentally Sustainable Cement Composites Based on Wheat Straw and Perlite. *Materials*, 15(2), s. 453. <https://doi.org/10.3390/ma15020453>
- Pichór, W., & Janiec, A. (2009). Thermal Stability Of Expanded Perlite Modified By Mullite. *Ceramics International*, 35, s. 527-530. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2007.10.008>
- Rajia, M., Nekhlaouic, S., Hassanid, I.-E. E., Essassia, E. M., Essabira, H., Rodriguee, D., . . . Qaissa, A. e. (2019). Utilization Of Volcanic Amorphous Aluminosilicate Rocks (Perlite) As Alternative Materials In Lightweight Composite. *Composites Part B*, 165, s. 47-54. doi:<https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.11.098>

- Ramazanoğlu, B. (2020). Yalıtım şaplarında bitlis yöresi pomza taşının perlit ile birlikte kullanımının incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi. Bitlis Eren Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Bitlis 80s.
- Rashad, A. M., Khalil, M. H., El-Nashar, M. H. (2021). Insulation Efficiency of Alkali-Activated Lightweight Mortars Containing Different Ratios of Binder/Expanded Perlite Fine Aggregate. *Innovative Infrastructure Solutions*, 6(156), S. 1-14. <https://doi.org/10.1007/s41062-021-00524-x>
- Sagbaş, A., & Başbuğ, B. (2018). Sürdürülebilir Kalkınma Ekseninde Enerji Verimliliği Uygulamaları: Türkiye Değerlendirmesi. *European Journal of Engineering and Applied Sciences*, 1(2), s. 43-50.
- Skubic, B., Lakner, M., & Plazl, I. (2013). Sintering Behavior of Expanded Perlite Thermal Insulation Board: Modeling and Experiments. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 53, s. 10244-10249. <https://doi.org/10.1021/ie400196z>
- Sun, D., & Wang, L. (2015). Utilization Of Paraffin/Expanded Perlite Materials To Improve Mechanical And Thermal Properties Of Cement Mortar. *Construction and Building Materials*, 101(1), s. 791-796. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.123>
- Şengül, O., Azizi, S., Karaosmanoğlu, F., & Taşdemir, M. (2011). Effect of Expanded Perlite On The Mechanical Properties And Thermal Conductivity of Lightweight Concrete. *Energy and Buildings*, 43(2-3), s. 671-676. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.11.008>
- Topçu, İ., & Işıkdag, B. (2007). Manufacture Of High Heat Conductivity Resistant Clay Bricks Containing Perlite. *Building and Environment*, 42(10), s. 3540-3546. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2006.10.016>
- Topçu, İ., & Işıkdag, B. (2008). Effect Of Expanded Perlite Aggregate On The Properties Of Lightweight Concrete. *Journal of Materials Processing Technology*, 204, s. 34-38. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.10.052>
- Tsaousi, G.-M., Sakkas, K. M., Douni, I., & Pnias, D. (2015,May). Development of lightweight insulating building materials. *An ECI Conference*, (s. 93-98).
- Uluer, O., Karaağaç, İ., Aktaş, M., Durmuş, G., Ağbulut, Ü., Khanları, A., & Çelik, D. N. (2018). Genleştirilmiş Perlitin Isı Yalıtım Teknolojilerinde Kullanılabilirliğinin İncelenmesi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 24(1), s. 36-42. doi: 10.5505/pajes.2017.61687
- Vaou, V., & Pnias, D. (2010). Thermal Insulating Foamy Geopolymers From Perlite. *Minerals Engineering*, 23(14), s. 1146-1151. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2010.07.015>
- Wang, M., Liu, S., Han, J., Bai, R., Gao, W., & Zhou, M. (2024). A novel capric-stearic acid/expanded perlite-based cementitious mortar for thermal energy storage. *Solar Energy*, 273, <https://doi.org/10.1016/j.solener.2024.112501>
- Yapıcı, F., Özçifçi, A., Gencer, A., & Kurt, Ş. (2011). The Effect Of Expanded Perlite On Thermal Conductivity Of Medium Density Fiberboard (MDF) Panel. *Technology*, 14(2), s. 47-51.
- Yıldız, N. (2014). Perlit. *Madencilik Türkiye Dergisi*, s. 100-102.
- Yılmaz, S., & Özdeniz, M. (2005). The Effect Of Moisture Content On Sound Absorption Of Expanded Perlite Plates. *Building and Environment*, 40, s. 311-318. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2004.07.004>
- Zou, J., Zheng, K. & Li, S. (2024). Research on A Kind of Lightweight Heat-insulating, Sound-insulating and Light-Transmitting Concrete Interior Partition Wall Block. *Academic Journal of Science and Technology*, 10(1).
- Zukowski, M., & Haese, G. (2010). Experimental And Numerical Investigation of A Hollow Brick Filled With Perlite Insulation. *Energy and Build*, 42(9), s. 1402-1408. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.03.009>



Kahramanmaraş Sütçü İmam University

Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 08.05.2024
Kabul Tarihi : 15.10.2024

Received Date : 08.05.2024
Accepted Date : 15.10.2024

İNŞAAT SEKTÖRÜ YAPIM İŞLERİNDE ERGONOMİK RİSKLER VE ÖNLEMLER: İSTANBUL METRO ŞANTIYESİ ÖRNEĞİ

ERGONOMIC RISKS AND PRECAUTIONS IN CONSTRUCTION WORKS: EXAMPLE OF ISTANBUL METRO CONSTRUCTION SITE

Gülizar HOŞTEN^{1*} (ORCID: 0000-0001-7290-3936)
Canan AYDOĞDU² (ORCID: 0000-0001-5971-5826)

¹ İstanbul Aydın Üniversitesi, Sağlık Hizmetleri Meslek Yüksek Okulu, İstanbul, Türkiye

² İstanbul Aydın Üniversitesi, Lisansüstü Enstitüsü İş Sağlığı ve Güvenliği Programı, İstanbul, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Gülizar HOŞTEN, guluzarhosten@aydin.edu.tr

ÖZET

İş kazalarının en sık yaşandığı sektörlerden biri olan inşaat sektörü yapım işlerinde iş kazalarının ve meslek hastalıklarının ortaya çıkmadan önlem alınmasında ergonomik risk etmenlerinin belirlenerek çözüm önerilerinin geliştirilmesi, çalışanın mutluluğu kadar işyerinin ve ülkenin ekonomik göstergelerinin iyileşmesi açısından da önemlidir. Bu çalışmanın ana amacı mavi yakalı çalışanların dinamik ve statik duruşlarını gözlemleyerek ergonomik risklerini hızlı tüm vücut değerlendirmesi (REBA) yöntemini kullanarak belirlemek, iyileştirme önerileri sunmak ve iş kazaları ile kas iskelet sistemine bağlı ortaya çıkan meslek hastalıkları arasındaki ilişkiyi inceleyerek kas iskelet sistemi rahatsızlıkları (KİSR) farkındalığı oluşumuna katkı sağlamaktır. Çalışmada 19 duruş incelenmiş ve bunların 14 tanesi yüksek veya çok yüksek risk seviyesinde tehlikeli çıkmıştır. Risk seviyelerinin bu kadar yüksek çıkmasının en önemli nedenleri arasında çalışanların kullandıkları el aletleri ve makinelerin ağırlıkları ve vücut duruşlarının değişmesine sebep olmasını gösterebiliriz. Tekrarlanan hareketler ve uzun çalışma saatleri riski artıran diğer etmenlerin başında gelmektedir. Uygun el aletleri, daha fazla makinenin sisteme girmesi ve yapılacak idari düzenlemeler çalışanların KİSR azaltarak ortaya çıkacak iş kazalarını da engelleyeceği sonucuna ulaşılmıştır.

Anahtar Kelimeler: İnşaat yapım işleri, Ergonomi, REBA, Kas-iskelet sistemi hastalıkları.

ABSTRACT

In the construction industry, which is one of the sectors with the highest number of occupational accidents, identifying ergonomic risk factors and developing solutions to take precautions before occupational accidents and diseases occur is important for the happiness of the employee as well as for the improvement of the economic indicators of the workplace and the country. The main purpose of this study is to determine ergonomic risk scores using the Rapid Entire Body Assessment (REBA) method, which is one of the methods used to determine ergonomic risks by observing the dynamic and static postures of blue-collar employees during their work, and to provide improvement suggestions, as well as to prevent musculoskeletal system occupational diseases and work accidents. This study aims to contribute to the awareness of musculoskeletal disorders (MSD) by examining their relationship. 14 of the 19 postures examined in our study were dangerous at high and very high-risk levels. One of the most important reasons for this situation are the changes in body postures of employees due to the hand tools and machines they use and the weights of them. Repetitive movements and long working hours are other factors that increase the risk. It has been concluded that appropriate hand tools, introducing more machines into the system, and administrative arrangements will reduce the MSD of employees and prevent occupational accidents.

Keywords: Construction Works, ergonomic, REBA, musculoskeletal system diseases.

GİRİŞ

Sağlıklı ve kaliteli bir yaşam, ancak iş hayatında da çalışanın sağlıklı ve güven içerisinde çalışmasının sağlanmasıyla mümkün olabilir. Çalışma süresince can güvenliğini korumak çalışan bireyin olduğu kadar işverenin ve devletin de görevidir. Çalışma ortamı nedeniyle ortaya çıkan meslek hastalıkları ve iş kazalarının saptanması, bildirilmesi, önlenmesi ile ilgili süreçlerde iyileştirmeler yapılması için ülkemizde kanunlar kapsamında eylem planları yapılmaktadır (Kalkınma Bakanlığı İSG Raporu, 2018).

İnşaat sektörü; ülkelerin gelişimine, ekonomisine ve ulusal veya uluslararası anlamda birçok farklı ticari faaliyete doğrudan katkı sağlayan çok önemli bir alandır. Literatürde, birçok işin aynı anda şantiye adı verilen çalışma alanlarında farklı çalışanlar tarafından yürütülmesinin ölüm, geçici veya sürekli iş görememezlik ile sonuçlanan iş kazalarına neden olduğu, diğer sektörlerle karşılaştırıldığında çalışanların yaşadıkları iş kazaları veya yakalandıkları meslek hastalıklarının daha çok olduğu ortaya konulmuştur (Ringen & Stafford, 1996; Tam vd., 2004; Im vd., 2009; Ceylan, 2014; Uzdil, & Güllüoğlu, 2020; Zorlutuna & Kılıç, 2022).

İnşaat işlerinde risk etmenlerine bakıldığında; hızlı tamamlanması gereken işler, birçok farklı alanda eşzamanlı olarak yapılan çalışmalar, geniş bir makine ve ekipmanın kullanıldığı, başta ergonomik riskler olmak üzere pek çok farklı riski bünyesinde bulunduran bir çalışma koludur.

İnşaat sektöründe makine, ekipman ve iş yeri faktörlü kazalarda kullanılan araçların bakımının zamanında yapılmaması, çalışana uygun iş ve ekipman sağlanmaması, uygun olmayan ısı, gürültü, aydınlatmanın yanı sıra stres, uzun çalışma saatleri, çalışanın fiziksel yapısının üzerinde iş verilmesi, çalışanın deneyimsizliği, tekrarlayan hareketler, kötü postür gibi olumsuz ergonomik koşulların oluşturduğu riskler en sık görülenlerdir (Aksüt vd., 2020; Çetinkaya & Baykent, 2020; Felekoğlu & Taşan, 2017).

İnşaat sektöründe çalışanların en çok şikâyet ettiği özellikle boyun, sırt, el ve kol ile bacak ve ayaklarda görülen kas iskelet sistemi kaynaklı ağrıların temel nedenlerine bakıldığında tekrarlanan hareketler, çalışma hızı, ergonomik olmayan aletlerin kullanımının sebep olduğu; kas, tendon, bağ ve eklemlerde ortaya çıkan, vücudun nöro-kas-iskelet yapılarını etkileyebilen zamanla daha kötüye gidebilen inflamatuvar bir durum olduğu bilinmektedir (Mohan vd. 2015). Kas-iskelet sistemine bağlı hastalıklar; eklemlerde ödem, kaslarda güçsüzlük, kızarıklık veya karıncalanma gibi belirtilerle kısa zamanda kendisini gösterebildiği gibi yıllar içinde yavaş yavaş da ortaya çıkabilir (Harkness vd., 2005; Atasoy vd., 2010).

Literatür tarandığında, sahada işin çeşitli aşamalarında yer alan inşaat işçilerinin bedensel ve zihinsel olarak karşı karşıya kaldıkları sorunları aşmak için çözüm üretmeye yardımcı olan ergonomi biliminin çalışanları hem kendilerini hem de çalıştıkları ortamı güvenli hale getirerek onların verimliliğini artırmayı hedeflediğinin vurgulandığı görülmektedir. Ergonomik önlemler işveren açısından değerlendirildiğinde, çalışanların üretkenliğini artırmada ve kaza ve yaralanmalarda azalma, dolayısıyla tazminat miktarında azalma sağlamaktadır. Çalışanın zihinsel stresini ve kas-iskelet sistemi ağrısını azalttığı işe devamsızlık yapmadan daha sıkı çalışmalarını sağladığı, iş yerine güven seviyesinin artmasıyla çalışanın verimliliğinin arttığı ve büyük kaza ve yaralanmaların azaldığı yapılan çalışmalarda görülmektedir (Jaffar vd., 2011; Torghabeh vd., 2013; Ishwarya & Rajkumar, 2021).

Ergonomik risklerin değerlendirilerek çözümler üretilebilmesi için farklı birçok risk analiz yöntemi bulunmaktadır. Çalışanların çalışma sırasındaki duruşlarını analiz etmek amacıyla kullanılan ergonomik risk yöntemlerinden ilki kişisel anket yöntemidir. Ülkemizde de en çok tercih edilen yöntemlerden biri olan Cornell Kas İskelet Sistemi Rahatsızlıkları (KİSR) taramasının yanı sıra İskandinav Kas İskelet Sistemi (KİS) anketi ve Alman Kas İskelet Sistemi (KİS) rahatsızlık anketi bu yöntem için örnek olarak verilebilir. İkinci yöntem yüksek maliyeti ile çalışma sırasındaki hareket ve duruşları analiz edebilmek için kullanılan, vücut bölümleri hakkında ayrıntılı sayısal veriler verebilen elektromiyografi, açıölçer, optik araçlar ve biyomekanik analiz gibi ölçüm ekipmanlarının kullanıldığı direk ölçüm yöntemidir. Üçüncü yöntem ise çalışma sırasında çalışanın gözlemlenerek fotoğraflandığı, basit veya bilgisayar tabanlı programlarla gerçekleştirilebilen gelişmiş yöntemlerin kullanıldığı yöntem olan sistematik gözlem yöntemidir (Özel & Çetik, 2010; Hignett & Mcatamney, 1999).

Basit sistematik yöntemlerden biri Hignett ve McAtamney (1999), tarafından geliştirilen Hızlı Tüm Vücut Değerlendirmesi İngilizce ismi ile Rapid Entire Body Assessment (REBA) yöntemidir. Araştırmacıların çalışanın tüm vücut duruşunu, kas ve iskelet sistemi üstünde tehlike oluşturan hareketler açısından hızlıca değerlendirmek amacıyla

geliştirdikleri bu yöntem gözlemsel bir analiz yöntemidir. Çalışanın çalışma sırasındaki duruşları analiz edilirken normalden fazla fiziksel güç gerektiren, zorlayıcı, uzun süreli ve tekrarlayan hareketlere öncelik verilerek yapılmaktadır (Gök, 2021; Neşeli, 2016).

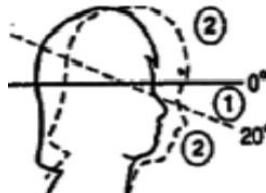
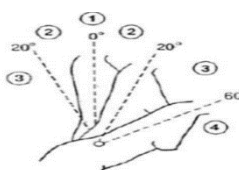
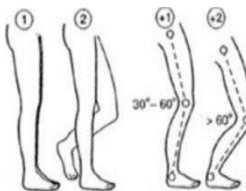
İş yaşantısında işverenler iş sağlığı ve güvenliği kanunları kapsamında risk analizleri yaparak önlem almak zorundadır. Fiziksel, kimyasal, biyolojik risklere karşı risk analizleri yapılmasına rağmen ergonomik risklerin analizleri çoğunlukla ötelenmektedir. Türkiye’de inşaat sektöründe kaynak işleri, duvar örme, yol inşaatı gibi belirli alanlara yönelik ergonomik risk analizleri ile ilgili çalışmalar olmasına rağmen hem çalışanların hem de işverenlerin ergonomik riskleri anlamaları için daha fazla araştırma yapılmasına ihtiyaç vardır. İnşaat sektörü yapım işleri her şantiyede yapılan işler, kullanılan malzemeler, ekipman farklılıkları, şantiye sahasındaki farklılıklar gibi nedenlerle farklılık gösterebilmektedir. Bu nedenle bu çalışma, bu alandaki boşluğu doldurmak ve Türkiye gibi gelişmekte olan ülkelere öncülük etmek amacıyla planlanmıştır.

Bu çalışmanın ana amacı inşaat sektörü yapım işlerinde çalışanların çalışmaları sırasındaki duruşlarını gözlemleyerek REBA ergonomik risk analiz yöntemi ile ergonomik risk skorlarını belirlemek ve çalışanların kas iskelet sistemi rahatsızlıklarını önlemek amacıyla iyileştirme önerileri sunmaktır. Bu çalışmada ayrıca meslek hastalıklarından biri olan KİSR farkındalığının oluşturulmasına katkı sağlanması amacıyla KİSR ile iş kazaları arasındaki ilişki incelenmiştir.

MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışmada, katılımcıların maruz kaldıkları ergonomik risklerin belirlenmesi amacıyla yapılan risk analizi hem durağan hem de dinamik çalışma pozisyonları için, tüm vücut analizini kapsayan REBA analiz yöntemi ile yapılmıştır. Yapılan literatür araştırmasında inşaat sektöründe REBA yönteminin ergonomik risk analizleri için önerilen yöntemlerden biri olduğu tespit edilmiştir (Vachhani vd., 2016; Kulkarni & Devalkar, 2018; Torghabeh vd., 2020).

Tablo 1. REBA Yöntemi Ergonomik Risk Analizi Grup A Hesaplamaları

REBA boyun hareketleri puanları	Hareket	Puan	Değişim puanı
	0°-20° bükülme	1	Boyunda esneme
	>20° bükülme veya yana dönme veya esneme varsa	2	yana dönme varsa +1
REBA gövde hareketleri puanları	Hareket	Puan	Değişim puanı
	Dik	1	Gövdede dönme
	0°-20° bükülme veya esneme	2	veya yana esneme varsa +1
	20°-60° bükülme, esneme	3	
	20°-60° bükülme, esneme	4	
REBA bacak hareketleri puanları	Hareket	Puan	Değişim puanı
	Çift yönlü yük taşıma, oturma veya yürüme	1	Dizlerde 30° ile 60° arasında bükülme varsa +1
	Tek yönlü ağırlık taşıma veya sabit olmayan duruş	2	Dizler >60° 'den daha fazla bükülüyorsa +2

Hignett ve McAtamney (1999), tarafından üç aşamalı bir risk değerlendirmesi çalışması olarak geliştirilen REBA'nın tablolar ile anlatımı aşağıdaki gibidir. Çalışmada ilk olarak Grup A olarak adlandırılan önce boyun, sonra gövde ve en son bacaklar için ayrı ayrı risk puanlaması yapılması gerekir (detaylar Tablo 1’de görülebilir).

Tablo 2. REBA Yöntemi Ergonomik Risk Analizi Tablo A Hesaplamaları

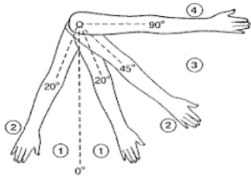
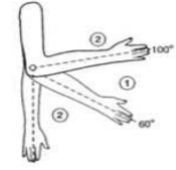
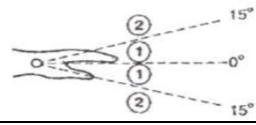
TABLO A		BOYUN											
		1 BACAĞ				2 BACAĞ				3 BACAĞ			
		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
GÖVDE	1	1	2	3	4	1	2	3	4	3	3	5	6
	2	2	3	4	5	3	4	5	6	4	5	6	7
	3	2	4	5	6	4	5	6	7	5	6	7	8
	4	3	5	6	7	5	6	7	8	6	7	8	9
	5	4	6	7	8	6	7	8	9	7	8	9	9

Tablo 3. REBA Kuvvet/Yük Puanları

Yük/Kuvvet	Puan
<5 kilogram	0
5-10 kilogram	1
> 10 kilogram	2
Ani/ Hızlı kuvvet artışı	+1

Sonraki aşamada Grup B olarak değerlendirilen kollar (üst kol ve alt kol) ile el bilekleri için analizler yine ayrı ayrı yapılarak hesaplanan puanlar B puanları tablosuna yerleştirilir. Bulunan puana çalışma sırasında kullanılan ekipman veya el aletinin kavrayış puanı eklenerek Tablo B puanı bulunur (detaylar Tablo 4,5 ve 6'da görülebilir).

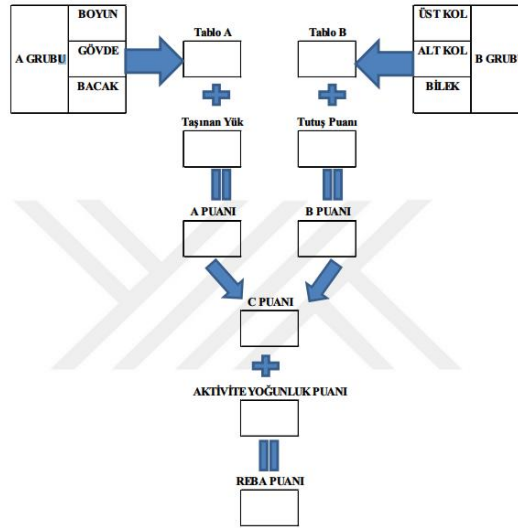
Tablo 4. REBA Yöntemi Ergonomik Risk Analizi Tablo B hesaplamaları

REBA kol hareketleri puanları	Hareket	Puan	Değişim puanı
	0°-20° esneme 0°-20° bükülme 20°-45° bükülme >20° esneme 45°-90° bükülme >90° bükülme	1 2 3 4	Omuzları yukarı kalkık ise +1 Kol hareketi engelleniyorsa +1 Kollar destekleniyorsa veya yardımcı çalışma var ise -1
REBA alt kol hareketleri puanları			
	60°- 100° bükülme <60° bükülme veya > 100° bükülme	1 2	Bükülme var ise +1 puan Bükülme var ise +2 puan
REBA el bileği hareketleri puanları			
	0°-15° esneme/bükülme >15° esneme/bükülme	1 2	Bilek dönmesi +1

Tablo 8. REBA Yöntemi Aktivite Yoğunluk Puanı

Aktivite	Puan
Vücut bölümlerinden bir veya daha fazlası sabit (1 dakikadan daha fazla tutma)	+1
Kısa aralıklarla yapılan işler 1 dakikada 4 defadan fazla tekrarlama- sabit konum)	+1
Yapılan iş vücudun duruşunda hızlı ve büyük değişikliğe neden oluyorsa veya dengede olmayan duruş	+1

Çalışanın tüm vücut bölgelerinin hareketleri değerlendirilerek hesaplanan REBA puanı analizi yapan uzmana çalışanın aldığı riskin kabul edilebilirlik seviyesini gösterecektir. Şekil 1’de REBA akış şeması gösterilmiştir. Yapılan analizde elde edilen puanlamaya göre risk seviyesi 1 (önemsiz) ile 11+ (çok yüksek) aralığında dağılım göstererek önlem alma seviyesini gösterir (detaylar Tablo 9’da gösterilmiştir).



Şekil 1. REBA Skoru

REBA puanına bağlı alınması gereken önlemler REBA risk değerlendirme tablosunda hesaplanan aktivite seviyesine göre öncelikli olarak belirlenir.

Tablo 9. REBA Risk Değerlendirme Tablosu

Aktivite Seviyesi	REBA puanı	Risk	Aktivite
0	1	Önemsiz	Önlem gerekmez
1	2-3	Düşük	Önlem gerekebilir
2	4-7	Orta	Önlem gerekli
3	8-10	Yüksek	Çok kısa zamanda önlem gerekli
4	11-15	Çok yüksek	Acil önlem gerekli

İstanbul Büyükşehir Belediyesi (İBB) Raylı Sistem Müdürlüğüne bağlı, yerin 30-150 metre altında değişik derinliklerde, toplam 56622 m² alan üstünde, 89 beyaz ve 331 mavi yakalı toplam 420 personelle yürütülen metro yapımı çalışmalarında günlük 18 saat çalışma yapılmaktadır. Çalışma saatleri gündüz vardiyaları için 08:00-18:00

ve gece vardiyaları için 20:00-06:00 arasındadır. Çalışmalarda bir saat öğle arası ve 15'er dakikalık iki çay molası verilmektedir. Çalışmalar hafta sonu da sürmekte ve her çalışan iki haftada bir pazar günü de çalışmaktadır.

Çalışmamızda metro inşaatı yapım işlerinde çalışan 19 işçi temmuz ağustos ayları arasında kalan iki aylık sürede gözlemlenmiş ve yaptıkları işlerin duruşları anlaşılmaya çalışılmıştır. Çalışma sırasında bedeni zorlayan eğilme, uzanma gibi hareketler ile vücut yükünün en fazla olduğu, en sık tekrarlanan duruşlar belirlenerek fotoğraflanmış ve kayıt altına alınarak REBA yöntemi kullanılarak analiz edilmiştir.

Ergonomik risk değerlendirilmesi yapılan yapım işleri aşağıdaki gibi sınıflandırılmıştır.

1. Kalıp yapılması
 - 1.1. İç kalıp yapılması
 - 1.2. Dış kalıp yapılması
2. Demirlerin kesilmesi
 - 2.1. Sabit demir makası ile bağ tellerinin kesilmesi
 - 2.2. Hareketli demir makası ile bağ tellerinin kesilmesi
 - 2.3. Farklı kalınlıktaki demirlerin kesilmesi
3. Demirlerin bağlanması
 - 3.1. İstasyon duvar kenarı döşeme demirinin tellerle bağlanması
 - 3.2. İstasyon orta alan döşeme demirinin tellerle bağlanması
 - 3.3. Gidaj perdesi etriye demiri bağlanması
4. Kaynak işleri
 - 4.1. Dış yüzey kaynak yapımı
 - 4.2. İç yüzey kaynak yapımı
5. Demirlerin bükülmesi
 - 5.1. Çapı 14 mm demirin bükülmesi
 - 5.2. Çapı 16 mm demirin bükülmesi
 - 5.3. Çapı 20 mm demirin bükülmesi
 - 5.4. Diyafram perde etriye demir bükülmesi
 - 5.5. Temel sehpa demir bükülmesi
6. Montaj-iksa
 - 6.1. Montaj yapılması için iksa taşınması
 - 6.2. İksa montajı
7. Diğer işler
 - 7.1. Elle çimento harcı hazırlama
 - 7.2. Segment taşları araç ile taşıma



BULGULAR

Materyal ve yöntem kısmında anlatılan REBA risk analizi doğrultusunda, aşağıda hazırlanan tablolarda verilen resimler, işçinin işini yaparken bedeni zorlayan eğilme, uzanma gibi hareketler ile vücut yükünün en fazla olduğu, en sık tekrarlanan duruşlar belirlenerek fotoğraflanmış ve kayıt altına alınarak yöntem doğrultusunda analiz edilmiş resimlerdir. Bu nedenle tek bir işçi için tek bir fotoğraf üstünden işin yapılışına göre diğer etmenler göz önünde tutulup grup skorlarına eklenerek sonucu hesaplanan REBA skorları sırasıyla aşağıdaki çizelgelerde gösterilmiştir (detaylar Tablo 10,11,12,13,14,15 ve16'da görülebilir).




Her iki kalıp yapılmasında da kullanılan çekicinin ağırlığı <5 kilogram ve kavrama gücü orta şiddette olduğu için puan eklenmemiştir. Çalışanın bu aktiviteyi kısa aralıklarla ve sabit olmayan zeminde yapmasından dolayı aktivite puanı "+1" olarak Tablo C skoruna eklenmiştir (detaylar tablo 10'da gösterilmiştir).

Çalışmalarda demir makası ile bağ demirlerinin kesilmesinde kullanılan keski makası 123 cm ve 9 kg ağırlığındadır. Çalışanın makası kullanırken açıp kapatması ve makasın hareketine ve demir buketinin duruş yerine göre çalışanın vücut hareketi değişmektedir. Ekipmanın tutuşunda kavrama orta şiddettedir ve çalışanın bu aktiviteyi kısa aralıklarla yapmaktadır (detaylar tablo 11'de gösterilmiştir).

Tablo 10. Yapım İşlerinde Kalıp Yapılması REBA Yöntemi Ergonomik Risk Analizi




1.Kalp yapılması	Grup A	Tablo A Değeri	Tablo B Değeri	Grup B	Tablo C Skoru	Aktivite Skoru	REBA Skoru	
1.1. İç kalıp yapılması	Gövde	2	4	2+ 1	Üst Kol	5	+1	<u>6</u>
	Boyun Bacaklar Yük/ Kuvvet A Skoru	2 1+1	0	0	2 2	Alt Kol Bilek Kavrama		B Skoru
1.2. Dış kalıp yapılması	Gövde	2+1	2	3	Üst Kol	4	+1	<u>5</u>
	Boyun Bacaklar Yük/ Kuvvet A Skoru	1 1	0	0	2 2	Alt Kol Bilek Kavrama		B Skoru

Tablo 11. Yapım İşlerinde Demirlerin Kesilmesi REBA Yöntemi Ergonomik Risk Analizi

2. Demirlerin kesilmesi	Grup A	Tablo A Değeri	Tablo B Değeri	Grup B	Tablo C Skoru	Aktivite Skoru	REBA Skoru		
2.1. Sabit demir makası ile bağ tel. kesilmesi	Gövde	3	8	3+1	Üst Kol	11	+1	<u>12</u>	
	Boyun Bacaklar Yük/ Kuvvet A Skoru	2+1 2+2	+1	+0	2 2+1	Alt Kol Bilek Kavrama		B Skoru	
2.2. Hareketli demir makası ile bağ tel. kesilmesi	Gövde	2	2	4	2+1	Üst Kol	3	+1	<u>4</u>
	Boyun Bacaklar Yük/ Kuvvet A Skoru	1 1	+1	+0	1 1+1	Alt Kol Bilek Kavrama		B Skoru	
2.3. Farklı kalınlıkta demir kesilmesi	Gövde	4+1	9	6	3+1	Üst Kol	12	+1	<u>13</u>
	Boyun Bacaklar Yük/ Kuvvet A Skoru	2+1 2+1	+2	+0	2 2+1	Alt Kol Bilek Kavrama		B Skoru	



Yapım İşlerinde demirlerin bağlanması için yapılan risk analizinde istasyon döşeme demirinin tellerle bağlanması ilk olarak duvar kenarı, ikinci olarak orta alanda incelenmiştir. Döşeme demiri çalışma yerinin kenarında belden eğilme hareketi ile yapıldığı, çalışma yerinin ortasında bağlandığı zaman ise dizleri kırarak daha farklı bir duruşla bağlandığı için farklı riskler taşımaktadır. Analizde kullanılan ince bağlama teli ve pensenin ağırlığı 5 kilogramın altındadır. Gıda perdesi etriye demiri bağlanmasında da kullanılan alet ve uygulanan güç aynıdır. Demirlerin bağlanma aşaması toprak zemin üzerinde devam ettiği için dizler belli bir açıda kırık, bel devamlı olarak bükük ve kol-dirsek tekrarlı olarak açılıp kapanma durumundadır (detaylar tablo 12'de gösterilmiştir).

Tablo 12. Yapım İşlerinde Demirlerin Bağlanması REBA Yöntemi Ergonomik Risk Analizi

3. Demirlerin bağlanmaları	Grup A	Tablo A Değeri	Tablo B Değeri	Grup B	Tablo C Skoru	Aktivite Skoru	REBA Skoru	
3.1. İstasyon duvar kenarı döşeme demiri tellerle bağlanması	Gövde	4	7	1+1	Üst Kol	7	+1	<u>8</u>
	Boyun Bacaklar Yük/ Kuvvet A Skoru	2 2+1 +0 +0 7	+0 +0 7	1 2+1	Alt Kol Bilek Kavrama B Skoru			
3.2. İstasyon orta alan telle bağlama	Gövde	4	7	1	Üst Kol	7	+1	<u>8</u>
	Boyun Bacaklar Yük/ Kuvvet A Skoru	2 1+2 0 0 7	0 0 7	1 1+1	Alt Kol Bilek Kavrama B Skoru			
3.3. Gıda perdesi etriye demiri bağlanması	Gövde	2+1	6	3+1	Üst Kol	9	+1	<u>10</u>
	Boyun Bacaklar Yük/ Kuvvet A Skoru	2+1 1+1 0 0 6	0 0 7	2 2+1	Alt Kol Bilek Kavrama B Skoru			

Çalışan kaynak işini yaparken kullanılan kaynak makinesi 5 kilogramın altındadır. Dış yüzeyde kaynak yapılırken çalışan ayakta, iç taraftan kaynak yapılırken ise oturarak yapılan kaynak çalışmaları analiz edilmiştir (detaylar tablo 13'de gösterilmiştir).






Tablo 13. Yapım İşlerinde Kaynak Yapımı REBA Yöntemi Ergonomik Risk Analizi

4. Kaynak yapımı	Grup A	Tablo A Değeri	Tablo B Değeri	Grup B	Tablo C Skoru	Aktivite Skoru	REBA Skoru	
4.1. Dış yüzey kaynak yapımı	Gövde	4	8	2	Üst Kol	9	+1	<u>10</u>
	Boyun Bacaklar Yük/ Kuvvet A Skoru	2 2+2 0 0 8	0 0 4	2 2+1	Alt Kol Bilek Kavrama B Skoru			
4.2. İç yüzey kaynak yapımı	Gövde	4	7	1	Üst Kol	7	+1	<u>8</u>
	Boyun Bacaklar Yük/ Kuvvet A Skoru	2 1+2 0 0 7	0 0 3	2 2+1	Alt Kol Bilek Kavrama B Skoru			

Raylı sistem metro yapım işlerinin başında gelen demirin bükülme işlemi farklı aşamada demirin kalınlığına ve bağlanacağı yere göre gerçekleştirilmektedir. Uygulamanın bu kısmında demirin kalınlığına bağlı olarak ince, orta ve kalın demirlerin bükülmesi ayrı ayrı analiz edilmiştir. Diyafram perde etriye demiri bükülmesi işinde çalışan yarı otomatik demir bükme makinesi ile etriye demiri bükme işlemini yapmaktadır. Büküldüğü bir adet demir 20mm çapında, ağırlığı 8,88 kg. x 4 adet toplam 25,52 kg demir aynı anda bükülüp taşınmaktadır. Temel sehpa demiri

bükülmesi içinde de çalışan yarı otomatik demir bükme makinası ile etriye demiri bükme işlemi yapmaktadır. Kesilerek hazırlanmış demirler 26 mm. çapında, 20,84 kg ağırlığındadır (detaylar tablo 14’de gösterilmiştir).

Tablo 14. Yapım İşlerinde Demir Bükülmesi REBA Yöntemi Ergonomik Risk Analizi



5.	Demirlerin bükülmesi	Grup A	Tablo A Değeri	Tablo B Değeri	Grup B	Tablo C Skoru	Aktivite Skoru	REBA Skoru	
5.1.	14 mm demir bükülmesi	Gövde	2	5	2+1	Üst Kol	5	+1	<u>6</u>
		Boyun	2+1		1	Alt Kol			
		Bacaklar	1+1		1+1	Bilek			
		Yük/ Kuvvet		0	+0	Kavrama			
		A Skoru		5		B Skoru			
5.2.	16 mm demirin bükülmesi	Gövde	2+1	8	2+1	Üst Kol	9	+1	<u>10</u>
		Boyun	2+1		1	Alt Kol			
		Bacaklar	2+2		1+1	Bilek			
		Yük/ Kuvvet		0	0	Kavrama			
		A Skoru		8		B Skoru			
5.3.	20 mm demirin bükülmesi	Gövde	4+1	9	2+1	Üst Kol	12	+1	<u>13</u>
		Boyun	2+1		1	Alt Kol			
		Bacaklar	2+1		2+1	Bilek			
		Yük/ Kuvvet		+2	+0	Kavrama			
		A Skoru		11		B Skoru			
5.4.	Diyafram perde etriye	Gövde	2+1	6	3+1	Üst Kol	10	+1	<u>11</u>
		Boyun	1+1		1	Alt Kol			
		Bacaklar	2+1		2+1	Bilek			
		Yük/ Kuvvet		+2	+1	Kavrama			
		A Skoru		8		B Skoru			
5.5.	Temel sehpa demir	Gövde	2+1	7	3+1	Üst Kol	11	+1	<u>12</u>
		Boyun	2+1		2	Alt Kol			
		Bacaklar	2+1		2+1	Bilek			
		Yük/ Kuvvet		+2	+0	Kavrama			
		A Skoru		9		B Skoru			

Yapım işlerinde yer altında açılan tünellerin üst kısmına yerleştirilen iksanın ağırlığı 110-120 kilogram arasındadır. İksanın kaldırılması sırasında çalışanların kavrama gücünün kötü derecede olmasına rağmen mümkün olduğu göz önünde bulundurularak analiz gerçekleştirilmiştir (detaylar tablo 15’de gösterilmiştir).


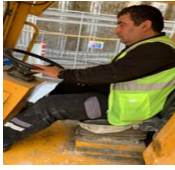
Manuel çimento harcı hazırlanması uygulamasında çalışanın 50 kg standart ağırlıktaki çimento torbalarını çimento makinesinin haznesine boşaltırken yaptıkları duruşlar analiz edilmiştir. Çimento harç hazırlama işlemi için bir defada 6 torba çimento kullanmakta ve işlem gün içerisinde tekrarlanmaktadır (detaylar tablo 16’da gösterilmiştir).

Segment taşlarının MSV aracı ile taşınması uygulamasında çalışan, MSV adlı 22,5 metre uzunluğunda bir araç ile tünel imalatında kullanılan ve şantiyeye üretilmiş hazır olarak gelen segment taşlarını, tünel içine taşımaktadır (detaylar tablo 16’da gösterilmiştir).

Tablo 15. Yapım İşlerinde Montaj-iksa REBA Yöntemi Ergonomik Risk Analizi

6. Montaj-iksa	Grup A	Tablo A Değeri	Tablo B Değeri	Grup B	Tablo C Skoru	Aktivite Skoru	REBA Skoru	
6.1. Montaj yapılması için iksa taşınması 	Gövde	4		2	Üst Kol	11	+1	<u>12</u>
	Boyun	2	8	2	Alt Kol			
	Bacaklar	2+2			Bilek			
	Yük/Kuvvet		2	2	Kavrama			
	A Skoru		10	4	B Skoru			
6.2. İksa Montajı 	Gövde	2+1		3+1	Üst Kol	10	+1	<u>11</u>
	Boyun	2+1	6	7	Alt Kol			
	Bacaklar	1+1			Bilek			
	Yük/Kuvvet		+2	2	Kavrama			
	A Skoru		8	9	B Skoru			

Tablo 16. Yapım İşlerinde Diğer İşler REBA Yöntemi Ergonomik Risk Analizi

7. Diğer işler	Grup A	Tablo A Değeri	Tablo B Değeri	Grup B	Tablo C Skoru	Aktivite Skoru	REBA Skoru	
7.1. Elle çimento harcı hazırlama 	Gövde	2		3	Üst Kol	8	+1	<u>2</u>
	Boyun	1	2	5	Alt Kol			
	Bacaklar	1			Bilek			
	Yük/Kuvvet		2	3	Kavrama			
	A Skoru		4	8	B Skoru			
7.2. Segment taşları araç ile taşıma 	Gövde	2		1	Üst Kol	1	+1	<u>1</u>
	Boyun	1	2	1	Alt Kol			
	Bacaklar	1			Bilek			
	Yük/Kuvvet		0	0	Kavrama			
	A Skoru		2	1	B Skoru			

Yapılan uygulamalar sonucu bulunan REBA puanlarının karşılık geldiği risk seviyesi ve riske bağlı olarak alınması gereken eylem planları hazırlanmıştır (detaylar Tablo 17’de gösterilmektedir).

Çalışma sonucunda metro inşaatı yapım işlerinde çalışan mavi yakalı çalışanların ergonomik olarak önlem gerekebilir olarak değerlendirilen 1 adet düşük, önlem gerekli olduğu sonucuna ulaşılan 4 adet orta, çok kısa zamanda önlem gerekli sonucuna ulaşılan 7 adet yüksek ve acil önlem gerekli olarak değerlendirilen 7 adet çok yüksek risk seviyesine maruz kaldıkları tespit edilmiştir.

Tablo 17. Uygulamaların REBA Risk Analizi Sonuç Tablosu

Yapılan iş	Skor	Risk Seviyesi	Aktivite
İç kalıp çakılması	6	orta	önlem gerekli
Dış kalıp çakılması	5	orta	önlem gerekli
Sabit demir makası ile bağ tellerinin kesilmesi	12	çok yüksek	acil önlem gerekli
Hareketli demir makası ile bağ tellerinin kesilmesi	4	orta	önlem gerekli
Farklı kalınlıktaki demirlerin kesilmesi	13	çok yüksek	acil önlem gerekli
İstasyon duvar kenarı döşeme demirinin tellerle bağlanması	8	yüksek	çok kısa zamanda önlem gerekli
İstasyon orta alan döşeme demirinin tellerle bağlanması	8	yüksek	çok kısa zamanda önlem gerekli
Gidaj perdesi etriye demiri bağlanması	10	yüksek	çok kısa zamanda önlem gerekli
Dış yüzey kaynak yapımı	10	yüksek	çok kısa zamanda önlem gerekli
İç yüzey kaynak yapımı	8	yüksek	çok kısa zamanda önlem gerekli
Çapı 14 mm demirin bükülmesi	6	orta	önlem gerekli
Çapı 16 mm demirin bükülmesi	10	yüksek	çok kısa zamanda önlem gerekli
Çapı 20 mm demirin bükülmesi	13	çok yüksek	acil önlem gerekli
Diyafram perde etriye demir bükülmesi	11	çok yüksek	acil önlem gerekli
Temel sehpa demir bükülmesi	12	çok yüksek	acil önlem gerekli
Montaj için iksa taşınması	12	çok yüksek	acil önlem gerekli
İksa montajı	11	çok yüksek	acil önlem gerekli
Elle çimento harcı hazırlama	9	yüksek	çok kısa zamanda önlem gerekli
Segment taşları araç ile taşıma	2	düşük	önlem gerekebilir

Yapılan REBA analizlerinin sonucunda sabit demir makası kullanılarak demir bağlarının kesilmesi, farklı kalınlıktaki demirlerin kesilmesi, çapı 20 mm olan demirler ile diyafram perde etriye ve temel sehpa demiri bükülmesi, iksa taşınma ve montajı işlerinde çalışan bireylerin ergonomik risklerinin çok yüksek olduğu hesaplanmıştır.

İstasyon duvar kenarı ve orta alan kenarı döşeme demirlerinin tellerle bağlanması, gidaj perdesi etriye demiri bağlanması, dış ve iç kaynak yapımı, 16 mm çaplı demirlerin bükülmesi, ve elle çimento hazırlanması işlerinde çalışanların ergonomik risklerinin seviyesinin yüksek olduğu hesaplanmıştır.

Çalışmamızda; iç ve dış kalıpların çakılması, hareketli demir makası kullanılarak bağ tellerinin kesilmesi ile çapı 14 mm olan demirlerin bükülmesi işlerinde çalışanların ergonomik risk seviyelerinin orta derecede olduğu hesaplanmıştır.

MSV aracı kullanılarak segment taşlarının taşınmasının ise düşük risk seviyesinde olduğu hesaplanmıştır.

TARTIŞMA

İnşaat sektörü sadece ülkemizde değil dünyada da en çok iş kazasının ve meslek hastalığının görüldüğü sektörlerden biri olarak öne çıkmaktadır. Bu sektörde çalışanların çalışma duruşlarının analiz edilerek gerekli önlemlerin alınması, çalışanların yorgunluğu nedeniyle ortaya çıkan iş kazalarını engelleyerek, çalışanların işe devamsızlıklarını ve kaza ya da hastalık nedeniyle durmak zorunda kalan işi ortadan kaldıracak, çalışanların yaşlandıklarında yaşayacakları kas iskelet sistemi kaynaklı hastalıkların da önüne geçerek daha sağlıklı ve kaliteli hayat sürmelerini sağlayacaktır.

Ergonomi, kullanıcıların özellikleri, sınırlamaları ve ihtiyaçlarına göre verimliliklerini, güvenliklerini ve genel sistem performansını optimize etmeye çalışır (Larrea-Araujo vd., 2021). Çalışmamızda 19 duruş analiz edilmiş ve 14 duruşun yüksek veya çok yüksek risk seviyesinde olduğu görülmüştür. Bu çalışmalardan çalışanların KİSR yakalanmalarını engellemek için çok yüksek riskli çalışmalar için acil olarak plan yapılması ve iyileştirme çalışmalarına hemen başlanması, yüksek risk seviyesi çalışmalar için yöneticilerin çok kısa zamanda önlem almaları gerektiği sonucuna ulaşılmıştır. Çalışanların iş yaparken kullandıkları el aletleri veya iş makineleri nedeniyle vücut duruşlarındaki değişimler risk seviyelerinin artmasının en büyük nedenlerinden biridir. Bu bulgular literatürle örtüşmektedir (Torghabeh vd., 2013; Ishwarya & Rajkumar, 2021, Saedpanah vd., 2018; Patial vd., 2022). Çalışanların demir donatıları hareketli makas kullanarak kesmeleri orta seviyede risk oluştururken, sabit makas kullanımları yaptıkları iş için kendi vücut ağırlıklarının da kullanmaları nedeniyle tüm vücutta dengesizlik

oluşturmakta ve risk seviyesini ortadan çok yükseğe çıkarmaktadır. Demir donatılarının kesilmeden önce zemine doğru yerleştirilmesi ve çalışanın işi kişisel kullanımına uygun doğru bir aletle yapması gibi basit bir çözümle ergonomik riskin azalacağı görülmektedir.

Demirlerin bükülmesi içinde bükülen demirin kalınlığına göre kullanılan makineler farklılık göstermektedir. Yapılan analizlerde ergonomik olarak en yüksek seviyede riske sebep olan çalışmaların yere yerleştirilen ve çalışanın bel hizasının altında çalışmaya yol açan makinelerle yapılan işler olduğu hesaplanırken, çalışanın bel hizasına gelen ve sadece ellerini kullanarak yaptığı bükme işleminin vücudun güç kullanmasına gerek duyulmaması nedeniyle orta seviyede riske sebep olduğu hesaplanmaktadır. Bu durum kullanılan makinelerin seçimleri ve yerleşimleri sırasında ergonomik kurallara uymanın önemini göstermekte ve doğru makinelerin kullanılmasının yaşanan sorunu büyük oranda çözeceğini göstermektedir. Tekrarlanan hareketlerin de risk seviyesini arttırdığı bilinmektedir (Gülerer & Sabır, 2022; Aksüt vd., 2020). Çalışma sırasında gözlemlenen çalışanın iş analizi yapıldığında bir saatte ortalama 12 tane demir büküldüğü hesaplanmıştır. Bu analizleri gerçekleştiren araştırmacılar bu oranın azaltılmasının da çalışanın taşıdığı yük miktarını azaltacağı için geçici bir çözüm olarak kullanılabilirliğini düşünmektedirler.

Li vd. (2019) tarafından yapılan bir çalışmada ağır kaldırmaların çalışanın kaza geçirme ihtimalini arttırdığına dikkat çekilerek vücut zorlanmaları nedeniyle iş kazası ve kas iskelet sistemi hastalıklarına sebep olduğu belirtilmiştir. Metro inşaatının yapımı sırasında montaj yapılması için 110-120 kg ağırlığında iksa adı verilen hazırlanmış demir kalıplar taşınması sırasında çalışanların tüm vücuduna yük getirmesinin yanı sıra bu ağırlığı birden fazla kişinin aynı anda dengede taşıyamayacak olması ergonomik açıdan riskin çok yüksek seviyede çıkmasına sebep olmuştur. Bu ağırlıktaki demirlerinin taşınması için forklift gibi bir aracın kullanılması yükü çalışanların üstünden alacağı için riskin düşük seviyeye indirgenmesini sağlayacaktır.

Vücudun zorlandığı ağırlıkların kaldırılması sırasında ortaya çıkan duruşlardaki bozukluk da ergonomik olarak risk seviyesini artıran etmenlerden biridir (Aksüt vd., 2020; Çetinkaya & Baykent, 2020; Liv vd., 2019; Felekoğlu & Taşan, 2017). Montajı yapan çalışanların vücut duruşları incelendiğinde tüm vücutlarını kullanarak ağırlığı elleriyle başlarının üstüne kaldırdıkları ve yerleştirdikleri görülmektedir. Bu çalışmada da iş makinelerinin kullanılması çalışanların maruz kaldıkları çok yüksek seviyedeki ergonomik riski düşürerek KİSR yakalanmalarını engelleyecektir.

Bu çalışmada çalışanların ergonomik açıdan maruz kaldıkları risklerin azaltılması için araştırmacılar tarafından aşağıda sıralanan iyileştirme çalışmaları önerilmektedir:

- Çalışma alanları tekrar düzenlenerek kullanılan makine ve el aletinin sayısını artırmak.
- Tezgâh ve el aletleri gibi iş ekipmanlarını çalışanın ölçülerine uygun olacak şekilde yenilemek veya düzenlemek.
- Çalışanların çalışma sırasındaki duruşlarını optimize ederek ergonomik prensiplere uygun hareket etmeleri için teşvik etmek.
- Çalışanları iş kazaları ve kas iskelet sistemi hastalıklarından koruyabilmek için yaptıkları işle ilgili ergonomi eğitimi vererek ve sürekli bilinçlendirme çalışmaları yapmak.
- Dinlenme ve çalışma sürelerini yorgunluk oluşumunu önleyecek şekilde düzenlemek.
- Duruş bozukluklarının engellemek için kişisel koruyucu ekipmanlar kullanmak.
- Çalışanların vücut zorlanmalarını farklı organlara dağılmasını sağlamak için çalışanları ara ara farklı görevlerde çalıştırmak.
- Uzman hekim aracılığıyla çalışanların sağlık kontrollerini düzenli olarak yapmak ve izlemek.
- Düzenli risk analizi yaparak elde edilen sonuçlar doğrultusunda işyerinde iyileştirmeler yapmak ve rahatsızlık risklerinin azalıp azalmadığını kontrol edilerek gerektiğinde yeni önlemler almak.
- Tüm sektörlerde olduğu gibi inşaat sektöründe de iş güvenliği uzmanlarının sektörün risklerini iyi analiz edilmesi için özellikle tecrübeli çalışanların görüşlerini alarak, çalışan temsilcileriyle birlikte çalışması iş kazalarını ve kas iskelet sistem hastalıklarını daha kolay önüne geçilmesini sağlayacaktır.

SONUÇ

Çalışmamızda metro inşaatı şantiyesinde hem yer altı hem de yer üstünde yapılan çalışmalar sırasında çalışanların duruşları incelenerek ergonomik risk analizi yapılmış ve 19 duruşun 14'ünün yüksek ve çok yüksek risk içerdiği çalışanların özellikle el-bilek, boyun ve bel bölgelerinin yüksek riskli vücut bölgeleri olduğu görülmüştür. Literatür

ışığında araştırmacılar tarafından önerilen önleyici faaliyetlerin yapılmasının iş yerindeki ergonomik riskleri azaltacağı veya tamamen ortadan kaldıracığı düşünülmektedir. Bu iyileştirmelerin yapılması çalışanın iş yerine olan güveninin artması ve güçlü bir güvenlik kültürünün oluşmasını sağlayacak, çalışanın iş verimi artıracığı gibi işyerinin ekonomik zararlarını da azalacaktır.

Bu çalışma inşaat sektörü yapı işleri çalışanlarının karşı karşıya kaldıkları kas iskelet sistemi hastalıklarının ne kadar ciddi olduğunu göstermesi nedeniyle son derece önemlidir. Bu çalışmanın ileride Erdinç vd. (2011) tarafından Türkçeye çevirisi yapılan, çalışanların kendilerinin doldurduğu ve ağrı yaşadıkları vücut organlarını rahatça ifade ettikleri Cornell Kas İskelet Rahatsızlığı Ölçeği gibi kas iskelet sistemi hastalıklarının belirlenmesine yardımcı olan ölçeklerle birleştirilerek bütünlük analizler yapılması gerekli önlemlerin alınarak çalışanların korunması için daha etkili olacaktır. Yapılan bu çalışma gelecekte bilgisayara aktarılmak için çekilen hareketli görüntülerin, özel yazılımlar aracılığıyla sonradan analiz edilerek değerlendirildiği 3D Match, TRAC, Sammie Cad, 3DSSPP gibi gelişmiş gözleme dayalı yöntemlerle analiz edildiği durumlarda çalışanlar ve işverenler açısından daha detaylı sonuçlara ulaşılacağı düşünülmektedir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmada fotoğraflarının kullanılmasına izin veren tüm İBB Metro çalışanlarına teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

- Aksüt, G., Eren, T., Tüfekçi, M. Ergonomik risk faktörlerinin sınıflandırılması: Bir literatür taraması. *Ergonomi*, 2020: 3, 173, 183. <https://doi.org/10.33439/ergonomi.773896>
- Atasoy, A., Keskin, F., Başkesen, N., Tekingündüz, S. (2010). Laboratuvar çalışanlarında işe bağlı kas iskelet sistemi sorunları ve ergonomik risklerin değerlendirilmesi. *Sağlıkta Performans ve Kalite Dergisi*, 2, 90–113. <http://dergipark.gov.tr/spkd/issue/29280/313469>
- Ceylan, H. (2014). Türkiye'de inşaat sektöründe meydana gelen iş kazalarının analizi. *International Journal of Engineering Research and Development*, 6(1), 1-6. <https://doi.org/10.29137/umagd.346068>
- Çetinkaya, F., Baykent, G. (2020). İşyeri çalışma ortamı koşullarının ergonomik yönden incelenmesi (örnek: şekerleme firması). *Uşak Üniversitesi Fen ve Doğa Bilimleri Dergisi*, 1, 15-31.
- Erdinç, O., Hot, K., Özkaya, M. (2011). Turkish version of the Cornell musculoskeletal discomfort questionnaire: Cross-cultural adaptation and validation. *Work*, 39(3), 251-260. doi: 10.3233/WOR-2011-1173.
- Felekoğlu, B., Taşan, S. Ö. (2017). İş ile ilgili kas iskelet sistemi rahatsızlıklarına yönelik ergonomik risk değerlendirme: Reaktif/proaktif bütünlük bir sistematik yaklaşım. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 32(3). <https://doi.org/10.17341/gazimmfd.337625>
- Gök, Y. (2021). REBA-RULA, OWAS VE NIOSH ergonomik risk değerlendirme yöntemlerinin inşaat sektörüne uygulanması ve incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi. İstanbul: İstanbul Yeni Yüzyıl Üniversitesi.
- Gülerer, S., & Sabır, E. C. (2022). Bir konfeksiyon işletmesinde seçilmiş ergonomik risklerin iş sağlığı ve güvenliği kapsamında analizi ve risk değerlendirmesi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 37(1), 237-248. <https://doi.org/10.21605/cukurovaumfd.1095069>
- Harkness, E. F., MacFarlane, G. J., Silman, A. J., McBeth, J. (2005). Is musculoskeletal pain more common now than 40 years ago?: Two population-based cross-sectional studies. *Rheumatology*, 44(7), 890-895. <https://doi.org/10.1093/rheumatology/keh599>
- Hignett, S. and Mcatamney, L. (1999). Rapid entire body assessment (REBA). *Applied Ergonomics*, 31, 201-205, [https://doi.org/10.1016/S0003-6870\(99\)00039-3](https://doi.org/10.1016/S0003-6870(99)00039-3)

- Im, H. J., Kwon, Y. J., Kim, S. G., Kim, Y. K., Ju, Y. S., Lee, H. P. (2009). The characteristics of fatal occupational injuries in Korea's construction industry, 1997–2004. *Safety Science*, 47(8), 1159-1162. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2008.11.008>
- Ishwarya, G. A., Rajkumar, D. (2021). Analysis of ergonomic risk factors in construction industry. *Materials Today: Proceedings*, 37, 2415-2418. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.08.269>
- Jaffar, N., Abdul-Tharim, A. H., Mohd-Kamar, I. F., Lop, N. S. (2011). A literature review of ergonomics risk factors in construction industry. *Procedia Engineering*, 20, 89-97. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.11.142>
- Kulkarni, V. S., & Devalkar, R. V. (2018). Postural analysis of building construction workers using ergonomics. *International Journal of Construction Management*, 19(6), 464–471. <https://doi.org/10.1080/15623599.2018.1452096>
- Larrea-Araujo, C., Ayala-Granja, J., Vinuesa-Cabezas, A., & Acosta-Vargas, P. (2021). Ergonomic risk factors of teleworking in ecuador during the covid-19 pandemic: A cross-sectional study. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(10). <https://doi.org/10.3390/ijerph18105063>
- Li, X., Gül, M., & Al-Hussein, M. (2019). An improved physical demand analysis framework based on ergonomic risk assessment tools for the manufacturing industry. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 70,58-69. <https://doi.org/10.1016/j.ergon.2019.01.004>
- Mohan, V., Justine, M., Jagannathan, M., Aminudin, S. B., Johari, S. (20154). Preliminary study of the patterns and physical risk factors of work-related musculoskeletal disorders among academicians in a higher learning institute. *Journal of Orthopaedic Science*, 20(2), 410-417. <https://doi.org/10.1007/s00776-014-0682-4>
- Neşeli, C. (2016) Ergonomik risk analizi yöntemlerinin karşılaştırılması ve bir kalıp imalat firmasında uygulanması. Yüksek Lisans Tezi. İzmir: İzmir Kâtip Çelebi Üniversitesi.
- Özel, E., Çetik, O. (2010). Mesleki görevlerin ergonomik analizinde kullanılan araçlar ve bir uygulama örneği. *Journal of Science and Technology of Dumlupınar University*, 22, 41-56.
- Patial, R., Gusain, H., Yadav, B. P., Siddiqui, N. A. (2022). A review of ergonomic risk assessment techniques employed in construction industry. *Advances in Construction Safety: Proceedings of HSFEA*, 117-131. https://doi.org/10.1007/978-981-19-4001-9_9
- Ringen, K., & Stafford, E. J. (1996). Intervention research in occupational safety and health: Examples from construction. *American Journal of Industrial Medicine*, 29(4), 314-320. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0274\(199604\)29:4<314::AID-AJIM7>3.0.CO;2-O](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0274(199604)29:4<314::AID-AJIM7>3.0.CO;2-O)
- Saedpanah, K., Motamedzade, M., Salimi, K., Eskandari, T., Samaei, S. E. (2018). Physical risk factors among construction workers by Workplace Ergonomic Risk Assessment (WERA) method. *Archives of Occupational Health*, 2(1), 56-62. <http://aoh.ssu.ac.ir/article-1-56-en.html>
- T.C. Kalkınma Bakanlığı. 11. Kalkınma planı iş sağlığı ve güvenliği çalışma grubu raporu. 2018 <https://www.sbb.gov.tr/wpcontent/uploads/2020/04/IsSagligiGuvenciligiCalismaGrubuRaporu.pdf>
- Tam, C. M., Zeng, S. X., & Deng, Z. M. (2004). Identifying elements of poor construction safety management in China. *Safety Science*, 42(7), 569-586. <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2003.09.001>
- Torghabeh, Z. J., Hosseinian, S. S., Ressang, A. (2013). Risk assessment of ergonomic risk factors at construction sites. *Applied Mechanics and Materials*, 330, 857-861. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.330.857>
- Torghabeh, Z. J., Stentz, T. L., & Jorgensen, M. (2020). Ergonomics investigation of workers in construction glass and glazing trade using the rapid entire body assessment (REBA) method. *International Journal of Advances in Engineering & Technology*, 13(3), 57-71. ©IJAET ISSN: 22311963

Uzdil, O., Güllüoğlu, A. (2020). Türkiye inşaat sektöründe 2016 ve 2017 yıllarında meydana gelen iş kazalarının istatistiksel olarak karşılaştırılması. *International Journal of Advances in Engineering and Pure Sciences*, 32(2), 137-144. DOI: 10.7240/jeps.555736

Vachhani, T. R., Sawant, S. K., & Pataskar, S. (2016). Ergonomics Risk Assessment of Musculoskeletal Disorder on Construction Site. *Journal of Civil Engineering and Environmental Technology*, 3(3), 228-231. p-ISSN: 2349-8404; e-ISSN: 2349-879X

Zorlutuna, A., Kılıç, H. S. (2022). İnşaat sektöründeki ergonomik risklerin değerlendirilmesi ve bir uygulama. *International Journal of Advances in Engineering and Pure Sciences*, 34(1), 14-26. <https://doi.org/10.7240/jeps.876378>



Kahramanmaraş Sütçü İmam University

Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 20.05.2024
Kabul Tarihi : 04.11.2024

Received Date : 20.05.2024
Accepted Date : 04.11.2024

EFFECT OF MECHANICAL PROPERTIES OF FILLING MATERIAL ON STATIC AND DYNAMIC BEHAVIOR OF MASONRY ARCH BRIDGES

DOLGU MALZEMESİNİN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN YIĞMA KEMER KÖPRÜLERİN STATİK VE DİNAMİK DAVRANIŞI ÜZERİNDEKİ ETKİLERİ

Ali Ekber SEVER¹(ORCID: 0000-0001-5314-5287)

¹Isparta University of Applied Sciences, Department of Civil Engineering, Isparta, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Ali Ekber SEVER, alisever@isparta.edu.tr

ABSTRACT

The present study examined the impacts of the mechanical properties of the filling material on the seismic behaviour of masonry arch bridges (MAB). A bridge model that did not exist was selected to achieve this objective. Using this model, bridge models with different filling material properties were created in the SAP2000 computer program. Modal analysis and linear time history analysis (THA) were conducted on the aforementioned models to ascertain the filling material's influence on the bridge's dynamic behavior. The findings of the modal analysis indicated that an increase in the density of the filling material increased in the period, while an increase in the elasticity modulus led to a decrease in the period. As a result of linear THA, it was determined that as the density of the filling material increases, the displacements and stresses increase, and as the elastic modulus increases, the displacements and stresses decrease. As a result of static analysis, it was determined that as the density of the filling material increases, the displacement and stress values increase, and as the elastic modulus increases, these values decrease.

Keywords: Arch bridge, filling material, masonry, dynamic analysis, static analysis

ÖZET

Bu çalışmada, dolgu malzemesinin mekanik özelliklerinin yığma kemer köprülerin sismik davranışı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Bu amaçla mevcut olmayan bir köprü modeli seçilmiş ve bu köprü modeli kullanılarak farklı dolgu malzemesi özelliklerine sahip köprü modelleri SAP2000 bilgisayar programında oluşturulmuştur. Dolgu malzemesinin köprünün dinamik davranışı üzerindeki etkilerini görebilmek amacıyla bu modeller üzerinde zaman tanım alanında doğrusal analiz ve modal analizler yapılmıştır. Modal analiz sonucunda, kullanılan dolgu malzemesinin yoğunluğu arttıkça periyodun büyüdüğü, elastisite modülü arttıkça ise periyodun küçüldüğü tespit edilmiştir. Zaman tanım alanında yapılan doğrusal analizler sonucunda ise; dolgu malzemesinin yoğunluğu arttıkça yer değiştirme ve gerilmelerin büyüdüğü, elastisite modülü arttığında ise yer değiştirme ve gerilmelerin küçüldüğü tespit edilmiştir. Statik analizler sonucunda, dolgu malzemesinin yoğunluğu arttıkça yer değiştirme ve gerilme değerlerinin arttığı, elastisite modülü arttıkça ise bu değerlerin küçüldüğü tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Kemer köprü, dolgu malzemesi, yığma, dinamik analiz, statik analiz

INTRODUCTION

An important component of transportation in many places around the world, masonry arch bridge (MAB) represents a priceless part of the cultural and architectural heritage of humanity. MAB has often been damaged or destroyed by unforeseen incidents such as earthquakes. Natural hazards such as earthquakes and floods can significantly damage or destroy such buildings. Consequently, the analysis of the seismic behavior of these bridges through the use of computer modelling is of significant importance for the continued viability of these structures. Many studies have been conducted in the past investigating the dynamic performance of MAB.

Kader et al. (2021) researched the seismic behavior of an MAB using varied damping ratios. They modeled the bridge in the SAP 2000 computer program and analyzed the behavior of the bridge with earthquake acceleration records. They evaluated the stress and displacements obtained as a result of this study. Brencich & Sabia (2008) examined the Tanaro bridge. This bridge, which is an MAB, first applied various tests to obtain the mode shapes and natural frequencies of the MAB and then used these data to construct the numerical model of the bridge. They then analyzed this model at different stages of the bridge's service life and demolition. Sakcali et al. (2019) examined the Irgandı Bridge in Bursa. They created a finite element model of this bridge, which is an MAB, and performed modal and linear dynamic analysis under different earthquake acceleration records. As a result of this study, they stated that maximum displacements occur in the upper part of the bridge and the greatest principal stresses occur in the support region.

Çubuk et al. (2022), in their study, researched the seismic performance of Murat Bey Bridge. They created a model of the MAB in the SAP2000 software and applied modal and time history analyzes (THA) to this model. The results of the aforementioned study revealed the highest stress and displacement values in the bridge. Laterza et al. (2017) researched the dynamic behavior of an MAB in their study. They created a numerical model of this multi-span bridge and performed a pushover analysis. As a consequence of their analysis, they stated that this bridge provided the displacement values demanded by the capacity spectrum method (ATC-40, 1996). Özmen & Sayın (2018) analyzed the Dutpınar bridge utilizing the acceleration records of a previous earthquake in Türkiye. As a consequence of the analysis of the masonry bridge, they modeled with the finite element method, and the largest and smallest shear stresses and strains were obtained.

Harapin et al. (2013) conducted a dynamic and static analysis of an MAB. In this research, the effects of vertical load, seismic effect, and temperature change were investigated. As a result, they stated that the deformation and crack regions obtained from the model they created in the computer program were compatible with the real model. Kumbasaroglu et al. (2019), performed a study to evaluate the seismic performance of an MAB. To this end, they modeled the masonry bridge and made analyzes under the bridge's own weight and earthquake acceleration records from the past. They evaluated the stress and displacement values obtained as a result of their analysis.

Saygılı & Lemos (2021) analyzed the seismic behavior of two historical MABs with different spans and geometries in Türkiye. To achieve this objective, finite and discrete element models of the aforementioned bridges were created in computer programs. Subsequently, time-history analyses were conducted on the aforementioned models. The analysis yielded two key findings. Firstly, the short-span bridge exhibited greater resistance to earthquakes. Secondly, discrete element models were deemed an appropriate tool for the safety evaluation of masonry bridges.

Sözen & Doğangün (2023) conducted a study investigating the seismic performance of an existing historical MAB. For this purpose, they modeled the original and modified versions of this bridge, whose shape changed over time, in a computer program. They evaluated the stress, deformation, and cracks obtained as a result of nonlinear static and dynamic analyses they performed on these models. As a result, they stated that the bridge became more vulnerable to earthquake loads as its shape changed.

In a study conducted by Evci et al. (2024), the seismic behaviour of a historical bridge was examined. To this end, a finite element model of the historical bridge was created in a computer program. A nonlinear THA was performed on the aforementioned model. As a consequence of their analysis, they evaluated the displacements and stresses occurring on the bridge.

There are many studies in the literature investigating the static behavior of masonry arch bridges. In a study conducted by Altunisik et al. (2015), the effects of restoration on the structural behaviour of MAB were investigated. To this

end, the researchers created computer models of both the unrestored and restored versions of an existing bridge. Subsequently, an analysis was conducted on the aforementioned models, evaluating their performance under dead load, live load, and dynamic loads. The displacement and stress results obtained from the aforementioned analyses were then compared. The findings of the study indicate that the restoration process is a crucial factor in the long-term viability of MAB.

Sözen & Çavuş. (2020) researched the behavior of an MAB under seismic loads. In this study, the altered and original forms of the masonry bridge were modeled in the ANSYS computer program. By performing static analysis and THA on these models, deformations and stresses were examined. As a result, they stated that the stiffness increased with the change in the bridge form.

Altunışık et al. (2015), analyzed the behavior of a historical arch bridge under dead and live loads in order to see how the arch thickness affects the structural performance of the bridge. As a result of this study, they revealed that the thickness of the arch affects the structural performance of the bridge.

Although there are many studies in the literature investigating the static and dynamic behavior of MAB, there is no study investigating the effects of the mechanical properties of the infill material on the static and dynamic behavior of MAB. Existing research often emphasizes general factors affecting bridge performance or other material properties, yet the distinct impact of variations in infill material mechanics on structural response has not been fully explored. Therefore, this study aims to address this gap by investigating how different mechanical properties of infill materials affect the overall performance of MAB under both static and dynamic loading conditions.

In this paper, the effects of the mechanical properties of the filling material on the dynamic behavior of masonry arch bridges were investigated. A non-existent bridge model was selected to develop a general understanding of the dynamic behavior of existing masonry arch bridges in Turkey. For this purpose, 9 MABs with different filling material properties were modeled in the SAP2000 computer program. By performing linear THA and modal analysis on these models, the impacts of the mechanical properties of filling material on the seismic performance of MAB were evaluated. In THA analyses, the acceleration record of the Pazarcık earthquake that occurred in Türkiye on February 6, 2023, was used.

CREATING THE FINITE ELEMENT MODEL OF THE BRIDGE

When the studies in the literature are examined, it has been determined that the elasticity modulus of the filling materials used in MAB generally vary between 400 - 1500 MPa, and their unit volume weights vary between 13 - 20 kN/m³ (Özmen & Sayın 2018, Saygılı & Lemos 2021, Onat & Sayın 2015, Bayraktar et al. 2007, Karaton et al. 2017, Pela et al. 2009, Pela et al. 2013, Zampieri et al. 2015, Frunzio et al. 2001). Poisson's ratios are generally taken as 0.2. In this study, in order to see the effects of the mechanical properties of the filling material on the dynamic behavior of masonry arch bridges, three different values are given to the elasticity module and unit weight within the ranges in the literature. The Poisson's ratio is chosen as 0.2. For this reason, 9 bridge models were created by giving different values to the elasticity modulus and density of the filling material. The same material properties of the arch and spandrel wall were used in all bridge models (Özmen & Sayın 2018). The elastic modulus, density, and Poisson's ratio of the arch are 2800 MPa, 28 kN/m³, and 0.2, respectively. The elasticity modulus, density, and Poisson's ratio of the spandrel wall are 2400 MPa, 24 kN/m³, and 0.2, respectively.

In this study, a bridge model that does not exist was chosen to see the effects of the mechanical properties of the filling material on the dynamic behavior of the masonry arch bridges. The reason for choosing a non-existent model is that it provides the opportunity to examine in more detail and freely how the structural and geometric properties of the bridges interact with the mechanical properties of the filling material. This bridge has a length of 28 m, a width of 4 m, and a height of 11.05 m. The spandrel wall of the bridge is 0.5 m thick. These properties were determined by considering the average geometric properties of single-span masonry arch bridges frequently encountered in Turkey. The model created in this way provides a more comprehensive perspective on the seismic performance of existing single-span masonry bridges. The geometric properties of the created models are shown in Figure 1. Fixed supports are assumed on the surfaces of the bridge that are in contact with the ground. It is assumed that there is full adhesion between the elements forming the bridge (arch, spandrel wall, and filling material). The properties of the filling materials are shown in Table 1.

Table 1. Mechanical Properties of Filling Materials

Model Name	Elasticity Modulus of the Filling Material (N/mm ²)	Density of the Filling Material (kN/m ³)	Poisson's Ratio
F1	500	13	0.2
F2	500	16.5	0.2
F3	500	20	0.2
F4	1000	13	0.2
F5	1000	16.5	0.2
F6	1000	20	0.2
F7	1500	13	0.2
F8	1500	16.5	0.2
F9	1500	20	0.2

Three distinct modelling methodologies, namely simplified micro, detailed micro, and macro modelling, are commonly employed for the numerical representation of masonry structures, contingent upon the desired level of precision and the scale of the structural system (Lourenco, 1996). In micro-modelling, which involves the detailed examination of material properties, it is possible to evaluate these separately for mortar and masonry parts. In simplified micro modelling, the masonry parts are widened by half the thickness of the mortar layer, thus ignoring the mortar and segregating the masonry parts from each other by interface lines. In macro modeling, masonry is considered composite without unit and mortar separation. In the study of large building systems, the macro modeling technique is often used, as it greatly shortens the solution time. The macro modeling technique was used in this study. In the macro modeling method, the relationship between the mortar and the masonry unit is neglected. The material is considered as composite (Özmen & Sayın, 2020). Figure 2 shows these modeling methods. The bridge is modeled using Solid element.

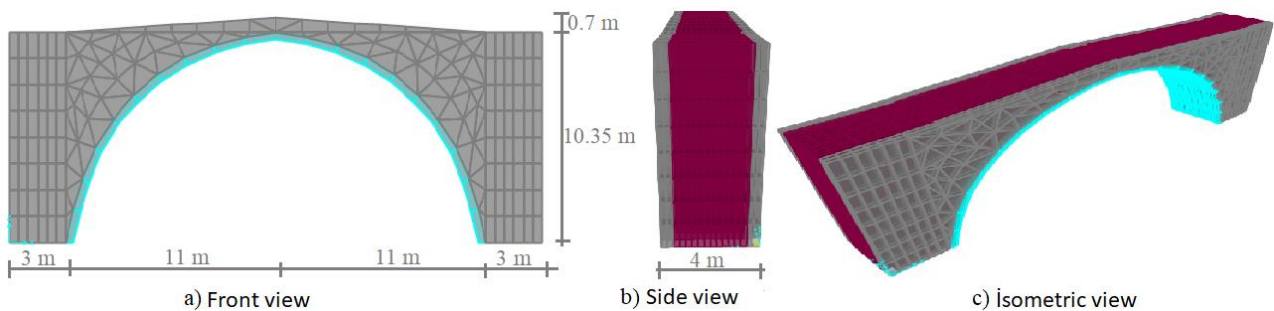
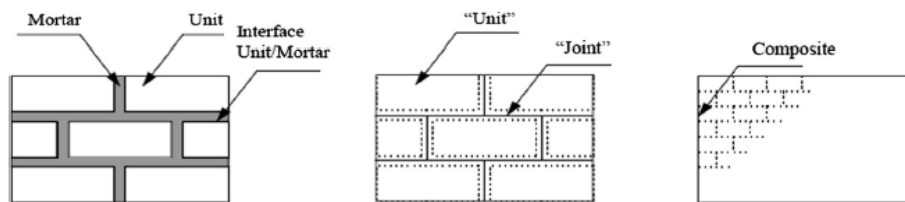


Figure 1. Geometric Properties of The Bridge Model.



a) Detailed micro modeling b) Simplified micro modeling c) Macro modeling

Figure 2. Modeling Methods Used for Masonry Structures (Lourenco 1996).

DETERMINATION OF SEISMIC PARAMETERS

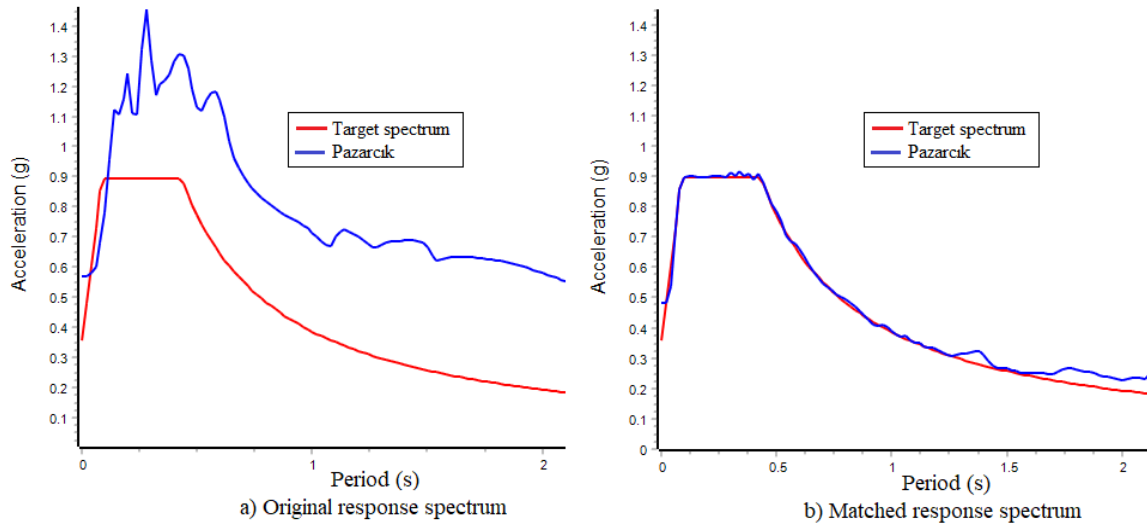
To determine the dynamic behavior of the MAB, acceleration records of a previous earthquake in Türkiye were used. It is assumed that the masonry bridge is located in the center of Isparta and accordingly, earthquake data for the DD-2 earthquake ground motion level defined in the Turkish Building Earthquake Code 2018 (TBDY 2018) were obtained from the Türkiye Earthquake Hazard Map interactive web application (AFAD). Obtained earthquake data are shown in Table 2. Table 3 contains the information about the earthquake used in the seismic analysis. The Seismo Match software was employed to facilitate the matching process for the region in proximity to the arch bridge. The original and matched response spectra obtained from the Seismo Match program are shown in Figure 3a, and the original and matched acceleration records are shown in Figure 3b. To reduce the analysis time, the 35-45 second interval, during which the acceleration record is at its most intense, was utilized.

Table 2. Earthquake Data (AFAD).

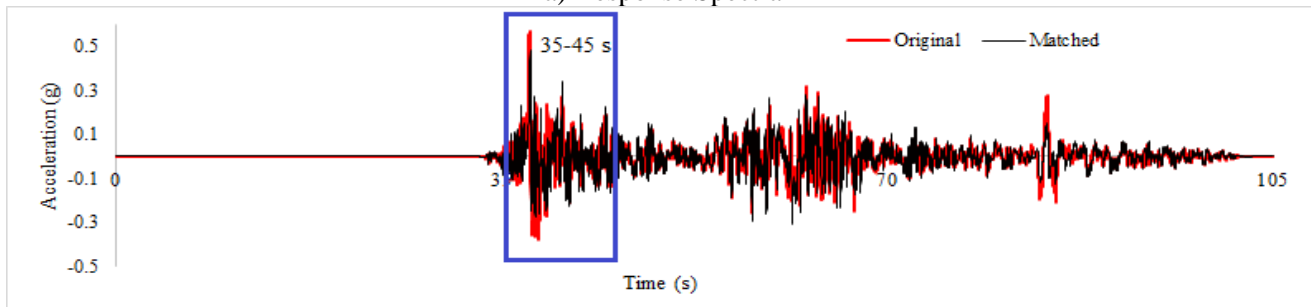
Parameter	Definition	Value
Earthquake Ground Motion Level	Earthquake ground motion level with 10% probability of exceedance in 50 years (recurrence period 475 years)	DD2
Ground Class	Medium firm to firm layers of sand, gravel or very solid clay	ZD
S_s	Short period map spectral acceleration coefficient	0.741
S_1	Map spectral acceleration coefficient for a 1.0 second period	0.171

Table 3. The Earthquake Used in The Analysis (AFAD).

Earthquake	Component	Station	M_w	Original		Matched	
				PGA (g)	PGV (cm/s)	PGA (g)	PGV (cm/s)
6 February 2023 Pazarcık	East-West	Pazarcık	7.7	0.567	131.17	0.482	84.00



a) Response Spectra



b) Acceleration records

Figure 3. Original and Matched Acceleration Records and Response Spectra (Seismo Match)

ANALYSES

Modal Analysis

Mode shapes play a significant role in the dynamic behavior of arch bridges. Modal analyses were performed on the bridge models in order to obtain the mode shapes and period values of the masonry arch bridge. The damping ratio was chosen as 5% for the modal analysis. While performing modal analysis, solutions were made for 50 modes.

Time History Analysis

A series of linear THA were conducted on the models generated in the SAP2000 program, utilizing the material properties detailed in Table 1. As illustrated in Table 4, the mass participation rates of the first modes are the highest in the y direction in all models. Consequently, THA was conducted exclusively in the y direction (width direction). For the linear THA, the acceleration record of the earthquake, as presented in Table 4, was utilized.

Static Analysis

In this study, a static analysis of the bridge under its own dead load was carried out to see the effects of the mechanical properties of the filling material on the static behavior of the arch bridge.

RESULTS AND DISCUSSION

Results of Modal Analysis

The first six mode shapes and period values derived from the modal analysis are presented in Figure 4. As a result of the modal analysis, the mode shapes obtained from all models are similar to each other. For this reason, only the mode shapes of the F1 model are shown in Figure 4. The mass participation ratios obtained for the 1st and 50th modes as a consequence of the modal analysis are shown in Table 4.

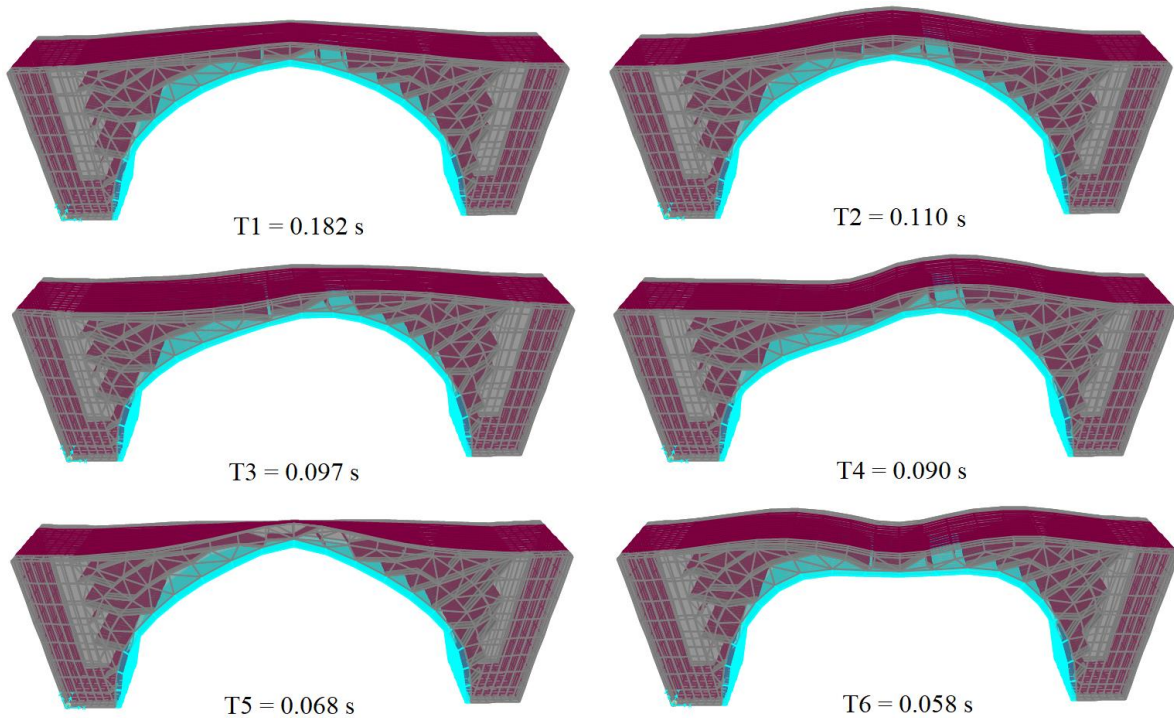


Figure 4. Mode Shapes and Period Values of The F1 Model.

Table 4. Mass Participation Ratios of Masonry Arch Bridge

Model	Mode	Mass participation ratios		
		X direction	Y direction	Z direction
F1	1	3.316E-17	0.41	1.904E-20
	50	0.84104	0.93	0.87887
F2	1	3.525E-17	0.41	1.41E-19
	50	0.85	0.93	0.88
F3	1	3.077E-17	0.40	1.532E-19
	50	0.84758	0.93	0.87792
F4	1	1.338E-17	0.40	1.264E-19
	50	0.83449	0.92	0.8878
F5	1	1.524E-17	0.40	4.455E-20
	50	0.87	0.91	0.89
F6	1	1.447E-17	0.39	2.425E-20
	50	0.87	0.93	0.89
F7	1	8.705E-18	0.39	2.213E-19
	50	0.84	0.91	0.89
F8	1	1.034E-17	0.39	1.941E-19
	50	0.87	0.92	0.89
F9	1	1.058E-17	0.39	2.163E-19
	50	0.87	0.92	0.89

The first period values (T_1) obtained for all models as a consequence of the modal analysis are shown in Figure 5.

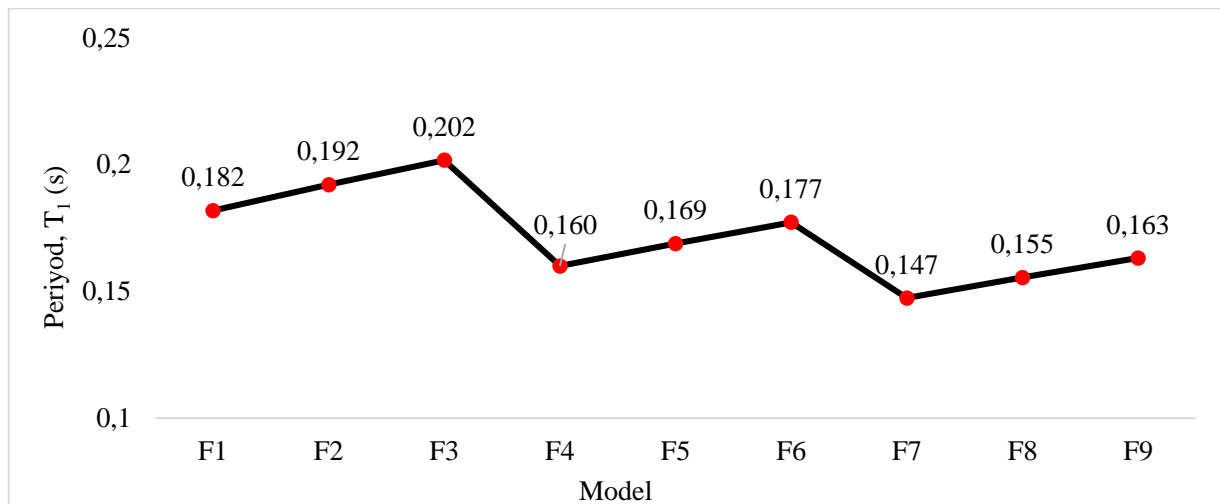


Figure 5. The First Period Values for All Models

As illustrated in Figure 5, the lowest period value was obtained from the F7 model, while the largest period value was obtained from the F3 model. In the F7 model, the filling material exhibited the highest modulus of elasticity and the lowest density, whereas in the F3 model, the filling material exhibited the lowest modulus of elasticity and the highest density. Consequently, the period of the F3 model was 37% larger than that of the F7 model. It can be observed that the period values increase when the elasticity modulus of the filling material is maintained constant and its density is increased. For instance, the period of the F3 model is 11% larger than that of the F1 model. This is a predictable outcome, given that it is well-established that the period value increases as the mass of the structure increases. When the density of the filling material is maintained and the elasticity modulus value is altered, it has been demonstrated that the period value declines as the elasticity modulus rises. It is established that the period is inversely proportional to the stiffness. As the elasticity modulus value increases, the reduction in the period is a predictable consequence of the elevated stiffness.

Figure 6 shows the design spectrum and period range of the analyzed models. Upon examination of Figure 5, it becomes evident that the fundamental periods of all models exhibit a range between 0.147 and 0.202 seconds. Consequently, the interval delineated in red within the graph of Figure 6 represents the aforementioned range.

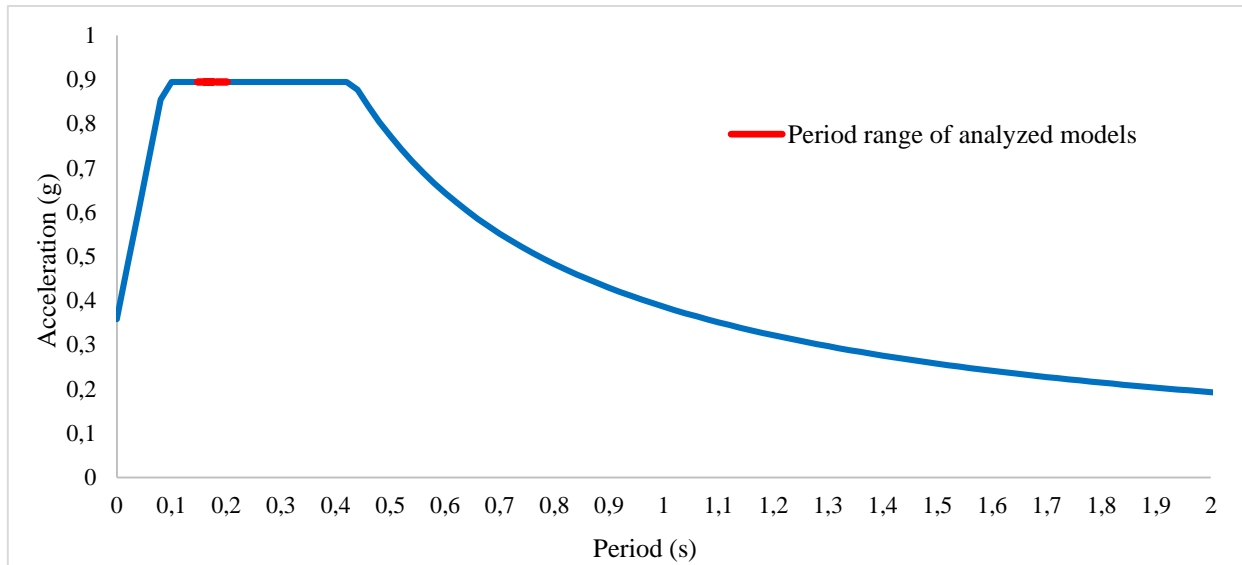


Figure 6. Design Spectrum

Upon examination of Figure 6, it becomes evident that the bridge will be subjected to the greatest acceleration values if its period falls within the range of 0.1-0.44 seconds. The fundamental periods of the analyzed models were found to align with this range. It can be reasonably assumed that if the elasticity modulus of the filling material is increased and its density is reduced, the period will be lower than 0.1 seconds. Consequently, the bridge may be subjected to lower acceleration values.

Results of Time History Analysis

Figure 7 illustrates the base shear forces that occur in all models as a result of THA. Figure 8 illustrates the time-dependent behavior of the base shear forces for the F1, F2, and F3 models. Figure 9 presents a similar analysis for the F2, F5 and F8 models. In the creation of Figures 8 and Figure 9, the 2-6 s interval was utilized, as this was the period during which the highest responses were observed.

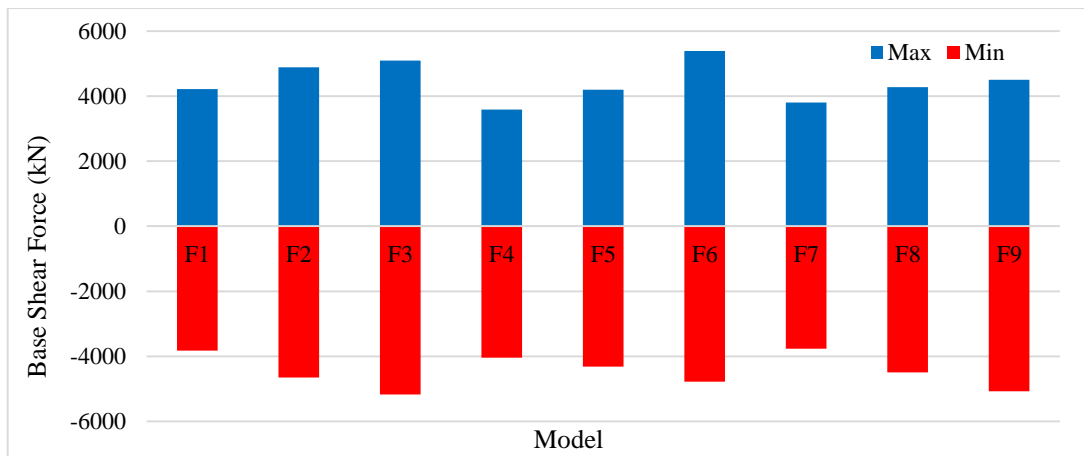


Figure 7. Maximum and Minimum Base Shear Forces

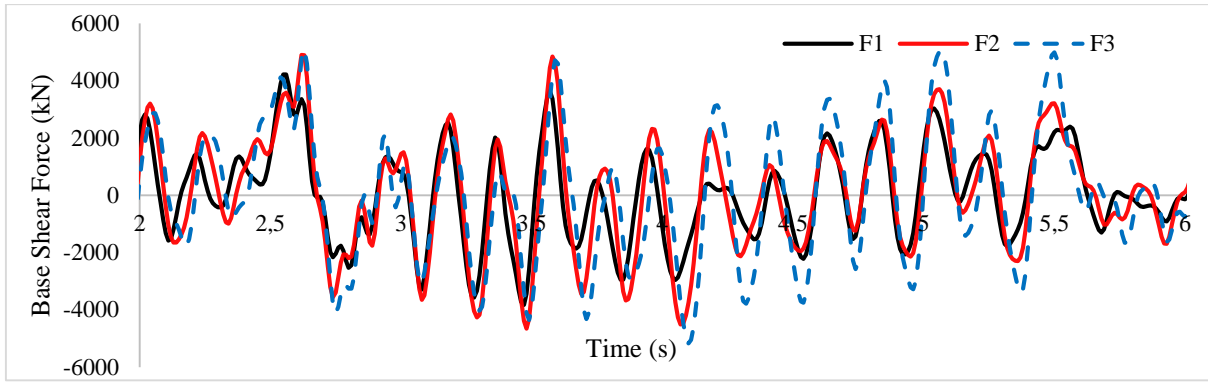


Figure 8. Base Shear Force-Time Graph for F1, F2, And F3 Models

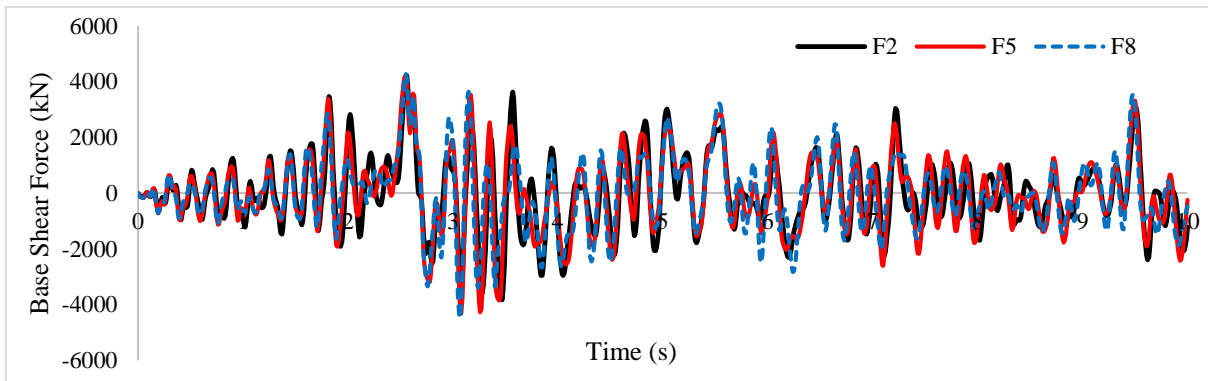


Figure 9. Base Shear Force-Time Graph for F2, F5, And F8 Models

Upon examination of Figures 7 and 8, it becomes evident that the base shear force exhibits a direct correlation with the density of the filling material. For example, the base shear force in the F3 model is 22% higher than that in the F1 model. Upon examination of Figure 9, it is evident that there is no discernible change in the base shear force as a result of the change in the elasticity modulus of the filling material.

A time-history analysis revealed that the highest displacement values were observed at the top of the bridge in all models. Similar results have been obtained in studies conducted in the literature (Sözen & Çavuş 2020, Altunisik et al. 2015, Usta et al 2024, Evci et al 2024, Sevim et al 2011, Saygılı & Lemos 2021). Figures 10 and 11 illustrate the time-dependent displacement of the peak over the 2-6 s interval. Table 5 presents the largest peak displacements and largest stress values observed in all models.

As illustrated in Figure 10, Figure 11, and Table 5, the lowest displacement value was observed in the F7 model, while the highest displacement value was observed in the F3 model. The largest displacement value observed in the F7 model is 44.4% less than that observed in the F3 model. As the density of the filling material increased, the displacement values exhibited a corresponding increase. For example, when comparing the F1 and F3 models, the increase was 24.6%. This result is to be expected, given that greater forces will act on the structure as the density of the filling material increases. As the elastic modulus of the filling material increased, the displacement values exhibited a pronounced decline. For example, when comparing the F2 and F8 models, this reduction was 42.3%. As the elasticity modulus increases, it is to be expected that the displacements will decrease, as the structure becomes more rigid. Consequently, this outcome is also to be expected.

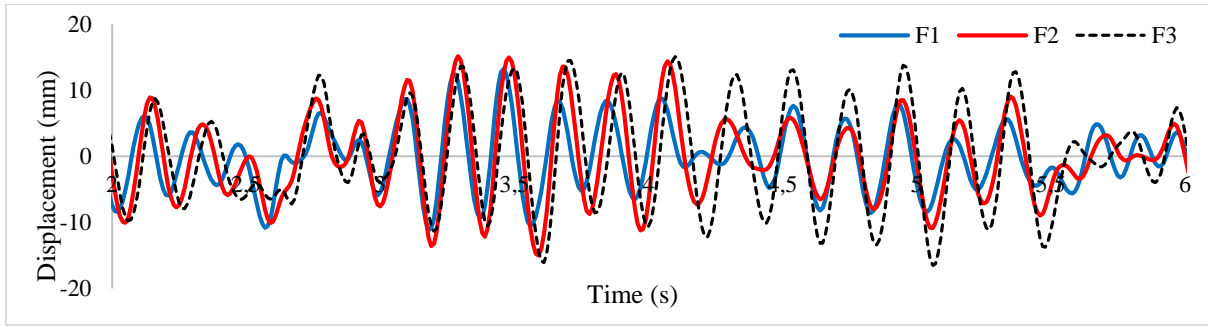


Figure 10. Displacement – Time Graph for F1, F2 And F3 Models

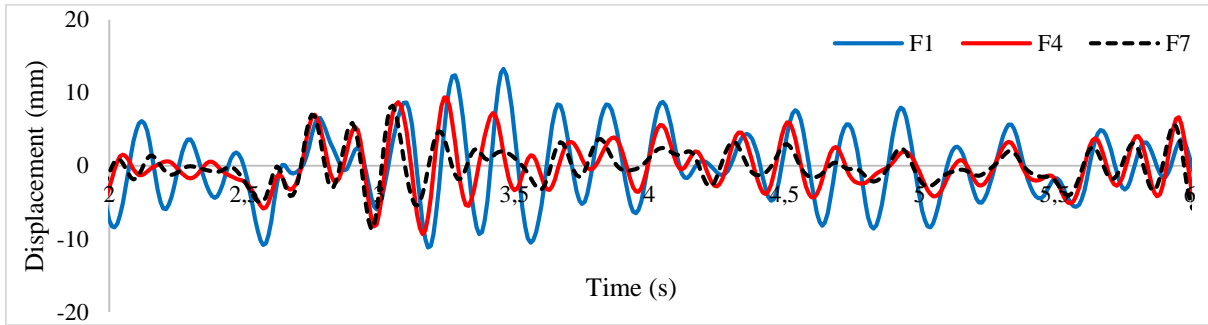


Figure 11. Displacement – Time Graph for F1, F4 And F7 Models

Table 5. Max displacement and stress values.

Model	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9
Max Displacement (mm)	13.26	15.16	16.52	9.38	11.92	12.71	8.69	8.75	10.54
Normal Stress (MPa)	1.271	1.459	1.563	1.075	1.346	1.426	1.005	1.085	1.277
Shear Stress (MPa)	0.316	0.360	0.393	0.23	0.292	0.316	0.224	0.225	0.263
Smax Stress (MPa)	1.277	1.494	1.594	1.081	1.354	1.433	1.001	1.063	1.284
Smin Stress (MPa)	1.277	1.494	1.594	1.081	1.354	1.433	1.001	1.063	1.284

Upon examination of Table 5, it becomes evident that the model exhibiting the lowest levels of stress is F7, while the model exhibiting the highest levels of stress is F3. For instance, when the stresses observed in these two models are contrasted, the largest normal stress, shear stress, and maximum/minimum principal stress values obtained from the F3 model are, respectively, 55.5%, 75.5%, and 59.2% greater than those observed in the F7 model. As the density of the filling material increased, the maximum values of normal stress, shear stress, and maximum/minimum principal stress also increased. As the elastic modulus of the filling material increased, the maximum value of normal stress, shear stress, and maximum/minimum principal stress decreased.

Figure 12, Figure 13, Figure 14, and Figure 15 illustrate the stress, shear stress, maximum principal stress, and minimum principal stress contours that were generated in the F1 model as a consequence of the THA. The contours in these figures were obtained from the 3.46th second of the earthquake. As the stress contours are similar in all models, only the contours of the F1 model are shown. As illustrated in Figure 12, the maximum normal stress values were observed at the top of the arch and the top of the bridge sides. Similar results were obtained in studies conducted in the literature (Altunisik, 2015, Saygılı & Lemos 2021, Bayraktar & Hökelekli 2021, Evcı et al 2024). As illustrated in Figure 13, the highest values of shear stresses were observed in the central regions of the arch.

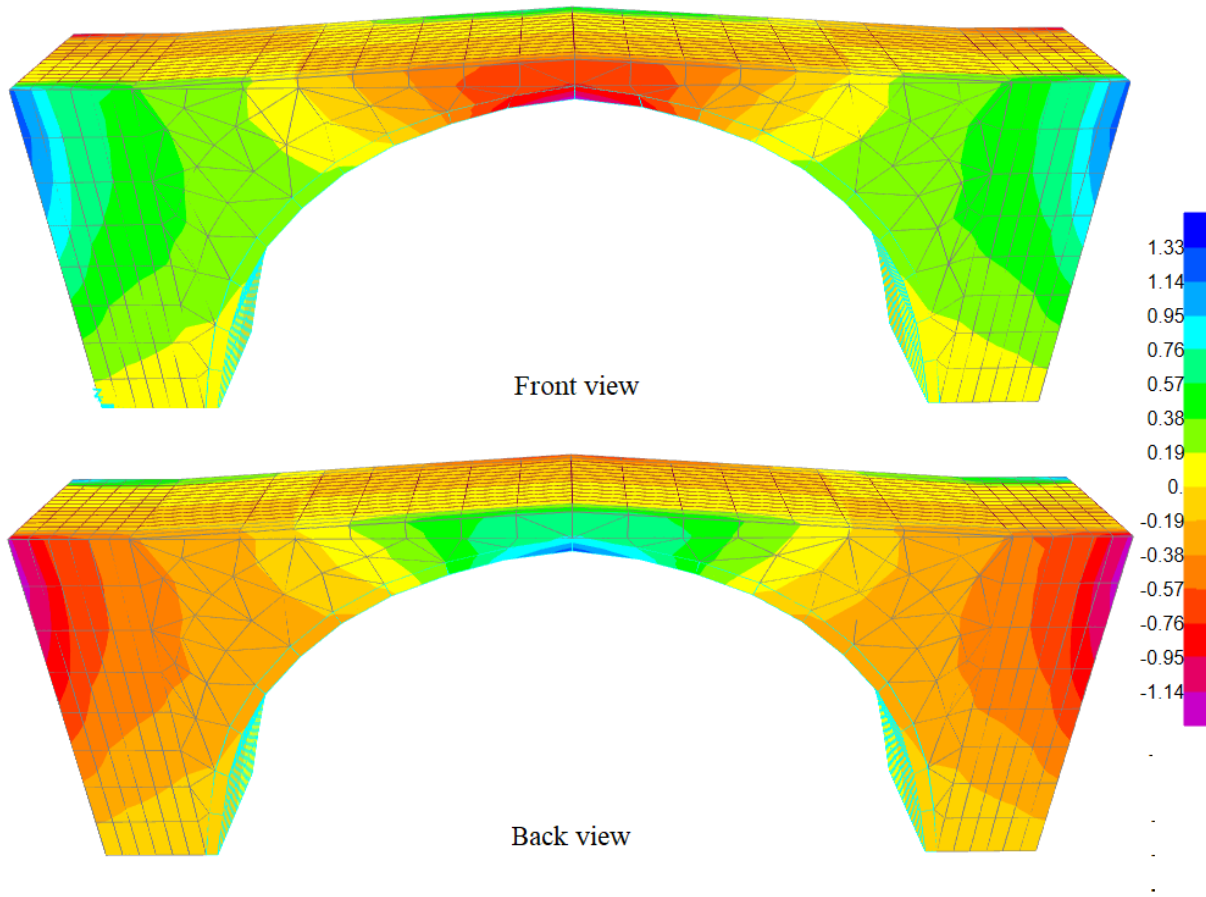


Figure 12. Normal Stress Contour for F1 Model (MPa).

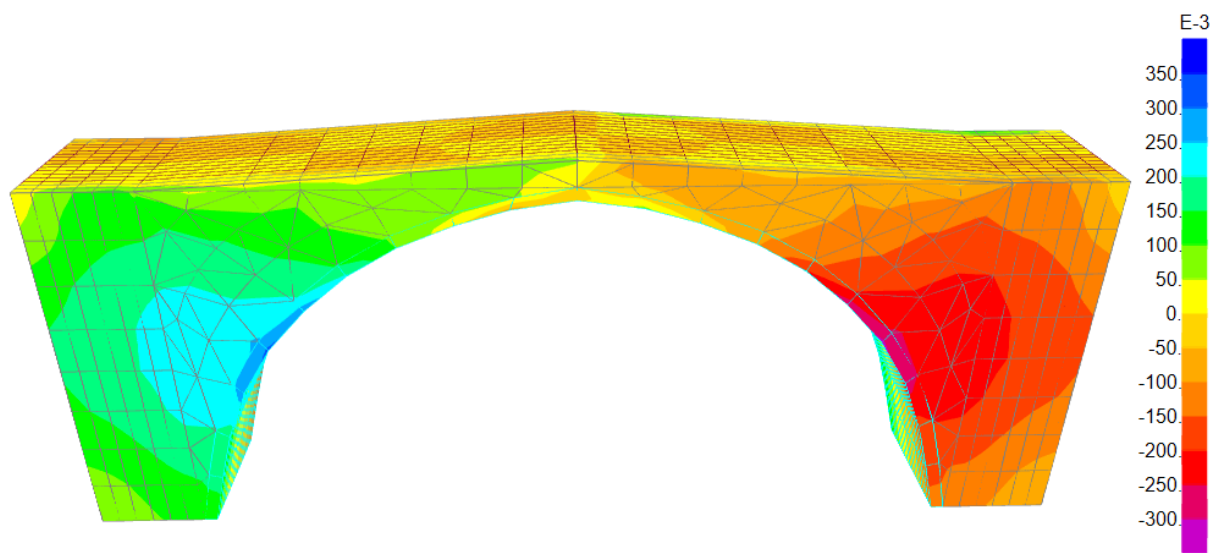


Figure 13. Shear Stress Contour for F1 Model (MPa).

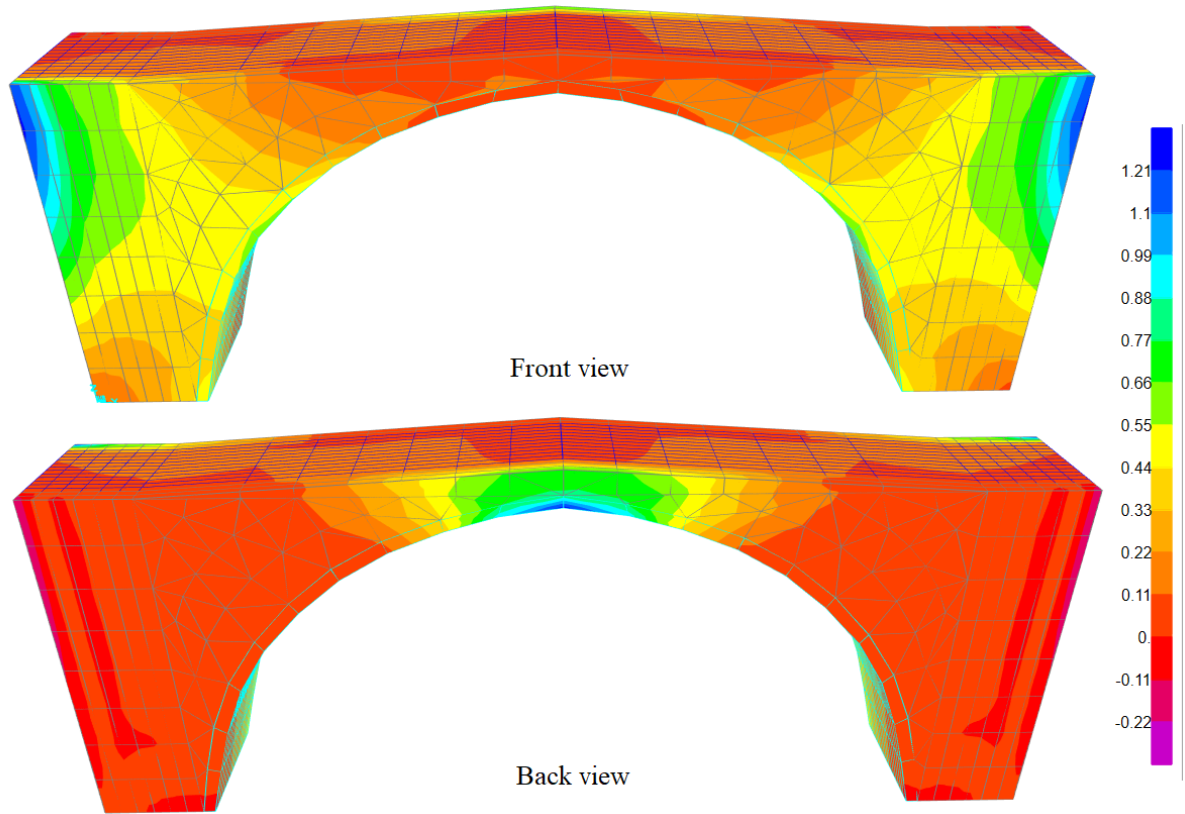


Figure 14. Smax Contour for F1 Model (MPa)

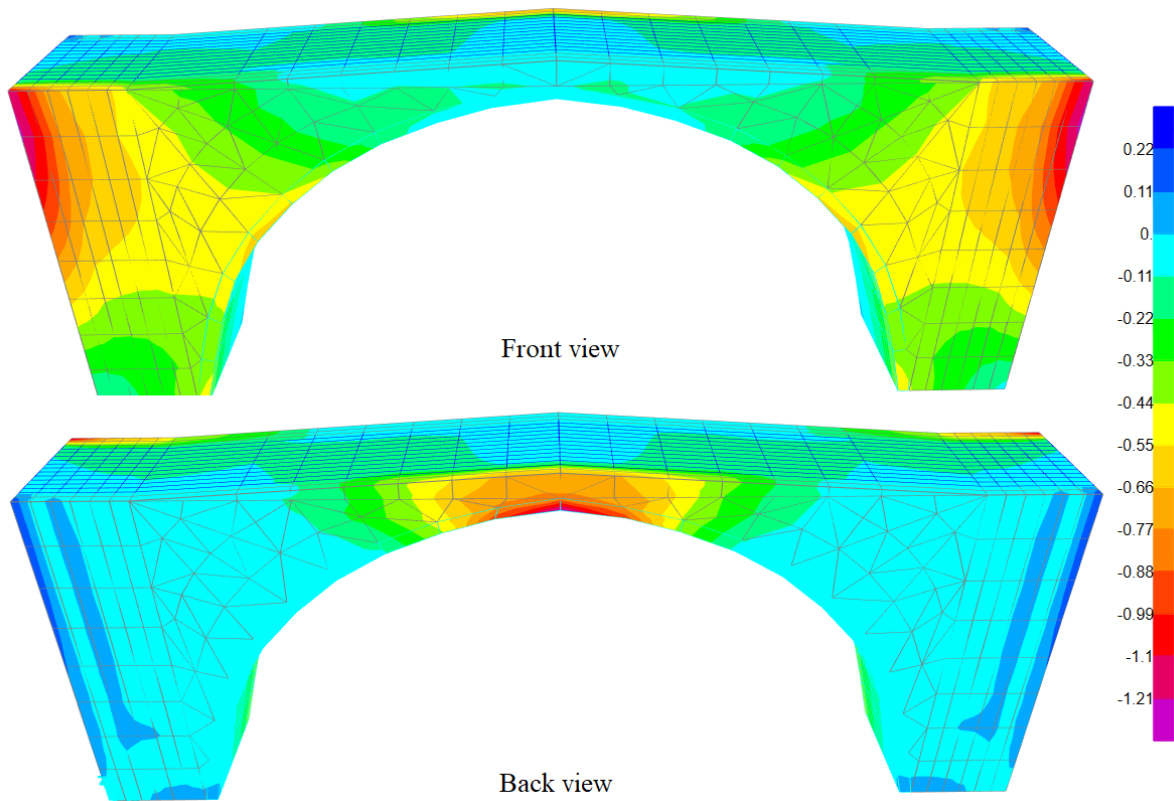


Figure 15. Smin Contour for F1 Model (MPa)

Upon examination of Figures 14 and 15, it becomes evident that the maximum and minimum principal stresses are concentrated at the top of the arch and on the sides of the bridge. A review of studies in the literature investigating the seismic performance of masonry arch bridges using nonlinear methods showed that there were studies that

expected damage to occur at the top of the arch or the sides of the bridge. (Sakcalı et al 2019, Özmen & Sayın 2023, Karaton et al. 2017). Figures 16, 17, 18, and 19 illustrate the maximum and minimum principal stress for the range of 2-6 s, as a function of time. Upon examination of Figures 16 and 18, it becomes evident that the maximum and minimum principal stresses occurring in the bridge undergo a transformation as the density of the filling material increases over time. The aforementioned graphs demonstrate that the utilization of high-density filling material will result in the exposure of greater maximum and minimum principal stresses during an earthquake. Figures 17 and 18 illustrate the effect of an increase in the elasticity modulus on the same graph. Upon examination of these figures, it can be observed that the utilization of a filling material with a high modulus of elasticity will result in a reduction in the maximum and minimum principal stresses experienced by the bridge during an earthquake.

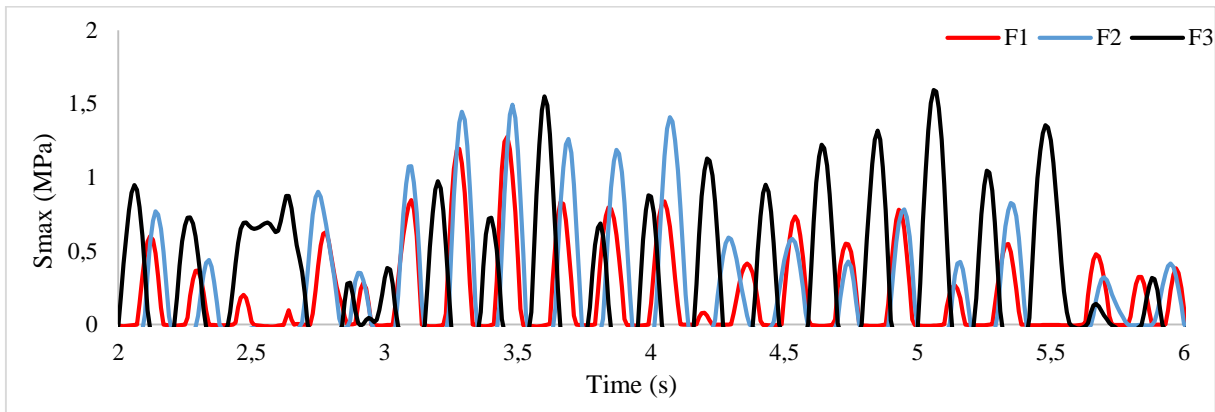


Figure 16. Maximum Principal Stress-Time Diagram for Models F1, F2, and F3

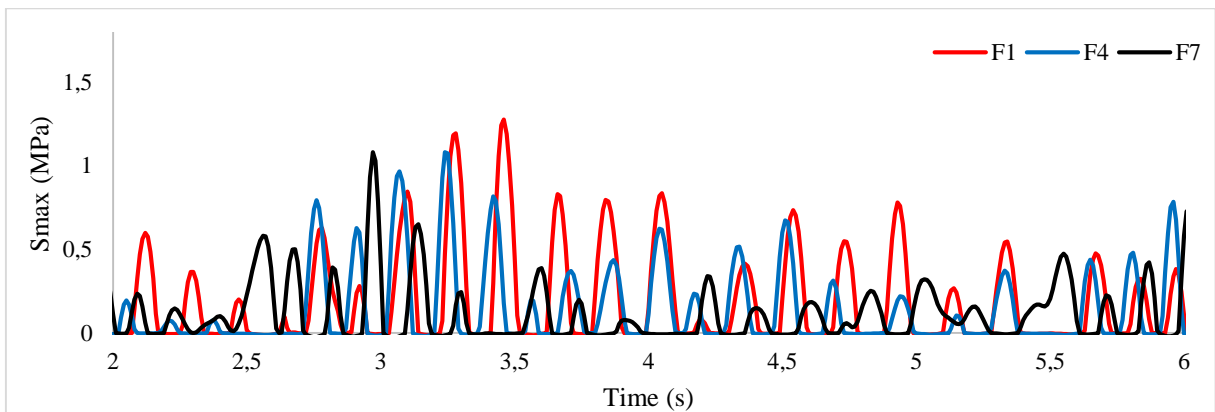


Figure 17. Maximum Principal Stress-Time Diagram for Models F1, F4, and F7

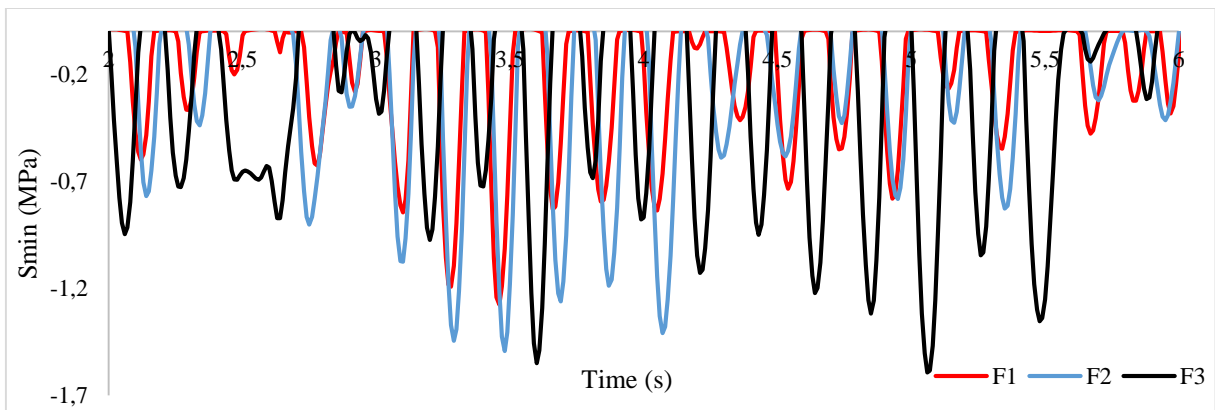


Figure 18. Minimum Principal Stress - Time Diagram for Models F1, F2, and F3

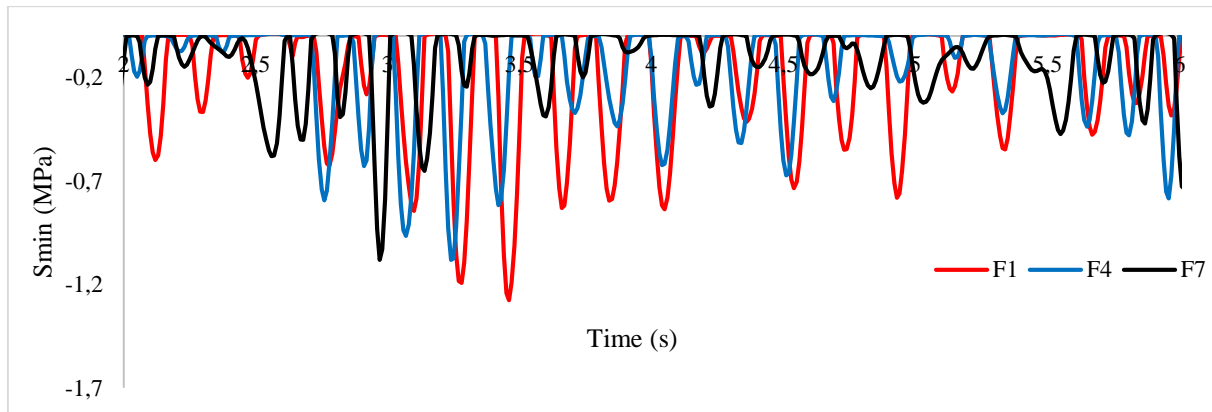


Figure 19. Minimum Principal Stress - Time Diagram for Models F1, F4, and F7

Results of Static Analysis

The largest vertical displacements resulting from the static analysis of the models are illustrated in Figure 20.

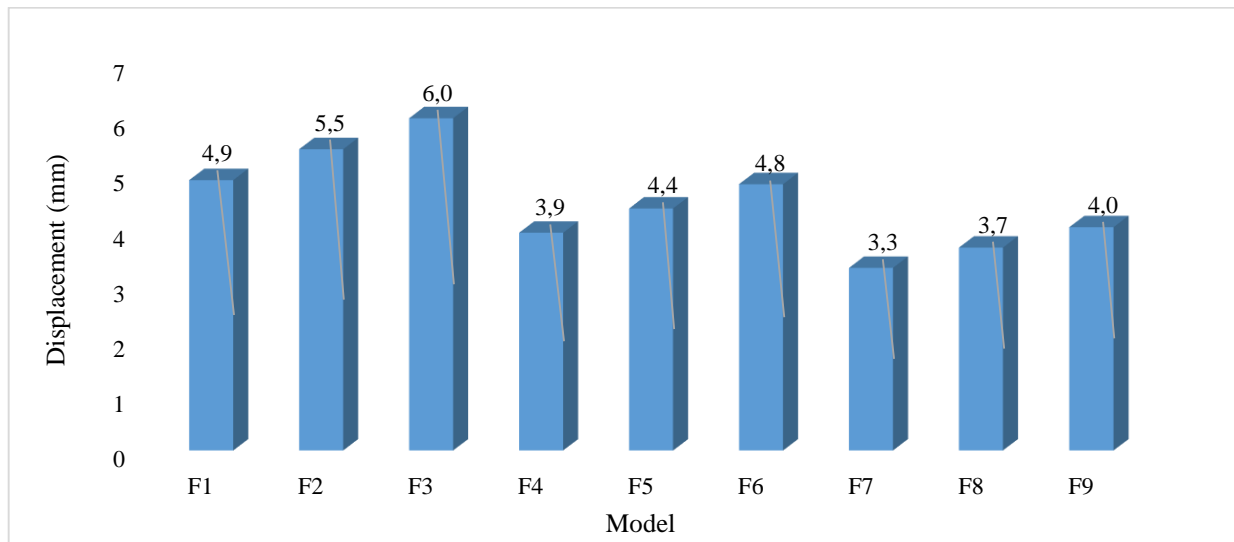


Figure 20. Vertical Displacement Graph

As seen in Figure 20, the largest displacement increases with increasing infill density. For example, the vertical displacement in the F3 model is 22.4% greater than in the F1 model. As the modulus of elasticity increased, the largest vertical displacement decreased. For example, the displacement in the F7 model is 32.7% less than in the F1 model. The largest vertical displacement occurs in model F3, while the smallest displacement occurs in model F7. The displacement value obtained from model F3 is 82% greater than the displacement value obtained from model F7. These results show that the mechanical properties of the infill material have a great influence on the static behavior of the masonry arch bridge.

Figure 21 illustrates the vertical displacement contour observed in the F1 model as a consequence of the static analysis. As identical displacement contours are observed in all models, only the contour of the F1 model is presented herewith. As can be seen in Figure 21, the largest vertical displacements occurred in the middle and upper parts of the bridge. Similar results were obtained in studies conducted in the literature (Sözen & Çavuş, 2020, Altunışık et al. 2015, Nemetlu et al. 2023, Altunışık et al. 2015).

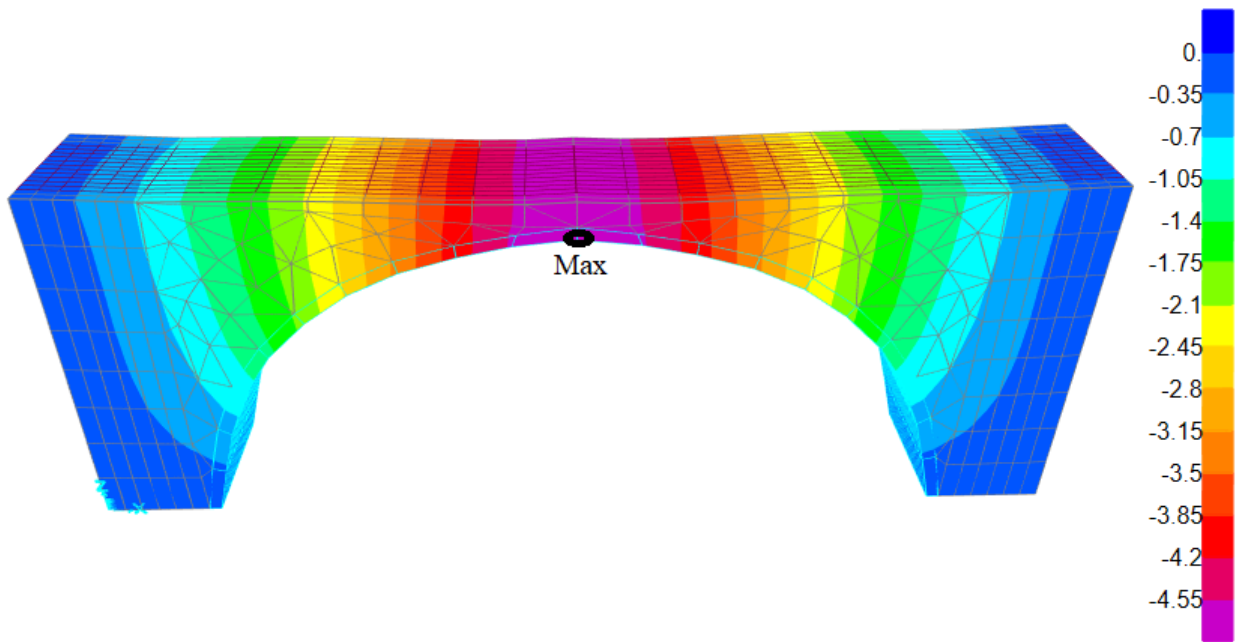


Figure 21. Vertical Displacement Contour of F1 Model (mm)

Figure 22 shows the maximum compressive and tensile stresses that occur in bridge models as a result of static analysis.

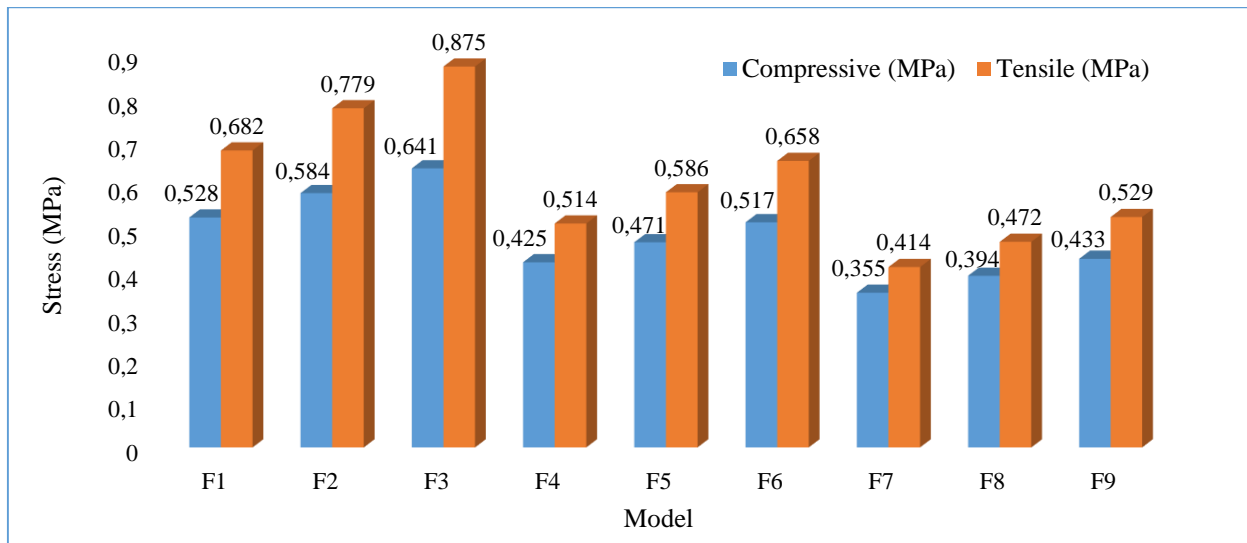


Figure 22. Graph of Compressive and Tensile Stresses

As seen in Figure 22, tensile and compressive stresses increased with the increase in the density of the filling material. For example, the maximum compressive and tensile stresses obtained from model F3 are 21.4% and 28.3% larger than model F1, respectively. As the elasticity modulus of the filling material increased, the compressive and tensile stresses decreased. For example, the compressive and tensile stresses obtained from model F7 are 32.8% and 39.3% smaller, respectively, compared to model F1. The highest compressive and tensile stresses occurred in model F3, while the lowest stresses occurred in model F7. The maximum compressive and tensile stresses in model f3 are 80.6% and 111.4% larger than those in model f7, respectively.

The normal stress contour occurring in the F1 model as a result of the static analysis is shown in Figure 23. As identical normal stress contours are observed in all models, only the contour of the F1 model is presented herewith.

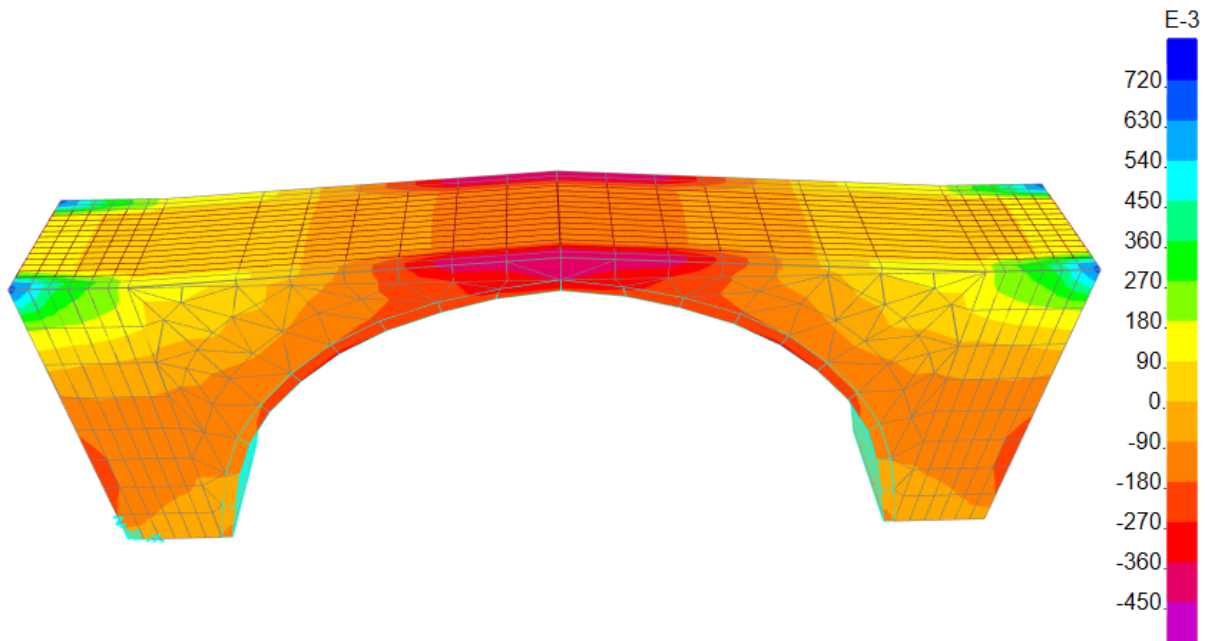


Figure 23. Normal Stress Contour of F1 Model (MPa)

As can be seen in Figure 23, the compressive stresses are concentrated in the upper parts of the arch, while the tensile stresses are concentrated in the upper part of the side supports. Similar results were obtained in studies conducted in the literature (Sözen & Çavuş 2020, Altunışık et al. 2015, Altunisik et al. 2015).

CONCLUSION

The objective of this study was to investigate the effects of the mechanical properties of the filling material used in masonry arch bridges on the static and dynamic behavior of the bridge. To this end, nine bridge models of identical dimensions and exhibiting disparate mechanical properties of the filling material were generated within the SAP2000 program. Static analysis, modal analysis, and THA were conducted to elucidate the behavior of the bridges. The results of the analyses are presented in the following table.

The results of the modal analysis indicated that similar mode shapes were observed in all models. It was observed that the fundamental periods of all models varied between 0.147 s and 0.202 s. It has been demonstrated that as the density of the filling material increases, the period of vibration also increases. Conversely, as the elasticity modulus of the filling material increases, the period of vibration decreases. The model exhibiting the lowest period is the one with the lowest density of the filling material and the highest modulus of elasticity.

The results of the THA indicated that the highest displacement values were observed at the top of the bridge in all models. As the density of the filling material increased, it was found that the base shear force, maximum displacement, normal stress, shear stress, and maximum/minimum principal stresses all increased. For example, the maximum displacement, base shear force, normal, shear, and principal stresses obtained from the F3 model are 25%, 22%, 23%, 24%, and 25% larger than those from the F1 model, respectively. Conversely, as the elasticity modulus of the filling material increased, the opposite occurred. It was observed that while normal stress and maximum/minimum principal stresses were concentrated in the upper parts of the sides of the bridge and the upper part of the arch, shear stresses reached their largest values in the middle parts of the arch. For example, the maximum displacement, base shear force, normal, shear, and principal stresses obtained from the F8 model are 42%, 8%, 26%, 38%, and 28% smaller than those from the F2 model, respectively.

The results of the static analysis demonstrated that as the density of the filling material increased, the values of displacement, compressive stress, and tensile stress also increased. Conversely, an increase in the elasticity modulus of the filling material results in a corresponding decrease in the aforementioned values. The highest values of compressive stress were observed in the upper regions of the arch, while the highest values of tensile stress were observed in the upper regions of the edge supports.

Consequently, it has been demonstrated that the mechanical properties of the filling material employed in the construction of MAB exert a significant influence on the static and dynamic behavior of the bridge. It has been demonstrated that the utilization of filler material with a low density and high modulus of elasticity in the construction of masonry arch bridges represents a superior approach in terms of the static and seismic behavior of the bridge.

REFERENCES

Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı. “Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği”. Ankara, Türkiye, 2018.

Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı. “Türkiye Deprem Tehlike Haritaları İnteraktif Web Uygulaması” <https://tdth.afad.gov.tr/TDTH/main.xhtml> (20.03.2023).

Altunışık, A.C., Kanbur, B., Genc, A.F., (2015). The effect of arch geometry on the structural behavior of masonry bridges. *Smart Struct. Syst*, 16(6), 1069-1089. <https://doi.org/10.12989/sss.2015.16.6.1069>

Altunisik, A. C., Bayraktar, A., & Genc, A. F. (2015). Determination of the restoration effect on the structural behavior of masonry arch bridges. *Smart Struct. Syst*, 16(1), 101-139. <http://dx.doi.org/10.12989/sss.2015.16.1.101>

ANSYS, 2008. Swanson Analysis System, US.

ATC-40, (1996), Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings-Vol.1, Applied Technology Council, Redwood City, CA

Bayraktar, A., Altunışık, A. C., Türker, T., & Sevim, B. (2007). The effect of finite element model updating on earthquake behaviour of historical bridges. In Sixth National Conference on Earthquake Engineering, Istanbul, Turkey, October (pp. 16-20).

Bayraktar, A., & Hökelekli, E. (2021). Nonlinear soil deformability effects on the seismic damage mechanisms of brick and stone masonry arch bridges. *International Journal of Damage Mechanics*, 30(3), 431-452. <https://doi.org/10.1177/1056789520974423>

Brencich, A. and Sabia, D., (2008). Experimental identification of a multi-span masonry bridge: The Tanaro Bridge. *Construction and Building Materials*, 22(10), 2087-2099. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.07.031>

Çubuk E.G., Sayın E., and Özmen, A., (2022). Dynamic Analysis of Historical Masonry Arch Bridges under Different Earthquakes: The Case of Murat Bey Bridge. *Turkish Journal of Science & Technology*, 17(2). <https://doi.org/10.55525/tjst.1105998>

Evcı, P. U., Sever, A. E., & Şakalak, E. (2024). Investigation of Seismic Behavior of the Historical Yeşiltepe Bridge. *Prevention and Treatment of Natural Disasters*, 3(2). <https://doi.org/10.54963/ptnd.v3i2.291>

Frunzio, G., Monaco, M., & Gesualdo, A. (2001). 3D FEM analysis of a Roman arch bridge. *Historical constructions*, 591-598.

Harapin, A., Smilović, M., Grgić, N., Glibić, M., Radnić, J., (2013). Static and dynamic analysis of the old stone bridge in Mostar. *Gradevinar* 64, 655-655. <https://doi.org/10.14256/JCE.715.2012>

Kader, A., Sayın, E. and Özmen, A., (2021). Farklı Sönüm Tipleri Altında Tarihi Yığma Köprülerin Sismik Tepkilerinin Değerlendirilmesi. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 34(1), 45-59. <https://doi.org/10.35234/fumbd.940435>

Karaton, M., Aksoy, H. S., Sayın, E., & Calayır, Y. (2017). Nonlinear seismic performance of a 12th century historical masonry bridge under different earthquake levels. *Engineering Failure Analysis*, 79, 408-421. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2017.05.017>

- Kumbasaroglu, A., Celik, A., Demir, O., Turan, A. & Yalciner, H., (2019). An Assessment of the Seismic Performance of the Historic Tigris Bridge. *Open Journal of Civil Engineering*, 9(03), 230. <https://doi.org/10.4236/ojce.2019.93016>
- Laterza, M., D'Amato, M., & Casamassima, V.M., (2017). Seismic performance evaluation of multi-span existing masonry arch bridge. In AIP Conference Proceedings (Vol. 1863, No. 1, p. 450010). AIP Publishing LLC. <https://doi.org/10.1063/1.4992619>
- Lourenco, P.B., (1996). Computational strategy for masonry structures. *Delft University of Technology and DIANA Research*.
- Nemutlu, Ö. F., Güzel, İ., Balun, B., Öztürk, M., & Sarı, A. (2023). Nonlinear Seismic Assessment of Historical Masonry Karaz Bridge Under Different Ground Motion Records. *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 12(1), 247-260. <https://doi.org/10.17798/bitlisfen.1232008>
- Onat, O., & Sayın, E. (2015). Tarihi Tağar Köprüsünün doğrusal olmayan sismik analizi. 5. Tarihi Eserlerin Güçlendirilmesi ve Geleceğe Güvenle Devredilmesi Sempozyumu, 1-3.
- Özmen, A. and Sayın, E., (2018). Seismic assessment of a historical masonry arch bridge. *Journal of Structural Engineering & Applied Mechanics*, 1(2), 95-104, 2018. <https://doi.org/10.31462/jseam.2018.01095104>
- Özmen, A. and Sayın, E., (2020). Tarihi yığma bir köprünün deprem davranışının değerlendirilmesi. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 9(2), 956-965. <https://doi.org/10.28948/ngumuh.715121>
- Özmen, A., & Sayın, E. (2023). 3D soil structure interaction effects on the seismic behavior of single span historical masonry bridge. *Geotechnical and Geological Engineering*, 41(3), 2023-2041. <https://doi.org/10.1007/s10706-023-02389-6>
- Pela, L., Aprile, A., Benedetti, A., (2009). Seismic assessment of masonry arch bridges. *Engineering Structures*, 31: 1777- 1788. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2009.02.012>
- Pelà, L., Aprile, A., & Benedetti, A. (2013). Comparison of seismic assessment procedures for masonry arch bridges. *Construction and Building Materials*, 38, 381-394. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.08.046>
- Sakcalı, G.B., Gönül, A. and Yüksel, İ., (2019). Seismic behavior of historical masonry bridges: The case study of Irgandi Bridge. *International Journal*, 6, 25. <https://doi.org/10.15377/2409-9821.2019.06.4>
- SAP2000. Integrated Finite Element Analysis and Design of Structures Basic Analysis Reference Manual. Berkeley, California, Computer and Structres Inc.
- Saygılı, Ö., & Lemos, J. V. (2021, October). Seismic vulnerability assessment of masonry arch bridges. In *Structures* (Vol. 33, pp. 3311-3323). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2021.06.057>
- Seismosoft. (2023). SeismoMatch 2023-A Computer Program for Spectrum Matching of Earthquake Records.
- Sözen, Ş., & Doğangün, A. (2023). Evaluation of the effect of change in support conditions on the seismic behavior of a historical masonry bridge. *ACM Journal on Computing and Cultural Heritage*, 16(4), 1-19. <https://doi.org/10.1145/3590957>
- Sevim, B., Bayraktar, A., Altunişik, A. C., Atamtürktür, S., & Birinci, F. (2011). Assessment of nonlinear seismic performance of a restored historical arch bridge using ambient vibrations. *Nonlinear Dynamics*, 63, 755-770. <https://doi.org/10.1007/s11071-010-9835-y>

Sözen, Ş. and Çavuş, M., (2020). Tek açıklıklı tarihi taş köprülerde form değişikliğinin köprünün sismik davranışına etkisinin değerlendirilmesi: Niksar Yılanlı (Leylekli) Köprü Örneği. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 8(1), 48-59. <https://doi.org/10.29130/dubited.589223>

Usta, P., Sever, A. E., Şakalak, E., & Ünveren, C. (2024). Examination of the Seismic Behavior of The Historical Yeşildere Bridge. *Konya Journal of Engineering Sciences*, 12(2), 432-450. <https://doi.org/10.36306/konjes.1427898>

Zampieri, P., Zanini, M. A., & Modena, C. (2015). Simplified seismic assessment of multi-span masonry arch bridges. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 13, 2629-2646. <https://doi.org/10.1007/s10518-015-9733-2>



Kahramanmaraş Sütçü İmam University

Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 23.05.2024
Kabul Tarihi : 04.09.2024

Received Date : 23.05.2024
Accepted Date : 04.09.2024

FARKLI BOYUTLARDA CAM LİFİ TAKVİYELİ ALÇI ESASLI KOMPOZİT HARÇLARIN MEKANİK VE TERMAL PERFORMANSLARININ KARŞILAŞTIRILMASI ÜZERİNE TEKNİK BİR İRDELEME

A TECHNICAL EVALUATION ON THE COMPARISON OF THE MECHANICAL AND THERMAL PERFORMANCES OF DIFFERENT SIZE GLASS FIBERS REINFORCED GYPSUM BASED COMPOSITE MORTARS

Ali KAYA^{1*} (ORCID: 0009-0008-3347-900X)
Lütfullah GÜNDÜZ¹ (ORCID: 0000-0003-2487-467X)

¹ İzmir Kâtip Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İzmir, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Ali KAYA, alikaya36555@gmail.com

ÖZET

Alçı esaslı kompozit harçlar, yapı endüstrisinde yaygın olarak kullanılan ve çeşitli inşaat uygulamalarında tercih edilen önemli bir yapı malzemesidir. Bu harçlar, alçı matris içerisine farklı takviye maddelerinin katılmasıyla geliştirilmiş, dayanıklılığı ve mukavemeti artırılmış kompozit malzemelerdir. Antik medeniyetlerden günümüze kadar uzanan bir geçmişe sahip olan alçı, modern inşaat teknikleriyle daha da yaygınlaşmış ve günümüzde kompozit harçlar olarak kullanımı yaygınlaşmıştır. Ancak, bu malzemeler bazı mekanik özelliklerde sınırlamalar getirmektedir eğilme dayanımı, basınç dayanımı veya ısı iletimi konularında bazı problemler ile karşılaşabilmektedir. Bu çalışma farklı cam lifi takviyelerinin alçı esaslı kompozit harçların performansı üzerindeki etkilerini incelemektedir. Mikronize cam lifi, taraklanmış cam lifi, 6 mm ve 12 mm cam lifi gibi farklı cam lifi türlerinin kullanıldığı deneyler, harcın mekanik özellikleri ve sıcaklık etkileri üzerinde kapsamlı analizler sunmaktadır. Bu analizler, alçı esaslı kompozit harçların tasarımını ve kullanımını daha etkili hale getirmek için önemli bilgiler sağlamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Alçı kompozit, mikronize cam lifi, taraklanmış cam lifi, 6mm cam lifi, 12mm cam lifi.

ABSTRACT

Gypsum-based composite mortars are widely used in the construction industry and preferred in various construction applications. These mortars are composite materials improved by adding different reinforcing materials to the gypsum matrix, enhancing their durability and strength. Gypsum, which has a long history from ancient civilizations to the present, has become more widespread with modern construction techniques, and its use in composite mortars has increased today. However, there are some limitations in the physical and mechanical properties of these materials. For instance, compared to cement-bonded mortar combinations, significant differences can be observed in technical properties such as flexural strength, compressive strength and thermal conductivity. This study examines the effect of different sizes of glass fiber reinforcements on the performance of gypsum-based composite mortars. Test samples were prepared using micronized, combed, 6 mm and 12 mm glass fibers, the analysis results on unit weight change, water absorption, apparent porosity, mechanical properties and thermal effects are presented comparatively in the context of fiber size effect. It was observed that sample 12 mm fibers performed better than those with other fiber sizes. The findings aim to improve design and usage conditions of gypsum-based composite mortar products.

Keywords: Gypsum composite, micronized glass fiber, combed glass fiber, 6mm glass fiber, 12mm glass fiber

ToCite: KAYA, A., & GÜNDÜZ, L., (2024). FARKLI BOYUTLARDA CAM LİFİ TAKVİYELİ ALÇI ESASLI KOMPOZİT HARÇLARIN MEKANİK VE TERMAL PERFORMANSLARININ KARŞILAŞTIRILMASI ÜZERİNE TEKNİK BİR İRDELEME. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 27(4), 1267-1284.

GİRİŞ

Alçı esaslı kompozit harçlar, modern yapı endüstrisinde önemli bir yere sahip olan ve çeşitli inşaat uygulamalarında yaygın olarak kullanılan bir yapı malzemesidir. Bu malzemeler, alçı esaslı matris içerisine farklı takviye maddelerinin katılmasıyla elde edilen, yapısal dayanıklılığı artırmak, mukavemetini yükseltmek ve özelliklerini iyileştirmek amacıyla geliştirilmiş bir tür kompozit malzemedir (Fantilli vd., 2021; Yildizel, 2020). İç mekan duvar kaplamalarından sıva uygulamalarına, dekoratif elemanlardan mimari yapıların inşasına kadar çeşitli alanlarda kullanılmaktadır (Ren vd., 2021).

Alçı, binlerce yıllık geçmişiyle eski medeniyetlerden beri kullanılan bir yapı malzemesidir. Eski Mısır'da piramitlerde ve Orta Çağ Avrupa'sında katedrallerde sıklıkla kullanılan alçı, 18. ve 19. yüzyıllarda modern inşaat tekniklerinin gelişmesiyle daha da yaygınlaşmıştır (Vitti, 2021). Günümüzde, alçının kompozit harçlar olarak kullanımı, malzemenin doğal özelliklerinin yanı sıra mekanik ve fiziksel özelliklerini iyileştirmek amacıyla çeşitli takviye maddeleriyle zenginleştirilmesiyle gerçekleşmektedir (Demir, 2019; Zhu vd., 2018).

Ancak, alçı esaslı kompozit harçlar kullanıldıkları uygulama alanlarında bazı zorluklarla karşılaşabilmektedir. Özellikle, eğilme dayanımındaki zayıflıklar ve ısı iletimindeki sınırlamalar, bu malzemelerin performansını etkileyen başlıca faktörlerdir (Gencel vd., 2022; Bouzit vd., 2019). Yüksek miktarda yük altında eğilme dayanımındaki zayıflıklar, yapısal bütünlüğü tehlikeye atabilirken, ısı iletimindeki sınırlamalar ise yapıların enerji verimliliğini ve ısı yalıtımını olumsuz etkileyebilir (Jia vd., 2021). Malzemenin zamana karşı ısıya olan dayanıklılık süresi, karşı tarafa ilettiği ısı miktarı ve ısı tutma yeteneği, enerji tasarrufu sağlamak amacıyla önemlidir (Khamidov vd., 2022). Alçı esaslı harçlarda bunu sağlamak mümkün olabilir, bu durum malzemeleri iyi bir yalıtım malzemesi yapar ancak mekanik mukavemeti sınırlayabilir (Chernysheva vd., 2020).

Buna rağmen, alçı esaslı kompozit harçların performansını artırmak ve kullanım alanlarını genişletmek amacıyla birçok araştırma ve geliştirme çalışması yapılmaktadır (Esan, 2024). Özellikle, farklı takviye malzemelerinin kullanımı ve üretim tekniklerindeki gelişmeler, bu malzemelerin mekanik özelliklerini iyileştirmek için önemli bir potansiyele sahiptir (Li vd., 2022). Takviye malzemeleri olarak cam lifi, polimer lifler, doğal lifler ve metal lifler gibi çeşitli malzemeler kullanılmaktadır (Gonçalves vd., 2022). Bu liflerin eklenmesi, harcın çekme ve eğilme mukavemetini artırarak daha dayanıklı yapı malzemeleri elde edilmesini sağlar (Wu vd., 2024).

Alçı bazlı kompozit harçların modern inşaat sektöründeki önemi, çevre dostu ve sürdürülebilir malzemelere olan talebin artmasıyla daha da belirginleşmiştir (Doleželová vd., 2022; Şahin & Demir, 2019). Bu harçlar, enerji verimliliğini artırarak ve yapıların çevresel etkilerini azaltarak sürdürülebilir yapı uygulamalarına katkıda bulunur (Devrek vd., 2022; Biçer, 2020). Örneğin, alçı esaslı kompozit harçların kullanımı, hem malzemenin dayanıklılığını artırır hem de yapıların enerji tasarrufunu sağlar (Korkmazı & Birinci, 2017). Aynı zamanda, bu tür kompozit malzemelerin üretimi, geleneksel yapı malzemelerine göre daha düşük enerji gereksinimleri ile gerçekleştirilebilir, bu da karbon ayak izinin azalmasına yardımcı olur (Kugo & Mai, 2021).

Günümüzde fiziksel geri dönüşümle elde edilmiş cam lif türevlerinin çimento bağlayıcılı harç kombinasyonlarında kullanımı üzerine sınır sayıda da olsa araştırma bulgularını görebilmek mümkün olmaktadır. Ancak, bu lif türü malzemelerin alçı bazlı bağlayıcılı ürünlerde kullanımı ve etkileşimleri üzerine yeter düzeyde çalışma bulgularına rastlanılmadığı da görülebilmektedir. Bu bağlamda, bu çalışma kapsamında fiziksel geri dönüşümle elde edilmiş ve dört farklı boyutta sınıflandırılmış tekstil tipi cam lifi takviyelerinin farklı oranlarda alçı esaslı kompozit harçların performansı üzerindeki etkileri incelenmiş ve özellikleri irdelenmiştir. Dört farklı boyutta sınıflandırılmış tekstil tipi cam lifleri bu çalışmada *mikronize cam lifi*, *taraklanmış cam lifi*, *6 mm cam lifi* ve *12 mm cam lifi* olarak isimlendirilmiş olup, cam lifi boyut etkisinin hazırlanan harç test örneklerinin mekanik özellikleri deneysel olarak incelenmiştir. Ayrıca, test örneklerinin 20°C-250°C sıcaklık değişimine maruz kalmaları durumunda ısıl verimlilik etkileri yapılan bir dizi ısıl değişim analizleri ile irdelenmiştir. Cam lifi boyutunun alçı bazlı harç

karışımlarındaki etkilerinin irdelenmesi, optimum lif boyutu ve kullanım oranlarının alçı bazlı yapı malzeme ürünlerinin gelişimine ışık tutması amaçlanmıştır. Ayrıca, farklı uzunluk değerlerine sahip cam lifi malzemelerin alçı bazlı ürünlerde sağlayabileceği teknik avantaj ve dezavantajlar üzerine bir tecrübenin oluşması da hedeflenmiştir.

MATERYAL VE YÖNTEM

Malzemeler

Alçı esaslı hazırlanan kompozit harç karışımlarında kullanılmış olan alçı, TS EN 13279 standardına uygun olarak üretilmiş ve piyasada kartonpiyer alçı olarak bilinen bir alçı türü olup teknik özellikleri Tablo 1’ de verilmiştir.

Tablo 1. Alçı Malzemenin Teknik Özellikleri (All Alçı, 2024)

Teknik özellikler	
Prize Başlangıç Süresi	min. 25dk.
Donma Süresi	12-14dk.
Hacim Ağırlığı 6.1 Yoğunluk (K.LA)	640-690 g/lt
Yayıma Çapı	180-210 mm
PH	1 lt'lik ölçülü kap için 6-7
Eğilmede Çekme Dayanımı	min.1,5 N/mm ²
Basınç Dayanımı	min.3,0 N/mm ²
Elek Analizi	200 um = <%1, 100 um = <%10

Çalışma kapsamında alçı esaslı kompozit harç örneklerinin hazırlanmasında dört farklı boyutta sınıflandırılmış tekstil tipi cam lifi kullanılmış olup, bu lifler mikronize cam lifi (ML), taraklanmış cam lifi (TL), 6 mm cam lifi (NL) ve 12 mm (UL) cam lifi olarak kodlanmıştır. Lif malzemelerin sembolik görselleri Şekil 1’de verilmiş olup, bazı teknik özellikleri Tablo 2’de verilmiştir. Bu lif örneklerinden mikronize cam lifi (ML) öğütülmüş toz formunda olup, diğer lifler farklı boyutlardaki elyaf formlarındadır.

Tablo 2. Tekstil Tipi Cam Lifi Malzemenin Teknik Özellikleri

Özellik	Mikronize	Taraklanmış	6 mm Cam Lifi	12 mm Cam Lifi
	Cam Lifi	Cam Lifi		
	ML	TL	NL	UL
Özgül ağırlık ağırlığı, (gr/cm ³)	2,60	2,58	2,62	2,63
Maksimum tane boyutu	150 µm	750 µm - 2 mm	6 mm	12 mm
Elyaf çapı, (µm)	10-15 (±%15)	10-15 (±%15)	15-18 (±%18)	15-18 (±%18)
Nem oranı, (%)	<0,15	<0,18	<0,15	<0,15
İplik oranı, (%)	<0,12	<0,16	<0,12	<0,12
Erime sıcaklığı, (°C)	>1050	>985	>1050	>1050
Çekme dayanımı, (MPa)	-	>2200	>3000	>3000
Elastisite Modülü, (GPa)	-	>35	>65	>65

Kompozit harç karışımlarının hazırlanmasında ana agrega malzeme olarak -1 mm boyutlu silis kumu ve dolgu malzemesi olarak -100 mikron boyutta toz formda kalsit (CaCO₃) kullanılmıştır. Silis kumu ve toz kalsit malzemeler piyasa koşullarından temin edilerek kullanılmıştır. Harç bileşiminde kıvam arttırıcı katkı malzemesi olarak alçı bileşimiyle uyumlu melamin sülfonat esaslı bir süperakışkanlaştırıcı, toz formunda piyasa koşullarından temin edilerek kullanılmıştır. Tüm harç karışımlarında karma suyu olarak şebeke suyu kullanılmıştır.



Şekil 1. Lifi Görselleri a. Mikronize Cam Lifi b. Taraklanmış Cam Lifi
c. 6mm Cam Lifi d. 12mm Cam Lifi

Tablo 3. Karışım Dizaynları

Numune Kodu	Alçı (%)	Kum (%)	Dolgu Malzemesi (%)	Melamin Sülfonat (%)	Lif (%)
KH	40	39,92	20	0,08	0,00
ML _{0,5}	40	39,42	20	0,08	0,50
ML ₁	40	38,92	20	0,08	1,00
ML _{1,5}	40	38,42	20	0,08	1,50
ML ₂	40	37,92	20	0,08	2,00
ML _{2,5}	40	37,42	20	0,08	2,50
ML ₃	40	36,92	20	0,08	3,00
ML ₄	40	35,92	20	0,08	4,00
TL _{0,5}	40	39,42	20	0,08	0,50
TL ₁	40	38,92	20	0,08	1,00
TL _{1,5}	40	38,42	20	0,08	1,50
TL ₂	40	37,92	20	0,08	2,00
TL _{2,5}	40	37,42	20	0,08	2,50
TL ₃	40	36,92	20	0,08	3,00
TL ₄	40	35,92	20	0,08	4,00
NL _{0,5}	40	39,42	20	0,08	0,50
NL ₁	40	38,92	20	0,08	1,00
NL _{1,5}	40	38,42	20	0,08	1,50
NL ₂	40	37,92	20	0,08	2,00
NL _{2,5}	40	37,42	20	0,08	2,50
NL ₃	40	36,92	20	0,08	3,00
NL ₄	40	35,92	20	0,08	4,00
UL _{0,5}	40	39,42	20	0,08	0,50
UL ₁	40	38,92	20	0,08	1,00
UL _{1,5}	40	38,42	20	0,08	1,50
UL ₂	40	37,92	20	0,08	2,00
UL _{2,5}	40	37,42	20	0,08	2,50
UL ₃	40	36,92	20	0,08	3,00
UL ₄	40	35,92	20	0,08	4,00

Malzemelerin Kullanım Oranları ve Örneklerin Hazırlanması

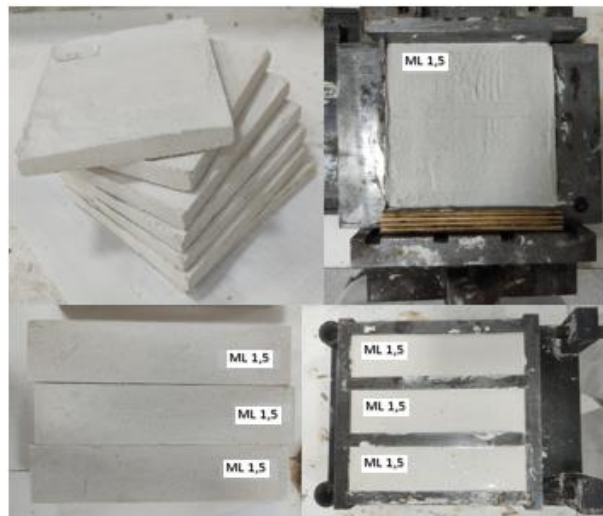
Alçı esaslı kompozit harç örneklerinin hazırlanmasında oluşturulan karışım kombinasyonları ve harç tasarım bileşenleri Tablo 3’de verilmiştir. Test örneklerinde cam lifi boyu ve katkı oranının etkisinin incelenebilmesi

amacıyla bileşiminde herhangi bir lif içermeyen bir seri kontrol numunesi (KH) hazırlanarak test edilmiştir. 4 farklı formdaki cam lifinin her biri ile ayrı ayrı ağırlıkça %0.5, %1, %1.5, %2, %2.5, %3 ve %4 oranlarında cam lif katkı test örnekleri hazırlanmıştır. Bu örneklerin hazırlanmasında karışımda kullanılan cam lifi miktarı, karışım tasarımındaki silis kumu ile ikame edilerek oluşturulmuştur.

Kompozit harç karışımlarında kullanılan 4 farklı formdaki cam lifinin her biri için 7'şer seri numuneler dökülmüştür. Bu test örneklerinde değişken parametre olarak karışım tasarımında lif katkı miktarı ağırlıkça artırılarak, lif miktarı ve boyut farkı etkisinin alçı esaslı harcın eğilme dayanımı, basınç dayanımı, birim hacim ağırlık ve 20°C-250°C sıcaklık etkileşiminde ısıl performans davranışının incelenmesi amaçlanmıştır. Tüm harç karışımları öncelikle kuru toz formda yaklaşık 1-2 dakika mikser kabında karıştırılarak homojen bir karışım elde edilmeye çalışılmıştır. Daha sonra tüm karışımlarda su/katı oranı 1,33 sabit değerde olacak şekilde şehir şebeke suyu ile homojen bir form elde edilinceye kadar 1.5-2 dakika daha karıştırma işlemine devam edilmiştir. Harç tasarımı alçı bazlı olması ve hızlı donma etkisi göstermesi sebebiyle, yaş karıştırma işlemi sonrası bekletilmeksizin tüm karışımlar prizmatik 40x40x160 mm³ çelik kalıplara ve ayrıca 140x140x10 mm³ hacimli kare geometrili çelik levha kalıplara dökülerek 30 dakika priz alma sürecine bırakılmıştır. Bu süre sonunda test örnekleri kalıplardan çıkarılıp 20±2°C'lik ortamda laboratuvar koşullarında test gününe kadar beklemeye bırakılmıştır (Şekil 2). Elde edilen tüm test örnekleri üzerinde Tablo 4'te belirtilen standartlarda öngörülen deneysel analizlerin prensipleri bu çalışmada test prosedürü olarak uygulanmış olup, teknik bulgular kaydedilmiştir (Şekil 3). Prizma şekilli örnekler üzerinde yoğunluk, görünür porozite, kütlece su emme, eğilme dayanım ve basınç dayanımı testleri yapılmıştır. Levha formundaki örnekler üzerinde ise laboratuvar ortam koşullarında oluşturulan bir test düzeneği yardımıyla sıcaklık etkileşim analizleri değişen sıcaklık etkilerinde incelenmiştir. Bunlara ilaveten test örnekleri üzerinde makroskobik incelemeler yapılarak lif takviyelerinin alçı bazlı matris yapı içerisindeki fiziksel durumu incelenmeye çalışılmıştır.

Tablo 4. Kompozit Harç Örnekleri Üzerinde Uygulanan Testler ve İlgili Standartları

Deneysel	İlgili Standart	Açıklama
Birim Hacim Ağırlık	TS EN 1015-10 (2001)	Sertleşmiş harcın boşluklu kuru birim hacim kütlelerinin tayini
Üç Nokta Eğilme Dayanımı	TS EN 1015-10 (2022)	Sertleşmiş harcın eğilmede çekme ve basınç dayanımının tayini
Tek Eksenli Basınç Dayanımı	TS EN 1015-10 (2022)	Sertleşmiş harcın eğilmede çekme ve basınç dayanımının tayini
Görünür Porozite	ASTM C20, (2022)	Görünür Porozite, Su Emme, Görünür Özgül Kütle, Yığın Yoğunluk Tayini
Kütlece Su emme	ASTM C20, (2022)	Görünür Porozite, Su Emme, Görünür Özgül Kütle, Yığın Yoğunluk Tayini



Şekil 2. Prizma ve Kare Levha Boyutlu Test Örneklerinin Sembolik Görünümü



a). Eğilme Dayanımı Analizi, b). Tek Eksenli Basınç Dayanımı Analizi,
c). Birim Hacim Ağırlık Tayini, d). Kütlece Su Emme Analizi

Şekil 3. Deneysel Çalışmalardan Kısa Bir Kesit

Tablo 5. Genel Deneysel Veri Tablosu

Numune Kod	1.Gün Yoğunluk (Kg/m ³)	14.Gün Yoğunluk (Kg/m ³)	Eğilme Dayanımı (MPa)	Basınç Dayanımı (MPa)	Görünür Porozite (%)	Kütlece Su Emme (%)
KH	1.849	1.582	1,75	6,85	3,23	18,63
ML _{0,5}	1.805	1.520	1,44	4,22	17,50	18,08
ML ₁	1.775	1.498	1,28	3,85	19,28	19,93
ML _{1,5}	1.823	1.523	1,28	4,15	18,49	18,99
ML ₂	1.795	1.534	1,28	4,22	18,20	18,69
ML _{2,5}	1.773	1.507	1,15	3,24	18,71	19,27
ML ₃	1.796	1.500	1,32	4,29	18,51	19,16
ML ₄	1.810	1.502	1,04	3,71	18,87	19,47
TL _{0,5}	1.853	1.644	1,16	2,98	18,18	18,49
TL ₁	1.820	1.575	1,13	2,85	18,68	19,05
TL _{1,5}	1.846	1.558	1,29	3,26	18,13	18,75
TL ₂	1.832	1.528	1,69	5,58	17,72	17,90
TL _{2,5}	1.833	1.528	1,42	4,11	17,70	18,14
TL ₃	1.813	1.518	2,14	6,42	17,30	17,74
TL ₄	1.826	1.517	1,96	5,69	17,87	18,38
NL _{0,5}	1.866	1.544	1,70	4,39	18,52	19,16
NL ₁	1.857	1.612	1,54	3,09	18,26	18,82
NL _{1,5}	1.832	1.571	1,72	3,41	18,26	18,91
NL ₂	1.852	1.549	2,18	3,69	17,86	18,54
NL _{2,5}	1.828	1.591	1,71	3,73	18,75	19,26
NL ₃	1.845	1.565	1,73	3,39	18,98	19,71
NL ₄	1.808	1.512	2,72	5,80	18,69	19,31
UL _{0,5}	1.868	1.563	1,51	3,53	18,40	18,92
UL ₁	1.825	1.519	1,48	3,39	18,53	19,35
UL _{1,5}	1.854	1.543	1,75	3,69	18,55	19,17
UL ₂	1.850	1.524	1,77	3,71	18,61	19,30
UL _{2,5}	1.836	1.521	1,80	4,63	18,43	19,05
UL ₃	1.830	1.511	2,60	5,85	18,26	18,88
UL ₄	1.819	1.514	3,32	7,03	17,96	19,67

Laboratuvar ortam koşullarında normal atmosfer basıncında beklemeye bırakılan tüm test örneklerinin 1. ve 14. gün birim hacim ağırlık değerleri ölçülerek kaydedilmiştir. 1. ve 14. gün kütle değeri değişimlerinden, her bir numune için nem atma miktarları % oran olarak hesaplanmıştır. 20°C-250°C sıcaklık etkileşiminde ısıl performans davranışının incelenmesi amacıyla kontrol karışımı ve her bir lif türevi için karışımdaki lif katkı oranı ağırlıkça %0.5, %2 ve %4 olan levha şekilli test örneklerinin 14 gün sonrasında testleri yapılmış olup, test düzeneğinde elde edilen parametrik bulgular detaylı kaydedilmiştir.

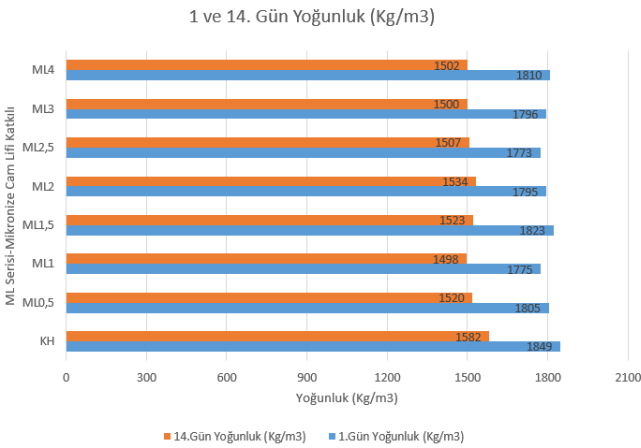
ARAŞTIRMA BULGULARI

Fiziksel Etkiler

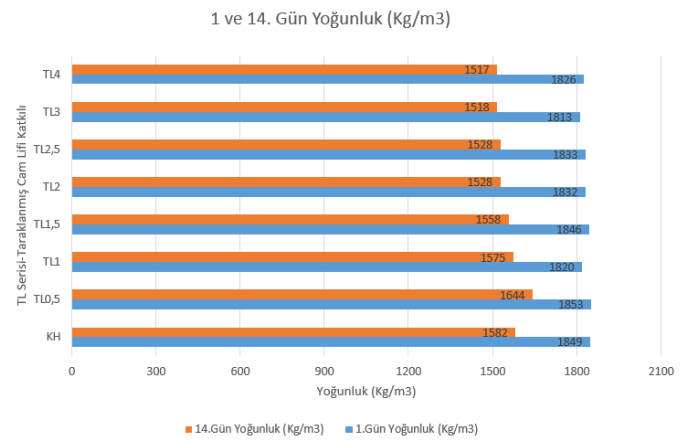
Alçı esaslı cam lif takviyeli kompozit harç örneklerinde elde edilen yoğunluk, eğilme dayanımı, basınç dayanımı, görünür porozite ve kütlece su emme deney bulguları Tablo 5'te verilmiştir.

Yoğunluk

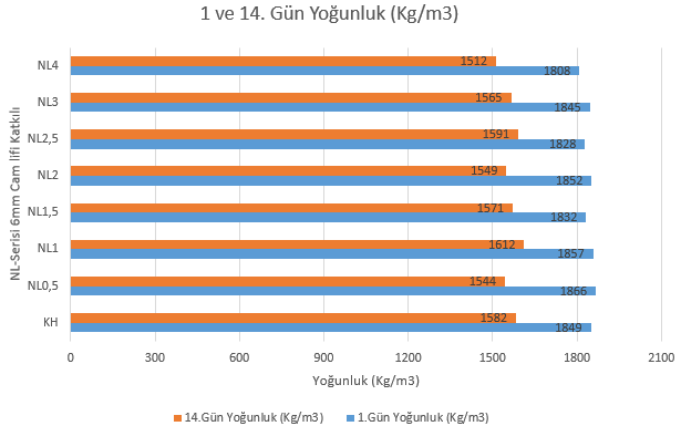
Kontrol örneklerinin 14 gün sonrası durumda yoğunluk değeri 1582 kg/m³ olarak ölçülmüştür. Alı_Ridha vd., 2017'de alçı bazlı kompozit test örneklerinin kuru durumda yoğunluk değerlerini karışımdaki su/alçı oranı değişimine bağlı olarak 1340 – 1463 kg/m³ aralığında belirlemişlerdir. Farklı boyut cam lifi takviyeli alçı esaslı kompozit harç örneklerinin 1. ve 14. gün yoğunluk değerleri incelendiğinde; her bir lif boyutu ve kullanım oranına göre yoğunluk değerlerinin farklılık göstermektedir. 1. gün yoğunluk değerleri dikkate alındığında, ağırlıkça %2.5 mikronize cam lifli karışım (ML_{2.5}) kontrol harcına göre %4,07 daha düşük yoğunluktadır. Bu değer, tüm test örnekleri arasında en düşük yoğunluk değerini temsil etmekte olup, 1773 kg/m³ değerindedir. Bununla birlikte en yüksek yoğunluk değeri ise ağırlıkça %0.5 oranında 12 mm cam lifi katkılı kompozit harç (UL_{0.5}) örneğinde elde edilmiş olup, kontrol harcına göre %1,06 daha yüksek yoğunluk değerindedir. 14. gün sonrasında tüm test örneklerinde farklı oranlarda nem atma ve kuruma olguları gözlenmiş olup, 14 gün sonra hemen hemen tüm örneklerin değişmez kütle değerine ulaştığı görülmüş olup, 14. gün yoğunluk değerleri tüm örnekler için bu çalışmada priz almış kuru durumda örnek yoğunluk değerleri olarak kabul edilmiştir. Bu bağlamda, ML₁ örneğinin yoğunluk değeri 1498 kg/m³ olup, kontrol harcına göre %5,34 daha düşük yoğunluktadır. Bununla birlikte en yüksek yoğunluk değeri ise ağırlıkça %0.5 oranında taraklanmış cam lifi katkılı kompozit harç (TL_{0.5}) örneğinde elde edilmiş olup, kontrol harcına göre %3,91 daha yüksek yoğunluk değerindedir. Tüm test örneklerinin 1. ve 14. gün yoğunluk değerleri arasındaki değişim grafiksel olarak Şekil 4 – Şekil 7'de her bir lif boyutu için ayrı ayrı gösterilmiştir.



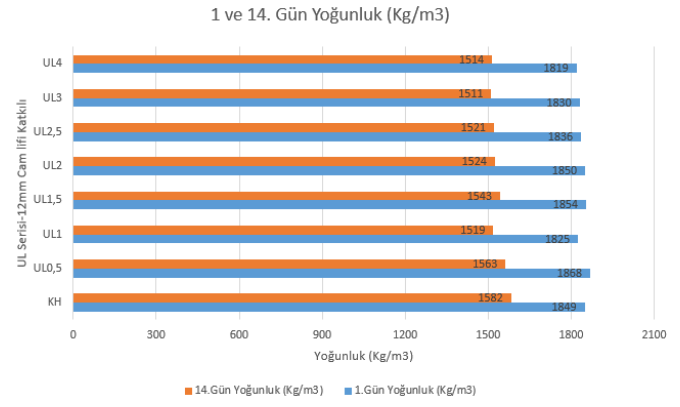
Şekil 4. ML Kodlu Örneklerin Süreye Bağlı Yoğunluk İlişkisi



Şekil 5. TL Kodlu Örneklerin Süreye Bağlı Yoğunluk İlişkisi



Şekil 6. NL Kodlu Örneklerin Süreye Bağlı Yoğunluk İlişkisi



Şekil 7. UL Kodlu Örneklerin Süreye Bağlı Yoğunluk İlişkisi

Farklı boyut lif katkılarının alçı bazlı harç kombinasyonlarındaki yoğunluğa etkisi bağlamında incelendiğinde, lif katkı oranının artmasıyla yoğunluk değerlerinin düştüğü görülmektedir. Ancak, bu düşüşler ihmal edilebilir düzeyde olup, yoğunluk değerleri üzerinde kısmi artışlar da görülebilmektedir. Bunun sebebi ise lifin matris yapı içerisinde yeterince homojen karışmamasından kaynaklı olduğu öngörülmektedir. Hazırlanan kompozit harç içerisinde kullanılan 4 farklı boyut cam lifi arasında mikronize cam lif katkılarıyla hazırlanan karışımlarda lif miktarının artması kontrol karışımına kıyasla yoğunluğu diğer lif boyutlarına göre daha fazla düşürmektedir.

Görünür Gözeneklilik

Alçı esaslı kompozit harç örneklerinin Tablo 4'de verilen görünür gözeneklilik değerleri incelendiğinde, kontrol harcının görünür gözeneklilik değeri ortalama %3.23 olarak belirlenmiştir. Bununla birlikte, kontrol harcına kıyasla cam lifi boyut etkisinin harcın matris yapısında önemli ölçüde görünür gözeneklilik olgusunu artırdığı açıkça görülebilmektedir. Ancak, lif boyutundaki değişimler açısından ele alındığında görünür gözeneklilik değerlerinde çok belirgin bir değişiklik oluşturmadığı görülmüştür. Cam lifi katkılı karışımlardan görünür gözeneklilik oranı en düşük olan karışım TL₃ olup değeri %17.30 olup, kontrol harcına göre gözeneklilik artışı yaklaşık 5.4 kat'dır. Görünür gözeneklilik oranı en yüksek olan karışım ise ML₁ olup değeri %19.28 olup, kontrol harcına göre gözeneklilik artışı yaklaşık 6 kat'dır. Örneklerin matris yapılarında cam lif boyutunun artışı, matris yapıda liflerin saçılımlı ve düzensiz dağılım özelliği göstermesi sebebiyle, görünür gözeneklilik olgularının artmasına neden olduğu düşünülmektedir.

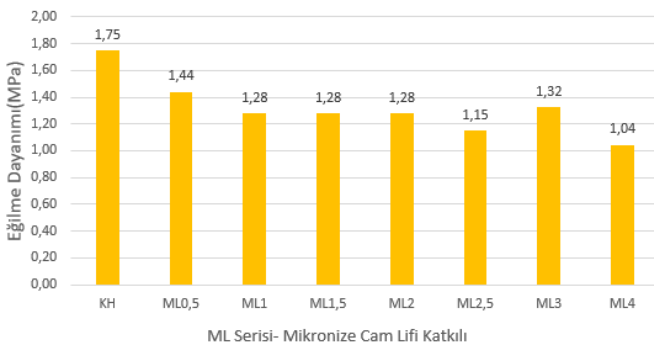
Kütlece Su Emme

Lif boyutu değişimi ve lif katkısı kullanım oranı bağlamında test örneklerinin kütlece su emme değerlerine etkisi bakımından incelendiğinde mikronize cam lifi, 6 mm cam lifi ve 12 mm cam lifi katkılı harçlarda değişken ara değerler görülse de genel olarak kütlece su emme değerlerinin lif takviyesinin artırılması ile arttığı yönündedir. Taraklanmış cam lifi katkılı harç örneklerinin kütlece su emme değerlerinde ise lif katkı oranı arttıkça genel eğilimin azalma yönünde olduğu gözlenmiştir. Bu bağlamda kontrol harcı (KH) ile kıyaslandığında, mikronize cam lifi katkılı harçlarda ML_{0,5} karışımı %2,96 daha az su emme değerine sahipken ML₄ karışımı %4,5 daha fazla su emme eğilimi göstermiştir. Taraklanmış cam lifi katkılı harçta kontrol numunesine oranla maksimum olarak TL₁ karışımı %2,24 daha fazla su emme özelliği gösterirken TL₃ karışımında %4,77 daha az kütlece su emme değeri elde edilmiştir. Diğer bir lif katkısı olarak kullanılan 6 mm cam lifinin kütlece su emme değerine etkisi kontrol harcına göre incelendiğinde maksimum değer NL₂ karışımında elde edilmiş olup kütlece %0,49 oranında daha az su emme eğilimi göstermiştir. Bununla birlikte, NL₃ karışımı ise %5,82 daha fazla su emme eğilimi göstermiştir. 12 mm cam lifi katkılı numunelerde ise UL₄ karışımı için maksimum değer elde edilmiş olup, kontrol harcına göre %5,58 daha fazla kütlece su emme eğilimi gösterdiği gözlemlenmiştir.

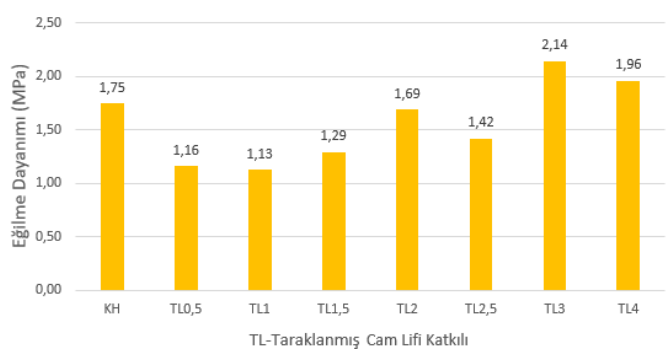
Eğilme Dayanımı

Cam lif katkılı alçı esaslı kompozit test örnekleri üzerinde 14 günlük kür sonrasında üç nokta eğilme dayanım testleri uygulanmıştır. Kompozit yapıları harçlarda farklı orijinlerdeki lif katkısının özellikle lif boyutuna bağlı olarak harcın eğilme dayanım değerlerini önemli ölçüde etkilediği genel bir yaklaşım olarak kabul edilebilmektedir. Özellikle lif boyutunun artışı ve katkı oranı arttıkça, harcın eğilme dayanımını artırıcı yönde olumlu bir etki ettiği

genel bir olgudur. Bu özellik çoğunlukla çimento esaslı harç matrislerinde görülebilen bir durum olmasının yanı sıra alçı esaslı matrislerde detay bir inceleme gerektirebilmektedir. Bu çalışma kapsamında dört farklı boyuttaki cam lifi katkısıyla hazırlanan örneklerde, lif boyutunun değişiminin harcın eğilme dayanım değerine farklı etkileşimleri olduğu görülmüştür. Bu bağlamda, özellikle mikronize cam lifli katkıli numunelerin tamamında, lif katkı oranının artmasına paralel olarak eğilme dayanım değerlerinin düştüğü belirlenmiştir (Şekil 8). Kontrol harcının aynı koşullardaki eğilme dayanımı 1.75 MPa iken, mikronize cam lifli katkıli numunelerin eğilme dayanımı değerleri 1.04 MPa – 1.44 MPa aralığında değişim göstermiştir. Bu durumun, mikronize cam lifinin lif boylarının 10-100 μm olması sebebiyle alçı bazlı matris yapı içerisinde gerekli adezyon etkisini sağlayamamış olması, lif katkısının artmasıyla daha gevrek dokulu bir yapı oluşması ve dayanım etkisinde negatif bir olgu gelişmesinden kaynaklandığı şeklinde yorumlanmıştır. Padavet ve arkadaşları (2011) gri kalsine alçının mekanik özelliklerinin (Young Modülü, mukavemet ve sürünme) zamana bağlı değişimleri üzerine yaptıkları araştırma çalışmasında alçı bazlı test örneklerinin eğilme dayanımlarını 1,12 – 3,58 MPa aralığında değişim gösterdiğini belirlemişlerdir. Bu bağlamda herhangi bir lif katkısı yer almayan kontrol örneklerinin de eğilme dayanım değerlerinin bu bulgular aralığında kaldığı görülmüştür.

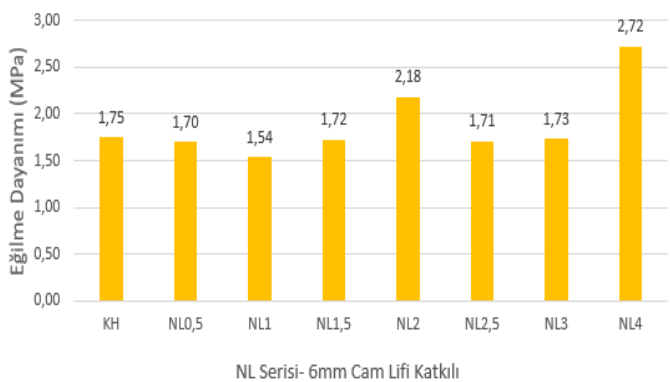


Şekil 8. ML Kodlu Örneklerin Eğilme Dayanımı Değerleri

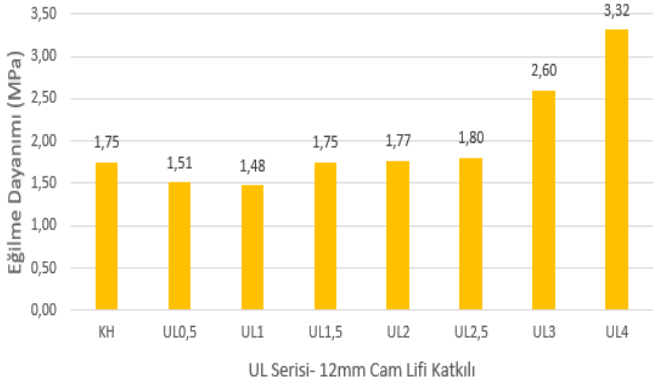


Şekil 9. TL Kodlu Örneklerin Eğilme Dayanımı Değerleri

Taraklanmış cam lifi katkıli örneklerin eğilme dayanım değerlerinde ise, ağırlıkça %3 lif katkı kullanım oranına kadar, lif katkısının harcın eğilme dayanımını kontrol harcına kıyasla artırıcı bir etki göstermediği belirlenmiştir. Bu kullanım oranına kadar olan taraklanmış cam lifi katkıli örneklerin (TL_{0,5} – TL_{2,5}) eğilme dayanımları kontrol harcının değerlerinden daha düşük düzeyde kalmıştır (Şekil 8). Ancak, ağırlıkça %3 ve %4 lif katkı kullanım oranlarına sahip TL3 ve TL4 karışımlarının ise eğilme dayanımları kontrol harcının değerlerinden daha yüksek değerlerdedir. Bu olgu; taraklanmış cam lifi kullanımlarında alçı esaslı harcın eğilme dayanımının artışı, lif katkısının ağırlıkça >%3'den daha büyük oranlarda kullanımının gerekliliğini göstermektedir. Bu oranlarda lif katkısının eğilme mukavemeti açısından daha etkinlik kazandığı görülebilmektedir.



Şekil 10. NL Kodlu Örneklerin Eğilme Dayanımı Değerleri



Şekil 11. UL Kodlu Örneklerin Eğilme Dayanımı Değerleri

Diğer taraftan, 6 mm cam lifi katkıli örneklerin eğilme dayanım değerlerinde ise, ağırlıkça %2 ve %4 lif katkı kullanım oranlı (NL₂ ve NL₄) karışımlarının eğilme dayanımının kontrol harcına kıyasla daha yüksek olduğu görülmektedir. En yüksek değer, %4 lif katkıli karışımda elde edilmiş olup, kontrol harcına göre eğilme

dayanımında %55,7'lik bir artış sağlanmıştır (Şekil 10). Bu boyuttaki diğer tüm lif katkılı NL karışımlarının eğilme dayanım değerlerinin, harcın eğilme mukavemetine belirgin bir artış eğilimi sergilemediği görülebilmektedir.

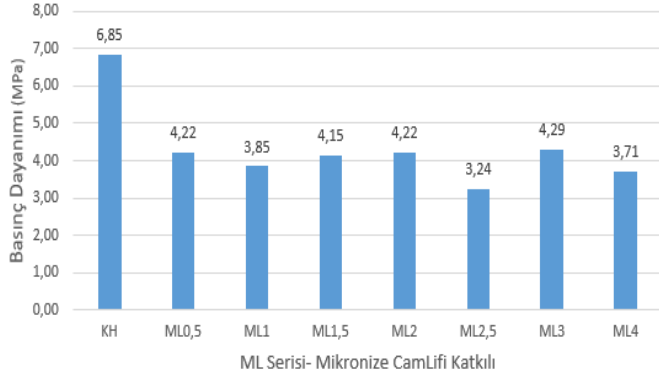
12 mm cam lifi katkılı örneklerin eğilme dayanım değerleri irdelendiğinde ise, ağırlıkça %1,5 lif katkı kullanım oranına kadar, lif katkısının harcın eğilme dayanımını kontrol harcına kıyasla artırıcı bir etki göstermediği belirlenmiştir. Bu kullanım oranına kadar olan 12 mm cam lifi katkılı örneklerin ($UL_{0.5} - UL_1$) eğilme dayanımları kontrol harcının değerlerinden daha düşük düzeyde kalmıştır (Şekil 11). Ancak, ağırlıkça %1,5 - %4 lif katkı kullanım oranlarına sahip $UL_{1.5} - UL_4$ karışımlarının ise eğilme dayanımları kontrol harcının değerlerinden daha yüksek değerlerdedir. Bu olgu; 12 mm cam lifi kullanımlarında alçı esaslı harcın eğilme dayanımının artışının, lif katkısının ağırlıkça $>1,5$ 'den daha büyük oranlarda kullanımının gerekliliğini göstermektedir. Bu oranlarda lif katkısının eğilme mukavemeti açısından daha etkinlik kazandığı açıkça görülebilmektedir. UL_4 karışımının eğilme dayanımına olumlu olan etkinliği yaklaşık %90 seviyesindedir.

Çalışma kapsamında elde edilen değerler doğrultusunda genel eğilimin matris yapıda lif boyunun artması harcın eğilme dayanımını iyileştirdiği yönündedir. Bu doğrultuda kompozit harç içerisinde 12 mm cam lifi kullanılmasının eğilmeye karşı direnci iyileştirdiği ve matris yapıya daha esnek bir form kazandırdığı belirlenmiştir. Bununla birlikte, matris yapıda lif boyunun artışına bağlı aynı zamanda matriste homojen bir dağılımın sağlanabilir olması, bu özelliği daha da geliştireceği kaçınılmaz olacaktır.

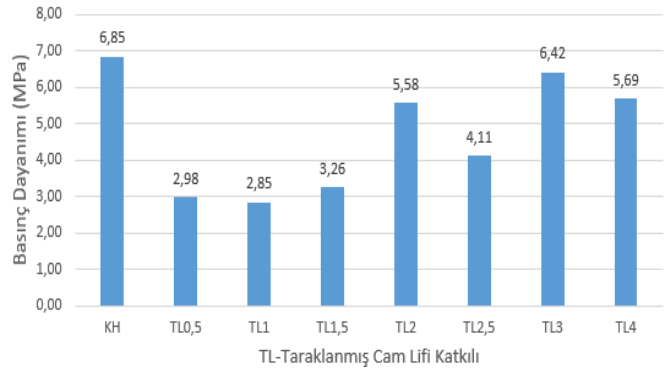
Basınç Dayanımı

Cam lif katkılı alçı bazlı kompozit test örnekleri üzerinde 14 günlük kür sonrasında basınç dayanım testleri uygulanmıştır. Eğilme dayanımının tersine, kompozit yapıli harçlarda farklı orijinlerdeki lif katkısının lif boyutuna bağlı olarak harcın basınç dayanım değerlerini genellikle olumsuz yönde etkilediği genel bir yaklaşım olarak kabul edilebilmektedir. Çimento esaslı harç matrislerinde lif boyutunun artışı ve katkı oranı arttıkça, harcın basınç dayanımını azaltıcı yönde bir etki ettiği gözlenebilmektedir. Ancak bu olgunun alçı bazlı matrislerde nasıl bir etkileşim sergilediği ayrı bir inceleme konusu olabilmektedir. Bu çalışma kapsamında dört farklı boyuttaki cam lifi katkısıyla hazırlanan örneklerde, lif boyutunun değişiminin harcın basınç dayanım değerine farklı etkileşimleri olduğu görülmüştür.

Mikronize cam lifli katkılı numunelerin tamamında, lif katkı oranının artmasına paralel olarak basınç dayanım değerlerinin düştüğü belirlenmiştir (Şekil 12). Kontrol harcının aynı koşullardaki basınç dayanımı 6.85 MPa iken, mikronize cam lifli katkılı numunelerin basınç dayanımı değerleri 3.24 MPa - 4.29 MPa aralığında değişim göstermiştir. Buradaki basınç dayanımı düşüşünün, matris yapının daha gözenekli forma dönüşmüş olmasından kaynaklandığı düşünülmüştür. Padavet vd., gri kalsine alçının mekanik özelliklerinin (Young Modülü, mukavemet ve sürünme) zamana bağlı değişimleri üzerine yaptıkları araştırma çalışmasında alçı bazlı test örneklerinin basınç dayanımlarını 1,86 – 9.62 MPa aralığında değişim gösterdiğini belirlemişlerdir. Al_Ridha ve arkadaşları (2017)'de alçı bazlı kompozit test örneklerinin basınç dayanımlarını karışımdaki su/alçı oranı değişimine bağlı olarak 3,20 – 7,41 MPa aralığında belirlemişlerdir. Bu bağlamda herhangi bir lif katkısı yer almayan kontrol örneklerinin de basınç dayanım değerlerinin elde edilen bu bulguların aralığında kaldığı görülmüştür. Bununla birlikte, bir diğer husus, karışım tasarımlarında katkı olarak ilave edilen cam lifi, karışım bileşenlerinden kumla ikame edilerek kullanılmasına bağlı olarak cam lifinin kuma oranla daha düşük tane mukavemetine sahip olması, harç matrisinin dayanım değerinin de zayıflamasına neden olabileceği öngörülmüştür. Benzer şekilde taraklanmış cam lifli katkılı numunelerin tamamında da, lif katkı oranının artmasına paralel olarak basınç dayanım değerlerinin düştüğü belirlenmiştir (Şekil 13). Taraklanmış cam lifli katkılı numunelerin basınç dayanımı değerleri 2.85 MPa - 6.42 MPa aralığında değişim göstermiştir. Ancak, taraklanmış cam lifi katkılı örneklerin lif katkı oranına bağlı seri içerisinde basınç dayanım değerlerinde, lif kullanım oranı arttıkça artan bir eğilimde iyileşme olduğu görülmektedir. Özellikle ağırlıkça %1,5 ($TL_{1.5}$) lif katkı kullanım oranından sonra harcın basınç dayanımının artış eğilime geçtiği görülmektedir.

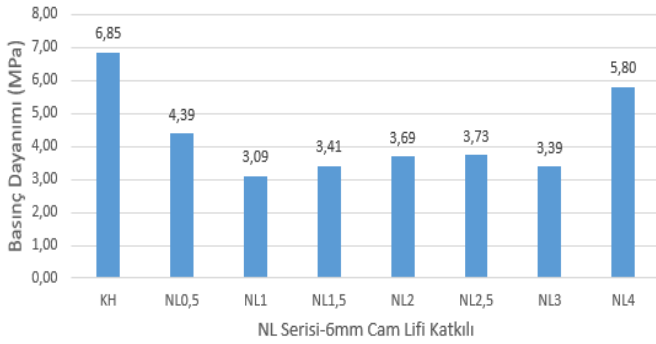


Şekil 12. ML Kodlu Örneklerin Basınç Dayanımı Değerleri

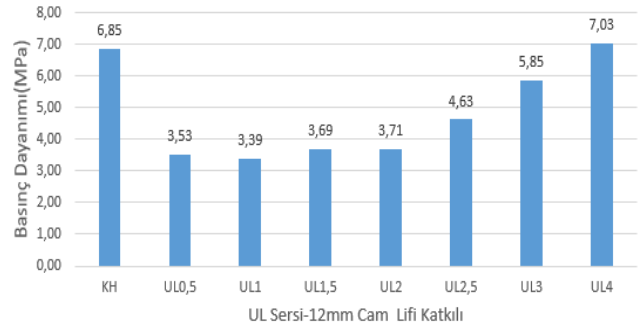


Şekil 13. TL Kodlu Örneklerin Basınç Dayanımı Değerleri

6 mm boyutlu cam lifli katkıli numunelerin tamamı diğer iki lif boyutunda olduğu gibi, lif katkı oranının artmasına rağmen basınç dayanım değerleri düşmüştür (Şekil 14). 6 mm cam lifli katkıli numunelerin basınç dayanımı değerleri 3.09 MPa - 5.80 MPa aralığında değişim göstermiştir. Cam lifli katkıli örneklerde lif katkı oranına bağlı serinin kendi içerisindeki değişimde basınç dayanım değerlerinde, lif kullanım oranı arttıkça artan bir eğilimde iyileşme olduğu görülmektedir. Özellikle ağırlıkça %4 (NL₄) lif katkı kullanım oranlı örnekler en yüksek basınç dayanımını oluşturmuş olup, kontrol örneğine göre %15.3'lük bir dayanım kaybı göstermiştir.



Şekil 14. NL Kodlu Örneklerin Basınç Dayanımı Değerleri



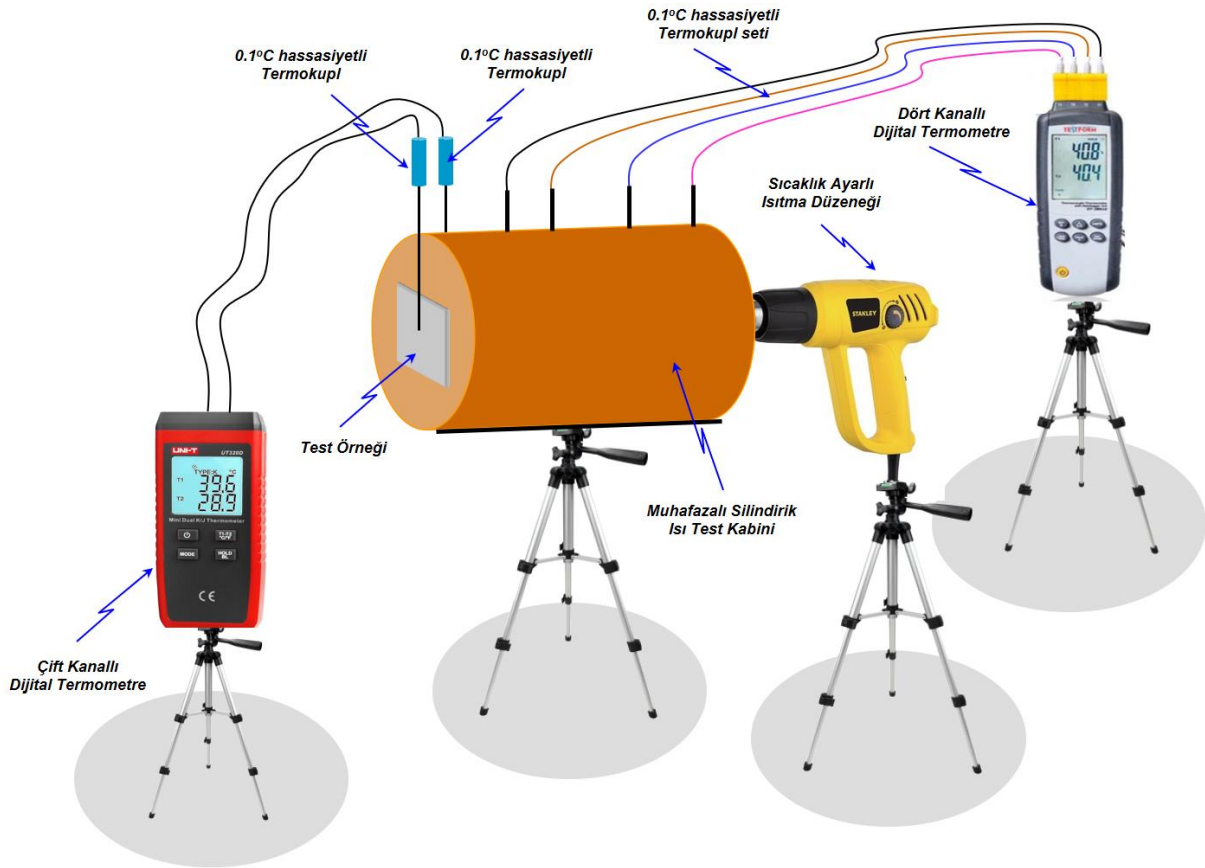
Şekil 15. UL Kodlu Örneklerin Basınç Dayanımı Değerleri

12 mm boyutlu cam lifli katkıli numunelerin basınç dayanım gelişimindeki etkileşim irdelendiğinde, diğer lif boyutlarında çalışma kapsamında tecrübe edinildiği üzere, lif katkı oranı arttıkça harcın basınç dayanımı iyileşmiştir. Kontrol harcına kıyasla, ağırlıkça %3'lük lif kullanım oranı da dahil tüm örneklerinin dayanımı daha düşüktür (Şekil 15). Ancak, ağırlıkça %4 (UL₄) lif katkı kullanım oranlı örnekler en yüksek basınç dayanımını oluşturmuş olup, kontrol örneğine göre %2.63'lük bir dayanım artışı göstermiştir.

Çalışma boyunca test edilen tüm örneklerin (ML, TL, NL ve UL serileri) dayanım değerleri bir arada irdelendiğinde, her bir seri için maksimum olarak basınç dayanımlarında sırasıyla %52.8, %58.4, %54.9 ve %50.6 oranlarında kontrol harcına göre düşüşler olmuştur. Genel eğilim olarak, lif boyutu arttıkça harcın matris yapısını daha plastik bir forma büründürmesine bağlı olarak basınç etkilerine karşı daha düşük dirençsiz bir yapısal özellik kazandırdığı tecrübe edilmiştir. Bu da bu tür harç kombinasyonlarına sahip yapı malzemelerinin basınç etkileşimlerine karşın görece değişken deforme olabilmeye potansiyelini oluşturmaktadır. Karışım kombinasyonundaki lif katkı oranı arttıkça, basınç dayanımında iyileşmeler ve gelişmeler gözlemlense de genel eğilim, dayanımın zayıflaması yönünde olmaktadır. Dayanım değerinin iyileşmesi ve görece kontrol örneğine göre daha yüksek dayanım direnci sağlanması, matris yapıdaki lifin oriyantasyonu, homojen dağılımı, topaklanma yapmaması gibi özelliklerin gelişimine bağlıdır.

Sıcaklık Etkileşim Analizi

Yapı malzemeleri kullanım ve uygulama alanlarında farklı sıcaklık etkileşimlerine farklı sürelerde maruz kalabilmektedir. Maruz kalınan sıcaklık değeri arttıkça, yapı malzeme yüzeyinde yanma, çatlama, yarıma ve damlama vb. deformasyonlar görülebilir. Bu olgu da, yapı malzemesinin kullanım koşullarını ve ortam uyumluğunu olumsuz etkileyen bir durum olarak görülmektedir. Alçı esaslı yapı malzemelerinde değişken sıcaklık değerlerine maruz kalma durumunda, karışım bileşenlerinin harcın matris yapısının deforme olmama olgusunda ne denli etki ettiği detay gerektiren bir inceleme konusudur. Bu bağlamda, çalışma kapsamında cam lifi orijinli katkıların harcın matrisinde artan sıcaklık değişimlerinde nasıl bir etkileşime neden olabileceği hususu, deneysel bir yöntemle irdelenmeye çalışılmıştır. Çalışmada uygulanan yöntem laboratuvar ortam koşullarında oluşturulmuş bir test düzeneğinde (Şekil 16), kare yüzey alanlı hazırlanan levha geometrili test örneğinin bir yüzeyi belirli bir zaman periyodunda artan derecelerde olmak üzere sıcaklık etkileşimine maruz bırakılmıştır.

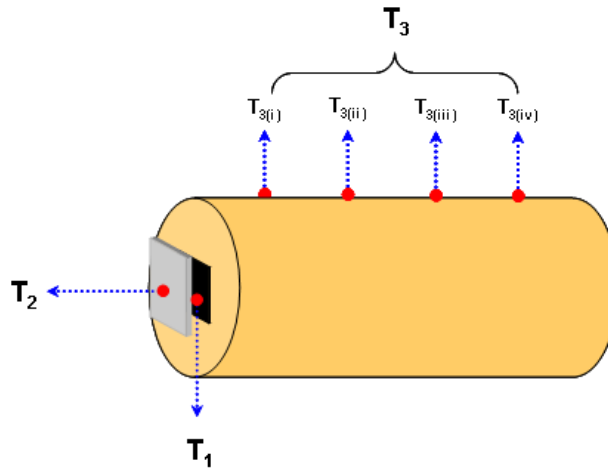


Şekil 16. Sıcaklık Etkileşimi Analizi Test Düzeneği Sembolik Görünümü

Test sürecinde sıcaklık etkileşimi 20°C – 250°C aralığında değişim göstermekte olup, her bir test için uygulanan zaman periyodu ortalama 15 dakika olarak belirlenmiştir. Test kabini içerisinde homojen dağılımlı bir sıcaklık değerinin oluşumu, test kabini üzerine eşit aralıklarda yerleştirilmiş 4 adet 0.1°C ölçüm hassasiyetli termokupllar ile $T_{3(i)} - T_{3(iv)}$ değerleri olarak kayıt altına alınmış, test kabininin iç sıcaklık değeri bu termokupllarla belirlenen sıcaklık değerlerinin aritmetik ortalaması T_3 olarak belirlenmiştir. Bununla birlikte, test kabininin açık yüzeyli numune bölümüne monte edilen levha geometrili test örneğinin yüzey sıcaklığı 0.1°C ölçüm hassasiyetli termokupl ile T_1 değerleri olarak kaydedilmiştir. Test örneğinin test kabini dışında ve atmosfer ortamına açık olan yüzeyine monte edilen 0.1°C ölçüm hassasiyetli termokupl yardımıyla soğuk yüzey sıcaklığı T_2 değerleri olarak ölçülerek kaydedilmiştir (Şekil 17).

Test sürecinde elde edilen veriler irdelendiğinde, her bir test için ayrı ayrı ortalama 15 dakikalık uygulanan test sürelerinde, test kabini içinde test örneğinin sıcak yüzeyi için ölçülen T_1 değerleri, 100°C – 235°C aralığında artan sıcaklık değerlerinde değişmiştir. Test kabininin iç ortam ortalama sıcaklık değeri T_3 ise T_1 değerine göre 1.35 °C -

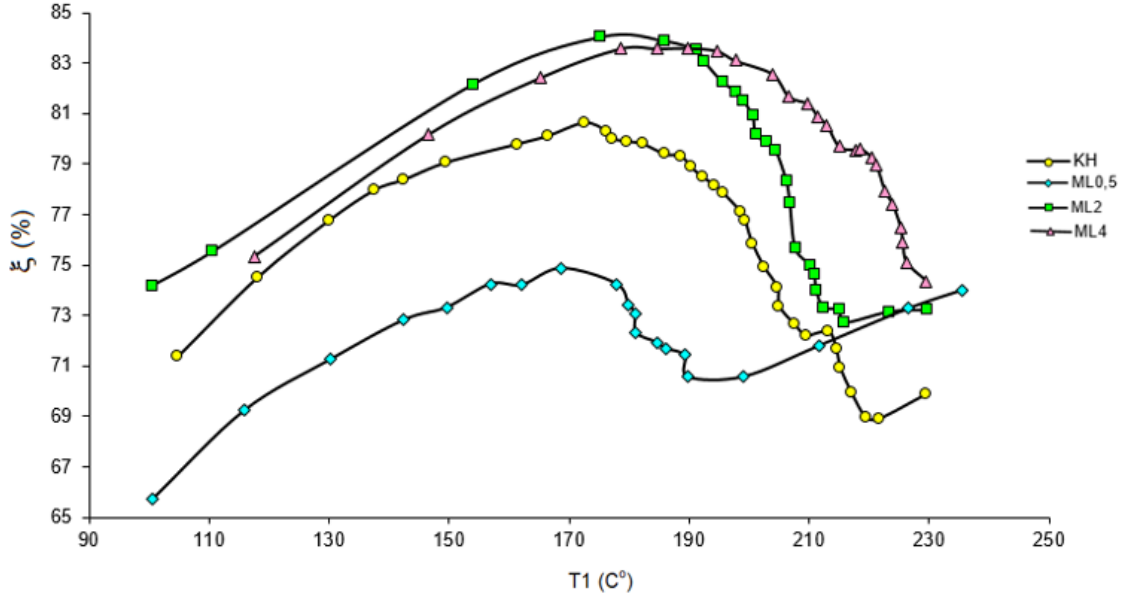
1.65°C aralığında daha yüksek sıcaklıklar olarak ölçülmüştür. Bununla birlikte, test örneğinin soğuk yüzey sıcaklık değerleri (T_2) ise karışım kombinasyonunun bileşenlerine ve oranlarına bağlı olarak 24°C – 70°C aralığında değişen sıcaklık değerlerinde olduğu belirlenmiştir. Her bir test örneğinin sıcaklık etkileşimleri sonrası ısıya maruz kalan yüzeylerindeki deformasyon durumu, renk değişimleri ve matris yapılarındaki olası değişimler detaylı olarak analiz edilmiştir. Ayrıca, sıcaklık etkisinde her bir test örneğinin iki yüzeyindeki sıcaklık farklığı sebebiyle oluşan ısı geçiş karakteristiği ve ısıya karşı direncini yalın ve görgül bir yaklaşımla analiz etmek üzere “ısı kazanç verimliliği” belirlenmiştir. Bu çalışma kapsamında T_1 sıcaklık değerinin $\Delta T = T_1 - T_2$ sıcaklık farkına oranı yüzde değeri “ısı kazanç verimliliği” olarak tanımlanmış olup, “ ξ ” sembolü ile simgelenmiştir. Her bir test serini temsil etmek amacıyla kontrol karışımı da dahil, lif boyutu değişimlerinde ağırlıkça %0.5, %2 ve %4 oranları için hazırlanan levha örneklerinin her biri sıcaklık etkileşim analizlerine tabi tutularak T_1 , T_2 ve T_3 sıcaklık değer değişimleri detaylı kaydedilmiştir. Ölçümlerden sonra test edilen her bir örneğin ısı kazanç verimliliği (ξ) hesaplanmış olup, numune yüzey sıcaklık değişimi bağlamında grafiksel olarak analizleri yapılmıştır.



Şekil 17. Deney Düzeneginde Ölçülen Sıcaklık Değerleri-Sembolik Gösterimi

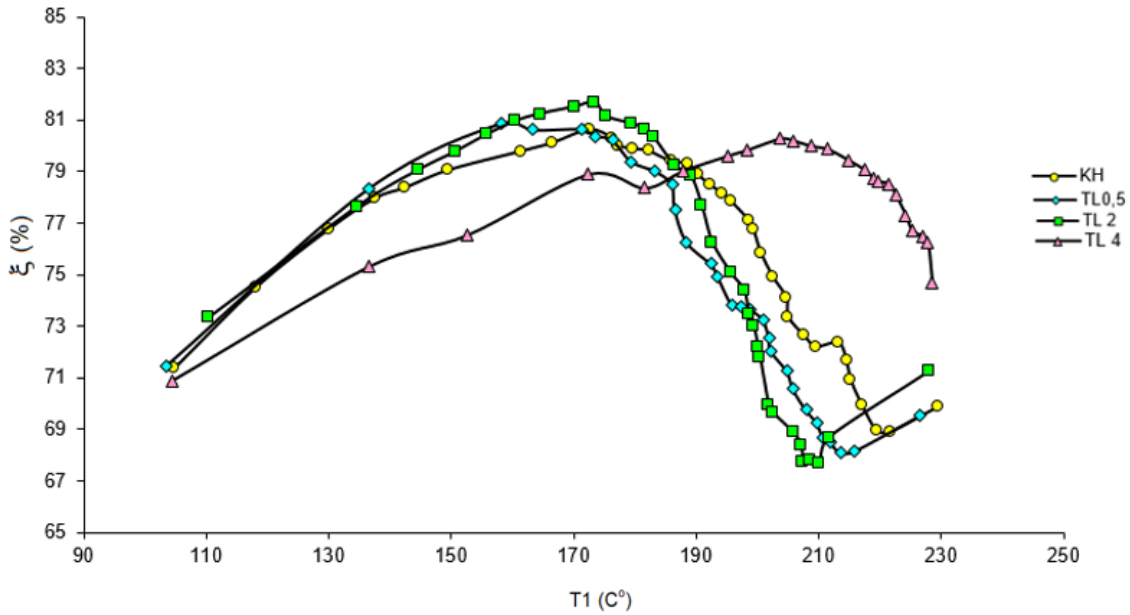
Cam lifi katkısı içermeyen kontrol test örneği, sıcaklık etkileşimine maruz kaldığında 165°C'ye kadar artan yüzey sıcaklığında ısı kazanç verimliliği (ξ) %80 oranına kadar artış eğilimi göstermiştir. 165°C yüzey sıcaklığını aşan sıcaklık değerlerinde numunenin hızla ısı kaybı sebebiyle verimliliği (ξ) %66 oranına kadar düşmektedir (Şekil 18).

Mikronize cam lifi katkılı test örneklerinin sıcaklık etkileşim değerlendirmesi Şekil 18'de verilmiştir. Ağırlıkça %0.5 oranında mikronize cam lifi katkılı test örneklerinden 215°C'ye kadar artan yüzey sıcaklığında ısı kazanç verimliliği, kontrol örneğine göre daha düşük düzeydedir. 215°C yüzey sıcaklığını aşan değerden sonra ξ verimliliği artmıştır. ML_2 ve ML_4 örneklerinin sıcaklık etkileşimi, kontrol örneğine benzer bir karakteristik sergilemiştir. ML_2 örneği 195°C'ye kadar artan yüzey sıcaklığında ısı kazanç verimliliği (ξ) %83 oranına kadar artış eğilimi gösterirken, ML_4 örneği ise 200°C'ye kadar artan yüzey sıcaklığında ξ verimliliği %84 oranına kadar artış eğilimi göstermiştir. Bu her iki örnek, ısı kazancı ve ısıya karşı direnç gösterme özelliği bağlamında kontrol örneğine göre daha etkin bir özellik göstermektedir.



Şekil 18. T_1 Sıcaklığına Bağlı ξ Değişimi (ML Serisi Örnekler)

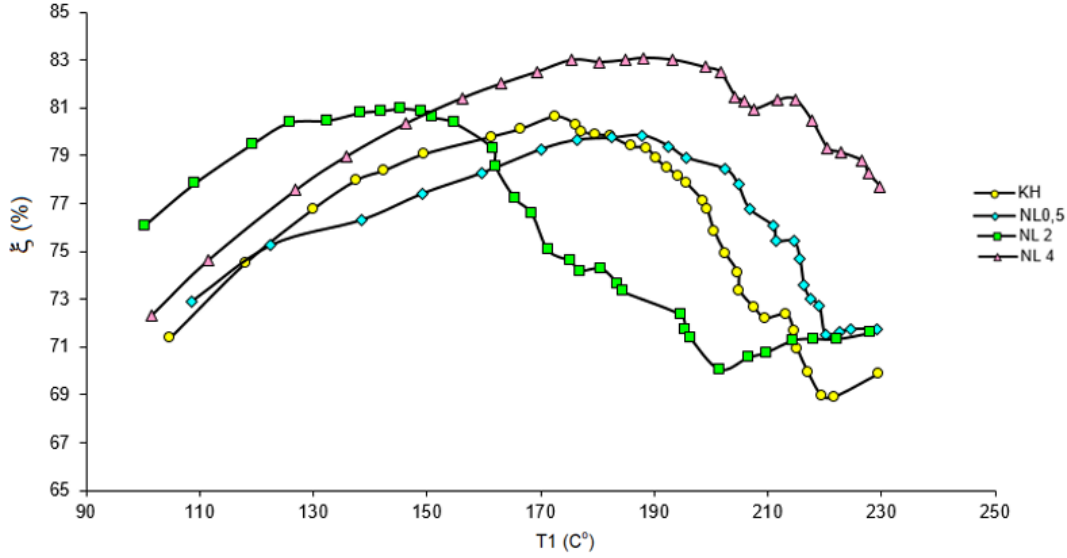
Taraklanmış cam lifli katkı test örneklerinin sıcaklık etkileşim değerlendirilmesi ise Şekil 19’da verilmiştir. Ağırlıkça %4 oranında taraklanmış cam lifli katkı test örneği $T_1=185^\circ\text{C}$ ye kadar diğer lif katkı ve KH kontrol örneğine göre daha düşük ξ verimliliğine sahiptir. Bununla birlikte $TL_{0,5}$ ve TL_2 örnekleri de $T_1=175^\circ\text{C}$ ye kadar ξ verimliliği kontrol örneğine göre daha düşüktür. Bu T_1 sıcaklık değerine kadar test örneklerinin ısı kazanç verimliliği %78 - %80 aralığında değişmektedir. Ancak, T_1 sıcaklığının daha yüksek değerlere artması, bünyesine ısı depolamış örneklerin ısı kaybı oluşturmasına bağlı olarak ξ verimliliği %66 oranına kadar düşmektedir. Bu olgu, test örneğinin yüksek sıcaklık ortamına maruz kalması durumunda düşük oranlarda da olsa ısıya karşı bir direnç özelliği gösterdiğini temsil edebilmektedir.



Şekil 19. T_1 Sıcaklığına Bağlı ξ Değişimi (TL Serisi Örnekler)

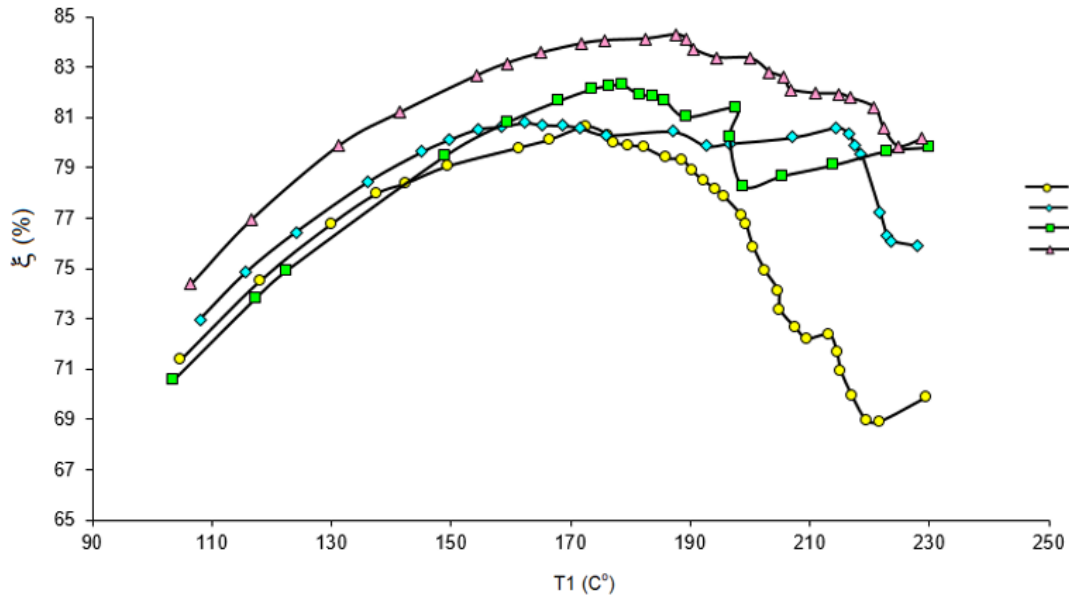
6 mm cam lifli katkı test örneklerinin sıcaklık etkileşim değerlendirilmesi Şekil 20’de verilmiştir. 6 mm cam lifli katkıli numuneler ısı kazanç durumuna göre incelendiğinde NL_4 kodlu numune her sıcaklık değerinde kontrol numunesine göre daha verimli bir performans gösterdiği görülmektedir. Grafik üzerinde NL_2 ’nin düzensiz eğilimi diğerlerine oranla dikkat çekmektedir. Bu durumun, cam lifinin matris yapıda topaklanmasından kaynaklı

olabileceği ve 160°C-215°C aralığında performansını kontrol numunesine göre kötü etkilediği söylenebilir. Ancak daha homojen bir karışım doğrultusunda daha verimli sonuçlar alınabileceği söz konusu durumlardan biridir. En düşük lif katkılı numune olan NL_{0.5} 180°C' den sonra ısı kazanç değerinin daha iyi bir performans göstermeye başladığı açıkça görülmektedir. 6 mm cam lifi katkılı test örneklerinin ξ verimliliği lif katkı oranına bağlı olmak koşuluyla %84 oranına kadar artabilmektedir.



Şekil 20. T₁ Sıcaklığına Bağlı ξ Değişimi (NL Serisi Örnekler)

12 mm cam lifi katkılı test örneklerinin sıcaklık etkileşim değerlendirilmesi Şekil 21'de verilmiştir. 12 mm cam lifi katkılı numuneler ısı kazanç durumuna göre incelendiğinde yalnızca UL₂ kodlu numunede 145°C'ye kadar kontrol numunesi değerinin bir miktar altında seyir etmekte olup, sonrasında daha verimli bir ısı kazanç performansı gösterdiği görülmektedir. Bunun yanı sıra belirtilen diğer oranlarda ise her sıcaklık seviyesinde kontrol numunesine göre daha yüksek ısı kazanç performansları görülmektedir. Bu bağlamda, 12 mm cam lifi kullanımının ısı kazanç ve ısıya karşı direnç gösterme özelliği dikkate alındığında diğer lif boyutlarına kıyasla daha önem kazanmaktadır.



Şekil 21. T₁ Sıcaklığına Bağlı ξ Değişimi (UL Serisi Örnekler)

Yukarıda sırasıyla sıcaklık etkileşimleri üzerine grafiksel olarak verilen her bir lif boyutuna ait analizlerde, daha anlamlı bir mukayese yapabilmek amacıyla eşdeğer T_1 sıcaklık değerlerinde harcın matris yapısının verimlilikleri irdelendiğinde Tablo 5’de verilen parametrik bulgular elde edilmiştir.

Tablo 5. Sabit Sıcaklıklarda Isı Kazanç Değerleri

Numune Kod	KH	ML _{0,5}	ML ₂	ML ₄	TL _{0,5}	TL ₂	TL ₄	NL _{0,5}	NL ₂	NL ₄	UL _{0,5}	UL ₂	UL ₄
T1 (C°)	ξ (%)	ξ (%)	ξ (%)	ξ (%)	ξ (%)	ξ (%)	ξ (%)	ξ (%)	ξ (%)	ξ (%)	ξ (%)	ξ (%)	ξ (%)
75	59,30	64,16	61,02	55,70	61,94	59,89	63,81	61,59	59,05	65,03	65,52	63,54	64,26
100	70,68	65,73	74,19	69,53	74,93	70,80	68,93	69,30	76,02	72,11	70,63	69,95	70,71
120	74,81	70,27	79,30	75,61	79,43	75,40	73,21	74,93	79,53	76,84	75,60	74,35	75,20
150	79,15	73,36	81,20	81,14	79,85	79,10	76,32	77,52	80,71	80,81	80,20	79,94	80,17
180	79,92	73,51	84,00	83,52	79,36	80,72	77,22	78,50	74,19	82,76	80,40	82,05	82,03
200	76,31	70,85	81,75	82,78	73,20	72,19	80,11	78,33	69,94	82,39	80,10	78,40	81,29
220	68,94	72,54	72,98	79,20	68,96	70,33	78,53	71,50	71,35	79,25	77,30	79,22	79,52

Kullanılan 4 farklı boyut cam lifi ve oranları karşılaştırıldığında, lif boyunun ve oranının artması numune özelinde ısı kazanç değerini iyileştirerek, enerji verimliliği daha yüksek alçı esaslı kompozit harç oluşturmaya olanak sağladığı görülmektedir. Artan sıcaklık değerlerinde, lif boyunun artışı ısı kazanç değerini geliştiren olumlu bir faktör olduğu görülmektedir. Yüksek sıcaklık ortamına maruz kalacak alçı esaslı yapı malzemelerinin daha etkin bir şekilde kullanılabilmesi amacıyla, cam lifinin bir donatı ajanı olarak kullanımı yanı sıra sıcaklığa direnç sağlamada da daha etken bir rol oynamasına olanak sağlayabilmektedir.

SONUÇ VE ÖNERİLER

Her bir lif boyutu ve kullanım oranına göre yoğunluk değerleri farklılık göstermiştir. 1 günlük yoğunluk değerlerinde en düşük yoğunluk değeri, ağırlıkça %2.5 mikronize cam lifli karışımı (ML_{2.5}) için elde edilmiş olup, kontrol harcına göre %4,07 daha düşük yoğunluktadır. 14 günlük yoğunluk değerlerinde ise ML₁ örneği en hafif örnek olarak görülmüş olup, kontrol harcına göre yoğunluk değeri %5,34 daha düşüktür. Cam lifi katkılı karışımlardan görünür gözeneklilik oranı en düşük olan karışım TL₃ olup değeri %17.30 olup, kontrol harcına göre gözeneklilik artışı yaklaşık 5.4 kat’dır. Görünür gözeneklilik oranı en yüksek olan karışım ise ML₁ olup değeri %19.28 olup, kontrol harcına göre gözeneklilik artışı yaklaşık 6 kat’dır. Kontrol harcına göre ML_{0,5} karışımı %2,96 daha az su emme değerine sahipken ML₄ karışımı %4,5 daha fazla su emme eğilimi göstermiştir. Taraklanmış cam lifi katkılı harçta kontrol numunesine oranla maksimum olarak TL₁ karışımı %2,24 daha fazla su emme özelliği gösterirken TL₃ karışımında %4,77 daha az kütlece su emme değeri elde edilmiştir. Eğilme dayanımı değerlerinde mikronize cam lifli katkılı numunelerin eğilme dayanımı değerleri 1.04 MPa – 1.44 MPa aralığında değişim göstermiştir. Taraklanmış cam lifi kullanımlarında alçı esaslı harcın eğilme dayanımının artmasının, lif katkısının ağırlıkça >%3’den daha büyük oranlarda kullanımının gerekliliği belirlenmiştir. 6 mm cam lifi katkılı örneklerinde En yüksek değer, %4 lif katkılı karışımda elde edilmiş olup, kontrol harcına göre eğilme dayanımında %55,7’lik bir artış sağlanmıştır. 12 mm cam lifi kullanımlarında ise lif katkısının ağırlıkça >%1,5’den daha büyük oranlarda kullanımının 12 mm cam lifi kullanımlarında alçı esaslı harcın eğilme dayanımının artmasının, lif katkısının ağırlıkça >%1,5’den daha büyük oranlarda kullanımının gerekliliğini göstermektedir. Tüm örneklerin (ML, TL, NL ve UL serileri) basınç dayanım değerleri, her bir seri için maksimum olarak basınç dayanımlarında sırasıyla %52.8, %58.4, %54.9 ve %50.6 oranlarında kontrol harcına göre düşüşler olmuştur. 4 farklı lif boyunun ve karışımlardaki katkı miktarının artması numune özelinde ısı kazanç değerini iyileştirerek, enerji verimliliği daha yüksek alçı esaslı kompozit harç oluşturmaya olanak sağladığı görülmüştür.

Bu çalışma kapsamında, farklı boyut ve oranlardaki cam lifi ile hazırlanan numuneler üzerinde gerçekleştirilen mekanik ve termal performans testleri sonucunda, artan lif katkısının kompozit harç yoğunluğunu ihmal edilebilir düzeyde artırdığı belirlenmiştir. Matris yapıdaki cam lifi uzunluğunun artması, yapı içerisindeki görünür gözeneklilik oranını artırmakta ve bu da kütlece su emme oranının artmasına neden olmaktadır. Alçı bazlı olarak test edilen örneklerde, karışımdaki lif katkı oranının artışı, basınç dayanım değerlerinin azalmasına sebebiyet vermiştir. Eğilme dayanımı incelendiğinde ise, lif boyutu ve oranının artırılması eğilme dayanımında %90’a kadar iyileşme sağlamış ve matris yapının daha esnek bir form kazanmasına yol açmıştır. Termal performans testleri

sonucunda, lif boyunun artmasının enerji verimliliği yüksek alçı esaslı kompozit harçların oluşturulmasına katkı sağladığı görülmüştür. Sonuç olarak, cam lifi boyutunun ve oranının artması eğilme dayanımı ve termal performans açısından pozitif etkiler oluşturmaktadır. Yoğunluk durumları karşılaştırıldığında ise sonuçlar ihmal edilebilir düzeyde kalırken, görünür gözeneklilik oranlarında belirgin bir artış gözlenmiş ve bu artış kütlece su emme oranını da benzer şekilde etkilemiştir. Basınç dayanımları aynı tip lif içinde oran arttıkça dayanım artışı gösterse de, genel bağlamda basınç dayanımının zayıfladığı yönünde bulgular elde edilmiştir. Elde edilen veriler ışığında, optimum performans için bu çalışma kapsamında ağırlıkça %2-%4 oranında 12 mm cam lifi kullanımının alçı esaslı kompozit harçlarda daha verimli sonuçlar vereceği yönündedir. Konu üzerine yeni çalışmalar yapacak araştırmacılar, tekstil tipi cam elyafların tek bir boyut kullanmak yerine, farklı boyutlardaki elyafların karması şeklinde düzenlenebilecek yeni formları alçı bazlı yapı malzeme ürünlerinde kullanımı üzerine araştırma çalışmaları geliştirilebilir. Bu şekilde uygulanacak kullanım şekli, bu çalışmada elde edilen bulgulardan teknik bağlamda daha avantajlı sonuçlar oluşturabilir.

KAYNAKLAR

- ALL ALÇI, (2024), Kartonpiyer Alçısı, Etnik Özellikler, <https://www.allalci.com/urun/kartonpiyer-alcisi#pd-download>
- ASTM C20, (2022), Standard Test Methods for Apparent Porosity, Water Absorption, Apparent Specific Gravity, and Bulk Density of Burned Refractory Brick and Shapes by Boiling Water, Designation: C20 – 00 (Reapproved 2022), ASTM International, United States.
- AL-Ridha A.S.D., Abbood A.A., Hussein H.H., (2017), Improvement of Gypsum Properties Using S.F.Additive, International Journal of Science and Research (IJSR), ISSN (Online): 2319-7064, Volume 6 Issue 8, August 2017, www.ijsr.net, Paper ID: ART20175774, p504-509, DOI: 10.21275/ART20175774
- Biçer, A. (2020). Thermal Properties of Gypsum Plaster with Fly Ash. Uluslararası Doğu Anadolu Fen Mühendislik Ve Tasarım Dergisi, 2(1), 120-133.
- Bouzit, S., Laasri, S., Taha, M., Laghzizil, A., Hajjaji, A., Merli, F., & Buratti, C. (2019). Characterization of natural gypsum materials and their composites for building applications. *Applied Sciences*, 9(12), 2443. <https://doi.org/10.3390/app9122443>
- Chernysheva, N., Lesovik, V., Fediuk, R., & Vatin, N. (2020). Improvement of performances of the gypsum-cement fiber reinforced composite (GCFRC). *Materials*, 13(17), 3847. <https://doi.org/10.3390/ma13173847>
- Devrek, O., Sevinç, A. H., Durgun, M. Y., Uras, Y. (2022). Alçı Esaslı Karışımlarda Mikronize Cam Küreciklerinin Değerlendirilmesi, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 25(4), 591-601. <https://doi.org/10.17780/ksujes.1142101>
- Doleželová, M., Krejsová, J., Scheinherrová, L., Keppert, M., & Vimmrová, A. (2022). Investigation of environmentally friendly gypsum based composites with improved water resistance. *Journal of Cleaner Production*, 370, 133278. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.133278>
- Demir, İ. (2019). *Bazı selülozik esaslı sekonder lifsel hammaddeler katılarak üretilmiş alçı esaslı kompozitlerin teknolojik özelliklerinin araştırılması* (Master's thesis, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü).
- Esan, M. T. (2024). Review of gypsum reinforced composites as building materials. *Discover Civil Engineering*, 1(1), 1-25. DOI: 10.1007/s44290-024-00005-x
- Fantilli, A. P., Józwiak-Niedźwiedzka, D., & Denis, P. (2021). Bio-fibres as a reinforcement of gypsum composites. *Materials*, 14(17), 4830. <https://doi.org/10.3390/ma14174830>
- Gonçalves, R. M., Martinho, A., & Oliveira, J. P. (2022). Evaluating the potential use of recycled glass fibers for the development of gypsum-based composites. *Construction and Building Materials*, 321, 126320. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126320>

- Gencil, O., Hekimoglu, G., Sarı, A., Ustaoglu, A., subası, s., marasli, m., . . . Memon, S. (2022). Glass fiber reinforced gypsum composites with microencapsulated PCM as. *Construction and Building Materials*. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127788>
- Jia, R., Wang, Q., & Feng, P. (2021). A comprehensive overview of fibre-reinforced gypsum-based composites (FRGCs) in the construction field. *Composites Part B: Engineering*, 205, 108540. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.108540>
- Khamidov, A., Akhmedov, I., Kholmirezayev, S., Yusupov, S., Kazadayev, A., & Sharopov, B. (2022). Application of heat-insulating composite gypsum for energy efficient constructio. *Science and innovation*, 1(A8), 1058-1064. DOI: 10.5281/zenodo.7447953
- Kuqo, A., & Mai, C. (2021). Mechanical properties of lightweight gypsum composites comprised of seagrass *Posidonia oceanica* and pine (*Pinus sylvestris*) wood fibers. *Construction and Building Materials*, 282, 122714. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122714>
- Li, Z., Wu, Z., Wang, X., Liu, J., Yan, W., Ding, L., & Huang , H. (2022). Physical and mechanical properties of gypsum-based composites. *Journal of Building Engine*. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.12.168
- Padevět P., Tesárek P., Plachý T., (2011), Evolution of mechanical properties of gypsum in time, *INTERNATIONAL JOURNAL OF MECHANICS*, Issue 1, Volume 5, 2011
- Ren, K., Cui, N., Zhao, S., Zheng, K., Ji, X., Feng, L., ... & Xie, N. (2021). Low-carbon sustainable composites from waste phosphogypsum and their environmental impacts. *Crystals*, 11(7), 719. <https://doi.org/10.3390/cryst11070719>
- S. Korkmazi, F. Birinci, Increasing the Tensile Strength of Fiber Reinforced Self-Compacting-Concrete, and Effects of Fiber Type and Orientation, *Romanian Journal of Materials*, 2017, 47(3), 361.
- Şahin, H., & Demir, İ. (2019). Gypsum-Based Boards Made from Mixtures of Waste Cellulosic Sources: Part 1. Physical and Mechanical Properties. *Avrupa Bilim Ve Teknoloji Dergisi*(16), 567-576. <https://doi.org/10.31590/ejosat.565240>
- TS EN 1015-10, (2001), Kâgir harcı-Deney metotları- Bölüm 10: Sertleşmiş harcın boşluklu kuru birim hacim kütlelerinin tayini, *TÜRK STANDARDLARI ENSTİTÜSÜ*, İnşaat İhtisas Grubu, s5, Ankara
- TS EN 1015-11, (2020), Kagir harcı - Deney yöntemleri - Bölüm 11: Sertleşmiş harcın eğilmede çekme ve basınç dayanımının tayin, *TÜRK STANDARDLARI ENSTİTÜSÜ*, Teknik Kurul, s18, Ankara
- Vitti, P. (2021). Mortars and masonry—structural lime and gypsum mortars in Antiquity and Middle Ages. *Archaeological and anthropological sciences*, 13(10), 164. DOI: 10.1007/s12520-021-01408-y
- Wu, T., Yue, K., Wang, S., Liang, B., Wu, P., Lu, W., ... & Sun, K. (2024). Experimental investigation on mechanical properties and fire performance of innovative wheat straw-gypsum composites as building sheathing panels. *Industrial Crops and Products*, 208, 117897. DOI: 10.1016/j.indcrop.2023.117897
- Yildizel, S. A. (2020). Material properties of basalt-fiber-reinforced gypsum-based composites made with metakaolin and silica sand. *Mechanics of Composite Materials*, 56, 379-388. <https://doi.org/10.1007/s11029-020-09889-z>
- Zhu, C., Zhang, J., Peng, J., Cao, W., & Liu, J. (2018). Physical and mechanical properties of gypsum-based composites reinforced with PVA and PP fibers. *Construction and Building Materials*, 163, 695-705. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.12.168



Kahramanmaraş Sütçü İmam University

Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 07.06.2024
Kabul Tarihi : 08.08.2024

Received Date : 07.06.2024
Accepted Date : 08.08.2024

COĞRAFİ BİLGİ SİSTEMLERİ ORTAMINDA DEPREM RİSKİNİN DEĞERLENDİRİLMESİ DİYARBAKIR ÖRNEĞİ

ASSESSMENT OF EARTHQUAKE RISK IN GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEMS ENVIRONMENT DİYARBAKIR EXAMPLE

Ali EM¹ (ORCID: 0000-0001-8170-9422)
Burak GÜL^{1*} (ORCID: 0009-0005-7735-2455)

¹ Dicle Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Diyarbakır, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Burak GÜL, brkg121@gmail.com

ÖZET

Deprem, yer kabuğundaki tektonik plakaların ani ve şiddetli bir biçimde birbirine karşı hareket etmesi sonucu ortaya çıkan sismik enerji salınımı ile karakterize edilen, doğal bir afet türüdür. Türkiye, coğrafi konumu itibarıyla dünya üzerinde aktif deprem bölgelerinden birinde yer almakta olup, bu nedenle sürekli ve sık deprem aktivitesine maruz kalmaktadır. Bu durum, Türkiye'nin deprem afetinin çok yönlü bir şekilde ve daha derinlemesine incelenmesini, bilimsel analiz ile etkili müdahale stratejileri geliştirilmesini gerektirmektedir. Bu bağlamda bu çalışmada Diyarbakır ilinin tüm ilçelerine ait 1900-2022 yıllarını kapsayan deprem büyüklüğü, tarihleri vs. gibi büyüklükler AFAD veri tabanından elde edilerek coğrafi bilgi sistemleri ortamına aktarılıp görselleştirilmiştir. Bu çalışmanın amacı ilçe bazında tüm ilçelere ait deprem verilerini yorumlayarak hangi ilçelerin daha riskli hangilerinin ise daha az riskli ilçeler olduğunu belirlemek olmuştur. Çalışma alanına ait görselleştirilmiş verilerle sonuçları yorumlama konusunda yardımcı olması hedeflenmiştir. Ayrıca bu makale, Diyarbakır'ın deprem riskini belirlemek ve buna uygun önlemleri almak isteyen yerel yönetimler, sivil toplum kuruluşları ve bireyler için önemli bir kaynak olması beklenmektedir.

Anahtar Kelimeler: Coğrafi bilgi sistemleri, deprem, deprem büyüklüğü, fay hattı

ABSTRACT

An earthquake is a type of natural disaster characterized by the release of seismic energy that occurs as a result of the sudden and violent movement of tectonic plates in the earth's crust against each other. Due to its geographical location, Turkey is located in one of the active earthquake zones in the world, and therefore it is exposed to continuous and frequent earthquake activity. This situation requires a multi-faceted and more in-depth examination of Turkey's earthquake disaster, and the development of effective response strategies with scientific analysis. In this context, in this study, earthquake magnitudes, dates, etc. covering the years 1900-2022 belonging to all districts of Diyarbakır province were obtained from the AFAD database and transferred to the geographic information systems environment and visualized. The aim of this study was to interpret the earthquake data of all districts on a district basis and to determine which districts are more risky and which are less risky districts. It is aimed to help interpret the results with the visualized data of the study area. In addition, this article is expected to be an important resource for local governments, non-governmental organizations and individuals who want to determine the earthquake risk of Diyarbakır and take appropriate measures.

Keywords: Earthquake, earthquake magnitude, geographic information systems, fault line

GİRİŞ

Türkiye, dünya üzerinde yer alan aktif deprem kuşaklarından biri üzerinde bulunmaktadır. Bu nedenle, ülkede deprem riski oldukça yüksektir. Türkiye'de 4 farklı deprem kuşağı bulunmaktadır. Kuzey Anadolu Fay Hattı: Türkiye'nin en önemli deprem kuşaklarından biri Kuzey Anadolu Fay Hattı'dır. Bu fay hattı, Karadeniz'in doğusundan Marmara Denizi'ne kadar uzanır ve Marmara Bölgesi'nde büyük depremlerin olasılığını artırır. Doğu Anadolu Fay Hattı: Doğu Anadolu Fay Hattı, Türkiye'nin doğusundan geçer ve özellikle Van Gölü çevresinde depremlere neden olabilir. Bu bölge, deprem riski açısından diğer bölgelere göre daha yüksektir. Güney Anadolu Fay Hattı: Güney Anadolu Fay Hattı, Akdeniz kıyıları boyunca uzanır ve bu bölgede deprem riskini artırır. Batı Anadolu Fay Hattı: Batı Anadolu Fay Hattı, Ege Bölgesi'nde bulunur ve bölgede deprem aktivitesine neden olmaktadır.

Deprem olaylarını tanımlayan bir dizi parametre bulunmaktadır. Bu parametreler, depremin büyüklüğü, derinliği, epicenter (merkez) konumu ve faydalanma tipi gibi özellikleri ifade etmektedir. Büyüklük (Magnitude): Depremin enerji miktarını ölçen bir parametredir. Büyüklüğü tanımlayan bazı ölçekler bulunmaktadır. Bu ölçekler: MI (Richter Ölçeği), Charles Richter tarafından geliştirilmiştir. ML sığ, yakın ve küçük depremler için kullanılır (Lokal magnitüd). Mb, P ve S dalgalarının genliği baz alınarak hesaplanır ve cisim dalgası büyüklüğü (Body-wave magnitude) olarak adlandırılır. Md, çok küçük ve yakın depremlerin süresi kullanılarak hesaplanır ve süre büyüklüğü olarak bilinir. MS, yüzey dalgalarının genliği baz alınarak hesaplanır. Mw, açığa çıkan enerjinin sismik momentinden hesaplanır ve moment büyüklüğü olarak adlandırılır. Me ise, depremin oluşturduğu enerji yayılım miktarını ve yapılar da meydana gelen hasar potansiyelini ölçen bir büyüklüktür. $M \geq 8.0$ olan depremler "çok büyük" olarak sınıflandırılırken, büyüklüğü 7.0 ile 8.0 arasında olan depremler "büyük" olarak sınıflandırılmaktadır. Büyüklüğü 5.0 ile 7.0 arasında olan depremler "orta büyüklükteki depremler", büyüklüğü 3.0 ile 5.0 arasında olan depremler "küçük depremler", büyüklüğü 1.0 ile 3.0 arasında olan depremler "mikro depremler" ve büyüklüğü 1.0'den küçük olan depremler ise "ultra-mikro depremler" olarak tanımlanmaktadır (Santos-Reyes ve Gouzeva, 2022).

Derinlik depremin meydana geldiği noktanın yüzeyden olan uzaklığını belirtir. Derinlik, depremin etkilerini yüzeye nasıl ilettiğini ve zararın ne kadar olabileceğini etkileyen bir faktördür. Dış merkez (Epicenter): Depremin yüzeye en yakın olduğu noktadır. Depremin merkezi genellikle bu noktaya en yakın yerleşim birimine referans alınarak ifade edilir. Odak noktası (Hypocenter): Depremin gerçekleştiği nokta, yani deprem dalgalarının yüzeye ulaştığı noktadır. Epicenter ile aynı olabilir, ancak her zaman aynı değildir. Derinlik, odak noktası ve dış merkez arasındaki mesafeyi belirler. Dalga Türleri: Deprem sırasında oluşan farklı tipte dalgalar vardır. Bunların ilki P-dalgaları (primer veya basınç dalgaları) P-dalgalarıdır. P dalgaları, deprem sırasında en hızlı hareket eden dalgalardır. Madde içinde bir dalga şeklinde yayılırlar, bu nedenle bir yayılma ortamına benzer şekilde genişlerler. Sıkıştırma ve genişleme hareketleriyle karakterizedirler. Sıkıştırma ile genişleme arasındaki bu dalga hareketi, madde içinde bir basınç değişimi oluşturur. Sert ve sıvı malzemelerde hareket edebilirler. S-dalgaları (ikincil veya kesme dalgaları) ise P dalgalarından biraz daha yavaş hareket eder (Cerić ve Ivić, 2023; Santos-Reyes ve Gouzeva, 2022).

Bu parametreler, depremin doğasını incelemek ve deprem riskini değerlendirmek için kullanılır. Deprem parametrelerinin, deprem bilimcilerine, inşaat mühendislerine ve afet yönetimi uzmanlarına depremin etkilerini daha iyi irdelemek ve önlemler almak konusunda yardımcı olmaktadır. Türkiye'nin aktif bir deprem ülkesi olduğu ve 1900-2023 yılları arasında büyüklüğü 7 ve üzeri olan 20 adet depremin meydana geldiği görülmektedir. Bu verilerin bile Türkiye'de deprem afetinin çok fazla önemsenmesinin ve üzerinde durulması gerektiğini göstermektedir. Bu doğrultuda da deprem riskleri, etkileri ve deprem konusunda yapılması gerekenler üzerine birçok akademik çalışma yapılmaktadır (Altuncu vd., 2020; Göver, 2023; Nemutlu vd., 2020; Özmen, 2023; Özşahin, 2021; Seyrek, 2020; Tursun vd., 2023). Deprem riskinin belirlenmesi sismik kırılma hızının, litolojik özelliklerin ve potansiyel tehlike alanlarının değerlendirilmesini içerir. Deprem riskini değerlendirmek için, tepki spektrumlarına dayalı sismik kırılma hızı değerlendirilmeleri, litolojik katmanları ve fay hatlarını tanımlamak için jeoelektrik anomali modellemesi ve deprem risk seviyelerini hızlı ve doğru bir şekilde hesaplamak için GEOSTAT uygulaması gibi uygulamalar dahil olmak üzere çeşitli metodolojiler mevcuttur (Erdik, 2021; Fischer vd., 2023; Hiden vd., 2022). Ayrıca, deprem riski değerlendirme metodolojileri, tehlikeleri karakterize etme ve güvenlik açıklarının belirlenmesindeki zorluklarla birlikte deprem tehlikesini, varlık kırılma hızını ve maruz kalma envanterini dikkate alır (Bakhtiar ve Suardi, 2022). Makine öğrenmesi, uzaktan algılamayı ve çok kriterli karar vermeyi birleştiren hibrit modeller, arazi kullanım planlaması ve risk yönetimi stratejileri için yararlı olan deprem riski değerlendirme haritalarının oluşturulmasına yardımcı olabilmektedir (Jena vd., 2023).

Demir ve Altaş, (2024) çalışmalarında GIS tabanlı Analitik Hiyerarşi Süreci (AHP) analizleri kullanılarak Kars şehrinde deprem hasarı riski potansiyelini araştırmışlardır. Çalışma özellikle Türkiye'nin sismik aktivite geçmişi ışığında, depremlerden kaynaklanan potansiyel kayıpları azaltmak için riskli alanların belirlenmesinin gerekliliğini vurgulamaktadır. Çalışmada deprem riskine katkıda bulunan jeolojik ve yapısal özellikler de dahil olmak üzere çeşitli faktörleri değerlendirmek için AHP kullanılmıştır. Bulgular, Kars'ın arazi alanının %51,5'inin risk altında olduğunu ve Gölyeri ve Paşacayı mahallelerinde önemli konsantrasyonların olduğunu göstermektedir. Çalışma ayrıca etkili kentsel planlama ve afet yönetimi için CBS ve AHP'yi entegre etmenin önemini vurgulamaktadır.

Doğan vd., (2023) çalışmalarında Coğrafi Bilgi Sistemlerini (CBS) kullanarak büyük çalışma alanlarında geleneksel jeofizik ve jeoteknik ölçümlere alternatif olarak litoloji, coğrafi eğim ve yükseklik gibi vekil özelliklerin kullanımını araştırmışlardır. Çalışmada depreme dayanıklı yapılar inşa etmek için yerel toprak koşullarını anlamının önemini vurgulayarak, kapsamlı saha çalışmasının maliyetli ve zaman alıcı olabileceği ifade edilmiştir. Vekil özellikler yöntemi ile küçük ölçekli çalışmalardan jeofiziksel ve jeoteknik parametreleri analiz etmeyi ve sınıflandırma haritaları üretmek için bunları uydu görüntüleri ve jeolojik verilerle karşılaştırması yapılmıştır.

Demirel ve Türk, (2023) çalışmalarında, 6 Şubat 2023'te Kahramanmaraş depremlerini takiben Türkiye'deki depremlerin mekânsal analizi odak noktasına alınarak özellikle Mw 4.0 ve üzeri büyüklükteki depremleri incelemişlerdir. Tehlikeli alanları belirlemeyi amaçlayan bu çalışma da depremlerin mekânsal dağılımını analiz etmek için Coğrafi Bilgi Sistemlerini (CBS) kullanılmıştır. Moran I ve Getis-Ord General G dahil olmak üzere çeşitli uzamsal istatistiksel yöntemler, depremlerin kümelenme modellerini tespit etmek için CBS ortamında kullanılmıştır. Çalışma ayrıca aktif fay hatları ile meydana gelen depremler arasındaki ilişkiyi anlamının önemini vurgulayarak, bu bilginin gelecekteki önleyici tedbirleri bilgilendirebileceğini öne sürmektedir.

Habib vd., (2023) Pakistan'ın Keşmir bölgesinde meydana gelen 5.6 büyüklüğündeki depremin çevreye verdiği hasarın CBS ortamında belirlenmesi üzerine çalışma yapmıştır. Çalışma da hasar ve risk haritaları oluşturularak depremin ve daha sonra oluşabilecek depremlerin değerlendirilmesi yapılmıştır. Civelekler ve Pekkan, (2022) çalışmalarında depreme dayanıklı bina tasarımları için yerel toprak sınıflarının haritalanmasının önemini vurgulamaktadır. Çalışmada Eskişehir'in Tepebaşı bölgesindeki toprak özelliklerinin Standart Penetrasyon Testi (SPT) verileri ve CBS teknolojisi kullanılarak 3 boyutlu görselleştirilmesi yapılmıştır. Çalışma ayrıca afet hazırlığı için çok önemli olan yerel toprak koşullarının anlaşılmasını geliştirmeyi amaçlamaktadır.

CBS'nin kullanıldığı diğer bir çalışmada Riske Duyarlı Arazi Kullanım Planlaması (RSLUP), deprem riski duyarlılığını yerel düzeyde haritalamak için GIS tabanlı çok kriterli imar yaklaşımlarını kullanarak felaket riski azaltma parametrelerini arazi kullanım planlamasına entegre edilerek çalışmanın politika yapıcılar için karar vermeyi kolaylaştıracağı belirtilmiştir (Barua vd., 2023). (Han vd., 2023) çalışmalarında etkili deprem riski azaltma stratejileri geliştirmek için bina savunmasızlığını CBS aracılığıyla değerlendirmenin önemini, kırılma seviyelerinin belirlenmesinde bina yoğunluğu ve yol altyapısı gibi faktörlerin önemini vurgulamaktadır. Bu çalışmalardan yola çıkılarak CBS ortamında deprem riskinin değerlendirilmesinin yaygın ve etkili olduğu görülmektedir.

Bu yaklaşımlar toplu olarak, etkili azaltma ve hazırlık stratejileri için deprem riskinin kapsamlı bir şekilde anlaşılmasına katkıda bulunur. Bu çalışmada da Diyarbakır ilinin tüm ilçelerine ait tarihsel deprem verileri CBS ortamına aktararak verilerin ilçe haritalarında görselleştirilmesi ve yorumlaması yapılmıştır. Deprem verileri ile birlikte Diyarbakır ilçelerindeki hangi bölgelerin ne kadar riskte olduğu ve tehlike durumları ayrıca belirtmeye çalışılmıştır. Bu çalışmanın yerel yönetimler ve okuyucu kitlesi için yardımcı bir çalışma olması beklenmektedir.

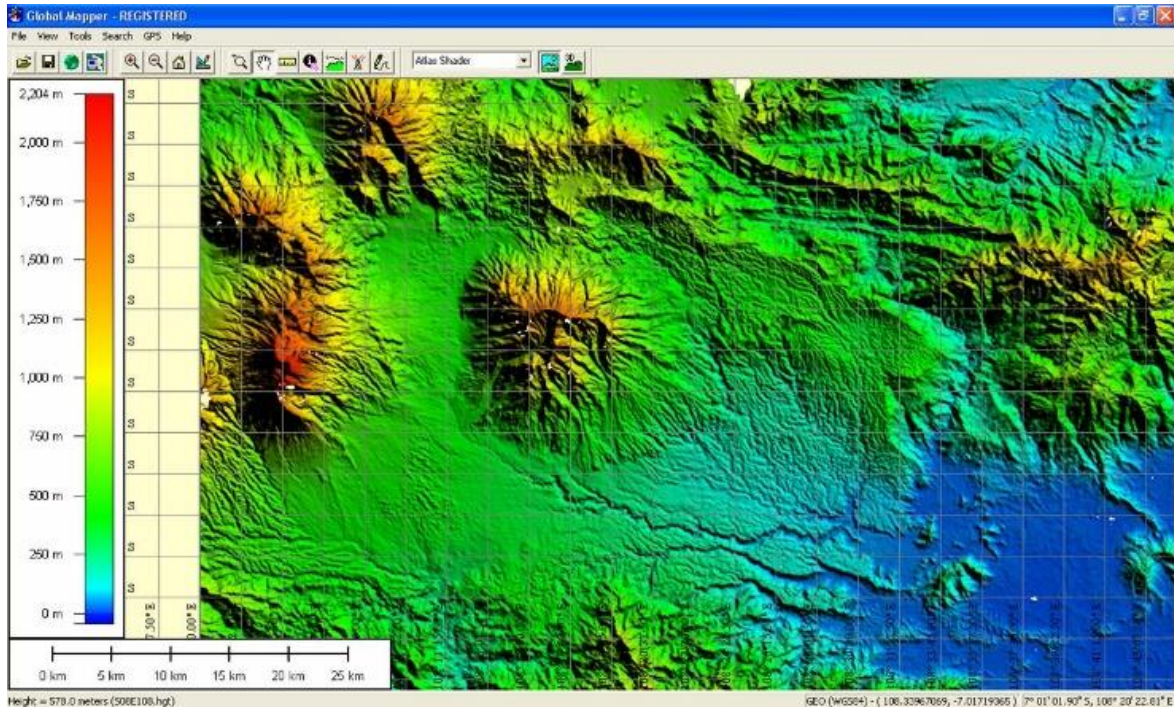
MATERYAL VE METOD

Çalışmada AFAD veri tabanından indirilen 1900-2022 yıllarına ait deprem verileri kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan verilerin büyüklük aralığı 1-7 seçilmiştir. Verilerde depremin meydana geldiği tarih ve saat, enlem, boylam, derinlik, rms değeri, büyüklüğü ve depremin meydana geldiği yer bilgileri bulunmaktadır (Tablo 1). Tablo 1'de büyüklüğü 3,5 ve üzerinde olan depremler verilmiştir. Bu aralığın seçilmesinin sebebi büyüklüğü 3,5'ten küçük depremlerin hem çok fazla sayıda olması hem de hasar verebilme ihtimallerinin az ve şiddetlerinin küçük olmasıdır. Bu veriler csv dosya formatına dönüştürülerek CBS ortamına aktarılmıştır. CBS ortamında Diyarbakır iline ait ilçeler tek tek ayrıştırılıp ilçelere ait veriler ilçelere ait öznitelik tablolarına eklenmiştir. Veriler depremin

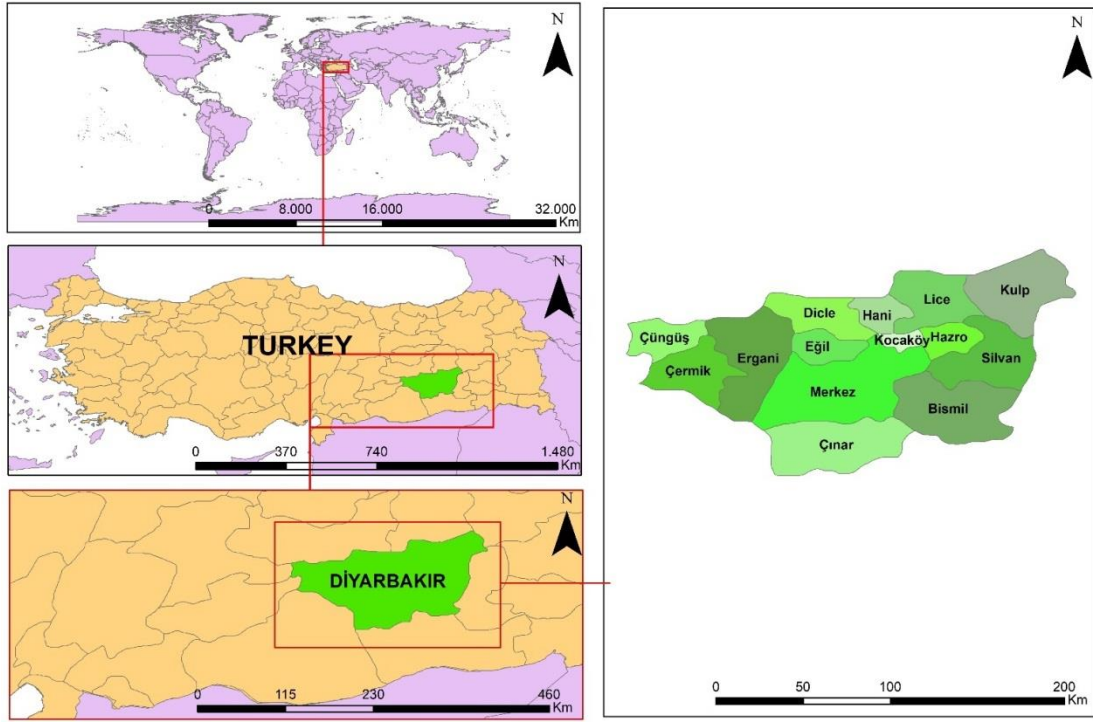
meydana geldiği koordinatlar baz alınarak ilçe haritalarında görselleştirmesi yapılmıştır. Çalışmadaki verilerde deprem büyüklüğünü belirtmek için iki büyüklük parametresi bulunmaktadır. İlki, Ml (Lokal Magnitüd): Charles F. Richter tarafından geliştirilen bir deprem büyüklüğü ölçüsüdür. Ml, depremin epicenter (merkez noktası) bölgesindeki yerel sismograf istasyonlarından gelen P ve S dalgalarının enerjisine dayanır. Ml ölçümü genellikle logaritmik bir ölçek kullanır. Her bir birimlik artış, enerjinin 10 kat arttığını gösterir. Bu büyüklük ölçümü, özellikle yerel olarak meydana gelen depremlerin büyüklüğünü değerlendirmek için yaygın olarak kullanılır. İkincisi ise Md (Süreye Bağlı Büyüklük): Süreye bağlı büyüklük (Md), Hugo Benioff tarafından geliştirilen bir büyüklük ölçüsüdür. Md, depremin başlangıcından sona kadar geçen süre içinde gözlemlenen dalga formundaki değişiklikleri ölçer. Bu ölçüm genellikle depremin yüzey dalgalarına (S dalgaları) dayanır. Bu dalgaların genliği ve süresi, depremin enerjisinin bir ölçüsü olarak kullanılır.

Çalışmada yazılım olarak Global Mapper kullanılmıştır. Global Mapper, coğrafi bilgi sistemleri (CBS) uygulamalarında kullanılan Blue Marble Geographics tarafından geliştirilmiş bir yazılımdır (Şekil 1). Bu yazılım, geniş bir yelpazedeki coğrafi veri işleme ve analiz yeteneklerini içermektedir. Global Mapper'ın temel özellikleri arasında çeşitli coğrafi veri formatlarının desteklenmesi yer almaktadır. Kullanıcılar, KML, GeoTIFF, ve shapefile gibi farklı formatlardaki verileri sorunsuz bir şekilde işleyebilirler. Yazılım, zemin modelleme ve analizi için özel araçlar içerir. Bu araçlar, kontur oluşturma, eğim analizi ve havza belirleme gibi topografik analizleri gerçekleştirmek için kullanılabilir. Global Mapper, kullanıcılara 2D ve 3D görselleştirme yetenekleri sunar. 3D görselleştirme özellikleri, yükseklik modellerini etkili bir şekilde temsil edebilme ve detaylı 3D renderlamalar yapabilme imkânı sağlar. Harita oluşturma ve düzenleme konusunda Global Mapper, profesyonel kalitede haritaların tasarlanmasını ve basılmasını kolaylaştırır.

Kullanıcılar, özelleştirilebilir düzenlere sahip haritalar oluşturabilir ve bu haritaları çeşitli amaçlar için kullanabilirler. Global Mapper, coğrafi veri analizi ve işleme alanında esneklik sunar. Birçok coğrafi veri standardını destekleyerek, farklı kaynaklardan gelen verilerin entegrasyonunu ve etkili bir şekilde işlenmesini sağlar (Geospatial World, 2024). Çalışma da verilerin görselleştirilmesi işlemi Global Mapper uygulamasında yapılmıştır. Çalışma alanına ait lokasyon haritası ise şekil 2'de verilmiştir.



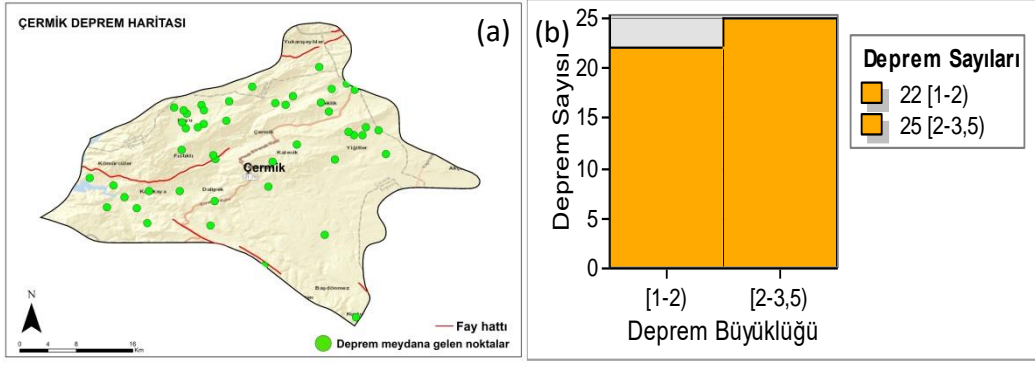
Şekil 1. Global Mapper Arayüzü (Geospatial World, 2024)



Şekil 2. Çalışma Alanı Lokasyon Haritası

Tablo 1. 1900-2022 Yılları Arasında Meydana Gelen Büyüklüğü 3,5'ten Büyük Olan Depremler (AFAD, 2024)

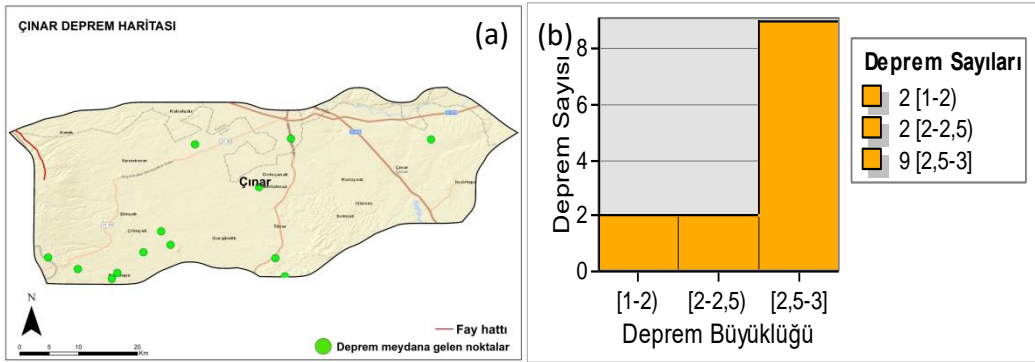
Tarih	Enlem	Boylam	Derinlik (Km)	Rms	Tip	Büyüklük	Yer
16\07\2021 08:44	39,851	38,24	13,8	1,1	Ml	4	Ergani (Diyarbakır)
12\05\2021 16:03	40,8745	38,5655	7,01	0,47	Ml	3,9	Kulp (Diyarbakır)
21\11\2020 03:23	40,9638	38,5741	6,43	0,42	Ml	3,8	Kulp (Diyarbakır)
12\08\2019 13:34	40,8303	38,3153	6,41	0,35	Ml	4,2	Hazro (Diyarbakır)
12\08\2019 08:38	40,8221	38,3088	7,09	0,18	Ml	3,6	Hazro (Diyarbakır)
21\12\2018 04:39	39,7815	38,0403	10,22	0,4	Ml	3,5	Ergani (Diyarbakır)
24\03\2018 15:04	40,9838	38,3408	12,01	0,36	Ml	4,1	Kulp (Diyarbakır)
5\12\2017 03:16	39,1606	38,2786	20,41	0,4	Ml	3,8	Çüngüş (Diyarbakır)
30\03\2017 23:55	39,7808	38,051	7	0,35	Ml	3,8	Ergani (Diyarbakır)
16\03\2014 02:38	40,6508	38,5508	6,98	0,34	Ml	3,7	Lice (Diyarbakır)
19\07\2013 23:17	40,8387	38,518	7,01	0,4	Ml	3,9	Kulp (Diyarbakır)
28\04\2012 03:17	40,741	38,5172	22,47	0,64	Ml	4,6	Lice (Diyarbakır)
27\06\2010 13:27	41,0063	38,3002	23,21	0,79	Ml	3,8	Silvan (Diyarbakır)
28\03\2008 21:59	40,5663	38,5478	6,69	0,46	Ml	3,7	Lice (Diyarbakır)
27\12\2007 09:59	39,3472	38,2735	5	0,62	Md	3,5	Çüngüş (Diyarbakır)
14\12\2007 21:59	39,3632	38,2895	15,76	0,59	Md	3,5	Çüngüş (Diyarbakır)
1\05\2007 22:53	39,3152	38,332	7,01	1,28	Md	3,5	Çüngüş (Diyarbakır)
19\04\2007 07:16	39,1888	38,3048	7,93	0,62	Ml	4,2	Çüngüş (Diyarbakır)
21\03\2007 01:32	39,3028	38,3491	5	0,5421	Ml	3,7	Çüngüş (Diyarbakır)
11\03\2007 23:35	39,2912	38,332	16,62	0,8256	Ml	4	Çüngüş (Diyarbakır)
1\03\2007 06:31	39,8423	38,2027	1,68	0,81	Md	3,5	Ergani (Diyarbakır)
28\02\2007 23:28	39,259	38,3116	4,2	0,2937	Md	4	Çüngüş (Diyarbakır)
28\02\2007 19:55	39,237	38,2267	26,11	0,8	Ml	5,2	Çüngüş (Diyarbakır)
6\01\2006 13:49	40,8016	38,534	4,2	0,549	Md	3,5	Lice (Diyarbakır)
24\07\2005 13:07	39,277	38,2467	22,4	0,044	Md	3,6	Çüngüş (Diyarbakır)
23\07\2005 16:47	40,6476	38,563	5	0,3491	Md	3,6	Lice (Diyarbakır)
20\12\2004 20:10	40,5916	38,4775	8,5	0,7615	Md	3,5	Lice (Diyarbakır)
7\09\2002 01:30	39,3	38,18	4,6	0	Md	3,7	Çüngüş (Diyarbakır)
18\01\2001 00:44	39,27	38,23	10,3	0	Md	3,5	Çüngüş (Diyarbakır)
25\04\1999 10:28	41	38,01	17,8	0	Md	3,5	Silvan (Diyarbakır)
13\04\1999 09:47	39,19	38,27	2,6	0	Md	4,4	Çüngüş (Diyarbakır)
1\03\1999 17:56	40,67	38,46	9,2	0	Md	3,9	Lice (Diyarbakır)
1\03\1999 14:54	40,66	38,52	7,6	0	Md	4	Lice (Diyarbakır)
8\10\1998 20:48	40,38	38,51	15,7	0	Md	4,4	Hani (Diyarbakır)
28\04\1998 03:45	40,51	38,51	5,9	0	Md	3,5	Lice (Diyarbakır)
19\09\1994 14:15	41,05	38,01	1	0	Md	4,4	Silvan (Diyarbakır)
16\08\1994 17:50	39,23	38,26	1	0	Md	3,5	Çüngüş (Diyarbakır)
22\07\1994 19:46	40,06	38,45	1	0	Md	3,8	Dicle (Diyarbakır)
22\07\1994 17:17	40,16	38,39	1	0	Md	3,6	Dicle (Diyarbakır)
1\07\1994 20:02	39,16	38,02	1	0	Md	4,4	Çermik (Diyarbakır)
6\09\1975 12:20	38,51	40,77	32	0,76	Md	6,6	Lice (Diyarbakır)
5\03\1990 02:59	40,71	38,47	8	0	Md	4,1	Lice (Diyarbakır)



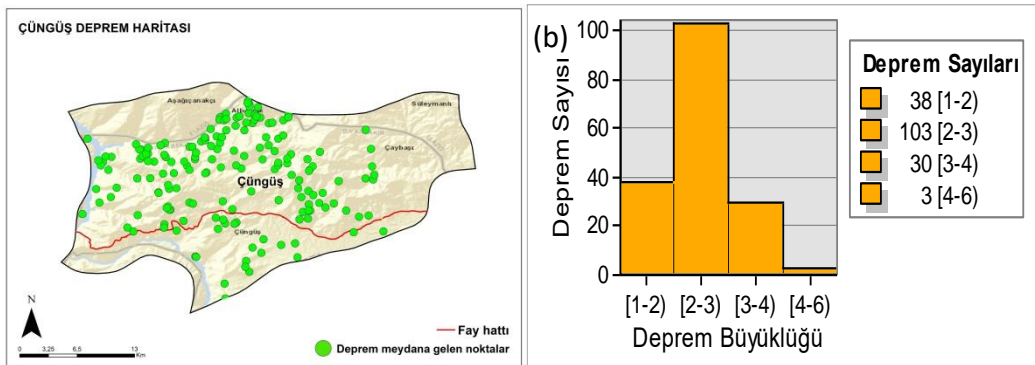
Şekil 5. (a) Çermik Deprem Haritası, (b) Çermik'e Ait Histogram Grafiği

Çermik ilçesi 700 m rakımda bulunan nüfusu 50.812 kişi olan, yüzölçümü ise 1032 Km² olan Diyarbakır'ın bir ilçesidir. Şekil 5 (a)'da ilçede meydana gelen depremlerin yerleri, şekil 5 (b)'de ise meydana gelen depremlerin büyüklüklerine göre sayıları gösterilmiştir. Veriler incelendiğinde Çermik ilçesinde 1900-2022 yılları arası 47 deprem olduğu ve en büyük depremin ise 3.3 büyüklüğünde olduğu görülmektedir. Çermik ilçesinde fay hattı bulunduğu ve çevre illerdeki depremlerden dolayı depremlerden etkilenme potansiyeli ilçe için önemli bir faktördür.

Çınar ilçesi 680 m rakımda bulunan nüfusu 74.207 kişi olan, yüzölçümü ise 1990 Km² olan Diyarbakır'ın bir ilçesidir. Şekil 6 (a)'da ilçede meydana gelen depremlerin yerleri, şekil 6 (b)'de ise meydana gelen depremlerin büyüklüklerine göre sayıları gösterilmiştir. Veriler incelendiğinde Çermik ilçesinde 1900-2022 yılları arası 13 deprem olduğu ve en büyük depremin ise 3 büyüklüğünde olduğu görülmektedir. Tarihsel veriler incelendiğinde deprem konusunda riskli olmadığı da ayrıca görülmektedir.



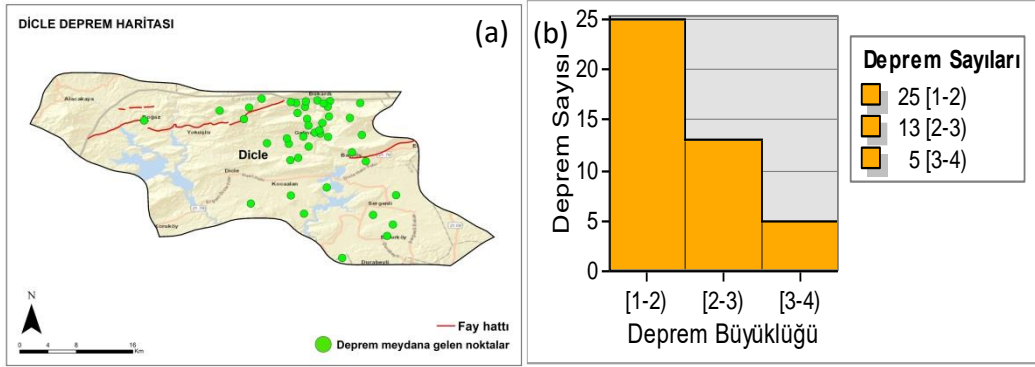
Şekil 6. (a) Çınar Deprem Haritası, (b) Çınar'a Ait Histogram Grafiği



Şekil 7. (a) Çüngüş Deprem Haritası, (b) Çüngüş'e Ait Histogram Grafiği

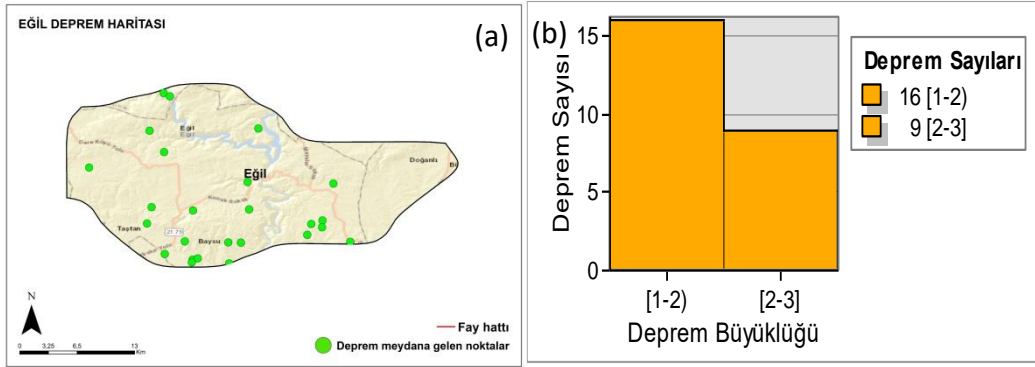
Çüngüş ilçesi 1049 m rakımda bulunan nüfusu 11.927 kişi olan, yüzölçümü ise 489 Km² olan Diyarbakır'ın bir ilçesidir. Şekil 7 (a)'da ilçede meydana gelen depremlerin yerleri, şekil 7 (b)'de ise meydana gelen depremlerin büyüklüklerine göre sayıları gösterilmiştir. Veriler incelendiğinde Çüngüş ilçesinde 1900-2022 yılları arası 174 deprem olduğu ve en büyük depremin ise 5.2 büyüklüğünde olduğu görülmektedir. Çüngüş ilçesinde fay hattı bulunduğu buradan deprem üretme potansiyeli ve çevre illerde meydana gelebilecek depremlerden daha fazla

etkilenebilme durumu söz konusudur. Diyarbakır'ın ilçelerinde Lice'den sonra en büyük deprem 5.2 büyüklüğünde bu ilçede meydana gelmiştir. Meydana gelen deprem sayısı ve büyük deprem üretme potansiyelinden dolayı ilçenin deprem konusunda daha dikkatli olması gerekmektedir.



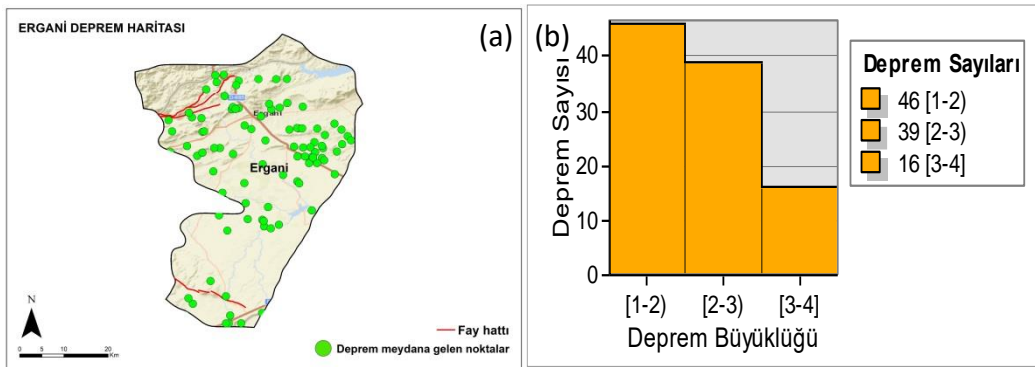
Şekil 8. (a) Dicle Deprem Haritası, (b) Dicle'ye Ait Histogram Grafiği

Dicle ilçesi 972 m rakımda bulunan nüfusu 38.220 kişi olan, yüzölçümü ise 975 Km² olan Diyarbakır'ın bir ilçesidir. Şekil 8 (a)'da ilçede meydana gelen depremlerin yerleri, şekil 8 (b)'de ise meydana gelen depremlerin büyüklüklerine göre sayıları gösterilmiştir. Veriler incelendiğinde Dicle ilçesinde çok fazla deprem meydana gelmediği 1900-2022 yılları arası sadece 43 deprem olduğu ve en büyük depremin ise 3.8 büyüklüğünde olduğu görülmektedir.



Şekil 9. (a) Eğil Deprem Haritası, (b) Eğil'e Ait Histogram Grafiği

Eğil ilçesi 860 m rakımda bulunan nüfusu 23.369 kişi olan, yüzölçümü ise 494 Km² olan Diyarbakır'ın bir ilçesidir. Şekil 9 (a)'da ilçede meydana gelen depremlerin yerleri, şekil 9 (b)'de ise meydana gelen depremlerin büyüklüklerine göre sayıları gösterilmiştir. Veriler incelendiğinde Eğil ilçesinde çok fazla deprem meydana gelmediği 1900-2022 yılları arası 25 deprem olduğu ve en büyük depremin ise 3.1 büyüklüğünde olduğu görülmektedir.

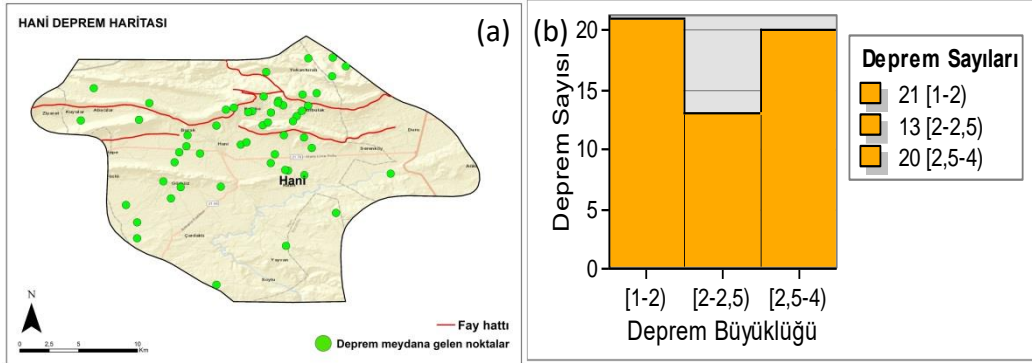


Şekil 10. (a) Ergani Deprem Haritası, (b) Ergani'ye Ait Histogram Grafiği

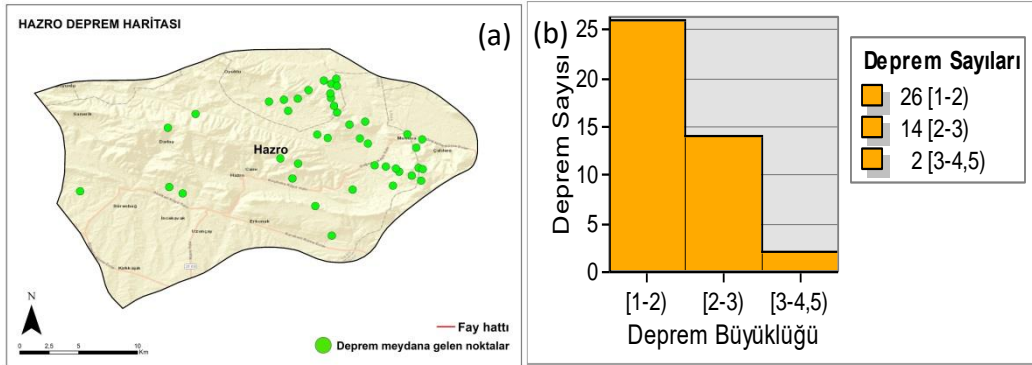
Ergani ilçesi 950 m rakımda bulunan nüfusu 130.105 kişi olan, yüzölçümü ise 1474 Km² olan Diyarbakır'ın bir ilçesidir. Şekil 10 (a)'da ilçede meydana gelen depremlerin yerleri, şekil 10 (b)'de ise meydana gelen depremlerin

büyükliklerine göre sayıları gösterilmiştir. Veriler incelendiğinde Ergani ilçesinde 1900-2022 yılları arası 101 deprem olduğu ve en büyük depremin ise 4 büyüklüğünde olduğu görülmektedir. İlçe sınırları içerisinde fay hattı geçtiğinden dolayı meydana gelen deprem sayıları ve deprem üretme potansiyeli yüksektir.

Hani ilçesi 756 m rakımda bulunan nüfusu 33.100 kişi olan, yüzölçümü ise 450 Km² olan Diyarbakır'ın bir ilçesidir. Şekil 11 (a)'da ilçede meydana gelen depremlerin yerleri, şekil 11 (b)'de ise meydana gelen depremlerin büyüklüklerine göre sayıları gösterilmiştir. Veriler incelendiğinde Hani ilçesinde 1900-2022 yılları arası 54 deprem olduğu ve en büyük depremin ise 3.3 büyüklüğünde olduğu görülmektedir. İlçe sınırları içerisinde fay hattı geçtiğinden dolayı meydana gelen deprem sayıları ve deprem üretme potansiyeli yüksektir. Fakat 1900-2022 yılları arasında sınırları içerisinde fay hattı bulunmasına rağmen tehlikeli sınıfta yer alabilecek büyüklükte bir deprem üretmemiştir.

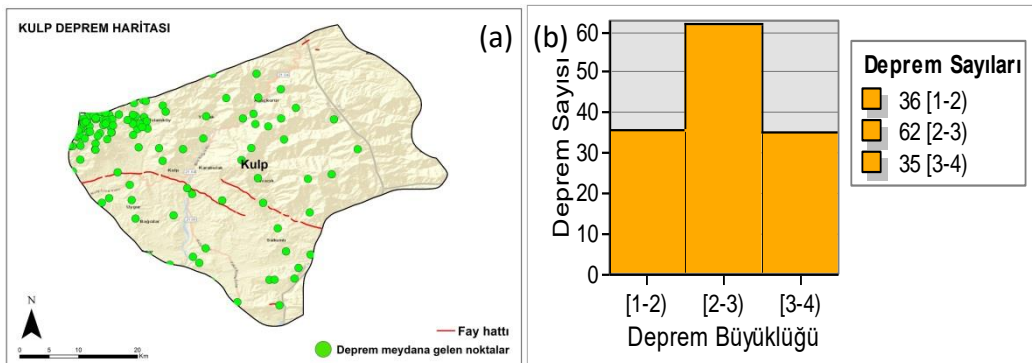


Şekil 11. (a) Hani Deprem Haritası, (b) Hani'ye Ait Histogram Grafiği



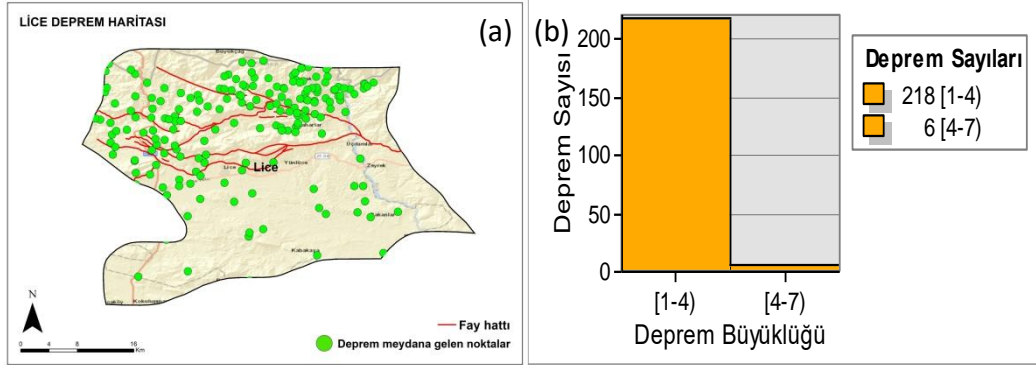
Şekil 12. (a) Hazro Deprem Haritası, (b) Hazro'ya Ait Histogram Grafiği

Hazro ilçesi 1050 m rakımda bulunan nüfusu 16.709 kişi olan, yüzölçümü ise 419 Km² olan Diyarbakır'ın bir ilçesidir. Şekil 12 (a)'da ilçede meydana gelen depremlerin yerleri, şekil 12 (b)'de ise meydana gelen depremlerin büyüklüklerine göre sayıları gösterilmiştir. Veriler incelendiğinde Hazro ilçesinde 1900-2022 yılları arası 42 deprem olduğu ve en büyük depremin ise 4.2 büyüklüğünde olduğu görülmektedir. İlçe sınırları içerisinde fay hattı geçmemektedir.



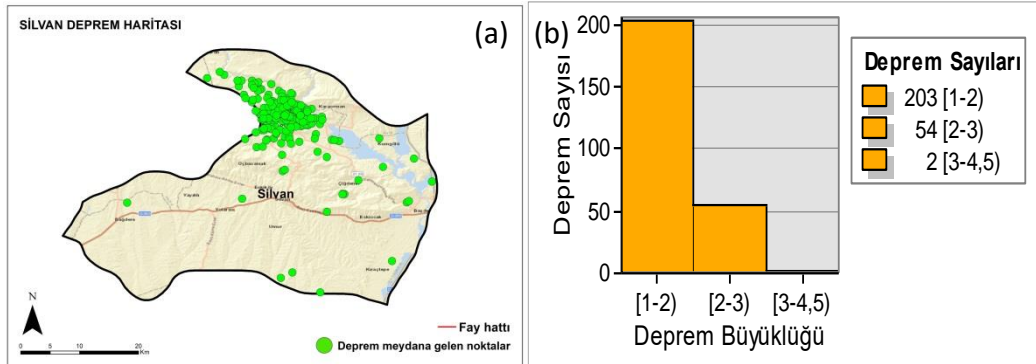
Şekil 13. (a) Kulp Deprem Haritası, (b) Kulp'a Ait Histogram Grafiği

Kulp ilçesi 1050 m rakımda bulunan nüfusu 36.640 kişi olan, yüzölçümü ise 1601 Km^2 olan Diyarbakır'ın bir ilçesidir. Şekil 13 (a)'da ilçede meydana gelen depremlerin yerleri, şekil 13 (b)'de ise meydana gelen depremlerin büyüklüklerine göre sayıları gösterilmiştir. Veriler incelendiğinde Kulp ilçesinde 1900-2022 yılları arası 123 deprem olduğu ve en büyük depremin ise 3.9 büyüklüğünde olduğu görülmektedir. İlçe sınırları içerisinde fay hattı geçtiğinden dolayı deprem üretme potansiyeli yüksektir. Fakat 1900-2022 yılları arasında tehlikeli sınıfta sayılabilecek büyüklükte bir deprem üretmemiştir.



Şekil 14. (a) Lice Deprem Haritası, (b) Lice'ye Ait Histogram Grafiği

Lice ilçesi 1125 m rakımda bulunan nüfusu 26.163 kişi olan, yüzölçümü ise 1083 Km^2 olan Diyarbakır'ın bir ilçesidir. Şekil 14 (a)'da ilçede meydana gelen depremlerin yerleri, şekil 14 (b)'de ise meydana gelen depremlerin büyüklüklerine göre sayıları gösterilmiştir. Veriler incelendiğinde Lice ilçesinde 1900-2022 yılları arası 224 deprem olduğu ve en büyük depremin ise 6.6 büyüklüğünde olduğu görülmektedir. 6.6 büyüklüğünde meydana gelen deprem büyük deprem sınıfındadır. 1975 yılında olan deprem birçok can ve mal kaybına sebep vermiştir. Diyarbakır ilinden meydana gelmiş 1900-2022 yılları arasındaki en büyük deprem olarak kayıtlara geçmiştir. Lice ilçesinde fay hattı bulunduğundan burada deprem üretme potansiyeli ve çevre illerde meydana gelebilecek depremlerden daha fazla etkilenebilme durumu söz konusudur. Lice'nin deprem geçmişi, büyük deprem oluşturabilme kapasitesi ve bugüne kadar oluşturduğu deprem sayısının diğer ilçelere göre fazla oluşu ilçenin bu konuda daha dikkatli olmasını gerektirmektedir.



Şekil 15. (a) Silvan Deprem Haritası, (b) Silvan'ın Ait Histogram Grafiği

Silvan ilçesi 840 m rakımda bulunan nüfusu 86.672 kişi olan, yüzölçümü ise 1373 Km^2 olan Diyarbakır'ın bir ilçesidir. Şekil 15 (a)'da ilçede meydana gelen depremlerin yerleri, şekil 15 (b)'de ise meydana gelen depremlerin büyüklüklerine göre sayıları gösterilmiştir. Veriler incelendiğinde Silvan ilçesinde 1900-2022 yılları arası 259 deprem olduğu ve en büyük depremin ise 4.4 büyüklüğünde olduğu görülmektedir. 1900-2022 yılları arasında 259 deprem üretmesiyle Diyarbakır'ın 1900-2022 yılları arasında en fazla deprem üreten ilçesidir. İlçe içerisinden aktif fay hattı geçmemektedir. Komşusu olduğu çevre ilçelerden Lice ve Kulp ilçelerinden fay hattı geçmektedir. Bu kadar fazla deprem üretmesine rağmen 1900-2022 yılları arasında büyük deprem sınıfına girebilecek bir deprem üretmemiştir. Bu çalışmada Diyarbakır'ın ilçelerine ait tarihsel deprem verileri tüm ilçelere göre ayrıştırılarak ilçe bazında deprem risk durumu ve meydana gelen depremlerin büyüklükleri ve sıklıkları yorumlanmıştır.

SONUÇ

Diyarbakır il sınırında 1900-2022 yılları arasında 1092 adet deprem meydana gelmiştir. Bu depremler en fazla 259 deprem ile Silvan ilçesinde, ikinci olarak 224 deprem ile Lice ilçesinde görülmektedir. Diyarbakır'da depremin yoğun görüldüğü Çüngüş, Hani, Ergani, Kulp, Lice, Hani Kuzeyde fay hatlarına yakın ilçelerdir. 100'den fazla deprem üreten ilçeler sırasıyla 259 depremle Silvan, 224 depremle Lice, 174 depremle Çüngüş, 123 depremle Kulp, 101 depremle Ergani ilçeleridir. Bu ilçelerin içinde olup fay hattına yakın olmayan fakat yoğun deprem görülen Silvan ilçesi bulunmaktadır. Bu bağlamda Silvan ilçesindeki depremlerin ayrı incelenmesi gerekmektedir. Diğer taraftan fay hattına uzak olan Bismil 5 deprem, Çınar 13 deprem üretmiş olup deprem üretme konusunda en risksiz alanlardır.

Deprem riskinin belirlenmesi konusunda yapılacak başka çalışmalarda daha geniş ve kapsamlı deprem veritabanları kullanarak analizlerin doğruluğu artırılabilir. Yüksek çözünürlüklü topografik ve jeolojik veriler kullanılarak daha detaylı analizler yapılabilir. Örneğin analitik hiyerarşi metodu yardımı farklı veri katmanları kullanılarak deprem riski bulunabilir. Bunun yanı sıra, ileri veri analiz teknikleri ve makine öğrenimi yöntemleri, deprem davranışlarını ve risklerini daha iyi anlamaya yardımcı olabilir.

Zaman serisi analizleri ile depremlerin mekansal ve zamansal dağılımları daha detaylı incelenebilir. Bu sayede, deprem aktivitesindeki değişimler ve trendler daha iyi anlaşılabilir. Deprem verileri ile birlikte hasar modellerinin entegrasyonu, olası deprem senaryolarının etkilerini simüle etmek için kullanılabilir. Bu tür modeller, yapıların ve altyapıların depreme karşı dayanıklılığını değerlendirmek için faydalı olabilir.

Literatürde Diyarbakır ili için ilçeler bazında yetersiz çalışma olduğundan dolayı bu çalışmanın mevcut eksikliği kapatmada faydalı olması ve kamu kurum kuruluşları, sivil toplum örgütleri ve okuyucu kitlesi içinde Diyarbakır ili için yapılacak deprem çalışmalarında bir kaynak olarak kullanılması beklenmektedir.

KAYNAKLAR

Altuncu Poyraz, S., Kalafat, D., Güneş, Y., Turhan, F., & Polat, R. (2020). Türkiye ve civarı sismik moment tensör kataloğu: 2016-2019. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 8(4), 1150–1164. <https://doi.org/10.21923/JESD.789876>

AFAD, 2024. <https://www.afad.gov.tr/turkiye-deprem-tehlike-haritasi>, Erişim zamanı 05 Ocak 2024

Bakhtiar, T., & Suardi, I. (2022). GEOSTAT application design for rapid determination of MATLAB-based earthquake risk level. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 989(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/989/1/012008>

Barua, U., Ansary, M. A., Islam, I., Munawar, H. S., & Mojtahedi, M. (2023). Multi-criteria earthquake risk sensitivity mapping at the local level for sustainable risk-sensitive land use planning (RSLUP). *Sustainability* (Switzerland), 15(9). <https://doi.org/10.3390/SU15097518>

Cerić, A., & Ivić, I. (2023). Application of analytic hierarchy process (ahp) in earthquake risk assessment. 964–974. <https://doi.org/10.5592/CO/2CROCEE.2023.133>

Civelekler, E., & Pekkan, E. (2022). The application of GIS in visualization of geotechnical data (SPT-Soil Properties): a case study in Eskişehir-Tepebaşı, Turkey. *International Journal of Engineering and Geosciences*, 7(3), 302–313. <https://doi.org/10.26833/IJEG.980611>

Demir, M., & Altaş, N. T. (2024). Kars kentinde deprem hasar risk potansiyeli taşıyan alanların CBS tabanlı AHP analizlerine dayalı olarak belirlenmesi. *Geomatik*, 9(1), 123–140. <https://doi.org/10.29128/GEOMATIK.1375650>

Demirel, Y., & Türk, T. (2023). 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş depremleri (Mw 7.7 ve Mw 7.6) sonrasında Türkiye'de meydana gelen depremlerin (Mw≥4) coğrafi bilgi sistemleri ile mekânsal analizi. *Türkiye Coğrafi Bilgi Sistemleri Dergisi*, 5(2), 60–69. <https://doi.org/10.56130/TUCBIS.1311693>

Diyarbakır Yenigün, 2024. <https://diyarbakiryenigun.com/diyarbakir/lice-depreminin-uzerinden-48-yil-gecti-166490h>, Erişim zamanı 08 Ocak 2024

Doğan, A., Başeğmez, M., & Aydın, C. C. (2023). Geniş çalışma alanlarında jeofizik ve jeoteknik ölçümlerin yerine geçebilecek vekil özelliklerin CBS ile belirlenmesi. *Geomatik*, 8(3), 293–305. <https://doi.org/10.29128/GEOMATIK.1161434>

- Erdik, M. (2021). Earthquake Risk Assessment from Insurance Perspective. Springer Tracts in Civil Engineering, 111–154. https://doi.org/10.1007/978-3-030-68813-4_6
- Fischer, E., Barreca, G., Greco, A., Martinico, F., Pluchino, A., & Rapisarda, A. (2023). Seismic risk assessment of a large metropolitan area by means of simulated earthquakes. *Natural Hazards*, 118(1), 117–153. <https://doi.org/10.1007/S11069-023-05995-Y>
- Geospatial World, 2024. <https://www.geospatialworld.net/news/dronemapper-chooses-gis-software-global-mapper/>, Erişim zamanı 05 Ocak 2024
- Göver, İ. H. (2023). Türkiye ve Japonya'nın Deprem Gerçekliği: Karşılaştırmalı Bir Analiz. *Mevzu – Sosyal Bilimler Dergisi*, 10, 279–323. <https://doi.org/10.56720/MEVZU.1319896>
- Habib, W., Mahmood, S., Huda, N. ul H., Noor, S. ., Saleem, A., Siraj, M. ., & Ahmad, H. . (2023). A post earthquake damage assessment using GIS in district Mirpur, Pakistan. *Advanced GIS*, 3(2), 53–58. Retrieved from <https://publish.mersin.edu.tr/index.php/agis/article/view/926>
- Han, T., Li, T., Ji, M., Yang, Y., & Liu, F. (2023). Risk assessment and zoning of earthquake disaster in Shandong Province based on GIS. 108. <https://doi.org/10.1117/12.2667651>
- Hidden, H., Minardi, S., Yasin, S., Sukrisna, B., & Ardianto, T. (2022). Determination and Mapping of the Causes of High Risk of Earthquake Hazards Using Geoelectrical Data in Bengkaung, Batu Layar, West Lombok Indonesia. *Jurnal Penelitian Pendidikan IPA*, 8(4), 2404–2410. <https://doi.org/10.29303/JPPIPA.V8I4.2206>
- İmamoğlu, M. Ş. (2019). Diyarbakır il merkezi ve çevresinin depremselliği ve zemin özellikleri. *DÜMF Mühendislik Dergisi*, 10(2), 697–707. <https://doi.org/10.24012/DUMF.579553>
- Jena, R., Shanableh, A., Al-Ruzouq, R., & Gibril, M. B. A. (2023). Earthquake Risk Assessment Using Xtreme Learning Machine and Remote Sensing. 2023 Advances in Science and Engineering Technology International Conferences, ASET 2023. <https://doi.org/10.1109/ASET56582.2023.10180748>
- Nemutlu, Ö. F., Balun, B., Benli, A., & Sarı, A. (2020). Bingöl ve Elazığ İlleri Özelinde 2007 ve 2018 Türk Deprem Yönetmeliklerine Göre İvme Spektrumlarının Değişiminin İncelenmesi. *DÜMF Mühendislik Dergisi*. <https://doi.org/10.24012/DUMF.703138>
- Özmen, B. (2023). Türkiye Deprem Bölgeleri Haritalarının Tarihsel Gelişimi ve Ankara'ya Etkileri. *Afet ve Risk Dergisi*, 6(3), 710–722. <https://doi.org/10.35341/AFET.1336981>
- Özşahin, B. (2021). Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği 2019'a Göre Kırklareli İçin Deprem Yüklerinin Değerlendirilmesi. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 9(2), 836–863. <https://doi.org/10.29130/DUBITED.768494>
- Santos-Reyes, J., & Gouzeva, T. (2022). Seismic risk communication: The case of preparatory schools in Mexico city. *Research Anthology on Managing Crisis and Risk Communications*, 83–99. <https://doi.org/10.4018/978-1-6684-7145-6.CH006>
- Seyrek, E. (2020). Yeni Türkiye sismik tehlike haritasının Ege bölgesi için değerlendirilmesi. *Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*. <https://doi.org/10.28948/NGUMUH.617268>
- Tursun, D., Taş, Ö. F., & Sayın, E. (2023). Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği 2018'e (TBDY-2018) göre betonarme bir binanın perde elemanlarının hasar sınır bölgelerinin tespit edilmesi. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 35(2), 581–595. <https://doi.org/10.35234/FUMBD.1287311>



Kahramanmaraş Sütçü İmam University

Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 15.03.2024
Kabul Tarihi : 14.05.2024

Received Date : 15.03.2024
Accepted Date : 14.05.2024

DIAGNOSIS AND CLASSIFICATION OF DIABETIC RETINOPATHY WITH YOLOv8-BASED DEEP LEARNING MODEL

YOLOv8 TABANLI DERİN ÖĞRENME MODELİ İLE DİYABETİK RETİNOPATİ TEŞHİSİ VE SINIFLANDIRMASI

Ömer ŞANVER¹ (ORCID: 0009-0004-4313-8007)
Ahmet SAYGILI^{*} (ORCID: 0000-0001-8625-4842)

¹ Tekirdağ Namık Kemal Üniversitesi, Bilgisayar Mühendisliği, Tekirdağ, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Ahmet SAYGILI, asaygili@nku.edu.tr

ABSTRACT

Diabetic retinopathy is a complication of diabetes that affects the eyes. High blood sugar levels damage the vessels of the retina, damaging the light-sensing cells in the eye, and can cause vision loss and, in severe cases, blindness. Deep learning models are powerful tools that can process and learn large data sets, and if used in the diagnosis of diabetes and diabetic retinopathy, they can benefit the early diagnosis of the disease. Deep learning enables early and high-accuracy detection of diabetic retinopathy symptoms with high sensitivity and specificity, as well as minimizing errors made by experts. In this study, we aimed to detect and classify diabetic retinopathy using the YOLOv8 (You Only Look Once) model, one of the CNN (convolutional neural network) architectures. The experimental studies were conducted with two different CPUs and two different GPUs. As a result of the experimental studies, the highest accuracy value was obtained as 84.91% with GPU1, and the average accuracy across the four different methods (CPU1, CPU2, GPU1, GPU2) was 83.82%.

Keywords: Diabetic retinopathy, deep learning, Yolov8, CNN

ÖZET

Diyabetik retinopati, diyabetin gözlere etki eden bir komplikasyonudur. Yüksek kan şekeri düzeyleri, retinanın damarlarına zarar vererek gözdeki ışığı algılayan hücrelere zarar vermekte ve görme kaybına, ciddi durumlarda ise körlüğe neden olabilmektedir. Derin öğrenme modelleri, büyük veri setlerini işleme ve öğrenme kapasitesine sahip güçlü araçlardır ve diyabet ile diyabetik retinopati teşhisinde de kullanılması durumunda hastalığın erken teşhisine fayda sağlayabilecektir. Derin öğrenme, yüksek hassasiyet ve spesifiklik ile diyabetik retinopati belirtilerinin erken ve yüksek doğrulukla tespit edilmesini ve bunun yanı sıra uzmanlar tarafından yapılan hataların minimize edilmesine olanak sağlar. Gerçekleştirdiğimiz bu çalışmada da CNN mimarilerinden biri olan YOLOv8 modeli kullanılarak diyabetik retinopati hastalığının tespiti ve sınıflandırılması amaçlanmıştır. Çalışmamızda 2 farklı CPU ve 2 farklı GPU ile deneysel çalışmalar yapılmıştır. Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda en yüksek doğruluk değeri GPU1 ile %84.91 olarak elde edilmiş ve dört farklı yöntemin (CPU1, CPU2, GPU1, GPU2) ortalama doğruluk değeri de %83.82 olarak elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Diyabetik retinopati, derin öğrenme, Yolov8, CNN

INTRODUCTION

Diabetes, which is an increasing health problem worldwide, causes various complications in the body by causing a series of metabolic disorders (Association, 2022). One of these complications is diabetic retinopathy. Diabetic retinopathy is a disease that occurs in the eyes of diabetic patients and can progress over time. This condition can cause vision loss as a result of damage to the blood vessels on the retina (Yau et al., 2012). Diabetic retinopathy occurs when long-term high blood sugar levels damage retinal tissue. At the beginning of the disease, symptoms are usually mild and may not be noticed by the patient. However, as it progresses, it can cause serious problems such as leaks in blood vessels, edema, and even new vessel formation. This condition may progress to permanent vision loss for the patient. Early diagnosis and effective treatment are critical to minimize the effects of diabetic retinopathy and prevent vision loss (Wong et al., 2018).

The relationship between diabetes and the retina is based on a complex interaction. Diabetes triggers diabetic retinopathy through its direct effects on the retina when blood sugar levels are persistently high (Fong et al., 2003). Diabetic retinopathy is a dangerous disease that affects the light-sensing cells and blood vessels at the back of the retina. High blood sugar levels damage the blood vessels in the retinas, which can lead to dilation, leakage, and even bleeding. Edema may occur in the retina tissue, which may affect visual functions (Vujosevic et al., 2020). In the long term, diabetic retinopathy can lead to serious vision loss. Therefore, diabetic individuals need to have regular eye examinations and keep their blood sugar levels under control. Early diagnosis and treatment is a critical process in preventing or delaying vision loss (Ansari et al., 2022). Additionally, in the management of diabetic retinopathy, it is necessary to regulate blood sugar levels as well as blood pressure and lipid levels.

It is a known fact that computer-aided diagnosis and support systems provide very successful results in detecting health-related problems. There are many studies in the literature that detect diabetic retinopathy. The first of these studies is the study conducted by Deperlioğlu and Köse (Deperlioğlu and Köse, 2018). In this study, a method developed for the diagnosis of diabetic retinopathy from retinal fundus images is discussed. In the study, a method including HSV (hue, saturation, brightness) color space, V rotation algorithm, and histogram equalization techniques was used to improve retinal fundus images. The results obtained from the evaluation performed on a total of 400 retinal fundus images are quite impressive. As a result of the study, the accuracy rate was determined as 97%, sensitivity 96.67%, specificity 93.33%, precision 97.78%, recall rate 93.33%, and F-score 93.33%. Çavli and M. Toğaçar (Çavli and Toğaçar, 2023) proposed a hybrid artificial intelligence model for the early diagnosis of retinopathy disease. As a result of experimental analyses, 100% overall accuracy was achieved with the proposed approach. Özçelik and Altan (Özçelik and Altan, 2021) devised a deep-learning model utilizing fundus images for the early detection and treatment of DR. The constructed model comprises two stages. Initially, two-dimensional signal processing techniques were employed on the fundus images to mitigate overfitting. Subsequently, a classification model was established utilizing Convolutional Neural Network and transfer learning methods, both being deep learning techniques. The proposed model achieved a classification performance of 97.8%. Özçelik, Y.B. and Altan, A. (Özçelik and Altan, 2023) present an artificial intelligence (AI)-based model that could use fundus images to determine the phase of DR disease. The proposed model consists of four stages, excluding the preprocessing stage. In the preprocessing stage, fractal analysis is performed to reveal the presence of chaos in the dataset consisting of 12,500 color fundus images. In the first stage, two-dimensional stationary wavelet transform (2D-SWT) is applied to the dataset consisting of color fundus images to prevent information loss in the images and to reveal their characteristic features. In the second stage, 96 features are extracted by applying statistical and entropy-based feature functions to approximate, horizontal, vertical, and diagonal matrices of 2D-SWT. In the third stage, the features that keep the classifier performance high are selected by a chaotic-based wrapper approach consisting of the k-nearest neighbor (kNN) and chaotic particle swarm optimization algorithms (CPSO) to cope with both chaoticity and computational complexity in the fundus images. At the last stage, an AI-based classification model is created with the recurrent neural network-long short-term memory (RNN-LSTM) architecture by selecting the lowest number of feature sets that can keep the classification performance high. Vipparthi et al, (Vipparthi et al., 2022) can assist ophthalmologists in clinical diagnosis and detection and classification of diabetic retinopathy. There are three phases in this diabetic retinopathy detection and classification technique enhancement Feature Extraction and Retinopathy Detection and Classification. Feature extraction involves blood vessel extraction and exudate extraction. The first two phases assist the ophthalmologists by providing clear images of the retina and blood vessels and exudates extracted images. In this work, from the presented retinal fundus pictures, the Res-Block model is used to classify and diagnose diabetic retinopathy. Fang and Qiao (Fang and Qiao, 2022), propose a novel DAG network model for the classification of diabetic retinopathy

based on multi-feature fusion of fundus images. Firstly, under the advice of the doctor, three indicative features of diabetic retinopathy are extracted using different algorithms: retinal hemorrhagic plaque, fundus neovascularization, and retinal varices. Then three features are sent to a classification model based on a novel DAG network for realizing multi-feature fusion and feature learning. Finally, the optimized classification model is used to recognize and classify diabetic retinopathy. DIARETDB1 dataset and real hospital data from Dalian NO.3 People's Hospital are used to evaluate the performance of the proposed method. For the DIARETDB1 dataset and real hospital data, the accuracy can reach 98.7% and 98.5%, respectively. Arslan Tuncer, Çınar and Fırat, (Arslan Tuncer, Çınar and Fırat, 2021) propose system is a CNN-SVM (Convolutional Neural Networks – Support Vector Machine) model and doesn't require any additional extraction of features or noise filtering on OCT images. A total of 968 OCT images are classified in pre-trained CNN methods with Alexnet, Resnet18, and Googlenet. Accuracy is achieved with the highest Googlenet 97.4%. To examine the performance of the proposed CAD system, the CNN-SVM method achieves 98.96% with the highest accuracy hybrid Alexnet-SVM model, which is implemented with Alexnet-SVM, Resnet18-SVM and Googlenet-SVM models. Shaukat et al (Shaukat et al, 2023), Several current approaches of preprocessing, segmentation, feature extraction/selection, and classification are discussed for the detection of DR lesions. also includes a detailed description of DR datasets that are accessible by the researcher for the identification of DR lesions. The existing methods' limitations and challenges are also addressed, which will assist invoice researchers in starting their work in this domain. Dulkadir and Gültekin, (Dulkadir and Gültekin 2023) used three different convolutional neural network models (YOLOv5, YOLOv8) for the autonomous classification of banana ripeness levels for use in multiple autonomous robotic harvesting systems. The models were trained on a 6-class banana ripeness level dataset and the test results were compared using commonly used performance metrics. Ağca and Takci (Kemal and Takci, 2022) introduced a hybrid approach combining ESA and machine learning for the identification and classification of DR. The transfer learning model adopts ESA architecture, employing ResNET-50 as an automatic feature extractor. Machine learning algorithms, including K-Nearest Neighbor Algorithm, Random Forest Algorithm, and Extra Trees Algorithm, function as classifiers. The classification process yielded an accuracy of 93% and an F1 score of 93%. Fang et al. (Fang et al., 2022) developed DeepDR, a deep learning system that enables the detection of diabetic retinopathy from early stages to late stages. DeepDR was trained for real-time image quality assessment, lesion detection, and grading using 466,247 fundus images of 121,342 diabetic patients. The success rates for grading diabetic retinopathy as mild, moderate, severe, and proliferative were 0.943, 0.955, 0.960, and 0.972, respectively. In this study, a computer-aided system that enables the diagnosis and classification of Diabetic retinopathy was proposed using the YOLOv8 model, one of the CNN architectures. YOLOv8 is extremely fast and accurate in real-time object detection. This allows fundus images to be scanned and abnormalities detected instantly. It is relatively easy to use and implement. It can be easily customized to suit different datasets and tasks. It is supported by an active research community. This means that the model is constantly being improved and updated. In the study, 3600 diabetic retinopathy images were used for 5 different disease levels ("Mild", "Moderate", "No_DR", "Proliferate_DR" and "Severe"). The training was done with the CPU and lasted 35 minutes. The overall accuracy value of the model was measured as 93%. In the study, the performances of image processing and different deep learning methods were comparatively analyzed in the diagnosis of diabetic retinopathy. We worked on a scattered and small data set with a short training time. The dataset used was readily available and no pre-processing was applied. No parameters were changed except dropout. All of them were left as default. By working on fungal images, it is aimed that Yolov8 can be used in different areas.

In the continuing parts of the study, the second section includes materials and methods, the third section includes experimental results, the fourth section includes discussion, and the last section includes results.

MATERIAL AND METHOD

In the study, Diabetic Retinopathy Detection (Dugas et al., 2015) in the Kaggle dataset is used. The data set consisting of fundus images consists of a total of 3600 retina images. The resolution of the retina images in .png format in the dataset is 224×224 pixels. There are 270 "Mild", 690 "Moderate", 1212 "No_DR", 219 "Proliferate_DR" and 137 "Severe" retina images for training. For verification, there are 100 retinal images belonging to the "Mild", 303 "Moderate", 537 "No_DR", 76 "Proliferate_DR" and 56 "Severe" classes. When the data set is examined, the imbalance in the number of images belonging to the classes draws attention.

Retinal images of the "No_DR, Mild, Moderate, Severe, and Proliferate_DR" classes in the fundus data set used in the study are shown in Figure 4.

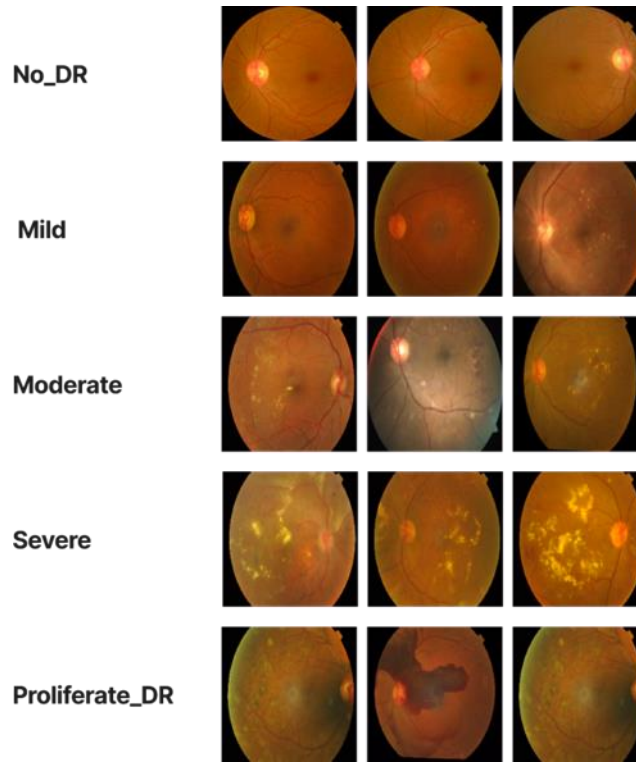


Figure 1. Retinal Images from Different Classes in the Data Set (Dugas et al., 2015)

Figure 1 shows the flow chart of the model developed with the data set consisting of fundus images for the diagnosis of DR disease and classification of its stages. To classify DR disease, the model was trained with the YOLOv8 algorithm, one of the CNN architectures. 70% of the data set consisting of fundus images is reserved for training the model, and the remaining 30% of the data set is used to test the validity of the model. The performance of the model is measured by classification performance metrics such as accuracy, precision, recall, and F1-score.

Ultralytics YOLOv8 is a model that builds on the success of previous YOLO versions and introduces new features and improvements to further increase performance and flexibility. It is shown in Figure 2.

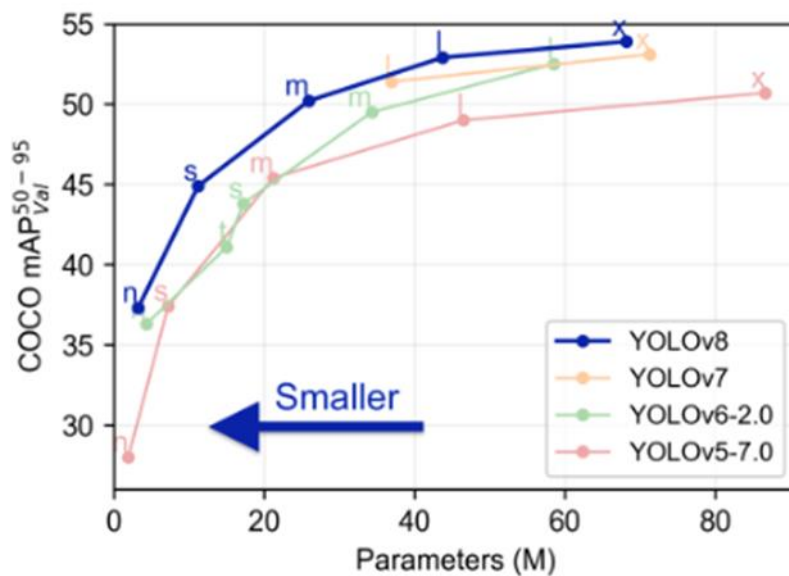


Figure 2. Comparison of Yolo Models

The basic underpinnings of the model build on the successes of previous YOLO versions. However, thanks to the innovations brought by YOLOv8, a higher level of performance and greater flexibility in the field of object detection has been achieved. Newly added features and improvements have enabled the model to be used effectively in various tasks. YOLOv8's focus on speed, accuracy, and ease of use has contributed to making this model preferable for a wide range of applications. These features enable it to be used successfully in several applications including object detection and tracking, sample segmentation, image classification and pose estimation tasks (Ultralytics et al., 2024). The architecture of the model is shown in Figure 3.

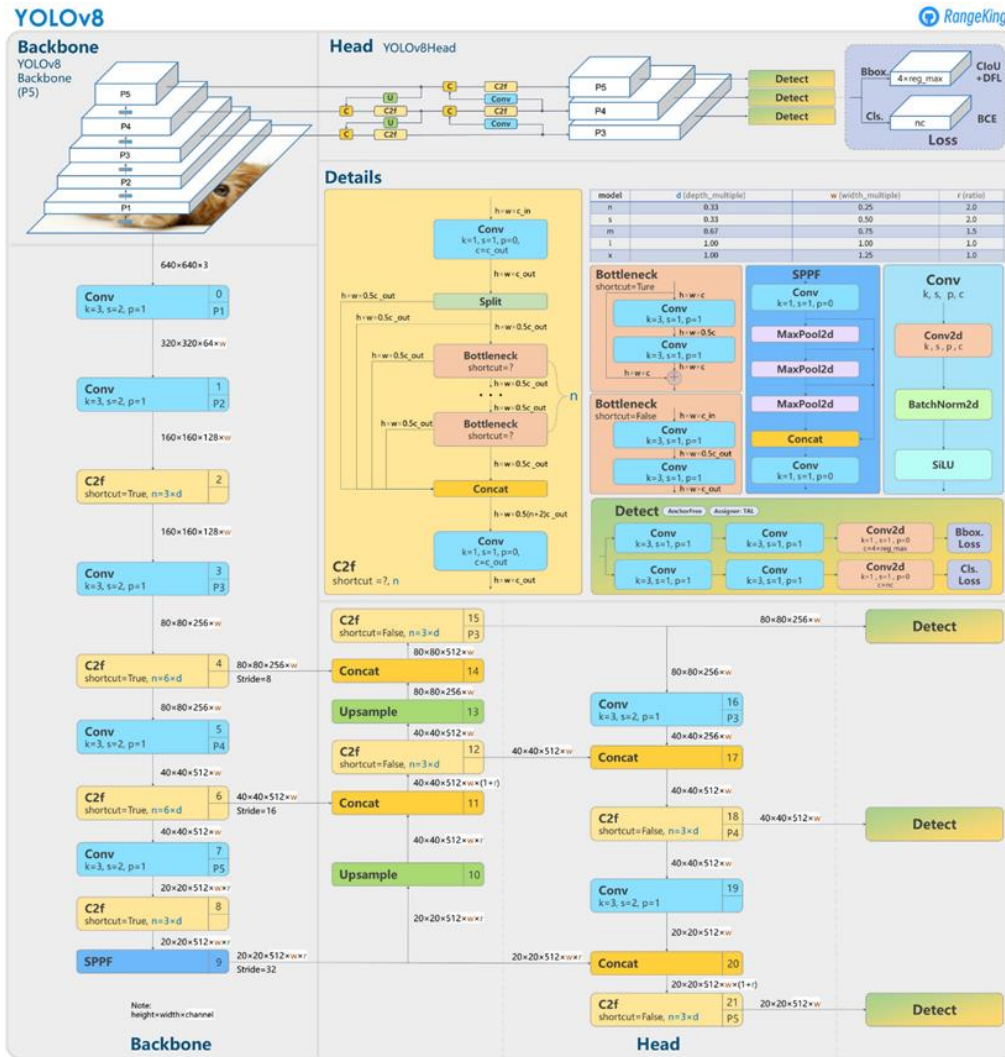


Figure 3. YoloV8 Architecture (King et al., 2024)

The model used consists of 10 layers. It has 1444693 parameters and is shown in Figure 3. It works with 224x224 images. Adam was preferred as the optimizer. To prevent overlearning, dropout was used, and its value was chosen as 0.2. Training with CPU Training lasted 50 epochs, 35 minutes. Those with GPU lasted 50 epochs, 5 minutes.

EXPERIMENTAL RESULTS

The confusion matrix is an important tool for calculating various evaluation metrics and understanding the performance of the model. The confusion matrix consists of four key terms detailing the relationship between true and predicted classes: True Positive (TP) represents cases where the model correctly predicts the positive class. That is, the actual value is positive (1), and the estimated value is positive (1). True Negative (TN) represents cases where the model correctly predicts the negative class. That is, the actual value is negative (0), and the estimated value is also negative (0). False Positives (FP) represent situations that the model predicts as positive but are negative. That is, the actual value is negative (0), but the estimated value is positive (1). False negatives (FN) represent situations that the model predicts as negative but are positive. That is, the actual value is positive (1), but the estimated value is negative (0).

Table 1. Model Parameters

Parameters	Module	Arguments
464	Convolution layer	[3, 16, 3, 2]
4672	Convolution layer	[16, 32, 3, 2]
7360	Fully Connected Layer	[32, 32, 1, True]
18560	Convolution layer	[32, 64, 3, 2]
49664	Fully Connected Layer	[64, 64, 2, True]
73984	Convolution layer	[64, 128, 3, 2]
197632	Fully Connected Layer	[128, 128, 2, True]
295424	Convolution layer	[128, 256, 3, 2]
460288	Fully Connected Layer	[256, 256, 1, True]
336645	Classification Layer	[256, 5]

Model performance is typically assessed using classification performance metrics, which include accuracy, precision, recall, and F1-score. Accuracy measures how often the classifier correctly predicts the outcome. Precision represents the proportion of correctly predicted positive samples out of all samples predicted as positive. Recall, also known as sensitivity, indicates the proportion of true positive samples that are correctly identified by the classifier. The F1-score is a harmonic mean of precision and recall, providing a single score that balances both metrics, giving an overall measure of a model's performance in classification tasks.

$$Accuracy = \frac{TP+TN}{TP+TN+FP+FN} \quad (1)$$

$$Precision = \frac{TP}{TP+FP} \quad (2)$$

$$Recall = \frac{TP}{TP+FN} \quad (3)$$

$$F1 - Score = \frac{2 \times Rec \times Prec}{Rec+Prec} \quad (4)$$

Performance evaluation was made using these metrics specified in our study. The performance results obtained are given in the table below.

Table 2. Performance Results

Class	Precision	Recall	F1 Score	
Mild	0.63	0.44	0.52	CPU 1
Moderate	0.72	0.86	0.78	
No_DR	0.96	0.98	0.97	
Proliferate_DR	0.70	0.58	0.63	
Severe	0.50	0.23	0.32	
Accuracy		0.83		
Mild	0.62	0.45	0.52	CPU 2
Moderate	0.72	0.86	0.78	
No_DR	0.96	0.98	0.97	
Proliferate_DR	0.75	0.57	0.65	
Severe	0.48	0.22	0.30	
Accuracy		0.83		
Mild	0.61	0.53	0.56	GPU 1
Moderate	0.76	0.87	0.81	
No_DR	0.96	0.98	0.97	
Proliferate_DR	0.71	0.56	0.63	
Severe	0.60	0.32	0.41	
Accuracy		0.8491		
Mild	0.62	0.63	0.62	GPU 2
Moderate	0.76	0.83	0.79	
No_DR	0.96	0.98	0.97	
Proliferate_DR	0.70	0.52	0.60	
Severe	0.51	0.32	0.39	
Accuracy		0.8436		

The confusion matrix used to show the classification performance of the best model is given in Figure 4 below. The least errors were encountered especially in the No_DR and Moderate classes. The most errors belong to the Severe class. Mild class is confused with Moderate class.

Yolov8 - GPU(1)						
TARGET \ OUTPUT	mild	Moderate	No_DR	Proliferate_DR	Severe	SUM
mild	53 4.82%	21 1.91%	8 0.73%	4 0.36%	0 0.00%	86 61.63% 38.37%
Moderate	30 2.73%	264 24.00%	1 0.09%	23 2.09%	28 2.55%	346 76.30% 23.70%
No_DR	14 1.27%	7 0.64%	556 50.55%	1 0.09%	0 0.00%	578 96.19% 3.81%
Proliferate_DR	2 0.18%	5 0.45%	0 0.00%	43 3.91%	10 0.91%	60 71.67% 28.33%
Severe	1 0.09%	6 0.55%	0 0.00%	5 0.45%	18 1.64%	30 60.00% 40.00%
SUM	100 53.00% 47.00%	303 87.13% 12.87%	565 98.41% 1.59%	76 56.58% 43.42%	56 32.14% 67.86%	934 / 1100 84.91% 15.09%

Figure 4. Confusion Matrices

To evaluate whether the training process has been successful or not, training and validation loss graphs are shown in Figure 11. The loss graph shows the learning ability of the model during the training process. The decrease in training loss over time indicates that the model has learned the data better and its generalization ability has increased. The decreasing loss trend observed during deep learning model training indicates that the model's performance improves over time and becomes a more reliable predictor. This trend reflects the increasing ability of the model to learn from data and its ability to predict desired outcomes more accurately. Therefore, considering the decreasing loss trend during deep learning model training provides an important indicator to evaluate and improve the performance of the model.

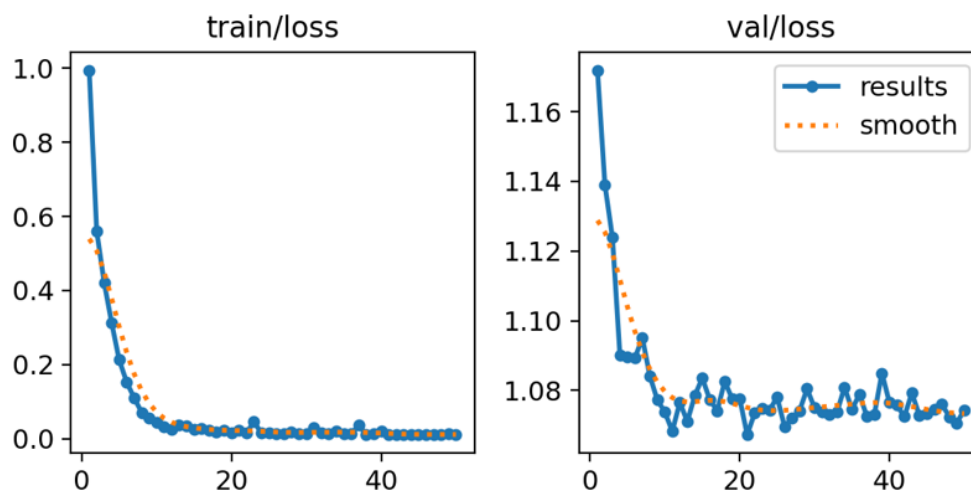


Figure 5. Train and Validation Graphic

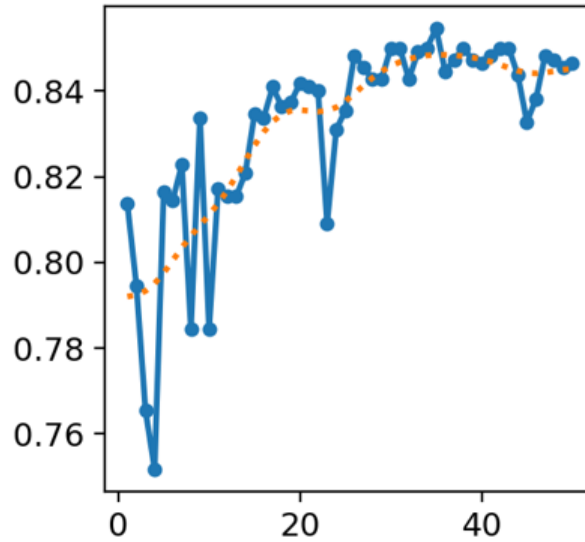


Figure 6. Accuracy Graphic

To evaluate the classification accuracy of the best model, the accuracy graph is presented in Figure 6. The Accuracy chart shows the percentage of correct predictions the model has. A high level of accuracy values throughout the training process indicates that the model has learned successfully and can generalize to new data.

DISCUSSION

In this study, no pre-processing, data augmentation, or data inequality removal process was applied to the data set before training. Training time was performed on CPU (12th Gen Intel Core (TM) i5-12400F) with 35 minutes and 50 epochs. The model was trained using a total of 3600 images. The F1 Score of the No_DR class exceeded 97%. For example, in the study of Özçelik and Altan (Özçelik and Altan, 2021), it was observed that the F1 Score remained around 88% in some models. At the same time, the accuracy of the model is 93%. This value is between 86% and 93% in the study of Ağca and Takci (Kemal and Takci, 2022) study. Compared to other studies, promising results were obtained regarding the diagnosis and classification of Yolov8 Diabetic Retinopathy.

Table 3. Comparison of Studies

Study	Dataset Size	Preprocessing	Accuracy (%)
(Deperlioğlu and Köse, 2018)	400	Yes	97
(Çavli and Toğaçar, 2023)	2111	Yes	100
(Özçelik and Altan, 2021)	3662	Yes	97
(Kemal and Takci, 2022)	3662	No	93
(Dai et al., 2021)	466,247	Yes	97
(Dulkadir and Gültekin 2023)(Yolo)	18257	Yes	80
This Study	3600	No	84

CONCLUSION

In this study, a computer-aided system that allows early diagnosis and classification of diabetic retinopathy disease is proposed using a deep learning architecture. In the study, a fundus dataset consisting of retinal images was used for early diagnosis and treatment of DR disease by classifying it as "Mild, Moderate, No_DR, Proliferate_DR, Severe" and a model was created using YOLOv8, one of the CNN architectures. Accuracy values were measured as 83%, 83%, 84.91% and 84.36% respectively. Despite the dispersed data set and short training time, high accuracy in the images and especially a high F1-score in the No_DR class were achieved. It has been understood that YoloV8 can be used for classification problems. With a larger and more balanced data set, the overall values of the model can be increased. To improve the model's accuracy and other evaluation metrics, the model can be improved by making fine calculations of the model parameters.

REFERENCES

- Ansari, P., Tabasumma, N., Snigdha, N. N., Siam, N. H., Panduru, R. V., Azam, S., Hannan, J., & Abdel-Wahab, Y. H. (2022). Diabetic retinopathy: an overview on mechanisms, pathophysiology, and pharmacotherapy. *Diabetology*, 3(1), 159-175.
- Arslan Tuncer, Seda & Çınar, Ahmet & Fırat, Murat. (2021). Hybrid CNN Based Computer-Aided Diagnosis System for Choroidal Neovascularization, Diabetic Macular Edema, Drusen Disease Detection from OCT Images. *Traitement du Signal*. 38. 673-679. 10.18280/ts.380314.
- Association, A. D. (2022). Standards of medical care in diabetes—2022 abridged for primary care providers. *Clinical Diabetes*, 40(1), 10-38.
- Çavli, A., & Toğaçar, M. (2023). Yapay Zekâ Yaklaşımlarını Kullanarak Retinopati Hastalığının Tespiti. *Mühendislik Bilimleri ve Araştırmaları Dergisi*, 5(1), 88-97.
- Dai, L., Wu, L., Li, H., Cai, C., Wu, Q., Kong, H., Liu, R., Wang, X., Hou, X., & Liu, Y. (2021). A deep learning system for detecting diabetic retinopathy across the disease spectrum. *Nature communications*, 12(1), 3242.
- Deperlioğlu, Ö., & Köse, U. (2018). Diagnosis of diabetic retinopathy by using image processing and convolutional neural network. 2018 2nd International Symposium on Multidisciplinary Studies and Innovative Technologies (ISMSIT),
- Dugas, E., Jared, J., & Cukierski, W(2015). Diabetic retinopathy detection. URL <https://kaggle.com/competitions/diabetic-retinopathy-detection>, 7.
- Dulkadir, S., & Gültekin, G. K. (2023). Tarımsal Otomasyon Sistemleri için Muz Olgunluk Seviyelerinin Derin Öğrenme Yöntemleri İle Sınıflandırılması. *EMO Bilimsel Dergi*, 13(3), 27-34.
- Lingling Fang, Huan Qiao(2022),Diabetic retinopathy classification using a novel DAG network based on multi-feature of fundus images,Biomedical Signal Processing and Control,Volume 77, 2022, 103810, ISSN 1746-8094, <https://doi.org/10.1016/j.bspc.2022.103810>.
- Fong, D. S., Aiello, L., Gardner, T. W., King, G. L., Blankenship, G., Cavallerano, J. D., Ferris III, F. L., Klein, R., & Association, A. D. (2003). Diabetic retinopathy. *Diabetes care*, 26(suppl_1), s99-s102.
- Kemal, A., & Takci, H. (2022). Hibrit Bir Model Oluşturarak Diyabetik Retinopati Sınıflandırılması. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*(36), 227-236.
- King, R. Retrieved 01.01.2024 from <https://github.com/open-mmlab/mmyolo>
- Özçelik, Y. B., & Altan, A. (2021). Diyabetik retinopati teşhisi için fundus görüntülerinin derin öğrenme tabanlı sınıflandırılması. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*(29), 156-167.
- Özçelik YB, 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. <https://doi.org/10.3390/fractalfract7080598>
- Ultralytics. *Ultralytics Documentation*. Retrieved 01.02.2024 from <https://docs.ultralytics.com/>
- Vujosevic, S., Aldington, S. J., Silva, P., Hernández, C., Scanlon, P., Peto, T., & Simó, R. (2020). Screening for diabetic retinopathy: new perspectives and challenges. *The Lancet Diabetes & Endocrinology*, 8(4), 337-347.
- V. Vipparthi, D. R. Rao, S. Mullu and V. Patlolla(2022). "Diabetic Retinopathy Classification using Deep Learning Techniques," *3rd International Conference on Electronics and Sustainable Communication Systems (ICESC)*, Coimbatore, India, 2022, pp. 840-846, doi: 10.1109/ICESC54411.2022.9885687.
- Wong, T. Y., Sun, J., Kawasaki, R., Ruamviboonsuk, P., Gupta, N., Lansingh, V. C., Maia, M., Mathenge, W., Moreker, S., & Muqit, M. M. (2018). Guidelines on diabetic eye care: the international council of ophthalmology recommendations for screening, follow-up, referral, and treatment based on resource settings. *Ophthalmology*, 125(10), 1608-1622.
- Yau, J. W., Rogers, S. L., Kawasaki, R., Lamoureux, E. L., Kowalski, J. W., Bek, T., Chen, S.-J., Dekker, J. M., Fletcher, A., & Grauslund, J. (2012). Global prevalence and major risk factors of diabetic retinopathy. *Diabetes care*, 35(3), 556-564.



Kahramanmaraş Sütçü İmam University

Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 26.03.2024
Kabul Tarihi : 06.05.2024

Received Date : 26.03.2024
Accepted Date : 06.05.2024

DIAGNOSIS OF PROSTATE CANCER WITH ENHANCED EFFICIENCY USING FINE-TUNED CNN AND TRANSFER LEARNING

İNCE-AYAR İLE ETKİNLİĞİ ARTIRILMIŞ ESA VE TRANSFER ÖĞRENME YÖNTEMLERİYLE PROSTAT KANSERİNİN TESPİTİ

Murat SARIATEŞ¹ (ORCID: 0009-0003-4351-9566)
Erdal ÖZBAY^{1*} (ORCID: 0000-0002-9004-4802)

¹ Fırat Üniversitesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Elazığ, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Erdal ÖZBAY, erdalozbay@firat.edu.tr

ABSTRACT

Cancer is one of the high-risk diseases for humans. Prostate cases are the second most common disease in men after lung cancer, and early diagnosis is vital. Artificial intelligence technologies have begun to be used in the diagnosis of prostate cancer, and more effective and sensitive results have been obtained, preventing potential errors in human-centered methods. In this study, in order to increase the classification performance in the diagnosis of prostate cancer, transfer learning methods and fine-tuning processes, which have higher success and learning ability with less training data, unlike machine learning methods, were applied. The two-class data set consisting of prostate cancer MR images, 'significant' and 'not-significant', was classified with Alexnet, Densenet201, Googlenet, and Vgg16 models with the feature extraction approach, and 71.40%, 72.05%, 65%, and 80.13% accuracy results were obtained respectively. To increase these rates, pre-trained transfer learning models were used and accuracy results of 89.74%, 94.32%, 85.59%, and 91.05% were achieved, respectively. A 98.10% validation result was obtained using the cross-validation method in the Densenet201 model. DenseNet201 model achieved the highest accuracy result of 98.63% in transfer learning with the combination of the RMSProp optimization method. The proposed transfer learning model provided an improvement of approximately 26% compared to the feature extraction method.

Keywords: Prostate cancer, CNN, deep learning, classification, transfer learning

ÖZET

Kanser insanlar için yüksek riskli hastalıkların başındadır. Prostat vakaları, akciğer kanserinden sonra erkeklerde ikinci sırada yer almakta ve erken teşhisi hayati önem taşımaktadır. Prostat kanserinin teşhisinde yapay zeka teknolojilerinden faydalanılmaya başlanmış, daha etkili ve hassas sonuçlar elde edilerek insan odaklı yöntemlerdeki potansiyel hatalarının önüne geçilmiştir. Bu çalışmada prostat kanserinin teşhisinde sınıflandırma performansını arttırabilmek adına makine öğrenmesi yöntemlerinden farklı olarak daha az eğitim verisi ile daha yüksek başarı ve öğrenme kabiliyetine sahip transfer öğrenme yöntemi ve ince-ayar işlemleri uygulanmıştır. Prostat kanseri MR görüntülerinden oluşan 'significant' ve 'not-significant' olmak üzere iki sınıflı veri setine, özellik çıkarımı yaklaşımıyla Alexnet, Densenet201, Googlenet ve Vgg16 modelleriyle sınıflandırılarak sırasıyla %71,40, %72,05, %65,72 ve %80,13 doğruluk sonuçları elde edilmiştir. Bu oranları arttırabilmek adına ön-egitimli transfer öğrenme modelleri kullanılmış ve sırasıyla %89,74, %94,32, %85,59 ve %91,05 doğruluk sonuçlarına ulaşılmıştır. Densenet201 modelinde çapraz-doğrulama yöntemi kullanılarak %98,10 doğrulama sonucu elde edilmiştir. DenseNet201 modeli transfer öğrenmede RMSProp optimizasyon yöntemi kombinasyonu ile %98,63 ile en yüksek doğruluk sonucuna ulaşmıştır. Önerilen transfer öğrenme modeli, özellik çıkarımı yöntemine kıyasla yaklaşık %26 oranında bir iyileştirme sağlamıştır.

Anahtar Kelimeler: Prostat kanseri, ESA, derin öğrenme, sınıflandırma, transfer öğrenme

ToCite: SARIATEŞ, M., & ÖZBAY, E., (2024). DIAGNOSIS OF PROSTATE CANCER WITH ENHANCED EFFICIENCY USING FINE-TUNED CNN AND TRANSFER LEARNING. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 27(4), 1306-1319.

INTRODUCTION

Worldwide and in our country, cancer is the second leading cause of death after cardiovascular diseases with a prevalence of 22%. Although the incidence of cancer varies by gender, it tends to be 25% more common in men than in women (Dorak and Karpuzoglu, 2012).

Prostate cancer is also particularly common in men and occurs as a result of abnormal growth and proliferation of cells in the prostate gland. While normal prostate cells grow and divide as much as the body needs, cancerous cells lose this control and begin to multiply rapidly and abnormally. In this way, prostate cancer can spread to other organs or lymph nodes outside the pelvic region and as a result of this metastasis, it causes an increase in Prostate Specific Antigen (PSA) levels in the blood (Carlsson et al., 2014).

PSA tests contribute to the early diagnosis of prostate cancer but can only be elevated in many benign conditions such as Benign Prostatic Hyperplasia. Rectal examination can detect tumors above 0.2 ml but has low sensitivity. In recent years, Multiparametric Prostate Magnetic Resonance Imaging (MpMRI) techniques have become more important in the diagnosis and treatment of prostate cancer (Bjurlin et al., 2020). In addition to imaging techniques, treatment options include surgical intervention, radiation therapy, hormone therapy, chemotherapy, and immunotherapy. The choice of treatment usually depends on the stage of the cancer, the general health status of the patient, and other factors.

When prostate cancer is diagnosed at an early age, the survival rate after treatment increases significantly, but during the prolonged survival period, patients may also face various psychosocial problems such as stress, anxiety, depression, and social isolation due to the side effects of cancer treatment. In addition, physiological problems such as weight loss, fatigue, anorexia, and sleep problems may trigger psychosocial problems (Himmerich et al., 2021). Therefore, early detection of prostate cancer prolongs the patient's life expectancy and reduces the risk of possible complications by increasing treatment success.

This study is planned to effectively detect prostate cancer with CNN and transfer learning methods, which have increased efficiency with fine-tuning. In the intermediate stages of the study, statistical data such as sensitivity, AUC, F1-score, and ROC curves will be included to understand the difference in classification accuracy rates from other studies and the necessary analyses will be made in the light of this information.

To date, many classification processes have been performed using traditional machine learning techniques. Some commonly used algorithms in the field of machine learning are given below.

- Naive Bayes Classifier
- K-nearest neighbor algorithm
- Decision Trees
- Support Vector Machine
- Random Forest
- Linear Regression
- Logistic Regression
- K-means algorithm

Many studies have been conducted on prostate cancer prediction using KNN, SVM, LR, NB, and RF algorithms, and as a result of these studies, the accuracy results were found between 70% and 90%. The highest accuracy of 90% was obtained from RF and LR algorithms (Srivenkatesh, 2020).

When the necessary literature review is made, it is observed that the success rate increases when deep learning methods are used instead of traditional machine learning techniques.

One way to use the existing model faster and more efficiently is to use transfer learning techniques. This allows for generalization, fine-tuning, learning speed, and efficiency (Weiss et al., 2016). The difference between traditional machine learning and transfer learning is shown graphically in Figure 1.

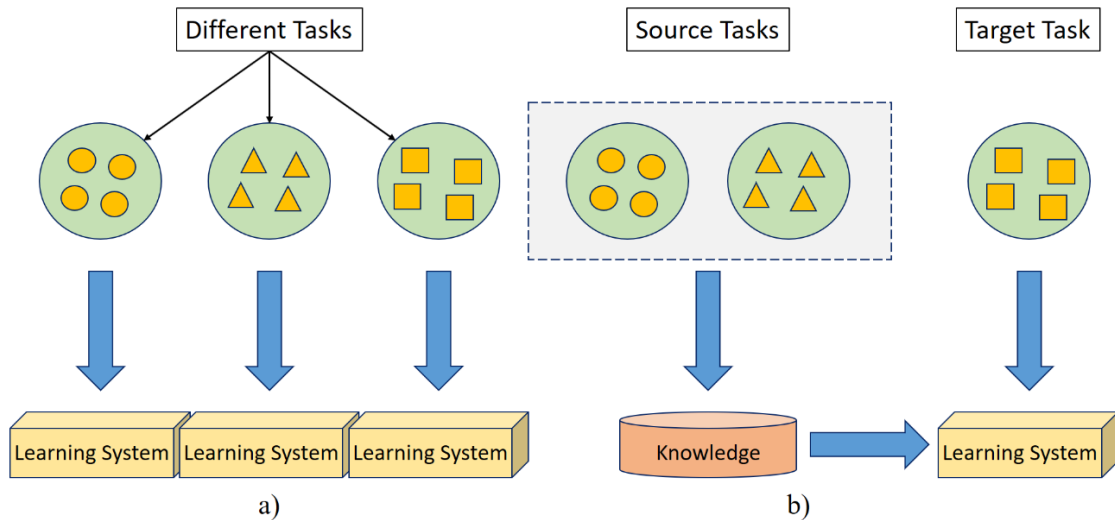


Figure 1. The Difference Between a) Traditional Machine Learning and b) Transfer Learning

When working with a non-large dataset, it has often made more sense to opt for a transfer learning approach to improve the performance of a deep learning model. Transfer learning is an approach that utilizes existing knowledge to improve the performance efficiency of limited learning data on the target task. This approach allows the knowledge already learned in the source task to be adapted to the training of the model in the target task, making it possible to achieve better results despite the limited amount of data. Therefore, the best trend of deep learning is to make the best use of the available knowledge by using transfer learning in limited data situations (Zhuang et al., 2020).

The approach realized in this study is aimed to diagnose prostate cancer faster from MR images and to allow more time to perform the necessary intervention. In addition, it is aimed to diagnose cancer at an early stage and to prevent the patient from being psychologically worn out by other methods applied during the diagnosis phase. The article's contributions to the literature can be summarized as follows:

- Classification performances obtained by hand-crafted feature extraction of pre-trained CNN architectures in prostate cancer diagnosis have been demonstrated.
- Transfer learning methods and fine-tuning processes have been applied with high classification success with insufficient or small training datasets.
- The DenseNet201 model achieved the highest accuracy result of 98.63% in transfer learning with the combination of the RMSProp optimization method using 5-fold CV.
- The proposed transfer learning method with fine-tuning efficiency, achieves much superior performance than hand-crafted feature extraction approach CNN models in prostate cancer diagnosis.

The study aims to contribute to other disease classification methods in the literature and to be useful for new studies. We focus on previous research to understand the context and significance of the current study, summarize previous work on our topic, and provide a better understanding of what gaps the current research fills, what questions it answers, and what aspects it contributes to.

A review of the literature reveals that disease detection and similar studies have generally been conducted using traditional machine learning methods, while transfer learning models have been popularly used in these classification and detection methods, especially in the last five years.

Swati et al. studied brain tumor classification for MRI images using transfer learning and fine-tuning. In this study, a pre-trained deep CNN model was used and a block-wise fine-tuning strategy based on transfer learning was proposed. An average accuracy of 94.82% was obtained (Swati et al., 2019).

Aslan et al. studied deep learning-based automatic brain tumor classification and obtained an accuracy of 96.44% in the classifier by using the MobilNetV2 deep learning model and k-nearest run (k-EYK) algorithm (Aslan, 2022).

Kılıçarslan et al. used transfer learning methods for disease detection in tomato leaves and the highest result of 99% was obtained with DenseNet architecture in studies conducted with DenseNet, ResNet50, and MobileNet architectures (Kılıçarslan and Pacal, 2023).

All these studies show that transfer learning methods can be used effectively in areas such as disease detection and classification. The current study was prepared by reviewing the necessary literature and examining similar studies.

MATERIAL AND METHOD

In this study, an automatic diagnosing system was designed with pre-trained CNN architectures and fine-tuning transfer learning methods to effectively detect prostate cancer. The flow diagram of the proposed method is illustrated in Figure 2.

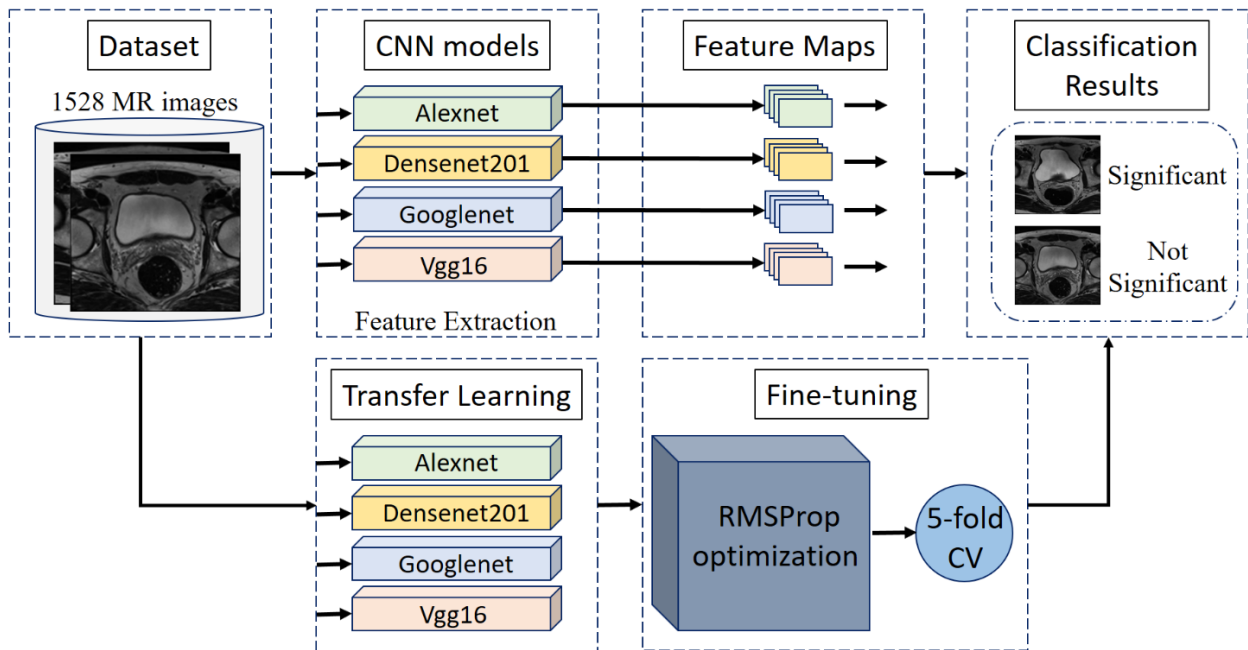


Figure 2. The Flow Diagram of the Proposed Methodology

Dataset

In this study, prostate cancer classification processes were performed using transfer learning with increased efficiency CNN, which has become increasingly popular in the literature. The dataset used to obtain the experimental results in this study is MRI images of prostate cancer taken from the Kaggle website (Geert et al., 2017). Dataset is divided into two classes as ‘significant’ and ‘not significant’. This dataset consists of 764 ‘significant’ images, i.e. clinically significant, and 764 ‘not significant’ images, i.e. clinically insignificant, totaling 1528 MR images. The image data, which was initially received as 8 bits, was set to 24 bits and used for classification. A sample of two different classes of the dataset is shown in Figure 3.

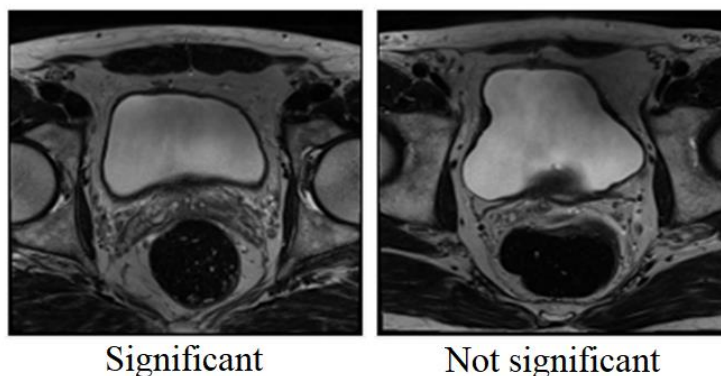


Figure 3. Sample MRI Images of the Prostate Dataset

Convolutional Neural Networks (CNN)

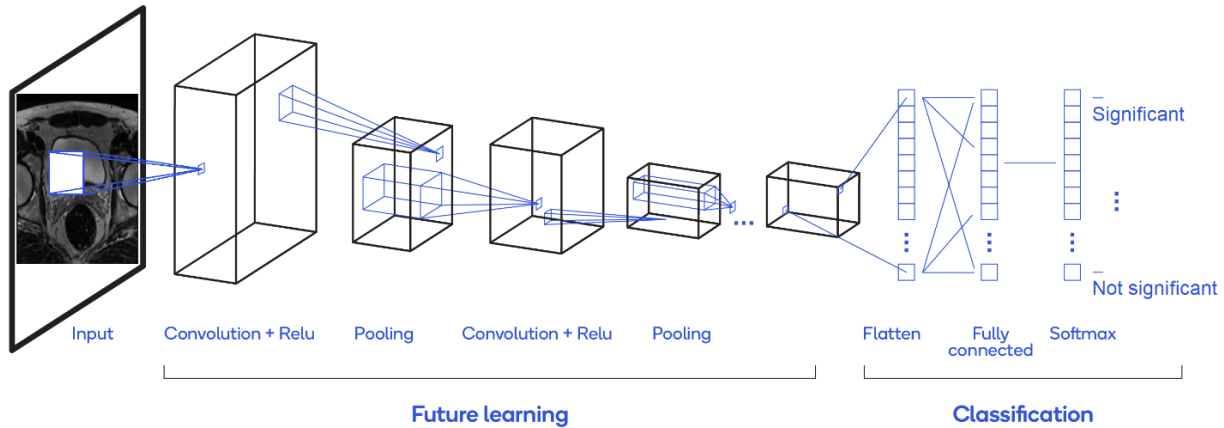


Figure 4. CNN Architecture and Layers

Convolutional Neural Networks (CNNs) are deep learning architectures based on artificial neural networks. CNN architectures contain more layers and neural cells than neural networks and therefore require a higher computational cost to train. However, CNNs have proven classification success. A common method is to transfer weights from the layers of a CNN trained with a large and comprehensive training dataset. This is the process of transferring the learned features of a pre-trained CNN model for a specific task to another task (Fırlıdak and Talu, 2019). The classical CNN architecture and layers are shown in Figure 4.

The basic layer types used in CNN are as follows (Zainudin et al., 2020):

- Convolutional Layer: It is the layer that learns the features in different parts of the image by shifting a window (filter or kernel) of a certain size on the image.
- ReLU Layer (Rectified Linear Unit Layer): This layer uses the ReLU function as the activation function. This layer helps CNN to learn non-linear features.
- Pooling Layer: it is used to reduce the size of the feature maps produced by convolutional layers.
- Fully Connected Layer: Used to convert the output of the CNN into an output for classification or regression. They are usually the last layers and enable the network to learn.
- Dropout Layer: The dropout layer is used to prevent overfitting of the network.
- Normalization Layers: used to increase the stability of the network and speed up the training process.

Classification with CNN

Image classification is a machine learning and artificial intelligence technique used to identify and assign the content of a digital image to a specific category or class. This is accomplished using a computer algorithm that automatically analyzes and recognizes the content of an image.

Table 1. The Parameters of the CNN Models

Parameters	Values
Batch size	10
Max epoch	6
Learning rate	0.0001
Validation frequency	3
Optimization	SGDM

In this study, to better understand the performance of the trained model developed with transfer learning, classification was first applied to the existing dataset. Of the two-class data set, 70% is allocated for training and 30% for testing. In the architecture, the fully connected layer is set appropriately and the classification layer is redesigned according to the input data. To train a network using SGDM (Stochastic Gradient Descent with Momentum), the size of the minibatch to be used for each training iteration is set to ‘minibatchsize=10’, the maximum number of epochs to be used for training is set to ‘maxepochs=6’, the initial learning rate used for training is set to ‘initiallearnrate=0.0001’, the neural network validation frequency in terms of the number of

iterations is set to 'validationfrequency=3'. The parameters of the CNN model are given in Table 1. These settings were the same for Alexnet, Densenet201, Googlenet, and Vgg16 architectures and the classifications were made. The dataset of prostate cancer MRI images was classified by making the necessary adjustments in Alexnet, Densenet201, Googlenet, and Vgg16 architectures by feature extraction method.

Transfer Learning and Fine-tuning

Transfer learning, as a machine learning concept, generally involves using knowledge gained in one task as the starting point of a model in another task. For example, if an image recognition model has been trained on the AlexNet dataset and has gained general object recognition capabilities, its feature extraction layers or pre-trained weights can be used as a starting point for a different task. This can lead to better results using less training data for the new task.

Transfer learning has been very useful when the dataset size is small, when there is not enough training data for the new task, or when it is necessary to use pre-trained models for a specific task. Moreover, transfer learning can improve the generalization ability and help the model perform better on real-world data.

In this study, Alexnet, Densenet201, Googlenet, and Vgg16 architectures were used for transfer learning. In these models, the dataset is split for training and validation, with 70% of the data used for training and 30% for validation. For example, the last three layers of the AlexNet model were removed and replaced with a new fully connected layer, a softmax layer, and a classification layer. This customized the model for the classification of prostate images.

Data augmentation was performed by augmenting the images in a predetermined way with techniques such as random rotation, panning, and mirroring. This helps the model learn more general features and reduces overfitting.

Training options were identified. These options determine which optimization algorithm is used during training, the learning rate, how often the validation data is evaluated, and how many epochs the training continues.

Optimization algorithms try to improve the training process of the model by managing the learning process (Özbay 2023). The correct choice of these algorithms can affect the speed and stability of the training process and the quality of the results. The correct choice of the learning coefficient is critical for training the model quickly and at the same time achieving the minimum point. A small learning coefficient can slow down the solution process and increase the training time. A large learning coefficient can lead to skipping the minimum point and excessive fluctuations (Seyyarer et al., 2020).

In this study, SGDM (Stochastic Gradient Descent Moment) was initially used as the most suitable optimization algorithm. However, it was later observed that higher accuracy rates were obtained when RMSProp (Root Mean Square Propagation) was selected as the optimization algorithm. RMSProp (Root Mean Square Propagation) is a gradient-based optimization algorithm widely used in deep learning and optimization algorithms. RMSProp can be considered an extension of the widely used Stochastic Gradient Descent (SGD) algorithm. The main goal of RMSProp is to correct the tendency of SGD to behave slowly at low dimensional learning rates and unstable at large dimensional learning rates. This is done by calculating the exponential moving average of the gradient squares. This method normalizes the magnitude of the gradients by adding a scaling term in which the gradients are divided by the average of their previous squares. Research has also shown that the optimal value for the initial learning rate is 0.0001. With necessary fine-tuning, the size of the minibatch was set to 'minibatchsize=10', the maximum number of epochs to be used for training was set to 'maxepochs=6', and the neural network validation frequency in terms of the number of iterations was set to 'validationfrequency=3'. The parameters of the Transfer learning models are given in Table 2.

Table 2. The Parameters of the Transfer Learning Models

Parameters	Values
Batch size	10
Max epoch	6
Learning rate	0.0001
Validation frequency	3
Optimization	RMSProp

Cross-Validation

An important method for reliably evaluating classification models built with transfer learning is the k-fold cross-validation method. Cross-validation is a method used to evaluate the performance of machine learning models. This method is used to verify the generalization ability of the model and helps to prevent overfitting.

Overfitting is when a machine learning model fits the training data too well and overly specializes in the training data (Montesinos et al., 2022). This reduces the generalization ability of the model and can lead to poor performance on new, unseen data. Figure 5 shows how the classification decision boundary follows the training data too closely for an overfitting model and not closely enough for an underfitting model.

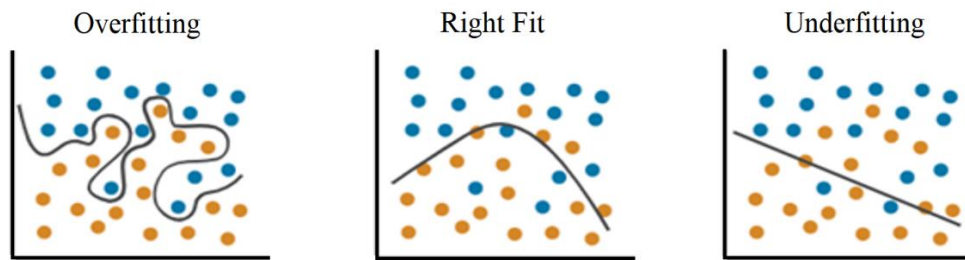


Figure 5. Overfitted Models of Classification

Training a model on a single dataset and evaluating its performance on the same dataset may not provide a reliable estimate of its generalization ability. k-fold cross-validation overcomes this challenge by splitting the dataset into k-folds and ensuring that each fold maintains the same class distribution as the original dataset. This technique allows for a more robust evaluation of models by training and testing models on multiple subsets of data (Mahesh et al., 2023).

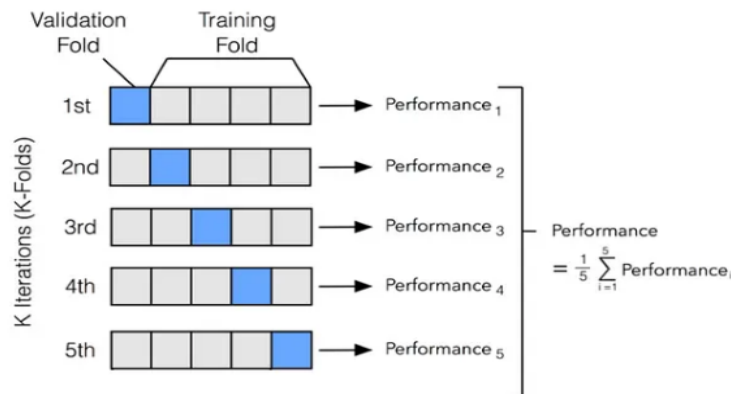


Figure 6. K-fold Cross-Validation [16]

In this study, the k-fold value was set to 5. It is an important point which part of the existing data set is taken as training data and which part is taken as test data. For this reason, in order not to cause any error and to reach the real accuracy value, a 5-step test, and training data were determined for the dataset on the trained models. In this way, the overfitting problem of the model was tried to be solved (Anguita et al., 2012). The k-fold cross-validation working methodology is shown in Figure 6.

EXPERIMENTAL RESULTS AND DISCUSSION

In this study, the classification algorithms described in section 2 were applied to the dataset described in section 3 for the detection of prostate cancer. Before looking at the outputs of the results obtained in transfer learning, the results obtained with the image classification method with Alexnet, Densenet201, Googlenet, and Vgg16 architectures are evaluated.

Performance Metrics

Initially, image classification was performed for Alexnet, Densenet201, Googlenet, and Vgg16 architectures, and then with a transfer learning model. Experiments were conducted to see the effect of the selected parameters and the trained model on the classification accuracy and the results are reported. To compare the results and make

better choices, accuracy metrics are used as model evaluation metrics. Accuracy is a proportional measure of the agreement between the predicted class and the true class. For example, accuracy is presented as the ratio of the number of cases predicted by the model to be at 'significant' risk for prostate cancer to the proportion of all cases that are actually at risk and the proportion of cases predicted by the model to be at no risk that is actually at no risk. Classification accuracy is derived from the metrics specified in the complexity matrix shown in Table 3.

Table 3. Two-class Confusion Matrix

		Predicted Class	
		Risk exist	No risk
True class	Risk exist	TP (True Positive)	FN (False Negative)
	No risk	FP (False Positive)	TN (True Negative)

Complexity matrix terms and their meanings are listed below:

- True Positive (TP): Represents the amount of data that belongs to the positive class and is correctly classified by the classifier.
- True Negative (TN): Represents the amount of data belonging to the negative class that was correctly classified by the classifier.
- False Positive (FP): An expression that actually belongs to the negative class is misclassified as a positive class.
- False Negative (FN): This is the misclassification of a statement as a negative class when it actually belongs to the positive class.

The metrics determined using the complexity matrix to determine the classification performance are listed below with their explanations (Özbay & Özbay, 2021):

Accuracy: It is used to evaluate the success of the proposed model. An accuracy value is calculated by dividing the set of correct predictions in the model by the entire dataset. It is calculated using performance evaluation metrics as given in Equation 1.

$$Accuracy = \frac{(TP + TN)}{(TP + TN + FP + FN)} \quad (1)$$

Precision: Especially important when the cost of false positive predictions is high. For example, if the model marks as spam (FP) an email that should arrive in your inbox, you will not see the important email you should receive and you will be at a loss. Precision is an important criterion when choosing a model. It is calculated as given in Equation 2.

$$Precision = \frac{TP}{(TP + FP)} \quad (2)$$

Recall: A useful metric also when the cost of predicting false negatives is high. It should be as high as possible. It is calculated as shown in Equation 3.

$$Recall = \frac{TP}{(TP + FN)} \quad (3)$$

F-score: This value is the harmonic mean of the sensitivity and precision (recall) values. It is calculated as given in Equation 4.

$$F1\ score = 2 * \frac{(precision * recall)}{(precision + recall)} \quad (4)$$

ROC curve (Receiver Operating Characteristic curve): a graphical tool used to evaluate the performance of a model in classification problems. In particular, it is used to visualize the sensitivity and specificity of the model. The ROC curve shows the relationship between sensitivity and specificity at different cut-off points (thresholds). The X-axis shows the sensitivity, defined as the false positive rate (FPR) and the Y-axis shows the true positive rate (TPR).

AUC (Area Under the ROC Curve): Refers to the area under the ROC curve. This value is a measure of the performance of classifiers. The AUC value can be between 0 and 1. If the AUC value of a model is close to 0.5, it can be said that it is as if it is performing random classification. However, as the AUC value approaches 1, the performance of the model improves.

Performance Evaluation

When calculating the classification accuracy, it is important to determine its effectiveness with the tests performed. In this respect, while determining the accuracy, the performance of the model is also examined. The complexity matrix was used to determine this performance. Then, using this matrix, accuracy, precision, sensitivity, and F-score metrics are calculated. The classification process was performed by making the necessary adjustments in Alexnet, Densenet201, Googlenet, and Vgg16 architectures with the feature extraction method, and the validation results were obtained as 71.57%, 72.05%, 65.72%, and 80.13% respectively. Confusion matrices of experimental results are given in Figure 7. The highest accuracy rate was obtained from the Vgg16 architecture with 80.13%.

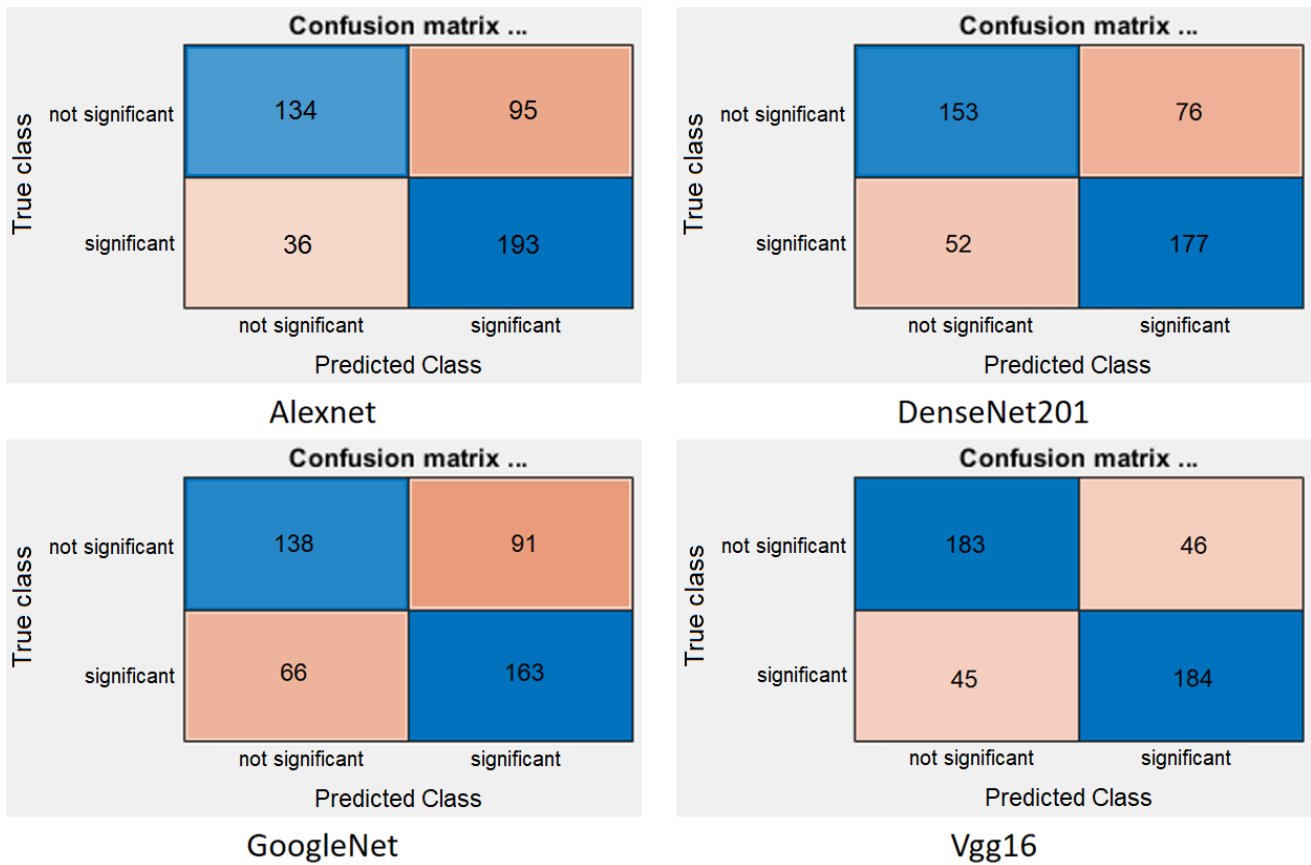


Figure 7. Confusion Matrices of the Pre-trained Models

The table of performance metrics calculated for Alexnet, Densenet201, Googlenet, and Vgg16 architectures is given in Table 4.

Models	Accuracy	Precision	Recall	F1-score
AlexNet	71.40%	58.52%	78.82%	67.17%
DenseNet201	72.05%	66.81%	74.63%	70.51%
GoogleNet	65.72%	60.26%	67.65%	63.74%
Vgg16	80.13%	79.91%	80.26%	80.09%

When the performance metrics mentioned above are analyzed in Table 4, it is seen that the highest classification accuracy is obtained with the Vgg16 architecture. To increase these validation results, transfer learning methods were applied and classification processes were performed again on the same architectures with the trained models. The models were trained with the transfer learning method and then the accuracy results were obtained for Alexnet, Densenet201, Googlenet, and Vgg16 architectures given in Table 5.

Table 5. Accuracy Results of the Transfer Learning Methods

Models	AlexNet	DenseNet201	GoogleNet	Vgg16
Accuracy	89.74%	94.32%	85.59%	91.05%

Initially, 70% of training data and 30% of test data are taken, so it is not clear exactly which part of the dataset is training data and which part is test data. For this reason, a machine learning model can adapt too much to the training data and become overly specialized to the training data. In order to avoid this situation and to get more accurate results, the k-fold cross-validation method was used. With this method, the data set for transfer learning models is divided into 5 parts, and each part is used as test and training data respectively. The performance metrics were obtained for Alexnet, Densenet201, Googlenet, and Vgg16 architectures given in Table 6 with this method.

Table 6. Performance Results of Transfer Learning Models with K-fold Cross-Validation

Models	Accuracy	Precision	Recall	F1-score
AlexNet	88.22%	85.87%	91.49%	88.59%
DenseNet201	98.10%	99.60%	96.60%	98.07%
GoogleNet	84.23%	84.73%	83.51%	84.11%
Vgg16	98.30%	98.30%	98.30%	98.30%

As seen in Table 6, the highest accuracy rate was obtained with Vgg16 at 98.30%. Accordingly, the ROC curve of the result obtained with Vgg16 is given in Figure 8.

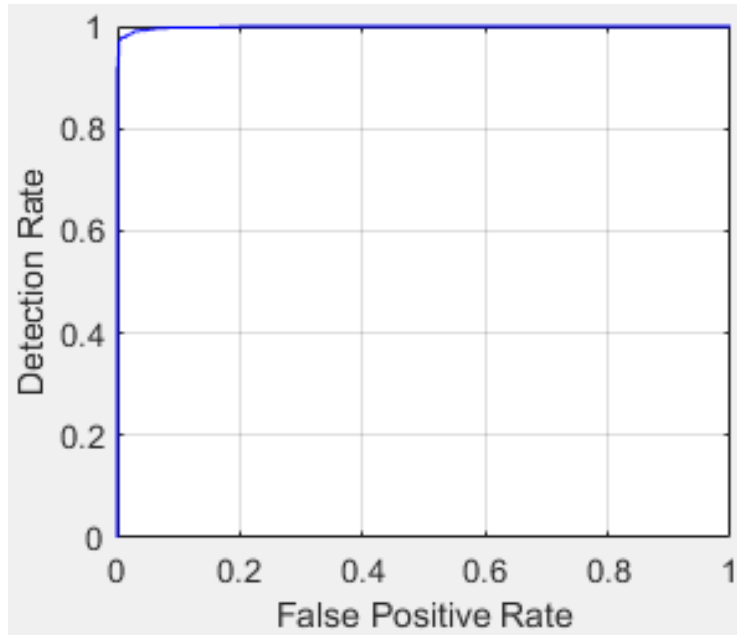


Figure 8. ROC Curve of Vgg16 Using Transfer Learning with K-fold Cross-Validation

The shape of the ROC plot provides important clues for interpreting the performance of the model. For an ideal model, the ROC curve passes through the upper left corner, meaning that the true positive rate is high and the false positive rate is low. The closer the ROC curve is to this ideal, the better the performance of the model.

Accordingly, the SGDM used as the optimization algorithm was modified and the RMSProp optimization algorithm was tested by making appropriate adjustments for the DenseNet201 and Vgg16 architectures with the two highest accuracy rates. In the examinations, higher accuracy results were obtained with the selected optimization algorithm. The transfer learning performance of the DenseNet201 model was obtained using the RMSProp optimization algorithm. Figure 9 shows the confusion matrix and ROC curve of DenseNet201’s transfer learning performance with RMSProp.

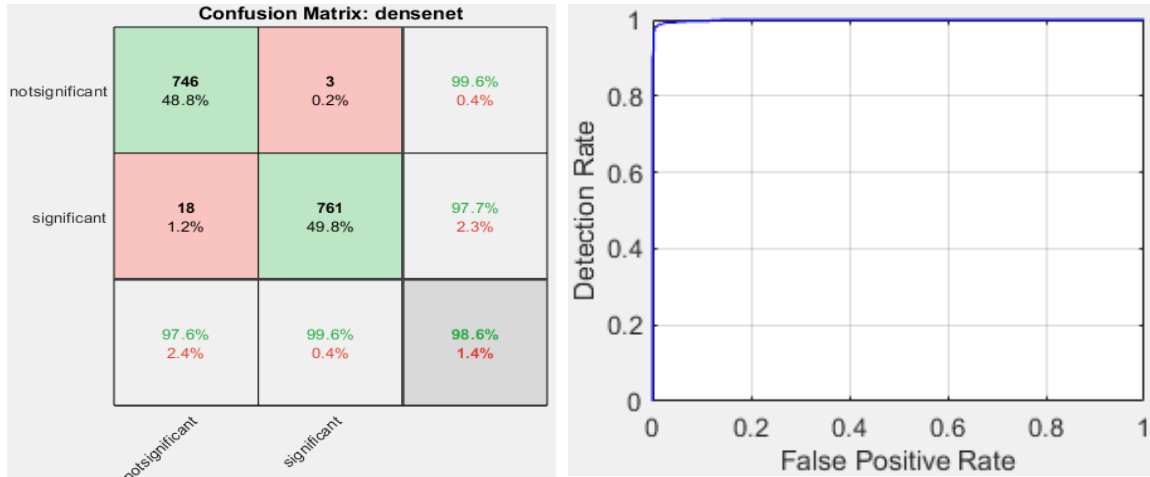


Figure 9. Confusion Matrix and ROC Curve of Densenet201 Using RMSProp Optimization

When the results given in Figure 9 were analyzed, it was seen that the highest accuracy rate of 98.63% was achieved with DenseNet201. When these results are evaluated in terms of performance metrics, the DenseNet201 model achieved the results in Table 7 by using the RMSProp optimization method in transfer learning.

Table 7. Performance Results of Densenet201 Optimized with RMSProp

Model	Accuracy	Precision	Recall	F1-score
DenseNet201	98.63%	99.60%	97.64%	98.61%

According to the evaluation results given in Table 7, the DenseNet201 model used the RMSProp optimization method in transfer learning achieved the result with the highest accuracy, precision, recall, and F1-score of 98.63%, 99.60%, 97.64%, and 98.61%, respectively. In this regard, an improvement of approximately 26% was achieved in the classification accuracy rate achieved with the proposed transfer learning model compared to the classification accuracy rate obtained with the feature extraction method.

The use of transfer learning and deep learning models in prostate cancer classification has an important place in the current literature. When the necessary research was done, it was seen that transfer learning methods were used in prostate cancer detection. However, when the contributions of this study are examined; In terms of optimization strategies, using optimization algorithms such as RMSProp as well as SGD and comparing the performance of these algorithms have been positive to obtain accurate results. Dividing the data set with k-fold cross-validation enabled a more reliable evaluation of the model’s performance, and also helped the model to be more resistant to overfitting and increased its generalization ability. The high accuracy rates obtained especially when the RMSProp optimization algorithm was used with the Densenet201 architecture showed the effectiveness and potential of this method. A total of 1528 data sets used in the study, divided into two classes as ‘significant’ and ‘not significant’, were evaluated to be successful due to the high accuracy rate of the transfer learning method used, although their number was lower than the data sets of other studies. The 98.63% accuracy rate obtained in this study, especially when the Densenet201 architecture and RMSProp optimization algorithm were used, showed that the current study was successful compared to other studies. In addition, the proposed method is compared with other state-of-the-art studies in the literature in Table 8.

The proposed method was compared with similar approaches to classify prostate cancer diseases, some of which are described in the literature section. In the proposed method, the features of the input image can be learned with different pre-trained CNN architectures. The feature obtained by feature extraction methods was classified with both CNN and transfer learning algorithms. Additionally, the cross-validation and RMSProp optimization algorithm was used to optimize the CNN parameters on transfer learning, which increased model robustness and accelerated convergence. The methods of the existing studies from recent years used the same or similar data sets. In this respect, when compared to the recent state-of-the-art studies given in Table 8, it can be said that the proposed method has greater potential than existing approaches due to its ease of application compared to traditional methods, its ability to handle multi-class variance, and its high classification rate.

Table 8. Performance Results of the Proposed Method with Current State-of-the-Art Studies

Authors / Year	Method	Result
(Abdelmaksoud et al., 2021)	Improved VGGNet	91.20%
(Yuan et al., 2019)	MPTL	86.92%
(Zhong et al., 2019)	DTL-based model	89.00%
(Kanna et al., 2023)	DL-based models	84.99%
(Tsuneki et al., 2022)	EfficientNetB1	97.80%
(Abbasi et al., 2020)	GoogleNet, SVM, SIFT	99.71%
(Hoar et al., 2021)	Boost CNN	93.00%
(Chavda and Degadwala, 2024)	ResNet and VGG	89.00%
(Hamm et al., 2023)	XAI, PI-RADS	80.00%
(Proposed method, 2024)	Transfer Learning with RMSProp	98,63%

Training data for deep learning architectures must be abundant. Furthermore, labeled data is needed for supervised learning in the majority of deep learning approaches, such as CNN-based methods, which is challenging and time-consuming in the clinical setting. It is still unclear how to efficiently train deeper networks and make the most of the training set's small amount of data. The literature has two popular solutions that can address the aforementioned issue in part. The first is data augmentation, which creates new data from the existing data by using affine transformations including translation, rotation, and scaling. However, in this study, we present an approach that can produce effective results on restricted data. The other approach is transfer learning, which has shown promise in the processing of medical images. There are two components to the transfer learning workflow: adjusting using the intended dataset and pre-training such as DenseNet201.

This study provides a brief evaluation of the future scope of prostate cancer diagnosis. Even with the difficulties CAD systems in clinical settings provide and the advent of deep learning techniques, the encouraging outcomes are too valuable to ignore. By extracting knowledge from large amounts of data, deep learning techniques generate an output that may be utilized for individualized treatment, thereby advancing precision medicine. Unlike traditional medical care, precision medicine focuses on the tiniest molecular and genomic details, and medical professionals base their diagnosis decisions on minor variations between patients. Radiomics emerged with the advancement of big data and medical imaging. With the use of several medical pictures and feature-related algorithms, it seeks to convert the region of interest into high-resolution feature maps. In the future, medical images referred to as imaging grouping will be easily linked to non-imaging data in electronic medical records, such as gender, age, medical history, and so forth. When applied to electronic medical data, deep learning techniques can help derive patient representations that could result in forecasts and enhancements of clinical decision support systems. Opportunities for wider use of CNN-based CAD systems in clinical practice exist because of the recent and rapid development of deep learning technology, particularly CNN-based approaches. These methods are not anticipated to replace radiologists in the near future, but they may ease normal workflow, increase the precision of diagnosis and detection, lower the likelihood of errors, and improve patient satisfaction.

For the sake of a fair evaluation, it was considered that it would be useful to address the weaknesses of the proposed approach. Accordingly, in the current study, no detailed analysis was made as to which features or image regions affect the classification performance of the model during the classification process. This type of analysis can help us better understand the impact of the model on the results. In addition, the inadequacy of the data set used and the image quality resulted in limited results. It was evaluated that increasing the mentioned features of the data set could allow positive results to be obtained on the results. When the results of the study are examined; It has been shown that high accuracy rates can be achieved with a limited data set. In this context, it is envisaged that new transfer learning methods to be developed in future studies will make a greater contribution to disease classification processes, shorten detection and diagnosis times, and more accurate results can be obtained regardless of the number of data sets.

Transfer learning may not provide significant benefits if the tasks in problem-solving are very different. If the source dataset is too small or not representative of the target domain, the transferred information may not be sufficient. If there is a significant difference between the distribution of the data between the source field and the target field, it may not be able to generalize well. To alleviate this problem, domain adaptation techniques are often used. Additionally, fine-tuning may require adjustments to the architecture, which can be complex and time-

consuming, leading to overfitting, especially if the model has a large number of parameters. Despite these limitations, transfer learning remains a valuable tool in machine learning, particularly in scenarios where labeled data is limited or expensive to acquire.

CONCLUSIONS

In this study, we aimed to improve classification accuracy by using models trained with transfer learning on image data consisting of prostate cancer MRI dataset. Initially, without the use of trained models, feature extraction was performed on the dataset using Alexnet, Densenet201, Googlenet, and Vgg16 architectures. These results were obtained as 71.57%, 72.05%, 65.72%, and 80.13% respectively. Then, to compare the results, pre-trained models and the SGDM optimization algorithm were used together and necessary fine-tuning was done. With this method, 89.74%, 94.32%, 85.59%, and 91.05% were obtained for Alexnet, Densenet201, Googlenet, and Vgg16 architectures, respectively. Considering the overfitting on the dataset, 5-step dataset segmentation with the k-fold cross-validation method was applied to the transfer learning models in order to obtain more accurate rates. The accuracy rates obtained with this method were 88.22%, 98.10%, 98.10%, 84.23%, and 98.30% respectively. Considering the tendency of SGDM, which is used as an optimization algorithm, to behave slowly at low dimensional learning rates and unstable at high dimensional learning rates, RMSProp was chosen as the optimization method for the model trained with the DenseNet201 architecture to obtain the highest accuracy rate. Compared to other trained models, the highest accuracy rate was obtained with the DenseNet201 architecture at 98.63%. A performance increase of approximately 26% was achieved with the trained model. In this study, the classification of prostate cancer by transfer learning with CNN, whose efficiency was increased with fine-tuning, was carried out. We investigated how pre-trained deep learning models can be used in important applications such as disease classification. The results show that transfer learning has the potential to significantly improve classification performance.

REFERENCES

- Abbasi, A. A., Hussain, L., Awan, I. A., Abbasi, I., Majid, A., Nadeem, M. S. A., Chaudhary, Q. A. (2020). Detecting prostate cancer using deep learning convolution neural network with transfer learning approach. *Cognitive Neurodynamics*, 14, 523-533.
- Abdelmaksoud, I. R., Shalaby, A., Mahmoud, A., Elmogy, M., Aboelfetouh, A., Abou El-Ghar, M., El-Baz, A. (2021). Precise identification of prostate cancer from DWI using transfer learning. *Sensors*, 21(11), 3664.
- Anguita, D., Ghelardoni, L., Ghio, A., Oneto, L., Ridella, S. (2012, April). The K'in K-fold Cross Validation. In *ESANN* (Vol. 102, pp. 441-446).
- Aslan, M. (2022). Derin Öğrenme Tabanlı Otomatik Beyin Tümör Tespiti. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 34(1), 399-407.
- Bjurlin, M. A., Carroll, P. R., Eggener, S., Fulgham, P. F., Margolis, D. J., Pinto, P. A., ... & Turkbey, B. (2020). Update of the standard operating procedure on the use of multiparametric magnetic resonance imaging for the diagnosis, staging and management of prostate cancer. *The Journal of urology*, 203(4), 706-712.
- Carlsson, S., Assel, M., Sjoberg, D., Ulmert, D., Hugosson, J., Lilja, H., & Vickers, A. (2014). Influence of blood prostate specific antigen levels at age 60 on benefits and harms of prostate cancer screening: population based cohort study. *Bmj*, 348.
- Chavda, M., & Degadwala, S. (2024). Prostate Cancer Gleason Score Classification Using Transfer Learning Models. *International Journal of Scientific Research in Computer Science Engineering and Information Technology*, 10(2), 450-458.
- Dorak, M. T., & Karpuzoglu, E. (2012). Gender differences in cancer susceptibility: an inadequately addressed issue. *Frontiers in Genetics*, 3, 268.
- Fırıldak, K., & Talu, M. F. (2019). Evrimsel sinir ağlarında kullanılan transfer öğrenme yaklaşımlarının incelenmesi. *Computer Science*, 4(2), 88-95.
- Geert, L., Oscar, D., Jelle, B., Nico, K., and Henkjan, H.. ProstateX Challenge data, The Cancer Imaging Archive. (2017). <https://www.kaggle.com/datasets/tgprostata/transverse-plane-prostate-dataset> Accessed 02.05.2024.

- Hamm, C. A., Baumgärtner, G. L., Biessmann, F., Beetz, N. L., Hartenstein, A., Savic, L. J., Penzkofer, T. (2023). Interactive explainable deep learning model informs prostate cancer diagnosis at MRI. *Radiology*, 307(4), e222276.
- Himmerich, H., Kan, C., Au, K., & Treasure, J. (2021). Pharmacological treatment of eating disorders, comorbid mental health problems, malnutrition and physical health consequences. *Pharmacology & Therapeutics*, 217, 107667.
- Hoar, D., Lee, P. Q., Guida, A., Patterson, S., Bowen, C. V., Merrimen, J., Clarke, S. E. (2021). Combined transfer learning and test-time augmentation improves convolutional neural network-based semantic segmentation of prostate cancer from multi-parametric MR images. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, 210, 106375.
- Kanna, G. P., Kumar, S. J., Parthasarathi, P., & Kumar, Y. (2023). A review on prediction and prognosis of the prostate cancer and gleason grading of prostatic carcinoma using deep transfer learning based approaches. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 30(5), 3113-3132.
- Kılıçarslan, S., & Pacal, I. (2023). Domates Yapraklarında Hastalık Tespiti İçin Transfer Öğrenme Metotlarının Kullanılması. *Mühendislik Bilimleri ve Araştırmaları Dergisi*, 5(2), 215-222.
- Mahesh, T. R., Geman, O., Margala, M., & Guduri, M. (2023). The stratified K-folds cross-validation and class-balancing methods with high-performance ensemble classifiers for breast cancer classification. *Healthcare Analytics*, 4, 100247.
- Montesinos López, O. A., Montesinos López, A., & Crossa, J. (2022). Overfitting, model tuning, and evaluation of prediction performance. In *Multivariate statistical machine learning methods for genomic prediction* (pp. 109-139). Cham: Springer International Publishing.
- Özbay, E., & Özbay, F. A. (2021). Derin Öğrenme ve Sınıflandırma Yaklaşımları ile BT görüntülerinden Covid-19 Tespiti. *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, 12(2), 211-219.
- Özbay, F. A. (2023). A modified seahorse optimization algorithm based on chaotic maps for solving global optimization and engineering problems. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 41, 101408.
- Seyyarer, E., Ayata, F., Uçkan, T., & Karci, A. (2020). Derin öğrenmede kullanılan optimizasyon algoritmalarının uygulanması ve kıyaslanması. *Computer Science*, 5(2), 90-98.
- Srivenkatesh, M. (2020). Prediction of prostate cancer using machine learning algorithms. *Int. J. Recent Technol. Eng*, 8(5), 5353-5362.
- Swati, Z. N. K., Zhao, Q., Kabir, M., Ali, F., Ali, Z., Ahmed, S., & Lu, J. (2019). Brain tumor classification for MR images using transfer learning and fine-tuning. *Computerized Medical Imaging and Graphics*, 75, 34-46.
- Tsuneki, M., Abe, M., & Kanavati, F. (2022). Transfer learning for adenocarcinoma classifications in the transurethral resection of prostate whole-slide images. *Cancers*, 14(19), 4744.
- Weiss, K. R., & Khoshgoftaar, T. M. (2016, November). An investigation of transfer learning and traditional machine learning algorithms. In *2016 IEEE 28th International Conference on Tools with Artificial Intelligence (ICTAI)* (pp. 283-290). IEEE.
- Yuan, Y., Qin, W., Buyyounouski, M., Ibragimov, B., Hancock, S., Han, B., Xing, L. (2019). Prostate cancer classification with multiparametric MRI transfer learning model. *Medical Physics*, 46(2), 756-765.
- Zainudin, Z., Shamsuddin, S. M., & Hasan, S. (2020). Deep layer CNN architecture for breast cancer histopathology image detection. In *The International Conference on Advanced Machine Learning Technologies and Applications (Amlta2019) 4* (pp. 43-51). Springer International Publishing.
- Zhong, X., Cao, R., Shakeri, S., Scalzo, F., Lee, Y., Enzmann, D. R., Sung, K. (2019). Deep transfer learning-based prostate cancer classification using 3 Tesla multi-parametric MRI. *Abdominal Radiology*, 44, 2030-2039.
- Zhuang, F., Qi, Z., Duan, K., Xi, D., Zhu, Y., Zhu, H., He, Q. (2020). A comprehensive survey on transfer learning. *Proceedings of the IEEE*, 109(1), 43-76.



Kahramanmaraş Sütçü İmam University Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 04.04.2024
Kabul Tarihi : 19.07.2024

Received Date : 04.04.2024
Accepted Date : 19.07.2024

DİYABET RİSK DURUMUNUN BELİRLENMESİNDE SINIFLANDIRMA ALGORİTMALARININ PERFORMANSLARININ KAPSAMLI BİR ŞEKİLDE KARŞILAŞTIRILMASI

A COMPREHENSIVE COMPARISON OF THE PERFORMANCE OF CLASSIFICATION ALGORITHMS IN DETERMINING DIABETES RISK STATUS

Rukiye UZUN ARSLAN^{1*} (ORCID: 0000-0002-2082-8695)

İrem ŞENYER YAPICI² (ORCID: 0000-0003-0655-340X)

Okan ERKAYMAZ³ (ORCID: 0000-0002-1996-8623)

¹ Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Zonguldak, Türkiye

² Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Zonguldak, Türkiye

³ Milli Savunma Üniversitesi, Deniz Harp Okulu, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Rukiye UZUN ARSLAN, rukiyeuzun67@gmail.com

ÖZET

Diyabet, dünya çapında prevalansı her geçen gün artan metabolik bir halk sağlığı sorunudur. Bu hastalık kontrol altına alınmaması durumunda birçok doku ve organ üzerinde geri dönüşümü olmayan hasarlara neden olabilmektedir. Bu nedenle, diyabet hastalığının erken teşhisi ve etkili bir şekilde yönetilmesi, hastaların yaşam kalitesinin artırılması ve potansiyel sağlık risklerinin azaltılması açısından kritik bir öneme sahiptir. Sağlık sektöründe, hastalıkların teşhisinde yaygın olarak kullanılan makine öğrenimi (MÖ) tabanlı karar destek sistemleri (KDS) önem arz etmektedir. Bu çalışmada, diyabet teşhisi için önerilen MÖ tabanlı bir KDS sunulmuştur. Çalışma kapsamında, veri seti rasgele 80:20 oranında beş kez bölünmüş ve beş farklı MÖ algoritmasıyla (k-en yakın komşu, ridge, aşırı gradyan artırma, ekstra ağaç ve gradyan artırma) performansları değerlendirilmiştir. Bunun için veri setindeki özellikler RO algoritmasıyla değerlendirilerek Ki-kare testine dayalı SelectKBest yöntemiyle en anlamlı özellikler belirlenmiştir. Ayrıca önerilen sistem performansı üzerinde yeniden örnekleme tekniklerinin (sentetik azınlık aşırı örnekleme tekniği, Near Miss) etkileri analiz edilmiştir. Yapılan analizler sonucunda, Near Miss yeniden örnekleme tekniğinin veri setine uygulanmasıyla gradyan artırma algoritmasının en iyi performansı sergilediği tespit edilmiştir. Bu durumda, test verileriyle yapılan analizlere göre F-skor, kesinlik, doğruluk ve duyarlılık değerleri sırasıyla %99.44, %98.89, %99.45 ve %100 olarak hesaplanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Diyabet, sınıflandırma, karar destek sistemi, örnekleme teknikleri.

ABSTRACT

Diabetes is a metabolic public health problem with an increasing prevalence worldwide. If untreated, it can cause irreversible effects on many tissues and organs. Therefore, early diagnosis and effective management of diabetes is critical to improve patients' quality of life and reduce potential health risks. In the healthcare industry, machine learning (ML) based decision support systems (DSS) are widely used for disease diagnosis. In this study, a proposed ML-based CDS for diabetes diagnosis is presented. Within the scope of the study, the dataset is randomly split five times in a ratio of 80:20 and the performances of five different ML algorithms (k-nearest neighbor, ridge, extreme gradient boosting, extra tree and gradient boosting) are evaluated. For this purpose, the features in the dataset are evaluated with the RO algorithm and the most significant features are determined by the SelectKBest method based on the Chi-square test. In addition, the effects of resampling techniques (synthetic minority oversampling technique, Near Miss) on the performance of the proposed system were analyzed. As a result of the

ToCite: UZUN ARSLAN, R., ŞENYER YAPICI, İ. & ERKAYMAZ, O., (2024). DİYABET RİSK DURUMUNUN BELİRLENMESİNDE SINIFLANDIRMA ALGORİTMALARININ PERFORMANSLARININ KAPSAMLI BİR ŞEKİLDE KARŞILAŞTIRILMASI. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 27(4), 1320-1333.

analysis, it was found that the gradient boosting algorithm performed best when the Near Miss resampling technique was applied to the dataset. In this case, the F-score, precision, accuracy and sensitivity values were calculated as 99.44%, 98.89%, 99.45% and 100%, respectively, based on the analysis with the test data.

Keywords: Diabetes, classification, decision support system, sampling techniques.

GİRİŞ

Diyabet dünya çapında prevalansı giderek artan bir halk sağlığı sorunu olup, pankreasın insülin hormonunu yeterince üretememesi veya vücudun üretilen insüline etkili bir şekilde yanıt verememesi sonucu ortaya çıkan kronik bir metabolik hastalıktır. Diyabet, gözlerden böbreklere, kalpten kan damarlarına kadar birçok farklı dokuda kronik hasarlara ve işlevsel bozukluklara neden olabilmektedir (Krasteva vd., 2011). Dünya Sağlık Örgütü'ne göre, beraberinde getirdiği komplikasyonlarla zamanla ölümcül sonuçlar doğurabilen diyabet dünya genelinde önde gelen ölüm nedenleri arasında yer almaktadır (WHO, 2024). Uluslararası Diyabet Federasyonu diyabet hastalığının 2021 yılında 6,7 milyon insanın ölümüne sebep olduğunu açıklamıştır. Bu rakamlar her geçen gün artmakta olup, hastalığın tedavi edilmemesi halinde 2045 yılına kadar diyabetli hasta sayısının 693 milyonu aşacağı tahmin edilmektedir (IDFA, 2022). Diyabetin bu kadar hızlı bir şekilde artması hastalığın önlenmesi, erken teşhisin konulması ve etkili bir şekilde tedavi edilmesi açısından önem taşımaktadır.

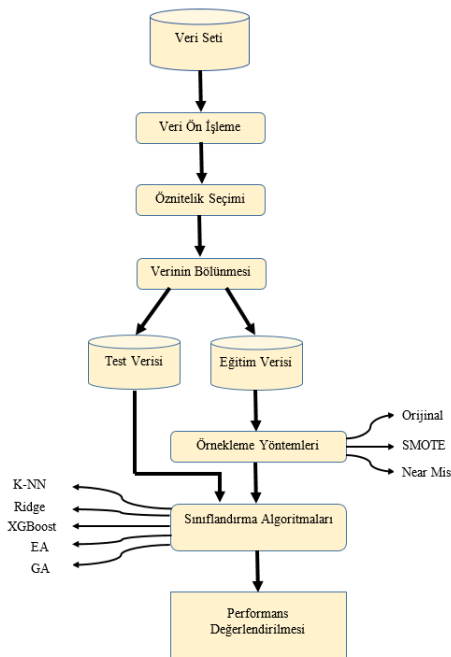
Günümüzde kullanılan teşhis yöntemlerinin zaman alıcı ve bazı durumlarda yeterli olmaması, araştırmacıları yeni arayışlara yönlendirmiştir. Sağlık sektöründe yeni teknolojilerin kullanılmasıyla birlikte yapay zekâ tabanlı yöntemler, diyabet teşhisi ve yönetiminde giderek daha büyük bir paya sahip olmaya başlamıştır. Bu bağlamda literatürde diyabet teşhisinde makine öğrenmesi (MÖ) temelli çok sayıda çalışma bulunmaktadır. Örneğin, Das vd. (2018), bireylerin diyabetik durumunun erken evrede teşhis edilebilmesi için MÖ temelli bir model önermişlerdir. Önerilen modelde çalışma süresi ve tahmin doğruluğu açısından kullanılan sınıflandırma algoritmalarından Navie Bayes (NB)'in J48'e kıyasla daha yüksek performans sergilediği tespit edilmiştir. Akyol ve Şen (2018) diyabet teşhisinde öznelik seçimi ve sınıflandırma tekniklerinin etkilerini irdelemişlerdir. Bunun için öncelikle PIMA yerlileri veri seti üzerinde özellik seçimi veya ağırlıklandırma yöntemleri kullanılarak veri setindeki baskın özellikler tespit edilmiş ve üç farklı MÖ algoritmasının performansları karşılaştırılmıştır. Yapılan analizlerle, kararlılık seçimi yöntemi ve Adaboost algoritmasıyla en yüksek başarımın elde edilebileceği gösterilmiştir. Alehegen vd. (2019) iki farklı veri seti kullanarak diyabet teşhisinde rasgele orman (RO), k en yakın komşu (KNN), NB ve J48 algoritmalarının tahminlerini birleştiren bir topluluk öğrenme algoritmasının başarımını irdelemişlerdir. Jakka ve Vakula Rani (2019) diyabet hastalığının erken evrede teşhis edilebilmesi için PIMA yerlileri veri seti üzerinde KNN, RO, lojistik regresyon (LR), karar ağacı (KA) ve destek vektör makinaları (DVM) algoritmalarının başarımlarını değerlendirmişlerdir. Farklı performans metriklerine göre yapılan değerlendirmeler sonucunda LR algoritmasının %77.6'lık bir oranla diyabeti doğru sınıflandırdığı belirlenmiştir. Daghistani ve Alshammari (2020), Suudi Arabistan'daki bir sağlık kuruluşundan elde ettikleri veri setini kullanarak LR ve RO algoritmalarının diyabet teşhisindeki performanslarını değerlendirmişlerdir. Yapılan analizlerde RO algoritmasının en yüksek sınıflandırma doğruluğuna (%88) sahip olduğu belirlenmiştir. Turhan vd. (2020) dengesiz bir veri setinde diyabet hastalığı teşhisi için üç farklı örnekleme tekniği kullanarak topluluk öğrenmesi yöntemlerinin performanslarını analiz etmişlerdir. Analizler sonucunda, sınıf dengesizliği olan veri setlerinde yeniden örnekleme tekniklerinin sınıflandırma algoritmalarına uygulanmasıyla daha yüksek başarımların elde edilebileceğini göstermişlerdir. Shuja vd. (2020), Kaşmir'deki bir laboratuvarından alınan dengesiz bir diyabet veri seti üzerinde sentetik azınlık aşırı örnekleme tekniği (SMOTE) uygulayarak, beş farklı MÖ algoritmasının diyabet teşhisindeki performanslarını karşılaştırmışlardır. Yapılan analizler sonucunda en yüksek başarımların SMOTE tekniğiyle birlikte kullanılan KA algoritmasıyla elde edilmiştir. Mohammed vd. (2020), gerçek bir diyabet veri seti kullanarak, MÖ algoritmalarının (KNN, KA, NB, LR, DVM ve yapay sinir ağları) diyabet hastalığını sınıflandırma performanslarını irdelemişlerdir. Çalışmalarında dengesiz sınıf problemiyle karşılaştıkları için SMOTE tekniğiyle birlikte, üç farklı normalizasyon tekniğini kullanarak algoritmaların başarımlarını kıyaslamışlardır. Yapılan analizler sonucunda, SMOTE yeniden örnekleme yöntemi ve farklı normalleştirme tekniklerinin sınıflandırma algoritmalarının performansını önemli ölçüde artırdığı ortaya konulmuştur. Mesquita vd. (2021), PIMA yerlileri veri seti üzerinde on farklı MÖ ile altı farklı aşırı örnekleme algoritmalarının diyabet teşhisi üzerindeki performansını irdelemişlerdir. Yapılan benzetim çalışmalarında, tüm kombinasyonlar arasında en iyi sonucun DVM-SMOTE yöntemiyle birlikte çalışan Adaboost algoritmasıyla elde edildiği tespit edilmiştir. Özlüer Başer vd. (2021) bireylerin diyabetik durumunun tespitinde altı farklı MÖ algoritmasının başarımını k-katmanlı çapraz doğrulama yöntemine göre analiz etmişlerdir. Yapılan analizlerde en yüksek başarımların %84.78 ile RO algoritmasıyla ulaşılmıştır. Harman (2021) dengesiz bir diyabet veri seti üzerinde SMOTE tekniği uygulayarak

DVM ve NB algoritmalarının başarımını irdelemiştir. Analizlerde en yüksek sınıflandırma başarımı %88 ile DVM’de elde edilmiştir. Özkan vd. (2022) bireylerin diyabetik durumunun tespitinde iki farklı yaklaşım kullanarak sekiz farklı MÖ algoritmasının başarımlarını karşılaştırmışlardır. Çalışmada diyabet tanısında istatistiksel ve kliniksel açıdan önemli (anlamlı) bulunan özellikleri kullanan modellerin performansları 10-kat çapraz doğrulama tekniğiyle değerlendirilmiştir. Yapılan analizlerde her iki yaklaşım içinde RO algoritmasının diğer algoritmalara kıyasla daha iyi sınıflandırma performansa sahip olduğu tespit edilmiştir. Sevli (2022) dengesiz bir diyabet veri seti kullanarak altı farklı MÖ algoritmasının performanslarını on dört farklı yeniden örnekleme tekniğine göre analiz etmiştir. Örnekleme tekniklerinin sınıflandırma başarımı üzerinde olumlu etkisinin olduğunu ve en yüksek doğruluk değerinin InstanceHardnessThreshold az örnekleme tekniğinin RO (%96,296) algoritmasına uygulanması durumunda elde edildiğini tespit etmiştir. Yılmaz vd. (2023) diyabetin erken evrede tespitine yönelik MÖ tabanlı bir model önermişlerdir. Beş farklı MÖ algoritmasının başarımlarının karşılaştığı çalışmada en yüksek sınıflandırma doğruluğu %96 ile RO’da elde edilmiştir. Özoğur ve Orman (2023) bireylerin diyabetik durumunun tespitinde beş farklı MÖ algoritmasının başarımlarını çeşitli yeniden örnekleme yöntemlerine dayanarak karşılaştırmışlardır. Yapılan analizler sonucunda en yüksek sınıflandırma başarımı SMOTE-ENN ve MICE örnekleme tekniklerinin DVM ile birlikte kullanıldığında ulaşılabildiğini ortaya koymuşlardır. Korkmaz ve Kaplan (2023), diyabet hastalığının teşhisi için MÖ temelli bir model önermişlerdir. Önerilen modelde yedi farklı sınıflandırma algoritmasının başarımı 10-kat çapraz doğrulama yöntemi uygulanarak analiz edilmiştir. Yapılan analizlerde, aşırı gradyan artırma (XGBoost) ve hafif gradyan artırma (LightGBM) algoritmalarının en yüksek doğruluk değerini (%90.01) verdiği tespit edilmiştir.

Yukarıda bahsedilen çalışmalar göz önüne alındığında, literatürde açık erişimli diyabet veri setlerinin kullanıldığı görülmektedir. Bu çalışmada ise, bireylerin diyabetik risk durumunun tespiti için güncel bir halka açık veri seti kullanılarak MÖ algoritmalarının başarımları analiz edilmiştir. Algoritmaların başarımları farklı performans metriklerine göre yeniden örnekleme tekniklerinin kullanıldığı ve kullanılmadığı durumlar için karşılaştırılarak yorumlanmıştır.

MATERYAL VE METOT

Gerçekleştirilen bu çalışmada farklı MÖ algoritmaları kullanılarak bireylerin diyabetik durumunun tespit edilmesi amaçlanmıştır. Bu bağlamda, Pakistan’ın iki ayrı bölgesinden toplanan ve açık erişimli bir veri tabanında bulunan güncel bir veri seti kullanmıştır (Kaggle, 2024). Çalışmada diyabet tanısında kullanılan ölçümlerden elde edilen verileri içeren veri setinde, K-NN, Ridge, XGBoost, ekstra ağaçlar (EA) ve gradyan artırma (GA) algoritmalarının sınıflandırma başarımları farklı performans metriklerine göre analiz edilmiştir. Yanı sıra örnekleme tekniklerinin algoritmaların performansları üzerindeki etkileri ele alınmıştır. Önerilen modelin akış şeması Şekil 1’de verilmiştir.



Şekil 1. Veri Setinden Örnek Bir Kesit

Veri Ön İşleme

Bu çalışmada Kaggle veri tabanında “Pakistani Diabetes Dataset” başlığı altında verilen açık erişimli bir veri seti kullanılmıştır (Kaggle, 2024). 912 hastanın tıbbi kayıtlarını içeren veri seti, hastanın diyabet durumunu tahmin etmeye olanak tanıyan bir dizi özellik içermektedir. Veri setindeki her bir örnek, 18 adet giriş özelliği (öznitelik) ve bir teşhis sınıfıyla (çıkış) temsil edilmektedir. Teşhis sınıfının değeri, hastanın diyabetik olup olmasına bağlı olan ikili (binary) bir değere sahiptir. Teşhis sınıfının değerinin 0 olması hastanın sağlıklı (diyabetik olmayan), 1 olması ise hastanın sağlıklı (diyabetik) olduğunu ifade etmektedir. Veri seti 486 diyabetik, 426 sağlıklı hasta kaydı içermektedir. Şekil 2’de veri setinden rasgele seçilen 10 satır, 19 öznitelik ve bunlara karşılık gelen değerler gösterilmiştir.

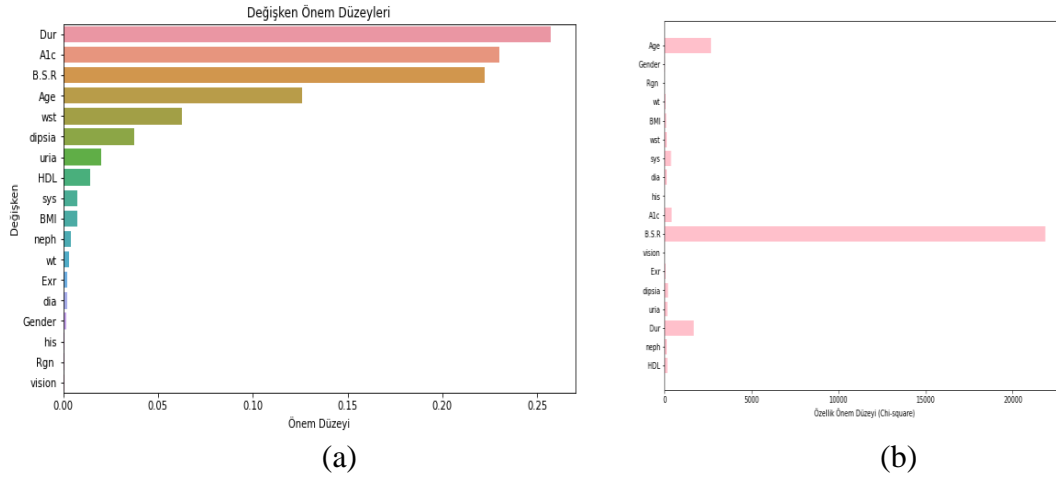
Age	Gender	Rgn	wt	BMI	wst	svs	dia	his	A1c	B.S.R	vision	Exr	dipsia	uria	Dur	neph	HDL	Outcome
24	0	0	84	26.57	34	120	80	0	5.4	123	0	30	0	0	0	0	57	0
28	0	1	58	20.63	35	130	90	0	5	92	0	20	0	0	0	0	46	0
34	0	0	70	20.92	32	110	60	1	5	98	0	35	0	0	0	0	42	0
35	1	0	67	27.9	37	137	92	0	6.8	139	1	30	1	1	1	0	39	1
35	1	0	56	26.71	38	140	90	1	6.5	97	0	20	1	0	5	0	56	1
37	1	0	59	24.6	40.5	130	78	1	9.1	253	0	20	1	0	4	0	48	1
38	1	0	82	26.5	42.5	110	80	0	11.5	238	0	0	1	0	4	1	42	1
39	1	0	83	28.3	34.5	120	110	0	5.1	174	1	0	1	1	2	1	42	1
41	1	0	52	21.66	34	124	75	1	8	201	0	0	1	1	2	1	50	1
54	1	1	81	31.63	39	150	84	0	6.7	112	1	20	0	1	8	1	48	1

Şekil 2. Veri Setinden Örnek Bir Kesit

MÖ temelli karar destek sistemlerinin geliştirilmesinde, verinin hazırlanması son derece önemlidir. Veri ön işleme süreci, veri setini modelin gereksinimlerine uygun hale getirmek için eksik verilerin tamamlanması, veri temizleme, normalleştirme ve boyut indirgeme gibi bir dizi işlemi içermektedir. Bu süreçler sayesinde, MÖ temelli modellerin güvenilir, doğru ve başarılı tahminler yapabilmesi için veri uygun hale dönüştürülmektedir. Bu bağlamda gerçekleştirilen çalışmada veri setindeki özniteliklerden önerilen modele katkısı olmayacak öznitelikler elimine edilmiştir. Bunun için öncelikle veri setindeki özniteliklerin önem düzeyini değerlendirmek için RO algoritması kullanılmıştır. Bu değerlendirme sonucunda, en anlamlı öznitelikleri tespit etmek için Ki-kare testine dayalı SelectKBest yöntemi uygulanmıştır (Şekil 3). RO algoritmasına göre belirlenen dört özellik arasından Ki-kare testine dayalı SelectKBest yöntemiyle çıkarılan üç özellik, hedef değişkenle istatistiksel olarak anlamlı bir ilişki göstermektedir. Bu özellikler, modelin hedef değişkeni tahmin etme yeteneğini geliştirmek adına seçilmiştir. RO algoritması, veri setindeki karmaşıklığı ele alarak önemli özellikleri belirlemede etkili olmuştur. Ki-kare testine dayalı SelectKBest yöntemi ise seçilen özelliklerin hedef değişkenle olan ilişkisini doğrulamak için istatistiksel bir yaklaşım sunmuştur. Bu bulgular ışığında, veri setindeki tüm öznitelikler arasından kan şekeri seviyesi değer aralığı, yaş ve zaman en anlamlı özellikler olarak tespit edilmiştir.

Örnekleme Algoritmaları

Sınıf dengesizliği, bir veri setindeki farklı sınıflara ait örneklerin dağılımında belirgin bir dengesizlik olduğu durumu ifade etmektedir. Bu durum, özellikle MÖ temelli modellerin eğitilmesi ve değerlendirilmesi sürecinde önemli bir sorun olabilmektedir. Dengesiz sınıflar, modelin az örneklı sınıfları doğru bir şekilde öğrenmemesine ve bu sınıfları yanlış sınıflandırmasına neden olabilmektedir. Bu sorunu çözmek için kullanılan teknikler arasında, örnekleme yöntemleri (örneğin, aşırı örnekleme ve azaltılmış örnekleme), sınıf ağırlıklarının dengelenmesi, sentetik veri üretimi gibi teknikler yer almaktadır. Bu teknikler, sınıf dengesizliğinin etkilerini azaltarak model performansını artırmayı amaçlamaktadır (Yavaş vd., 2020). Gerçekleştirilen bu çalışmada modellerin performansı üzerinde Near Miss az örnekleme tekniği ile SMOTE aşırı örnekleme tekniğinin etkileri irdelenmiştir.



Şekil 3. Veri Setinden Anlamlı Özelliklerin Çıkarılması a)RO Algoritmasına Göre Özelliklerin Önem Düzeyi, b) Ki-Kare Testine Dayalı SelectKBest Yöntemine Göre Çıkarılan En Anlamlı Özellikler

SMOTE yöntemi, bir veri kümesindeki azınlık sınıfının temsil edilme düzeyini artırmak için kullanılan bir tekniktir. Bu yöntemde, azınlık sınıfındaki her örnek için k en yakın komşusuna bakılarak, interpolasyon tekniğine dayalı rasgele sentetik örnekler oluşturulmaktadır. Bu yeni örnekler, sınıflandırıcının daha büyük ve daha az spesifik karar bölgeleri oluşturmasını sağlamaktadır. Böylelikle, daha dengeli bir sınıf dağılımı elde edilirken, aşırı örneklemeyle ilişkili sorunlar azaltılmış olmaktadır (Öztürk, 2022; Dal vd., 2021).

Near Miss örnekleme yöntemi, bir veri kümesinde azınlık sınıfına ait örneklerle çoğunluk sınıfına ait örnekler arasındaki uzaklıkları dikkate alarak, örneklerin seçilmesini sağlamaktadır. Bu yöntemin amacı, azınlık sınıfına ait örnekleri seçerek çoğunluk sınıfına ait örneklerle olan uzaklıklarını minimize etmektir. Bu şekilde, sınıf dengesizliği azaltılarak daha dengeli bir veri seti elde edilmesi hedeflenmektedir. Near Miss, sınıf dengesizliği problemlerini çözmek için SMOTE gibi diğer yöntemlerle birlikte kullanılabilir. Ancak, yakınlık tabanlı bir seçim kriterine dayandığı için SMOTE'den farklı bir yaklaşımı benimsemektedir (Mqadi vd., 2021).

Sınıflandırma Algoritmaları

Son yıllarda büyük boyutlu verilerin otomatik olarak analiz edilmesi gereksinimi, MÖ algoritmalarına dayalı yöntemlerin kullanımının yaygınlığının artmasına neden olmuştur. Bu bağlamda, gerçekleştirilen çalışmada literatürde diyabet teşhisinde başarılı sonuçlar verdiği bilinen KNN, Ridge, GA, EA ve XGBoost algoritmalarından yararlanılmış olup, algoritmalarının temel prensipleri aşağıda sunulmuştur.

K en yakın komşu (K Nearest Neighbour, KNN) algoritması, belirli bir örneğin sınıfını tahmin etmek için komşu veri noktalarının sınıf etiketlerine bakmaktadır. Bu algoritma, yeni bir veri noktasının sınıfını belirlemek için ona en yakın k komşuyu bulmakta ve bu komşuların sınıf etiketlerinin çoğunluğunu kullanarak tahmin yapmaktadır. KNN, basit ve esnek bir algoritma olmasına rağmen, büyük veri setlerinde ve yüksek boyutlu öznitelik uzaylarında hesaplama maliyeti artabilmektedir. Ayrıca, bu algoritmada k değerinin seçimi önemlidir; küçük k değerleri aşırı uyuma neden olabilirken, büyük k değerleri ise modelin genelleme yeteneğini azaltabilmektedir (Hacıbeyoğlu vd., 2023; Yakar vd., 2024).

Ridge algoritması, lineer regresyon yöntemine dayalı bir sınıflandırma algoritmasıdır. Temel prensibi, gürültülü veya çoklu korelasyonlu özniteliklerle başa çıkmak için lineer regresyonu düzenlemektir. Bu algoritma, modelin karmaşıklığını kontrol etmek için bir düzenleme terimi kullanmakta ve bu sayede aşırı uyumun önüne geçmektedir. Genellikle, düzenleme parametresi olan lambda (λ) değeriyle kontrol edilmektedir. λ değeri arttıkça, modelin karmaşıklığı azalmakta ve genelleme yeteneği artmaktadır. Ridge sınıflandırma algoritması, özellikle yüksek boyutlu veri setleri veya çoklu özelliklerin bulunduğu durumlarda etkili bir şekilde kullanılabilir (Turan, 2023).

Ekstra ağaçlar (Extra Trees, EA) KA tabanlı bir topluluk öğrenme algoritmasıdır. Sınıflandırma kararının çoğunluğa göre verildiği bu algortmada, tipik KA farklı bölünme noktaları rasgele seçilmektedir. Bu rasgele seçim, her bir ağacın bölünme noktalarının farklı özelliklerde ve değerlerde olmasını sağlamaktadır. Böylece

ağaçlar arasında daha fazla çeşitlilik oluşturarak, ağaçların daha yüksek genelleme yeteneğine sahip olmasını ve aşırı öğrenmeye karşı dirençli olmasını sağlamaktadır. Ayrıca, bu algoritmada performansı artırmak için topluluktaki ağaç sayısı artırılabilir. Bu nedenle de EA algoritması, veriye dayalı tahminlerde daha geniş bir çeşitlilik ve daha iyi bir performans sunmaktadır (Türkmenoğlu ve Yıldız, 2021).

Gradyan arttırma (Gradient Boosting, GA), KA gibi zayıf tahmin edicilerini birleştirerek daha güçlü bir tahmin edicinin oluşturulmasını amaçlayan bir topluluk öğrenme algoritmasıdır. Temel prensibi, ardışık öğrenme adımlarıyla önceki tahmin edicilerin hatalarını minimize etmek için yeni tahmin edicilerin eklenmesine dayanmaktadır. Böylelikle her bir adımda önceki modellerin hataları düzeltilerek önerilen modelin genel performansı artırılmaktadır (Sungur ve Bakır, 2024).

XGBoost, GA'nın daha gelişmiş bir versiyonu olarak kabul edilen ağaç tabanlı bir topluluk öğrenme algoritmasıdır. Bu algoritma hesaplama hızı, ölçeklenebilirlik ve performans açısından GA'den daha üstün bir yapıya sahiptir. Ayrıca, aşırı öğrenmeye karşı daha dirençli olması ve daha iyi genelleme yeteneğine sahip olması, onu çeşitli MÖ problemlerinde tercih edilen bir seçenek haline getirmektedir (Yakut vd., 2023).

Performans Ölçütü

Çalışmada kullanılan modelin performansının değerlendirilmesi için doğruluk, duyarlılık, kesinlik ve F- skor metrikleri kullanılmıştır. Bu metriklerin hesaplanmasında gerçek değerlerle tahmin edilen değerler arasındaki ilişkiyi sunan karmaşıklık matrisinden faydalanılmıştır. Karmaşıklık matrisinde yer alan TP, TN, FN ve FP değerleri sırasıyla Doğru Pozitif (True Positive (TP)), Doğru Negatif (True Negative (TN)), Yanlış Negatif (False Negative (FN)) ve Yanlış Pozitif (False Positive (FP)) temsil etmektedir. Metriklerin hesaplanmasında kullanılan denklemler ve tanımları Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Performans Metriklerinin Matematiksel Denklemleri Ve Tanımları

Metrik Adı	Formülü	Tanımı
Doğruluk	$\frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN}$	Doğruluk, tahmin edilen örnek sayısının bütün örnek sayısına olan oranıdır. Bu değer 0 ila 1 arasında değer almakta olup, 1'e yakın olması modelin başarılı olduğunu ifade edilmektedir.
Duyarlılık	$\frac{TP}{FN + TP}$	Duyarlılık, gerçek pozitif örneklerin ne kadarının doğru bir şekilde belirlenebildiğini ölçmektedir.
Kesinlik	$\frac{TP}{FP + TP}$	Kesinlik, modelin pozitif olarak belirlediği örneklerin aslında ne kadarının doğru pozitif olduğunu ölçmektedir.
F-Skor	$\frac{2 \times \text{kesinlik} \times \text{duyarlılık}}{\text{kesinlik} + \text{duyarlılık}}$	F-skor modelin genel doğruluğunu ölçmekte olup, yanlış tahmin edilmiş örnek oranını ölçmektedir.

SONUÇLAR

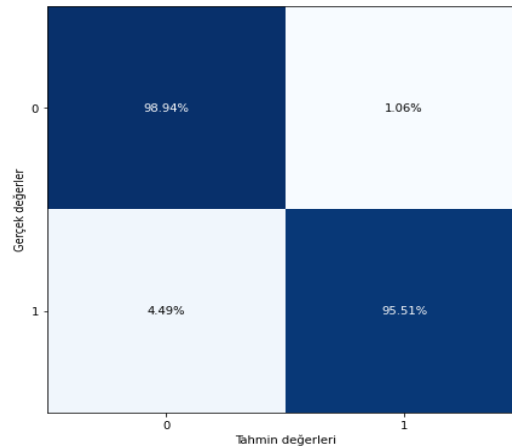
Gerçekleştirilen çalışmada daha az özellikle diyabet hastalığını tahmin edebilen MÖ tabanlı bir karar destek sistemi önerilmiştir. Önerilen sistem için, ilk olarak veri setindeki en anlamlı özellikler belirlenmiştir. Bu amaçla, RO algoritmasıyla özelliklerin önem düzeyi değerlendirilmiş ve ardından Ki-kare testine dayalı SelectKBest yöntemiyle en anlamlı özellikler seçilmiştir. Bu değerlendirme sonucunda, kan şekeri seviyesi değer aralığı, yaş ve zaman özellikleri diyabet tahmini için en belirleyici özellikler olarak belirlenmiştir. Önerilen sistemin performansını değerlendirmek için, orijinal veri seti %80 eğitim ve %20 test olarak rasgele ayrıştırılmıştır. Eğitim için ayrılan veri seti sistemin eğitiminde kullanılırken, test veri seti ise sistemin performansının objektif bir şekilde değerlendirilmesinde kullanılmıştır. Daha sonra veri seti üzerinde literatürde diyabet tahmininde sıklıkla kullanılan MÖ algoritmalarından olan K-NN, Ridge, Xgboost, GA ve EA algoritmaları ve her bir algoritma için farklı örnekleme teknikleri (Near Miss ve SMOTE) uygulanması durumunda başarımları değerlendirilmiştir. Her bir

sınıflandırıcı başarımı, örnekleme tekniklerinin uygulanıp uygulanmaması durumları için ayrı ayrı değerlendirilerek, karmaşıklık matrisleriyle birlikte sunulmuştur. Çalışma kapsamında yapılan bütün analizler, Python programlama dilinde gerçekleştirilmiştir. Bununla birlikte analizlerin güvenilirliğini sağlamak ve sistemin genel performansını objektif bir şekilde değerlendirmek için veri setinin rasgele bölünme işlemi beş kez tekrar edilmiştir. Her bir 80:20 bölme işlemi sonrasında elde edilen sonuçların ortalaması alınmış ve önerilen modelin performansı bu ortalama üzerinden değerlendirilmiştir. Bu doğrultuda örnekleme olmadan (orijinal) ve örnekleme tekniklerinin uygulanması durumlarında KNN algoritmasının performans metrikleri Tablo 2’de verilmiştir. F-skor, kesinlik, duyarlılık ve doğruluk değerleri, hem eğitim hem de test verileri için ayrı ayrı sunulmuştur.

Tablo 2. KNN Algoritması İçin Sınıflandırma Sonuçları

		Orijinal (%)	SMOTE (%)	Near Miss (%)
F-Skor	Eğitim	98,34	98,21	98,00
	Test	97,14	97,14	97,14
Kesinlik	Eğitim	100	100	100
	Test	98,84	98,84	98,84
Duyarlılık	Eğitim	96,73	96,47	96,08
	Test	95,51	95,51	95,51
Doğruluk	Eğitim	98,22	98,24	98,04
	Test	97,27	97,27	97,27

Tablo 2’den açıkça görüldüğü gibi, örnekleme tekniklerinin uygulanmasının KNN sınıflandırıcısının performansı üzerinde belirgin bir etkisi olmamıştır. F-skor metriği, eğitim verileri için örnekleme yapılmadığında (orijinal veri seti) %98.34, SMOTE fazla örnekleme tekniği uygulandığında %98.21 ve Near Miss az örnekleme tekniği uygulandığında %98 olarak belirlenmiştir. Test verileri üzerinden yapılan analizlerde ise F-skor değeri her üç durumda için %97 olarak hesaplanmıştır. Kesinlik metriği eğitim ve test verileri için her üç durumda da sırasıyla %100 ve %98.84 olarak elde edilmiştir. Duyarlılık metriği ise eğitim verileri için orijinal veri setinde %96.73, SMOTE uygulandığında %96.47 ve Near Miss uygulandığında %96.73 olarak hesaplanmıştır. Test verileri üzerinde ise her üç durum için duyarlılık %95.51 olarak ölçülmüştür. Doğruluk metriği açısından eğitim verileri için orijinal veri setiyle %98.22’lik, SMOTE tekniğiyle %98.24’lük ve Near Miss tekniğiyle ise %98.04’lük başarımlara ulaşılmıştır. Test verileri üzerinde ise her bir durum için %97.27’lik doğruluk oranı elde edilmiştir. Genel olarak, her bir durum için sınıflandırma performansları test verileri üzerinde benzerlik gösterirken, eğitim verileri üzerinde küçük farklılıklara neden olmuştur. Şekil 4’de test verileri için KNN algoritmasında en yüksek sınıflandırma başarımının (%97.27) elde edildiği duruma ait karmaşıklık matrisi sunulmuştur.

**Şekil 4.** Test Verileri Üzerinden En Yüksek Başarım Elde Edilen KNN Algoritmasına Ait Karmaşıklık Matrisi

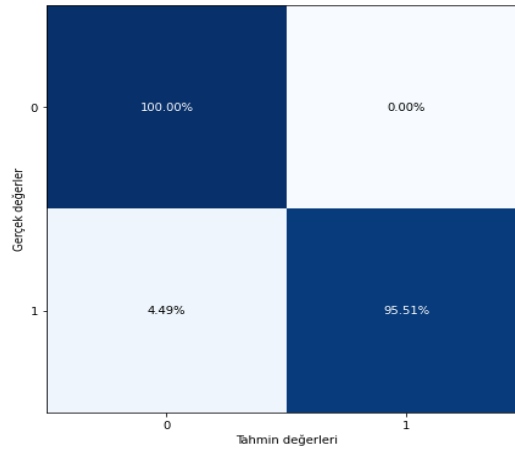
Şekil 4’ten açıkça görüldüğü gibi, KNN algoritması kullanan model, örnekleme tekniklerinin uygulanıp uygulanmamasına bakılmaksızın sağlıklı bireyleri %95.51 doğrulukla sağlıklı olarak sınıflandırmıştır. Ancak, %1.06 oranında yanlış sınıflandırma yapılmıştır. Diyabetli bireyleri ise %95.51 oranında doğru, %4.49 oranında yanlış sınıflandırmıştır. Bu sonuçlar, modelin genel performansının yüksek olduğunu ve çoğu durumda doğru sınıflandırma yaptığını göstermektedir.

Tablo 3’de orijinal veri seti ile SMOTE ve Near Miss örnekleme tekniklerinin uygulanması durumlarında Ridge algoritmasının performans metrikleri eğitim ve test verileri için ayrı ayrı verilmiştir.

Tablo 3. Ridge Algoritması İçin Sınıflandırma Sonuçları

		Orijinal (%)	SMOTE(%)	Near Miss(%)
F-Skor	Eğitim	95,09	95,08	96,15
	Test	96,05	96,59	97,70
Kesinlik	Eğitim	94,97	95,20	98,42
	Test	96,59	97,70	100
Duyarlılık	Eğitim	95,21	94,96	93,98
	Test	95,51	95,51	95,51
Doğruluk	Eğitim	94,65	95,09	96,23
	Test	96,17	96,72	97,81

Tablo 3’den açıkça görüldüğü üzere F-skor metriği eğitim verileri üzerinde örnekleme yapılmadığında %95.09, SMOTE tekniği uygulandığında %95.08 ve Near Miss tekniği uygulandığında %96.15 olarak belirlenmiştir. Test verileri içinse bu değerler sırasıyla %96.05, %96.59 ve %97.70 olarak hesaplanmıştır. Kesinlik metriği, eğitim verilerine örnekleme yapılmadığında %94.97, SMOTE tekniğinde %95.20 ve Near Miss tekniğinde %98.42 olarak elde edilmiştir. Test verileri içinse bu değerler sırasıyla %96.59, %97.70 ve %100 olarak bulunmuştur. Duyarlılık metriğine bakıldığında, eğitim verilerine örnekleme yapılmadığında %95.21, SMOTE uygulandığında %94.96, Near Miss uygulandığında ise %93.98 oranlarına ulaşılmıştır. Test verileri üzerinde ise her üç durum için duyarlılık %95.51 olarak ölçülmüştür. Doğruluk metriği açısından ise eğitim verileri üzerinden orijinal veri setiyle %94.65’lik, SMOTE tekniğiyle %95.09’luk, Near Miss tekniğiyle ise %96.23’lük başarımlara ulaşılmıştır. Test verileri içinse bu değerler sırasıyla %96.17, %96.72 ve %97.81 olarak bulunmuştur. Sonuç olarak Ridge algoritmasında test verileri üzerinden en yüksek başarımla (%97.81) Near Miss tekniğinin uygulanması durumunda gözlemlenmiştir. Bu durumda elde edilen karmaşıklık matrisi Şekil 5’de verilmiştir.



Şekil 5. Test Verileri Üzerinden En Yüksek Başarımla Elde Edilen Ridge Algoritmasına Ait Karmaşıklık Matrisi

Şekil 5’de sunulan verilere göre, Near Miss az örnekleme tekniği uygulanması durumunda Ridge algoritması kullanılan modelde, sağlıklı bireyler için %100, diyabetli bireyler için %95.5 doğruluk oranları elde edilmiştir. Ayrıca, sağlıklı bireyler için yanlış sınıflandırma yapmayan modelde, diyabetli bireylerin %4.49’u yanlışlıkla sağlıklı olarak sınıflandırılmıştır. Bu bulgular, modelin sağlıklı bireyleri sınıflandırmada çok iyi bir performans gösterdiğini ortaya koymaktadır.

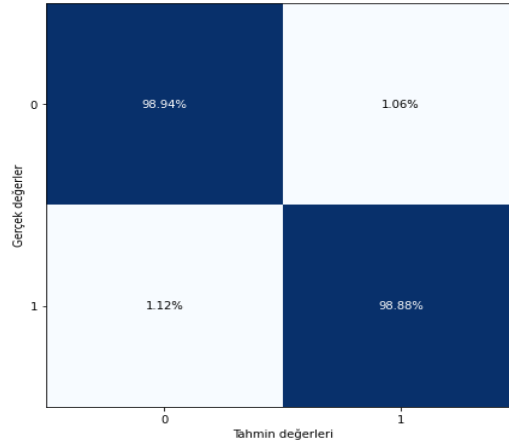
Tablo 4’de veri setine örnekleme tekniklerinin uygulanıp uygulanmama durumları için XGBoost algoritmasının sınıflandırma başarımları gösterilmiştir.

Tablo 4’den açıkça görüldüğü üzere, eğitim verileri için F-skor metriği örnekleme ve fazla örnekleme durumlarında %99.62, az örnekleme durumunda ise %99.55 olarak hesaplanmıştır. Kesinlik metriği örnekleme ve fazla örnekleme durumlarında %99.75, az örnekleme durumunda %99.70 olarak elde edilmiştir.

Tablo 4. XGBoost Algoritması İçin Sınıflandırma Sonuçları

		Orijinal (%)	SMOTE (%)	Near Miss (%)
F-Skor	Eğitim	99,62	99,62	99,55
	Test	98,88	98,88	98,88
Kesinlik	Eğitim	99,75	99,75	99,70
	Test	98,88	98,88	98,88
Duyarlılık	Eğitim	99,50	99,50	99,40
	Test	98,88	98,88	98,88
Doğruluk	Eğitim	99,59	99,62	99,55
	Test	98,91	98,91	98,91

Duyarlılık metriği ise örnekleme ve fazla örnekleme durumlarında %99.50, az örnekleme durumunda %99.40 olarak bulunmuştur. Doğruluk metriği açısından, orijinal veri setiyle %99.59, SMOTE tekniğiyle %99.62 ve Near Miss tekniğiyle %99.55 doğruluk oranlarına ulaşılmıştır. Test verileri üzerinden ise F-skor, kesinlik ve duyarlılık metrikleri örnekleme tekniğinden bağımsız olarak %98.88, doğruluk metriği ise %98.91 olarak hesaplanmıştır. Bu bulgular ışığında, XGBoost algoritmasının hem eğitim hem de test verilerinde yüksek ve tutarlı performans sergilediği, örnekleme tekniklerinin bu performansı önemli ölçüde etkilemediği tespit edilmiştir. Test verileri üzerinden XGBoost algoritmasında en yüksek sınıflandırma başarımının (%98.91) elde edildiği duruma ait karmaşıklık matrisi Şekil 6'da sunulmuştur.

**Şekil 6.** Test Verileri Üzerinden En Yüksek Başarım Elde Edilen Xgboost Algoritmasına Ait Karmaşıklık Matrisi

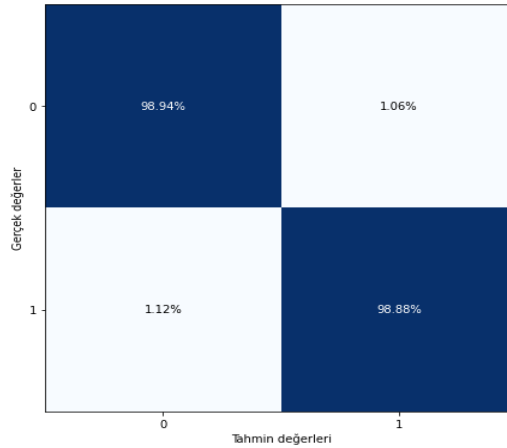
Şekil 6'dan açıkça görüldüğü gibi, örnekleme tekniğinin uygulanma durumundan bağımsız olarak XGBoost algoritması kullanan model, sağlıklı bireyleri %98.94'lük, diyabetli bireyleri %98.88'lik doğruluk oranıyla doğru bir şekilde sınıflandırmıştır. Diyabetli bireyleri yanlışlıkla sağlıklı birey olarak sınıflandırma oranı %1.12 iken, sağlıklı bireyleri yanlışlıkla diyabetli birey olarak sınıflandırma oranı ise %1.06 olarak hesaplanmıştır. Bu bulgular, modelin genel olarak yüksek performans sergileyerek çoğu durumda doğru sınıflandırma gerçekleştirdiğini ortaya koymaktadır.

Tablo 5'de veri setine örnekleme tekniklerinin uygulanıp uygulanmama durumları için EA algoritmasının sınıflandırma başarımleri gösterilmiştir.

Tablo 5. EA Algoritması İçin Sınıflandırma Sonuçları

		Orijinal (%)	SMOTE (%)	Near Miss (%)
F-Skor	Eğitim	99,75	99,75	99,70
	Test	98,88	98,88	98,88
Kesinlik	Eğitim	100	100	100
	Test	98,88	98,88	98,88
Duyarlılık	Eğitim	99,50	99,50	99,40
	Test	98,88	98,88	98,88
Doğruluk	Eğitim	99,73	99,75	99,70
	Test	98,91	98,91	98,91

Tablo 5’de verilen eğitim verilerine ait sonuçlardan, F-skor metriğinin örnekleme ve fazla örnekleme durumlarında %99.75, az örnekleme durumunda ise %99.70 olarak hesaplandığı görülmektedir. Kesinlik metriği tüm durumlarda %100 olarak sabit kalmıştır. Bununla birlikte her bir durum için duyarlılık metriği sırasıyla %99.50, %99.50 ve %99.40 elde edilirken, doğruluk metriği sırasıyla %99.73, %99.75 ve %99.70 olarak hesaplanmıştır. Test verilerine ait sonuçlar incelendiğinde ise örnekleme tekniklerinin uygulanma durumuna bakılmaksızın F-skor, kesinlik ve duyarlılık metrikleri %98.88 olarak, doğruluk metriği ise %98.91 olarak elde edilmiştir. Bu bulgular, EA algoritmasının hem eğitim hem de test verilerinde yüksek performans sergilediğini ortaya koymaktadır. Buna göre test verileri üzerinden EA algoritmasında en yüksek sınıflandırma başarımının (%98.91) elde edildiği duruma ait karmaşıklık matrisi Şekil 7’de verilmiştir.



Şekil 7. Test Verileri Üzerinden En Yüksek Başarım Elde Edilen EA Algoritmasına Ait Karmaşıklık Matrisi

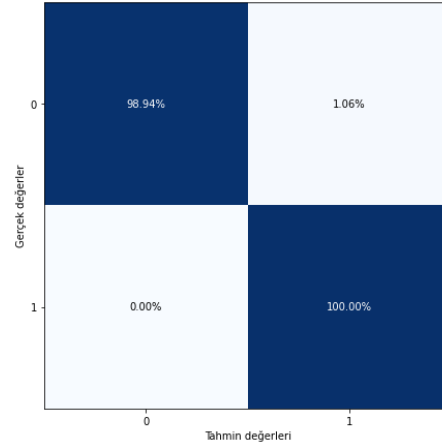
Şekil 7’den açıkça görüldüğü üzere, örnekleme tekniğinin uygulanma durumuna bakılmaksızın EA algoritması kullanan modelin sağlıklı bireyleri doğru sınıflandırma oranı %98.94, yanlış sınıflandırma oranı ise %1.06 olarak belirlenmiştir. Diyabetli bireyler için ise doğru sınıflandırılma oranı %98.88, yanlış sınıflandırma oranı ise %1.12 olarak hesaplanmıştır. Bu durum modelin genellikle doğru sınıflandırma yaptığını göstermektedir.

Tablo 6’da veri setine örnekleme tekniklerinin uygulanıp uygulanmama durumları için GA algoritmasının sınıflandırma başarım metrikleri gösterilmiştir.

Tablo 6. GA Algoritması İçin Sınıflandırma Sonuçları

		Orijinal (%)	SMOTE (%)	Near Miss (%)
F-Skor	Eğitim	99,75	99,75	99,70
	Test	98,88	98,88	99,44
Kesinlik	Eğitim	100	100	100
	Test	98,88	98,88	98,89
Duyarlılık	Eğitim	99,50	99,50	99,40
	Test	98,88	98,88	100
Doğruluk	Eğitim	99,73	99,75	99,70
	Test	98,91	98,91	99,45

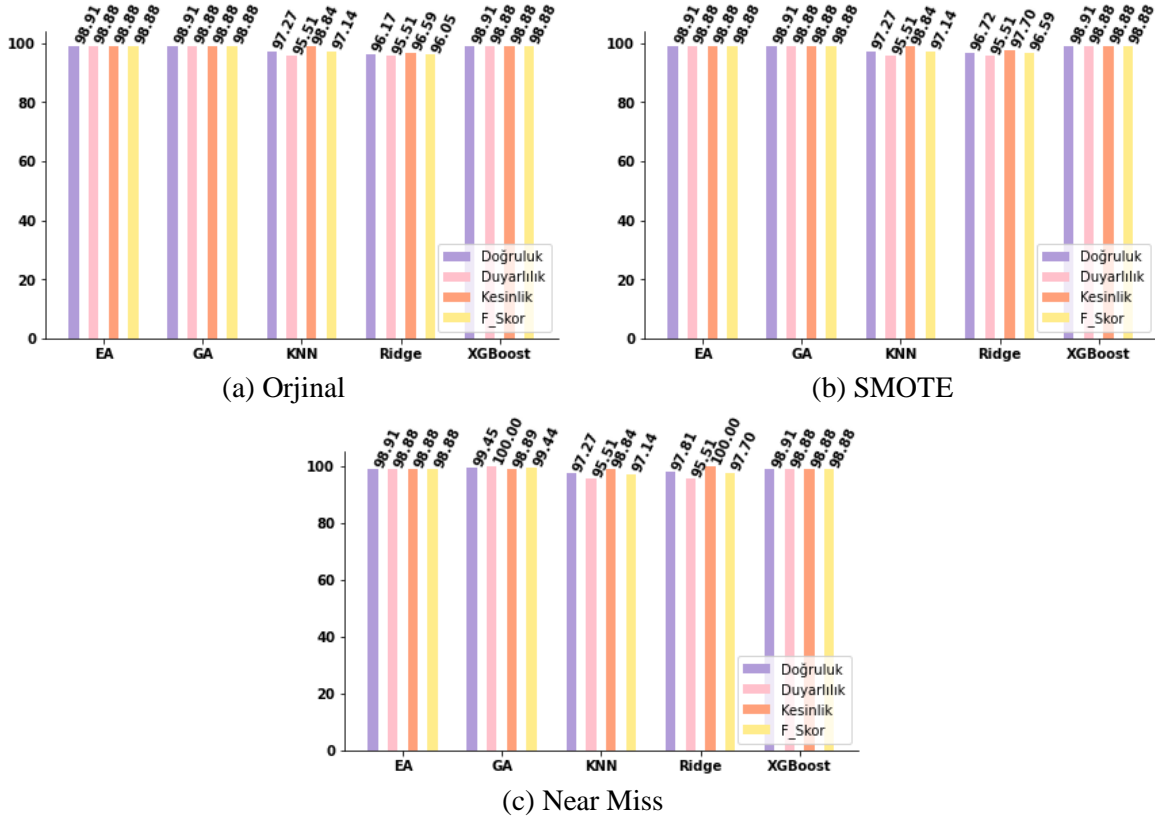
Tablo 6’daki eğitim verileri üzerinden elde edilen sonuçlar incelendiğinde, F-skor değerleri örnekleme ve fazla örnekleme durumlarında %99.75, az örnekleme durumunda ise %99.70 olarak belirlenmiştir. Kesinlik metriği her üç durumda da %100 olarak hesaplanmıştır. Duyarlılık metriği örnekleme ve fazla örnekleme durumlarında %99.50, az örnekleme durumunda %99.40 olarak bulunmuştur. Doğruluk metriği açısından ise, orijinal veri setiyle %99.73, SMOTE uygulanan veri setiyle %99.75 ve Near Miss uygulanan veri setiyle %99.70 doğruluk oranlarına ulaşılmıştır. Bununla birlikte test verileri üzerinden elde edilen sonuçlar incelendiğinde örnekleme ve fazla örnekleme durumları için F-skor, kesinlik ve duyarlılık metrikleri (%98.88) sabitken, doğruluk değeri %98.91 olarak bulunmuştur. Az örnekleme durumunda ise bu metrikler sırasıyla %99.44, %98.86, %100 ve %99.45 olarak elde edilmiştir. Bu bulgular, Near Miss yönteminin GA algoritmasının test verilerindeki performansını olumlu yönde etkilediğini göstermektedir. Şekil 8’de test verileri için GA algoritmasında en yüksek sınıflandırma başarımının (%99.45) elde edildiği duruma ait karmaşıklık matrisi sunulmuştur.



Şekil 8. Test Verileri Üzerinden En Yüksek Başarım Elde Edilen GA Algoritmasına Ait Karmaşıklık Matrisi

Şekil 8'e göre az örnekleme tekniği uygulanan GA algoritmasını kullanan modelin sağlıklı bireyleri doğru sınıflandırma oranı %98.94, yanlış sınıflandırma oranı ise %1.06 olarak belirlenmiştir. Model diyabetli bireyleri yanlış sınıflandırma yapmamıştır. Bu durum modelin diyabetli bireyler için doğru sınıflandırma yaptığını göstermektedir.

Şekil 9'da bireylerin diyabetik durumunun tespitinde kullanılan sınıflandırma algoritmalarının başarımlarının değerlendirilmesi veri setine örnekleme tekniğinin uygulanıp uygulanmaması durumları için tüm performans metrikleri açısından ayrı ayrı gösterilmiştir. Şekilden de açıkça görüldüğü gibi veri setine Near Miss az örnekleme tekniğinin uygulanması durumunda GA algoritması için en yüksek doğruluk değeri (%99.45) elde edilmiştir. Bu örnekleme yöntemi için GA algoritmasına ait duyarlılık, kesinlik ve F-skor metrikleri sırasıyla %100, %98.89 ve %99.44 olarak hesaplanmıştır.



Şekil 9. Diyabet Tahmininde Algoritmaların Başarımlarının Tüm Performans Metrikleri Açısından Yapılan Örnekleme Teknikleri Açısından Değerlendirilmesi a) Orijinal b) SMOTE c) Near Miss

Literatürde MÖ algoritmaları kullanılarak bireylerin diyabetik durumunun tespiti üzerinde çok sayıda çalışma yer almaktadır. Ancak insan vücudunun kompleks yapısı klinik uygulamalarda MÖ algoritmalarının kullanımını sınırlamaktadır (Chen & Pan, 2018). Gerçekleştirilen bu çalışmada açık erişimli güncel bir veri seti kullanılarak bireylerin diyabet risk durumlarının tespitinde MÖ algoritmalarının başarımları incelenmiştir. Çalışma kapsamında elde edilen bulguların önceki çalışmalarla kıyaslanması önem arz etmekte olup, Tablo 7’de bir karşılaştırma tablosu verilmiştir. Tablo 7’den de görüldüğü gibi önerilen algoritma ile elde edilen doğruluk değerinin diğer çalışmalara nazaran daha yüksek olduğu açıkça görülebilmektedir.

Tablo 7. Literatür Karşılaştırması

Yazarlar	Veri Seti	MÖ Algoritması	Başarım
Akyol ve Şen (2018)	Pima Yerlileri diyabet veri seti	Adaboost	%73,88
Jakka ve Vakula Rani (2019)	Pima Yerlileri diyabet veri seti	LR	%77,6
Daghistani ve Alshammari (2020)	Suudi Arabistan'daki bir sağlık kuruluşundan elde edilen veri seti	RO	%88
Shuja vd. (2020)	Kaşmir'deki bir laboratuvarından elde edilen dengesiz bir diyabet veri seti	SMOTE örnekleme yöntemi ve KA	%94,70
Mesquita vd. (2021)	Pima Yerlileri diyabet veri seti	SVM-SMOTE yöntemiyle ve Adaboost	%83,12
Özlüer Başer vd. (2021)	Amerikadaki bir hastaneden elde edilen diyabet veri seti	RO	%84,78
Harman (2021)	Pima Yerlileri Diyabet veri seti	SMOTE örnekleme yöntemi ve DVM	%88
Özkan vd. (2022)	İzmir Bozkaya Eğitim ve Araştırma Hastanesi, Endokrinoloji ve Metabolizma Hastalıkları polikliniğinden alınan veri seti	RO	%84,48
Sevli (2022)	Pima Yerlileri diyabet veri seti	InstanceHardnessThreshold örnekleme yöntemi ve RO	%96,30
Yılmaz vd. (2023)	Bangladeş Sylhet Diyabet Hastanesinde hastalara uygulanan bir anket yöntemi kullanılarak toplanan veri seti	RO	%96
Özoğur ve Orman (2023)	Pima Yerlileri diyabet veri seti	SMOTE-ENN ve MICE örnekleme yöntemleri ve DVM	%90
Korkmaz ve Kaplan (2023)	Pima Yerlileri diyabet veri seti	XGBoost ve LightGBM	%90,01
Önerilen model	Pakistan diyabet veri seti	Near Miss örnekleme yöntemi ve GB	%99,45

TARTIŞMA

Sağlık alanında giderek artan veri hacimleri ve karmaşık bilgi yapıları, MÖ algoritmalarının kullanımına olan ilgiyi büyük ölçüde artırmaktadır. Bu algoritmalar, büyük veri kümeleri arasında ilişkileri belirleyebilmekte, hastalık teşhisi ve prognozlamada önemli bir rol oynayabilmekte ve tedavi yöntemlerinin kişiselleştirilmesine olanak tanımaktadır. Bunun yanı sıra MÖ temelli geliştirilen modeller, tıbbi karar alma süreçlerinde objektif ve veriye dayalı bir yaklaşım sunarak, klinik sonuçları iyileştirmeye ve sağlık hizmetlerini optimize etmeye yardımcı olmaktadır (Chen & Pan, 2018). Gerçekleştirilen bu çalışmada, dünya çapında yaygın olarak karşılaşılan ve insidansı giderek artan diyabet hastalığının erken teşhisi için MÖ algoritmaları ile örnekleme yöntemlerinin birleştirildiği bir model önerilmiştir. Modelde MÖ algoritması olarak literatürde diyabet tanısında sıklıkla tercih edilen KNN, Ridge, XGBoost, EA ve GA algoritmaları kullanılmıştır. Ayrıca, örnekleme yöntemleri olarak SMOTE (Sentetik Azaltma Tekniği) ve Near Miss yöntemleri uygulanmıştır. Elde edilen bulgular, farklı MÖ algoritmalarının diyabet sınıflandırılmasındaki performanslarını değerlendirmek için çeşitli örnekleme yöntemlerinin kullanılabilceğini göstermektedir. Özellikle GA algoritmasının Near Miss alt örnekleme yöntemi ile en iyi performansa sahip olduğu tespit edilmiştir. Bu bulgu, diyabet sınıflandırmasında örnekleme tekniklerinin etkilerini ele almanın önemini vurgulamaktadır. Özellikle, diyabetin erken teşhisi ve doğru sınıflandırılması, hastaların tedavi ve yönetiminde kritik bir öneme sahiptir. Bu bağlamda, elde edilen sonuçlar sağlık uzmanlarına ve

araştırmacılara, diyabet tanısında MÖ algoritmalarının potansiyelini değerlendirme konusunda yol gösterici olacağı düşünülmektedir. Ancak çalışmada veri ön işleme aşamalarında yüksek hesaplama yükü ve zaman maliyeti gibi zorluklarla karşılaşmıştır. Gelecek çalışmalarda, hibrit öznelik seçimi yöntemlerinin kullanılması, hiperparametre optimizasyon tekniklerinin uygulanması ve veri artırma yöntemlerinin entegre edilmesi önerilmektedir. Bu iyileştirmeler, modelin performansını artırmak ve genellenabilirliğini sağlamak adına önemli katkılar sunabilir. Ayrıca, daha geniş ve çeşitli veri setleri kullanılarak modelin farklı veri dağılımlarına karşı dayanıklılığı artırılabilir. Bu tür yaklaşımlar, diyabet teşhisi ve yönetiminde MÖ algoritmalarının etkinliğini ve doğruluğunu artırabilir.

KAYNAKLAR

- Alehegn, M., Raghvendra Joshi, R., & Mulay, P. (2019). Diabetes Analysis And Prediction Using Random Forest, KNN, Naïve Bayes, And J48: An Ensemble Approach. *International Journal of Scientific & Technology Research*, 8(9), 1346-1354.
- Akyol, K., & Şen, B. (2018). Diabetes Mellitus Data Classification by Cascading of Feature Selection Methods and Ensemble Learning Algorithms. *International Journal of Modern Education and Computer Science*, 10(6), 10-16. <https://doi.org/10.5815/ijmeecs.2018.06.02>
- Dal, A., Gümü, İ. H., Güldal, S. & Yavaş, M. (2021). Dengesiz Veriler İçin Ağırlıklı Geometrik Ortalama Tabanlı Yeni Bir Yeniden Örnekleme Yaklaşımı, *Adıyaman Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 8 (15), 343-352. <https://doi.org/10.54365/adyumbd.940539>
- Daghistani, T., & Alshammari, R. (2020). Comparison of statistical logistic regression and randomforest machine learning techniques in predicting diabetes. *Journal of Advances in Information Technology*, 11(2), 78-83. <https://doi.org/10.12720/jait.11.2.78-83>
- Das, H., Naik, B., & Behera, H. S. (2018). Classification of diabetes mellitus disease (DMD): A data mining (DM) approach. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 710, 539-549. Springer Verlag. https://doi.org/10.1007/978-981-10-7871-2_52
- Hacıbeyoğlu, M., Çelik, M., & Erdaş Çiçek, Ö. (2023). En Yakın Komşu Algoritması ile Binalarda Enerji Verimliliği Tahmini. *Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 5(2), 28-37. <https://doi.org/10.47112/neufmbd.2023.10>
- Harman, G. (2021). Destek vektör makineleri ve naive bayes sınıflandırma algoritmalarını kullanarak diyabet mellitus tahmini. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (32), 7-13. <https://doi.org/10.31590/ejosat.1041186>
- IDF Diabetes Atlas. Diabetes around the world in 2021. <https://diabetesatlas.org/> Accessed 04.04.2024
- Jakka, A., & Vakula Rani, J. (2019). Performance evaluation of machine learning models for diabetes prediction. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering*, 8(11), 1976-1980. <https://doi.org/10.35940/ijitee.K2155.0981119>
- Kaggle. Pakistani Diabetes Dataset. (2024). <https://www.kaggle.com/datasets/mshoaibishaaq/pakistani-diabetes-dataset> Accessed 04.04.2024
- Korkmaz, M., & Kaplan, K. (2023). Şeker hastalığı teşhisi ve önerilen modellerinin karşılaştırılması. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 12(1), 1-1.
- Mesquita, F., aurício, J., & Marques, G. (2021). Oversampling techniques for diabetes classification: A comparative study. In 2021 International Conference on e-Health and Bioengineering (EHB) (pp. 1-6). IEEE.
- Mqadi, N. M., Naicker, N., & Adeliyi, T. (2021). Solving misclassification of the credit card imbalance problem using near miss. *Mathematical Problems in Engineering*, 2021, 1-16. <https://doi.org/10.1155/2021/7194728>
- Mohammed, R., Rawashdeh, J., & Abdullah, M. (2020). Machine learning with oversampling and undersampling techniques: overview study and experimental results. In 2020 11th international conference on information and communication systems (ICICS) (pp. 243-248). IEEE.
- Özüler Başer, B., Yangın, M., & Sarıdaş, E. S. (2021). Makine Öğrenmesi Teknikleriyle Diyabet Hastalığının Sınıflandırılması. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 25(1), 112-120. doi: 10.19113/sdufenbed.842460

- Özoğur, H. N., & Orman, Z. (2023). Sağlık Verilerinin Analizinde Veri Ön İşleme Adımlarının Makine Öğrenmesi Yöntemlerinin Performansına Etkisi. *Türkiye Bilişim Vakfı Bilgisayar Bilimleri ve Mühendisliği Dergisi*, 16(1), 23-33.
- Öztürk, H. (2022). Dengesiz veri setlerinde farklı dengeleme algoritmalarının optimum denge oranlarının sınıflandırma ve regresyon ağaçları yöntemi ile incelenmesi: simülasyon çalışması. Doktora Tezi. Aydın Adnan Menderes Üniversitesi Sağlık Bilimleri Enstitüsü Biyoistatistik, Aydın 88s.
- Özkan, Y., Yürekli, B. S., & Suner, A. (2022). Diyabet tanısının tahminlenmesinde denetimli makine öğrenme algoritmalarının performans karşılaştırması. *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 12(1), 211-226. <https://doi.org/10.17714/gumusfenbil.820882>
- Sungur, F., & Bakır, H. (2024). Hiperparametre ayarlama ve veri dengelemenin kalp hastalığı tahmini için kullanılan makine öğrenimi algoritmaları üzerindeki etkilerinin incelenmesi. *Bilişim Teknolojileri Dergisi*, 17(1), 45-58. <https://doi.org/10.17671/gazibtd.1399813>
- Sevli, O. (2022). Diyabet hastalığının farklı sınıflandırıcılar kullanılarak teşhisi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 38(2), 989-1002. <https://doi.org/10.17341/gazimmfd.880750>
- Shuja, M., Mittal, S., & Zaman, M. (2020). Effective prediction of type ii diabetes mellitus using data mining classifiers and SMOTE. In *Advances in Computing and Intelligent Systems: Proceedings of ICACM 2019* (pp. 195-211). Springer Singapore.
- Turan, T. (2023). Makine Öğrenmesi Algoritmaları İle Su Kalitesi Ve İçilebilirlik Tahmini. *Uluborlu Mesleki Bilimler Dergisi*, 6(2), 65-80.
- Türkmenoğlu, B. K., & Yıldız, O. (2021). Predicting the survival of heart failure patients in unbalanced data sets. In *2021 29th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU)* (pp. 1-4). IEEE.
- Turhan S., Özkan, Y., Yürekli, B. S., Suner, A., & Doğu, E. (2020). Comparison of Ensemble Learning Methods for Disease Diagnosis in Presence of Class Unbalanced: Case of Diabetes. *Turkiye Klinikleri Journal of Biostatistics*, 12(1), 16-26. <https://doi.org/10.5336/biostatic.2019-66816>
- Uğurgöl, E., Batbat, T., Yeşilbas, D., Altınkaynak, M., Güven, A., Demirci, E., & Dolu, N. (In press) Doğrusal olmayan EEG dinamikleri ile anksiyete tespiti. *Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 13(2), 1-1. <https://doi.org/10.28948/ngumuh.1359809>
- WHO. Diabets. (2024). https://www.who.int/health-topics/diabetes#tab=tab_1 Accessed 04.04.2024
- Yılmaz, H., Buldu, A., Kaya, Y., & Kuncan, F. (2023). Yapay Zeka Yöntemleriyle Erken Evre Diyabet Risk Tahmini. *Journal of Scientific Reports-B*, (007), 59-71.
- Yakut, G., Çay, R. İ., & Öztürk, H. H. (2023). Makine Öğrenimi Teknikleri Kullanılarak Isparta İli İçin Tarımsal Ürün Önerme Sistemi. *Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 9(4-ICAIAME 2023), 174-185. <https://doi.org/10.30855/gmbd.0705S17>
- Yavaş, M., Güran, A., & Uysal, M. (2020). Covid-19 veri kümesinin SMOTE tabanlı örnekleme yöntemi uygulanarak sınıflandırılması. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 258-264. <https://doi.org/10.31590/ejosat.779952>



Kahramanmaraş Sütçü İmam University

Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 09.04.2024
Kabul Tarihi : 23.05.2024

Received Date : 09.04.2024
Accepted Date : 23.05.2024

DEPREM SEVİYE SINIFLANDIRMASI İÇİN HİBRİT BİR CONVLSTM MODELİ: KARŞILAŞTIRMALI BİR ANALİZ

A HYBRID CONVLSTM MODEL FOR EARTHQUAKE LEVEL CLASSIFICATION: A COMPARATIVE ANALYSIS

Anıl UTKU¹ (ORCID: 0000-0002-7240-8713)

¹ Munzur Üniversitesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Tunceli, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Anıl UTKU, anilutku@munzur.edu.tr

ÖZET

Deprem, yer kabuğunda depolanan enerjinin açığa çıkması sonucu yer yüzeyinin aniden sarsılmasıdır. Depremler genellikle yer altı kayalarının aniden kırılması ve bir fay boyunca hızlı itmesi nedeniyle meydana gelir. Binaların ve altyapının düzgün inşa edilmediği ve nüfusun hazırlıklı olmadığı bir ortamda, orta şiddette bile olsa bir deprem yıkıcı olabilir. Yapay zekâ yöntemleri, deprem tahmini gibi doğal afetlerin öngörülmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Bu amaçla geliştirilen hibrit ConvLSTM modeli ile yer kabuğundaki karmaşık enerji dinamikleri ve hareketleri, büyük miktardaki jeolojik verilerden analiz edilerek deprem olasılıklarının tahmin edilmesi amaçlandı. ConvLSTM, LR, RF, SVM, XGBoost, MLP, CNN ve LSTM gibi popüler yöntemlerle USGS tarafından sunulan gerçek zamanlı deprem verileri kullanılarak karşılaştırıldı. Deneysel sonuçlar, ConvLSTM'in 0,9951 doğruluk ve 0,9993 AUC ile karşılaştırılan modellerden daha başarılı olduğunu göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Deprem, derin öğrenme, makine öğrenmesi, cnn, lstm

ABSTRACT

An earthquake is a sudden shaking of the earth's surface as a result of the release of energy stored in the earth's crust. Earthquakes usually occur due to sudden breaking of underground rocks and rapid movement along a fault. In an environment where buildings and infrastructure are not properly constructed and the population is not prepared, an earthquake of even moderate intensity can be devastating. Artificial intelligence methods play an important role in predicting natural disasters, such as earthquake prediction. The hybrid ConvLSTM model developed for this purpose aimed to predict earthquake probabilities by analyzing complex energy dynamics and movements in the earth's crust from large amounts of geological data. ConvLSTM was compared with popular methods such as LR, RF, SVM, XGBoost, MLP, CNN and LSTM using real-time earthquake data provided by USGS. Experimental results showed that ConvLSTM outperformed the compared models with 0.9951 accuracy and 0.9993 AUC.

Keywords: Earthquake, deep learning, machine learning, cnn, lstm

GİRİŞ

Depremler, dünya çapında birçok insanın can ve mal kaybı yaşamasına neden olan doğal afetlerdir (Chaudhary ve Piracha, 2021). Depremler yer sarsıntısı, toprağın sıvılaşması, heyelan, yeryüzünde çatlak, çığ ve tsunami gibi durumlara da neden olabilir. Depremlerin sebep olduğu hasar depremin büyüklüğü, yoğunluğu, süresi, toprak yapısı, zamanı, binalarda kullanılan malzeme kalitesi ve afet yönetimi gibi faktörlere bağlıdır (Shafapourtehrany vd., 2023). Deprem sırasında, yer kabuğunda biriken enerji aniden serbest kalarak kaya kütlelerinin fay hatları boyunca hızla hareket etmesine ve yer değiştirmesine neden olur (Bytchkov, 2024). Bu hareket, S ve P sismik dalgaları şeklinde yeryüzünde yayılan titreşimler üretir. S dalgaları, titreşimlerin dalga yayılma yönüne dik olarak hareket etmesine neden olur (He vd., 2020). S dalgaları, yatay sarsıntının meydana gelmesini sağlar. Deprem esnasında ilk olarak hissedilen ve ilk ani sarsıntıya neden olan P dalgaları ise titreşimlerin dalga yayılımıyla aynı yönde hareket etmesini sağlar (Zakka vd., 2024).

Sismograf ve Richter ölçeği, depremleri karakterize etmek için kullanılan araçlardır. Sismograf, depremlerin neden olduğu titreşimleri veya yer hareketlerini ölçmek ve kaydetmek için kullanılan bir cihazdır (Huang vd., 2022). Sismograf depremin yoğunluğu, süresi ve sıklığı hakkında bilgi vermektedir. Richter ölçeği ise sismograflar tarafından kaydedilen deprem dalgalarını analiz ederek depremin büyüklüğünü ölçmektedir (Giridhar vd., 2021).

Ülkemizde 6 Şubat 2023 tarihinde Kahramanmaraş'ın Pazarcık ve Elbistan ilçelerinde 9 saat arayla meydana gelen 7.7 ve 7.6 büyüklüğündeki depremler, 11 ilde 53 binden fazla kişinin hayatını kaybetmesine ve 107 binden fazla kişinin yaralanmasına neden oldu. Ayrıca 17 Ağustos 1999'da Kocaeli'nin Gölcük ilçesinde meydana gelen 7.4 büyüklüğündeki deprem, 17 binden fazla insanın hayatını kaybetmesine ve 44 bine yakın insanın yaralanmasına neden oldu. Deprem kuşağında bulunan ülkemizde, depreme yönelik acil durum planlamalarının geliştirilmesi, yerel yönetimler ve ilgili kurumlar tarafından bina kontrollerinin yapılması ve yapı denetim süreçlerinin kontrolüyle birlikte depremlerde yaşanabilecek can ve mal kayıpları engellenebilir.

Depremler, her yıl küresel ölçekte önemli sayıda can kayıplarına ve büyük maddi hasarlara yol açan, son derece yıkıcı doğal afetlerdir (Nievas vd., 2020). Depremler meydana gelmeden önce ve depremlerden sonrasında yönelik etkin stratejiler geliştirmek ve afet yönetimi bilincini yaygınlaştırmak, depremin etkilerinin azaltılması ve güvenliğin sağlanması açısından önemlidir (Priyadi vd., 2021). Depremlerin, önceden tahmin edilmesine yönelik çalışmalar uzun yıllardır devam etmektedir. Depremleri tahmin etmek için kullanılan geleneksel modeller sınırlı verilerle iyi çalışırken, günümüzde mevcut olan devasa sismoloji verisetleri üzerinde yeterince başarılı olamamaktadır. Bu sebeple yapay zekâ yöntemleri, deprem tahmininde ön plana çıkmaktadır. Depremlerin meydana gelmeden önce tespit edilmesi, deprem başlamadan kısa bir süre önce etkilenmesi muhtemel bölgelere mobil cihazlar aracılığıyla bildirim gönderilmesini ve bu sayede çeşitli önlemlerin alınmasını ifade eder (Colombelli vd., 2020). Faya yakın sismometreler tarafından depremin enerjisi tespit edilerek yapay zekâ yöntemleri ile depremin olası boyutu belirlenebilir. Sunulabilecek erken uyarılar, insanların güvenli alanlara gidebilmelerine, elektrik ve doğal gaz gibi tehlike oluşturabilecek enerji hatlarının kontrol edilebilmesine ve acil durum planlarının devreye sokulmasını sağlayabilir.

Bu çalışmada, depremlerin dünyanın neresinde ve hangi tarihte gerçekleşeceğini tahmin etmek amacıyla hibrit bir ConvLSTM modeli geliştirildi. Çalışmada, Amerika Birleşik Devletleri Jeoloji Araştırmaları Kurumu (United States Geological Survey - USGS) tarafından sunulan 27 Aralık 2023 ile 26 Ocak 2024 tarihleri arasında dünya genelinde meydana gelen 9451 depremden oluşan bir veriseti kullanıldı. CNN ve LSTM'in öne çıkan özelliklerinden faydalanmak amacıyla geliştirilen ConvLSTM modeli, geleneksel makine öğrenmesi ve derin öğrenme modelleriyle uygulamalı olarak karşılaştırıldı.

Bu çalışmanın literatüre olan katkıları aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Depremlerin meydana gelme zamanlarını ve nerede meydana gelebileceklerini daha yüksek bir doğrulukta tahmin edebilmek amacıyla hibrit bir derin öğrenme modeli geliştirildi.
- USGS tarafından sunulan ve 9451 depremden oluşan, güncel bir veriseti kullanıldı. Literatürde bu veriseti kullanılarak yapılmış bir çalışma yoktur.
- ConvLSTM'in etkinliği Random Forest (RF), Logistic Regression (LR), Support Vector Machine (SVM), Convolutional Neural Network (CNN), eXtreme Gradient Boosting (XGBoost), Multi-Layer Perceptron (MLP) ve Long-Short Term Memory (LSTM) gibi makine öğrenmesi ve derin öğrenme modelleriyle karşılaştırıldı.

İLGİLİ ÇALIŞMALAR

Bu bölümde, makine öğrenmesi ve derin öğrenme yöntemleri kullanılarak yapılmış literatürdeki çalışmalar incelenmiştir.

Ommi ve Hashemi, kuzey Zagros bölgesinin deprem olasılıklarının belirlenmesine yönelik Artificial Neural Network (ANN), RF ve SVM'in karşılaştırmalı bir analizini sunmuştur (Ommi ve Hashemi, 2022). Çalışmada 1995-2022 yılları arasındaki sismik veriler kullanılmıştır. Deneysel sonuçlar, ANN'in sismik olayların yaklaşık %97'sini doğru bir şekilde tahmin ederek karşılaştırılan yöntemlerden daha başarılı olduğunu göstermiştir.

Utku ve Akcayol, deprem zamanlarının tahminine yönelik hibrit CNN-GRU modelini önermiştir (Utku ve Akcayol, 2024). Önerilen model, RF, ARIMA, CNN ve GRU ile karşılaştırılmıştır. Çalışmada, 1965-2016 yılları arasındaki deprem verileri kullanılmıştır. Depremlerin meydana gelme zamanları arasındaki süre farkları kullanılarak bir sonraki depremin meydana gelme zamanının tahmin edilmesi amaçlanmıştır. Deneysel sonuçlar, önerilen hibrit modelin karşılaştırılan modellerden daha düşük hata oranlarına sahip olduğunu göstermiştir.

Zhou vd. binaların depremde hasar görme durumlarının tahminine yönelik çoklu doğrusal regresyon, SVM ve Back Propagation Neural Network modellerinin uygulamalı bir analizini sunmuştur (Zhou vd., 2024). Çalışmada Ludian depreminin binalara verdiği hasar verilerinden oluşan bir veri seti kullanılmıştır. Kullanılan veri seti yapı kategorisi, topoğrafik durum ve sismik parametrelerden oluşmaktadır. Deneysel sonuçlar, Back Propagation Neural Network modelinin 0,05'ten daha düşük RMSE değeriyle karşılaştırılan modellerden daha başarılı olduğunu göstermiştir.

Sadhukhan vd. Japonya, Endonezya ve Hindu-Kush Himalaya bölgelerinin sismik verilerini kullanarak deprem büyüklüğünün tahminine yönelik LSTM tabanlı bir model geliştirmiştir (Sadhukhan vd., 2023). Çalışmada Bi-directional Long Short-Term Memory (Bi-LSTM), transformatör model ve LSTM'in uygulaması sunulmuştur. Deneysel sonuçlar, LSTM'in Japonya için 0,06 Mean Absolute Error (MAE), Bi-LSTM'in Endonezya için 0,073 ve transformatör modelin Hindu-Kush Himalaya bölgesi için 0,062 MAE değerine sahip olduğunu göstermiştir.

Kavianpour vd. depremlerin büyüklük ve meydana gelme sayılarını tahmin etmek amacıyla CNN-Bi-LSTM modelini önermiştir (Kavianpour vd., 2023). Çalışmada, Çin'deki farklı bölgelerden elde edilen bir veri seti kullanılmıştır. LR, CNN, LSTM, MLP, RF ve SVM'in sonuçları önerilen modelle karşılaştırılmıştır. Deneysel sonuçlar, önerilen modelin karşılaştırılan modellerden daha başarılı olduğunu göstermiştir.

Abebe vd. Afrika boynuzu bölgesindeki deprem büyüklüklerini tahmin etmek amacıyla Bi-LSTM ve transformatör modellerini kullanarak hibrit bir model geliştirmiştir (Abebe vd., 2023). Geliştirilen modelin sonuçları, Bi-LSTM ve LSTM ile karşılaştırılmıştır. Deneysel sonuçlar, geliştirilen hibrit modelin 0,276 MAE değeriyle karşılaştırılan modellerden daha başarılı olduğunu göstermiştir.

Muhammad vd. deprem tahminine yönelik Deep Neural Network (DNN) tabanlı bir model sunmuştur (Muhammad vd., 2023). Veri seti olarak Şili, Hindukuş ve Güney Kaliforniya'nın sismik verileri kullanılmıştır. Çalışmada geliştirilen modelin sonuçları RF, SVM ve LR ile karşılaştırılmıştır. Deneysel sonuçlar, geliştirilen derin sinir ağı modelinin Şili, Hindukuş ve Güney Kaliforniya veri setleri için sırasıyla %98,28, %95,13 ve %99,29 doğruluk değerleriyle karşılaştırılan modellerden daha başarılı olduğunu göstermiştir.

Sadhukhan vd. depremler ile küresel sıcaklıklar arasındaki ilişkiyi belirlemek için derin öğrenme tabanlı karşılaştırmalı bir analiz sunmuştur (Sadhukhan vd., 2022). Çalışmada, Gated Recurrent Unit (GRU), Bi-LSTM, Recurrent Neural Network (RNN) ve LSTM ve modellerinin sonuçları karşılaştırılmıştır. Deneysel sonuçlar, LSTM'in 0,31 MAE değeriyle karşılaştırılan modellerden daha başarılı olduğunu göstermiştir.

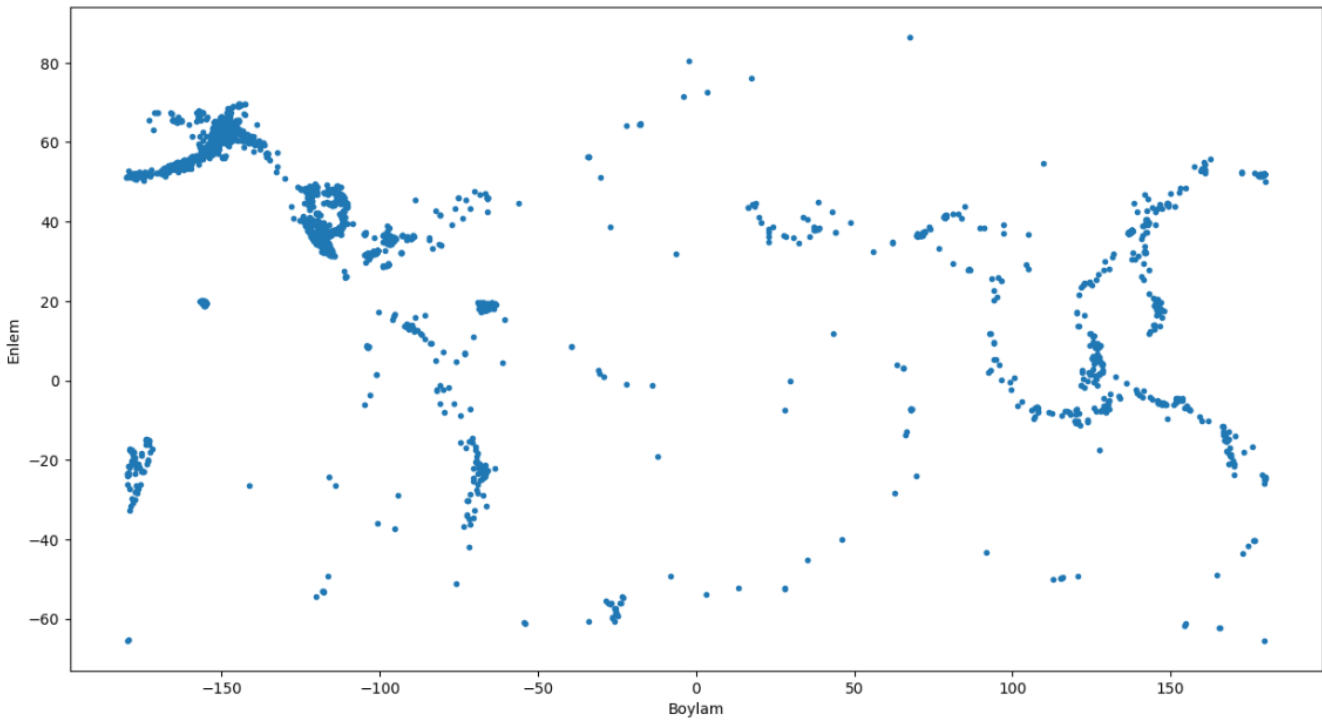
Abri ve Artuner, depremler ile iyonosfer arasındaki ilişkilere göre deprem tahmini yapabilmek amacıyla LSTM tabanlı bir model geliştirmiştir (Abri ve Artuner, 2022). Çalışmada, GPS istasyonlarından elde edilen 2012-2019 yılları arasındaki depremlerin toplam elektron içeriği (Total Electron Content-TEC) değerleri kullanılmıştır. Geliştirilen LSTM tabanlı tahmin modeli RF, SVM ve Linear Discriminant Analysis (LDA) ile karşılaştırılmıştır. Deneysel sonuçlar, LSTM'in deprem tespitinde 0,82 doğruluk oranıyla makine öğrenmesi modellerinden daha başarılı olduğunu göstermiştir.

MATERYAL VE METOT

Bu çalışmada, CNN ve LSTM modelleri kullanılarak hibrit ConvLSTM modeli geliştirilmiştir. Geliştirilen model, USGS tarafından sağlanan gerçek zamanlı bir deprem veriseti üzerinde, geleneksel makine öğrenmesi ve derin öğrenme modelleriyle kapsamlı olarak karşılaştırılmıştır. Ayrıca verisetinin genel yapısını anlamak, görselleştirmek ve öznitelikler arasındaki ilişkileri sunabilmek amacıyla veriseti üzerinde çeşitli analizler yapılmıştır.

Veriseti

Kullanılan veriseti, zaman, konum, büyüklük ve derinlik gibi 22 öznitelikten oluşmaktadır. Verisetinde 27 Aralık 2023 - 26 Ocak 2024 tarihleri arasında dünya genelinde meydana gelen 9451 depreme ait veriler bulunmaktadır (USGS Earthquakes, 2024). Verisetinde, tarih, enlem, boylam, depremin derinliği, büyüklüğü, deprem büyüklüğünü belirlemek için kullanılan ölçek, depremin yerini belirlemek için kullanılan sismik istasyonların sayısı, bitişik istasyonlar arasındaki mesafe, sismik olayın merkez üstünden en yakın istasyona olan mesafe, sismik olayın coğrafi konumu ve bir kimlik numarası bulunmaktadır. Ayrıca istasyonlar arası seyahat süresi, sismik olayın türü, sismik olayın konumunu ve büyüklüğünü ilk raporlayan ağ, kilometre cinsinden konumun belirsizliği, derinlik ve büyüklük hatası, büyüklüğü hesaplamak için kullanılan sismik istasyon sayısı ve sismik olayın uzmanlar tarafından incelenip incelenmediğini belirten durum öznitelikleri bulunmaktadır. Şekil 1'de belirtilen tarihler arasındaki depremlerin enlem ve boylamlarına göre konumları görülmektedir.



Şekil 1. Enlem ve Boylamlarına Göre Depremlerin Konumları

Şekil 2'de verisetinde bulunan konumlara göre meydana gelen depremler ve büyüklükleri görülmektedir.

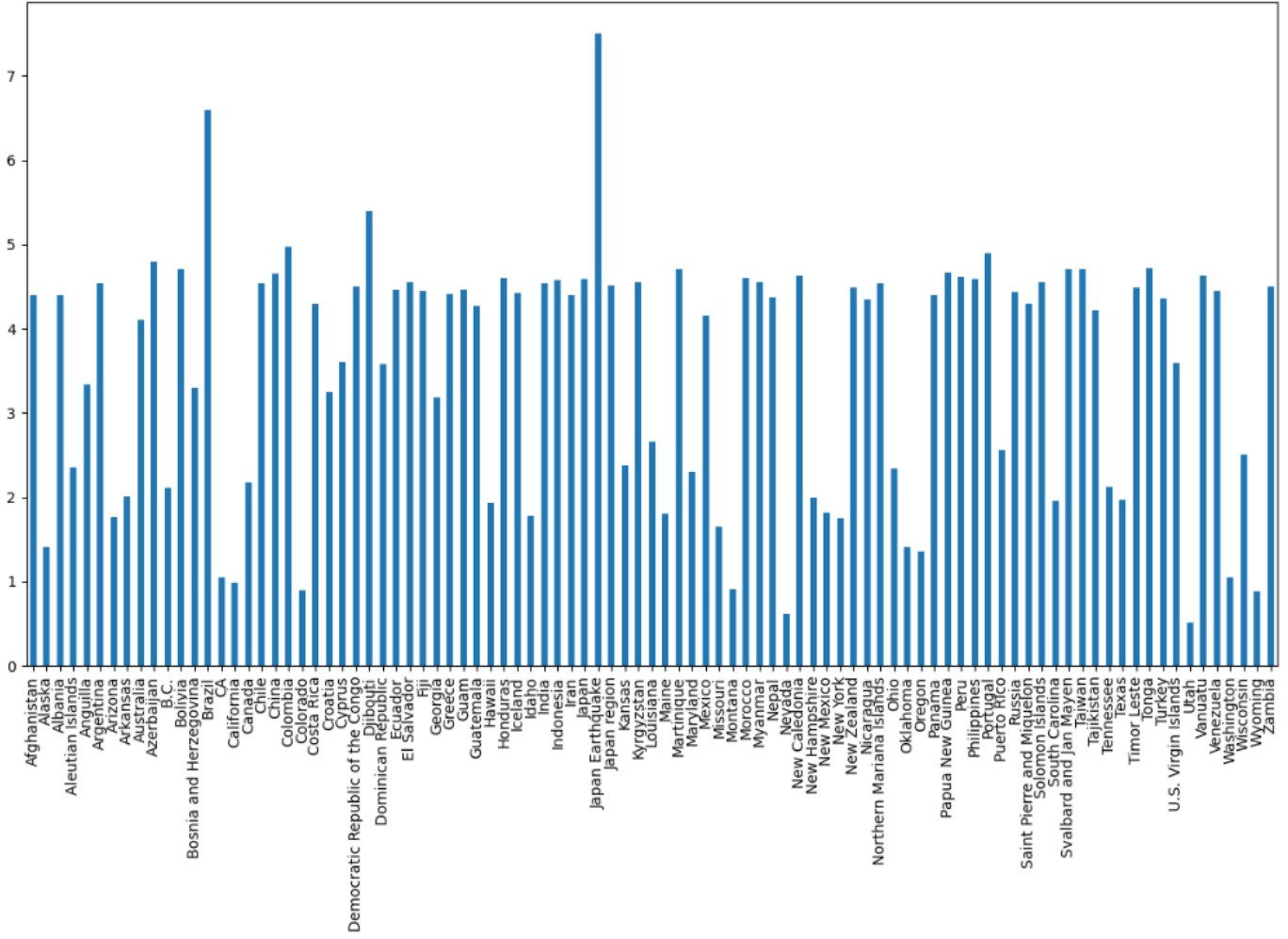
Şekil 3'te en büyük 10 deprem ve konumları görülmektedir.

Veri Ön-İşleme

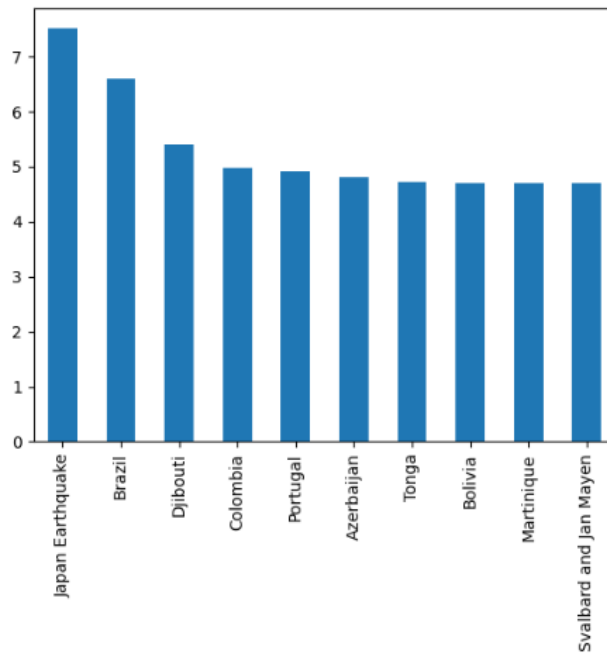
Veri ön-işleme aşamasında, verisetindeki tarih, enlem, boylam, derinlik, büyüklük ve konum öznitelikleri seçilerek öznitelik boyutu azaltılmıştır. Örnek olarak verisetinin ilk 5 satırı Tablo 1'de görülmektedir.

Tablo 1. Veriseti

Tarih	Enlem	Boylam	Derinlik	Büyükük	Konum
2023-12-27	54.761900	-164.065400	7,443	3,00	Alaska
2023-12-27	43.462200	16.286000	10,000	2,70	Croatia
2023-12-27	54.748000	-164.104667	4,200	0,67	Alaska
2023-12-27	54.771700	-164.123600	9,669	3,60	Alaska
2023-12-27	18.097333	-66.835500	18,310	2,14	Puerto Rico



Şekil 2. Verisetinde Bulunan Konumlara Göre Meydana Gelen Depremler ve Büyüklükleri



Şekil 3. En Büyük 10 Deprem ve Konumları

Depremler, büyüklüğü 2,5'den büyük olanlar tehlikeli (1), 2,5'den küçük olanlar ise tehlikesiz (0) olarak etiketlenmiştir. Verisetinin %80'i modellerin eğitimi için %20'si ise modellerin testi için kullanılmıştır. Eğitim verilerinin %10'u ise model hiper-parametrelerinin optimize edilmesi amacıyla doğrulama için ayrılmıştır. Doğrulama verileri, her bir modelin en iyi sonuçları elde edeceği hiper-parametrelerin belirlenmesi amacıyla kullanılmıştır. Grid arama ile modellerin hiper-parametreleri belirlenmiştir. Modellerin hiper-parametreleri Tablo 2'de görülmektedir.

Tablo 2. Modellerin Hiper-Parametreleri

Model	Hiper-parametreler
LR	C: 100, penalty: l2
RF	n_estimators: 200, max_depth: 7, criterion: gini, max_features: auto
SVM	C: 1000, gamma: 0.001, kernel: rbf
XGBoost	max_depth: 7, subsample: 0.5, n_estimators: 60, learning_rate: 0.1
MLP	hidden_layer_sizes: (5,2), activation: relu, max_iter: 200, solver: adam
CNN	Conv1D filters: 64, activation: ReLU, kernel_size:3, pool_size:2
LSTM	number_of_neurons: 64, activation: sigmoid, optimizer: adam, epoch:50, batch_size: 16
ConvLSTM	kernel_size:3, Conv1D filters: 64, activation: ReLU, pool_size:2, number_of_neurons: 64, activation: sigmoid, optimizer: adam, epoch:80, batch_size: 4

Sınıflandırma Yöntemleri

LR, bağımlı değişkenlerle bağımsız değişkenler arasındaki ilişkiyi belirlemek için kullanılan bir yöntemdir (Gomilla, 2021). Lojistik bir modelde kategorik bir sonuç değişkeninin olasılığı bir veya daha fazla öngörücü sürekli değişken temelinde modellenir. Değişkenler arasında doğrusal olmayan bir ilişki söz konusudur. Bağımlı değişken, sonuç olasılıklarının logaritmasının hesaplanmasını içeren bir dönüşüme tabi tutulur (Backhaus vd., 2023).

RF, daha doğru tahminlere ulaşmak için birden fazla karar ağacından oluşan bir topluluk oluşturan bir makine öğrenmesi algoritmasıdır (Utku, 2023). Oluşturduğu orman, torbalama yöntemiyle eğitilmiş karar ağaçları topluluğudur. Bu yöntem, model kombinasyonlarının genel sonucun doğruluğunu arttırmasını ifade etmektedir. RF, ağaçları oluştururken modele rastgelelik eklemektedir. Dğümleri bölerken rastgele bir özellik alt kümesi arasındaki en iyi özelliği arar (Zhou ve Mentch, 2023).

SVM, N boyutlu bir özellik uzayındaki farklı sınıflardaki veri noktalarını ayırabilen en uygun hiperdüzlemi bulmayı amaçlamaktadır (Cervantes vd., 2020). Hiperdüzlem, sınıfların birbirlerine en yakın noktaları arasındaki marjın, en büyük olmasını sağlamayı amaçlanmaktadır. Hiperdüzlemin boyutu, özelliklerin sayısına bağlıdır. SVM, giriş verilerini daha yüksek boyutlu bir özellik alanına dönüştürmek için çekirdek işlevini kullanır (Chandra ve Bedi, 2021). Çekirdek işlevi, verileri orijinal özellik alanından çekirdek alanına eşlemeyi mümkün kılar. SVM eğitildikten sonra karar sınırının hangi tarafına düştüklerini belirleyerek görülmemiş veri noktalarını sınıflandırabilir.

XGBoost, karar ağaçlarından oluşan zayıf öğrencilerin tahminlerini bir araya getirerek güçlü bir tahmin modeli oluşturur. Her zayıf öğrencinin, öncekilerin hatalarını düzeltmesini sağlayarak doğru bir topluluk modeli oluşturmak için bir güçlendirme tekniği kullanır (Ali vd., 2023). Hataların gradyanlarına göre modelin parametrelerini değiştirerek maliyet fonksiyonunu en aza indirir. XGBoost, yeni bir düğüm eklemenin her düzeyde bir bütün olarak amaç fonksiyonunu geliştirip geliştirmediğini değerlendirerek ağaçları seviye bazında veya genişlik öncelikli olarak oluşturur (Amjad vd., 2022). XGBoost, her seviyedeki her özellik için yapılabilecek her bölmeyle değerlendirir ve amaç fonksiyonunu mümkün olduğu kadar en aza indiren seçer. XGBoost, tüm özellikleri aynı anda dikkate alarak ağaç oluşturma esnasında aynı özelliğin birden fazla kez ziyaret edilmesi ve değerlendirilmesi ihtiyacını ortadan kaldırır (Liv vd., 2023).

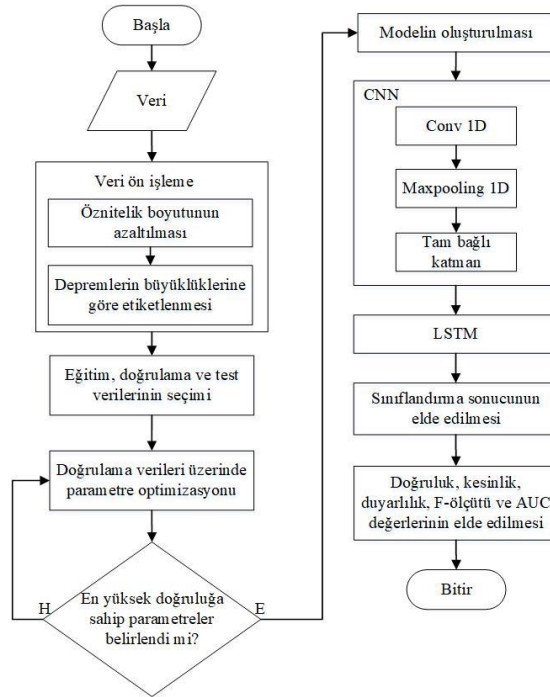
MLP, bir giriş ve çıkış katmanı ile bir veya daha fazla gizli katmana sahip bir yapay sinir ağıdır. MLP'de her katman diğerine tam bağlıdır (Cinar, 2020). Modeli eğitmek için geriye yayılım algoritmasını kullanır. Her düğüm, değerini gelen düğüme yalnızca ileri yönde iletir. Giriş katmanı eğitim verisetini girdi olarak alır ve gizli katmana iletir. Gizli katmanlar MLP'nin hesaplama yaptığı katmanlardır. Gizli katmanlar, düğüm değerleriyle çarpılan ağırlıklara sahiptir. Aktivasyon fonksiyonu gizli katmanda aktif düğümleri tanımlamak için kullanılır (Kim vd., 2022). Çıkış katmanı ise üretilen tahmin çıktısını verir.

CNN havuzlama katmanı, konvolüsyon katmanı ve tam bağlantılı katmanlardan oluşan bir derin öğrenme modelidir. Konvolüsyon katmanı, filtreleri ve çekirdekleri kullanarak girdi verilerinden lokal örüntüleri ve özellikleri çıkarır. Filtre, veriden özellikleri çıkarmak için kullanılan küçük boyutlu bir matristir (Cao vd., 2024). Havuzlama katmanı, girdinin uzamsal boyutlarını alt örnekleyerek ağırlık hesaplamasının karmaşıklığını azaltır. Havuzlama katmanları, temel özellikleri korurken daha az önemli bilgileri atarak boyutsallığın azaltılmasına yardımcı olur (Singh vd., 2020). Tam bağlı katman, verideki ilişkileri öğrenme ve probleme özgü çıktılar üretmek amacıyla çıkarılan özellikleri bir sinir ağına entegre eder.

LSTM, kaybolan gradyan sorununu çözmek ve sıralı verilerdeki uzun vadeli bağımlılıkları yakalamak için tasarlanmış bir tekrarlı sinir ağı modelidir (Al-Selwi vd., 2023). LSTM giriş ve çıkış kapıları ile unutmaya kapısı gibi bellek hücrelerini kontrol eden kapılara sahiptir. Bu kapılar, bellek hücresine hangi bilgilerin ekleneceğine ve hangi bilgilerin bellek hücresinden çıkarılacağına karar verir (Ahire vd., 2021). Bu yapı bilgilerin seçici olarak tutulmasına veya unutulmasına olanak tanıyarak uzun vadeli bağımlılıkların öğrenilmesini sağlar. LSTM'in hafızasını temsil eden hücre durumları bilgileri uzun diziler halinde saklayabilir. Gizli durum, hücre durumundaki bilgileri seçici olarak hatırlayabilir, unutulabilir ve çıktı üretebilir (Landi vd., 2021). Unutmaya kapısı, hücre durumundaki hangi bilgilerin saklanacağını ve unutulacağını belirler. Çıkış kapısı, her zaman adımında çıkışı üretmek için kullanılan bilgiyi kontrol eder.

Geliştirilen Hibrit Model

Şekil 4'te görüldüğü gibi geliştirilen sistemde öncelikle veriseti üzerinde öznelik boyutlarının azaltılması ve depremlerin büyüklüklerine göre etiketlenmesi süreçlerini içeren veri ön-işleme yapılmıştır.

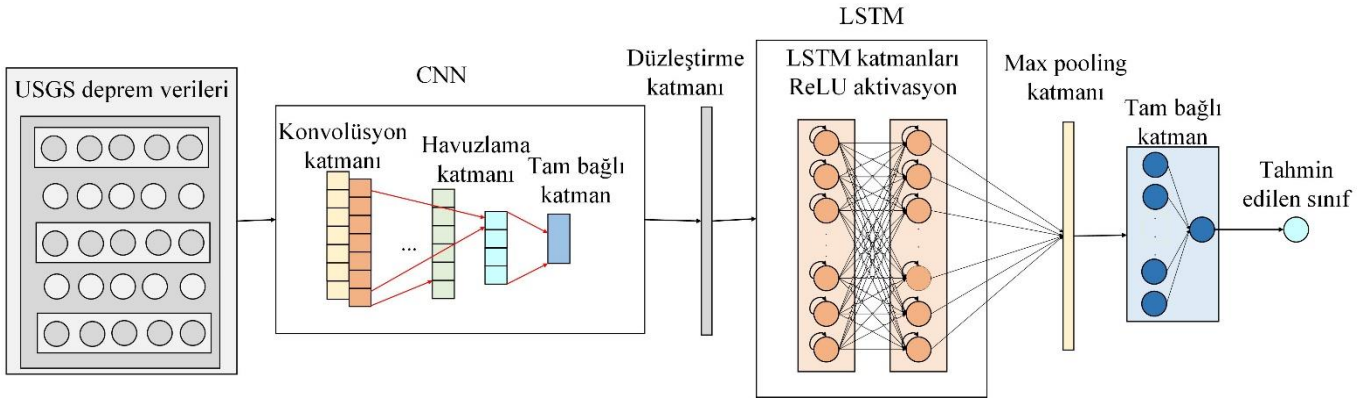


Şekil 4. Geliştirilen Sistemin Akış Diyagramı

Veriseti eğitim, test ve doğrulama için ayrılmıştır. Doğrulama verileri kullanılarak Grid arama yöntemiyle en yüksek doğruluğa sahip hiper-parametreler belirlenmiştir. CNN konvolüsyon, havuzlama ve tam bağlı katmanlardan oluşmaktadır. CNN özellik çıkarımı yaptıktan sonra özellik haritalarını LSTM'e iletir. LSTM sınıflandırma çıktısını üretmektedir. Elde edilen çıktıya göre doğruluk, kesinlik, duyarlılık, F-ölçütü ve AUC değerleri hesaplanmaktadır.

ConvLSTM ile CNN ve LSTM modellerinin öne çıkan özelliklerinden faydalanmak amaçlanmıştır. CNN, özellikle veriden özellik çıkarmak için etkinliği kanıtlanmış bir modeldir. Konvolüsyon ve havuzlama katmanları sayesinde verideki gürültüyü ortadan kaldırır. Tekrarlı bir sinir ağı modeli olan LSTM, sıralı girdi verileri üzerinde etkili olan bir modeldir. LSTM, tekrarlı sinir ağlarında kaybolan gradyan problemini çözmek için geliştirilmiş ve uzun vadeli

ilişkilerin öğrenilmesini kolaylaştıran bir modeldir. LSTM bilgi filtrelemek amacıyla sigmoid fonksiyonunu kullanır. Güncelleme kapıları, bilgi akışlarını kontrol ederek geçmiş verilerden hangilerinin hatırlanacağına karar verir. Şekil 5'te ConvLSTM'in mimarisi görülmektedir.



Şekil 5. ConvLSTM'in Mimarisi

ConvLSTM giriş katmanı, konvolüsyon katmanı, havuzlama katmanı, düzleştirme katmanı, LSTM katmanları, max pooling katmanı, tam bağlı katman ve çıkış katmanından oluşmaktadır. ConvLSTM'in hiper-parametreleri ise CNN bileşeni için kernel_size:3, Conv1D filters: 64, activation: ReLU ile 1D MaxPooling katmanında pool_size:2'dir. LSTM bileşeni için her biri 64 nörondan oluşan çift katmanlı LSTM kullanılmıştır. Dense katmanda aktivasyon fonksiyonu olarak sigmoid kullanılmıştır. Optimizasyon algoritması Adam'dır. ConvLSTM modelinde CNN, girdi verilerindeki özellikleri çıkararak konvolüsyon işlemi yardımıyla girdi özelliklerini çok boyutlu gruplara dönüştürür. Düzleştirme katmanı, havuzlama ve konvolüsyon katmanlarından gelen 3 boyutlu özellik haritalarının boyutlarının indirgenmesi için kullanılır. İndirgenen özellikler daha sonra tahmin için LSTM'e iletilir.

Performans Değerlendirme Metrikleri

Sınıflandırma modellerinin değerlendirilmesinde karışıklık matrisi ve bu matris kullanılarak türetilen doğruluk, kesinlik, duyarlılık ve F-ölçütü metrikleri kullanılmaktadır. Ayrıca, sınıflandırıcının sınıfları ayırt etme yeteneğinin ölçüsü olan AUC metriği kullanılmaktadır. Şekil 6'da karışıklık matrisi görülmektedir.

		Gerçek değerler	
		Tehlikeli (1)	Tehlikesiz (0)
Tahmin değerleri	Tehlikeli (1)	TP	FP
	Tehlikesiz (0)	FN	TN

Şekil 6. Karışıklık Matrisi

Karışıklık matrisi, Şekil 6'da görüldüğü gibi ikili sınıflandırma problemlerinde 2x2 boyutunda bir matristir. TP, tehlikeli olarak etiketlenmiş ve tehlikeli olarak tahmin edilen depremlerin sayısını ifade etmektedir. FN, tehlikeli olarak etiketlenmiş ancak tehlikesiz olarak tahmin edilen depremlerin sayısını ifade eder. FP, tehlikesiz olarak etiketlenmiş ancak tehlikeli olarak tahmin edilen depremlerin sayısını ifade eder. TN ise tehlikesiz olarak etiketlenmiş ve tehlikesiz olarak tahmin edilen depremlerin sayısını ifade eder.

Karışıklık matrisi kullanılarak F-ölçütü, kesinlik, doğruluk, duyarlılık metrikleri elde edilmektedir. Doğruluk Eş. 1'de görüldüğü gibi doğruluk doğru tahmin edilen örneklerin sayısını ifade etmektedir.

$$\text{Doğruluk} = \frac{\text{TN} + \text{TP}}{\text{TN} + \text{FP} + \text{TP} + \text{FN}} \quad (1)$$

Kesinlik, Eş. 2'de görüldüğü gibi tehlikeli olarak tahmin edilen depremlerin gerçekte kaçının tehlikeli olduğunu ifade etmektedir.

$$\text{Kesinlik} = \frac{TP}{TP+FP} \quad (2)$$

Duyarlılık ise Eş. 3'te görüldüğü gibi modelin tehlikeli depremlerin kaçını doğru tahmin ettiğini ifade eder.

$$\text{Duyarlılık} = \frac{TP}{TP+FP} \quad (3)$$

F-ölçütü ise kesinlik ve duyarlılık değerleri kullanılarak Eş. 4'te görüldüğü gibi hesaplanır. F-ölçütü, eşit dağılmayan verisetlerinde hatalı model seçimleri yapılmasına engel olmaktadır.

$$\text{F-ölçütü} = \frac{2 * \text{Hassasiyet} * \text{Duyarlılık}}{\text{Hassasiyet} + \text{Duyarlılık}} \quad (4)$$

AUC değeri hesaplanırken sınıflandırıcının değişen karar eşiklerindeki performansını gösteren ROC eğrisinin altındaki alan ölçülmektedir. ROC eğrisi, farklı karar eşiklerine sahip bir sınıflandırıcının performansını Gerçek pozitif oranı (True Positive Rate - TPR) ve yanlış pozitif oranına (False Positive Rate - FPR) göre çizer. ROC eğrisinin altında kalan alan AUC puanı olarak hesaplanmaktadır. Modelin, tüm sınıflandırma eşiklerinde pozitif veya negatif örnekler arasında ayırım yapmak için göreceli puanları ne kadar iyi üretebildiğini özetler. AUC puanı 0 ile 1 arasında değişir ve AUC değerinin 1 olması mükemmel performansı belirtir.

DENEYSEL SONUÇLAR

ConvLSTM'in deneysel sonuçları LR, RF, SVM, XGBoost, MLP, CNN ve LSTM ile kapsamlı bir şekilde karşılaştırılmıştır. Her bir model için karışıklık matrisi elde edilerek doğruluk, kesinlik, duyarlılık, F-ölçütü ve AUC değerleri hesaplanmıştır. LR için oluşturulan karışıklık matrisi Şekil 7'de ve karışıklık matrisine göre elde edilen performans metriklerinin sonuçları Tablo 3'te görülmektedir.

		Gerçek değerler	
		Tehlikeli (1)	Tehlikesiz (0)
Tahmin değerleri	Tehlikeli (1)	53	8
	Tehlikesiz (0)	11	1571

Şekil 6. LR için Karışıklık Matrisi

Şekil 7'de görüldüğü gibi LR için TP değeri 53, FP değeri 8, FN değeri 11 ve TN değeri ise 1571'dir.

Tablo 3. LR için Deneysel Sonuçlar

Doğruluk	Kesinlik	Duyarlılık	F-ölçütü	AUC
0,9884	0,8688	0,8281	0,8479	0,9477

Tablo 3'te görüldüğü gibi LR, 1643 örnekten 1624'ünü doğru sınıflandırarak %98,84 doğruluğa ulaşmıştır. Şekil 8 ve Tablo 4'te RF için karışıklık matrisi ve deneysel sonuçlar görülmektedir.

		Gerçek değerler	
		Tehlikeli (1)	Tehlikesiz (0)
Tahmin değerleri	Tehlikeli (1)	54	6
	Tehlikesiz (0)	10	1573

Şekil 8. RF için Karışıklık Matrisi

Şekil 8'de görüldüğü gibi LR için TP değeri 54, FP değeri 6, FN değeri 10 ve TN değeri ise 1573'tür.

Tablo 4. RF için Deneysel Sonuçlar

Doğruluk	Kesinlik	Duyarlılık	F-ölçütü	AUC
0,9902	0,9000	0,8437	0,8709	0,9496

Tablo 4'te görüldüğü gibi RF, 1643 örnekten 1627'sini doğru sınıflandırarak %99,02 doğruluğa ulaşmıştır. Şekil 9 ve Tablo 5'te SVM için karışıklık matrisi ve deneysel sonuçlar görülmektedir.

		Gerçek değerler	
		Tehlikeli (1)	Tehlikesiz (0)
Tahmin değerleri	Tehlikeli (1)	55	6
	Tehlikesiz (0)	9	1573

Şekil 8. SVM için karışıklık matrisi

Şekil 9'da görüldüğü gibi SVM için TP değeri 55, FP değeri 6, FN değeri 9 ve TN değeri ise 1573'tür.

Tablo 5. SVM için Deneysel Sonuçlar

Doğruluk	Kesinlik	Duyarlılık	F-ölçütü	AUC
0,9908	0,9016	0,8593	0,8799	0,9501

Tablo 5'te görüldüğü gibi SVM, 1643 örnekten 1628'ini doğru sınıflandırarak %99,08 doğruluğa ulaşmıştır. Şekil 10 ve Tablo 6'da XGBoost için karışıklık matrisi ve deneysel sonuçlar görülmektedir.

		Gerçek değerler	
		Tehlikeli (1)	Tehlikesiz (0)
Tahmin değerleri	Tehlikeli (1)	57	5
	Tehlikesiz (0)	7	1574

Şekil 10. XGBoost için Karışıklık Matrisi

Şekil 10'da görüldüğü gibi XGBoost için TP değeri 57, FP değeri 5, FN değeri 7 ve TN değeri ise 1574'tür.

Tablo 6. XGBoost için Deneysel Sonuçlar

Doğruluk	Kesinlik	Duyarlılık	F-ölçütü	AUC
0,9926	0,9193	0,8906	0,9047	0,9732

Tablo 6'da görüldüğü gibi XGBoost, 1643 örnekten 1631'ini doğru sınıflandırarak %99,26 doğruluğa ulaşmıştır. Şekil 11 ve Tablo 7'de MLP için karışıklık matrisi ve deneysel sonuçlar görülmektedir.

		Gerçek değerler	
		Tehlikeli (1)	Tehlikesiz (0)
Tahmin değerleri	Tehlikeli (1)	58	6
	Tehlikesiz (0)	6	1573

Şekil 11. MLP için Karışıklık Matrisi

Şekil 101'de görüldüğü gibi MLP için TP değeri 58, FP değeri 6, FN değeri 6 ve TN değeri ise 1573'tür.

Tablo 7. MLP için Deneysel Sonuçlar

Doğruluk	Kesinlik	Duyarlılık	F-ölçütü	AUC
0,9926	0,9062	0,9062	0,9062	0,9625

Tablo 67’de görüldüğü gibi MLP, 1643 örnekten 1631’ini doğru sınıflandırarak %99,26 doğruluğa ulaşmıştır. Şekil 12 ve Tablo 8’de CNN için karışıklık matrisi ve deneysel sonuçlar görülmektedir.

		Gerçek değerler	
		Tehlikeli (1)	Tehlikesiz (0)
Tahmin değerleri	Tehlikeli (1)	57	6
	Tehlikesiz (0)	7	1573

Şekil 12. CNN için Karışıklık Matrisi

Şekil 12’de görüldüğü gibi CNN için TP değeri 57, FP değeri 6, FN değeri 7 ve TN değeri ise 1573’tür.

Tablo 8. CNN için Deneysel Sonuçlar

Doğruluk	Kesinlik	Duyarlılık	F-ölçütü	AUC
0,9920	0,9047	0,8906	0,8975	0,9618

Tablo 8’de görüldüğü gibi CNN, 1643 örnekten 1630’unu doğru sınıflandırarak %99,20 doğruluğa ulaşmıştır. Şekil 13 ve Tablo 9’da LSTM için karışıklık matrisi ve deneysel sonuçlar görülmektedir.

		Gerçek değerler	
		Tehlikeli (1)	Tehlikesiz (0)
Tahmin değerleri	Tehlikeli (1)	58	4
	Tehlikesiz (0)	6	1575

Şekil 13. LSTM için Karışıklık Matrisi

Şekil 13’te görüldüğü gibi LSTM için TP değeri 58, FP değeri 4, FN değeri 6 ve TN değeri ise 1573’tir.

Tablo 9. LSTM için Deneysel Sonuçlar

Doğruluk	Kesinlik	Duyarlılık	F-ölçütü	AUC
0,9939	0,9354	0,9062	0,9205	0,9732

Tablo 9’da görüldüğü gibi LSTM, 1643 örnekten 1633’ünü doğru sınıflandırarak %99,39 doğruluğa ulaşmıştır. Şekil 14 ve Tablo 10’da ConvLSTM için karışıklık matrisi ve deneysel sonuçlar görülmektedir.

		Gerçek değerler	
		Tehlikeli (1)	Tehlikesiz (0)
Tahmin değerleri	Tehlikeli (1)	60	4
	Tehlikesiz (0)	4	1575

Şekil 14. ConvLSTM için Karışıklık Matrisi

Şekil 14’te görüldüğü gibi ConvLSTM için TP değeri 60, FP değeri 4, FN değeri 4 ve TN değeri ise 1575’tir.

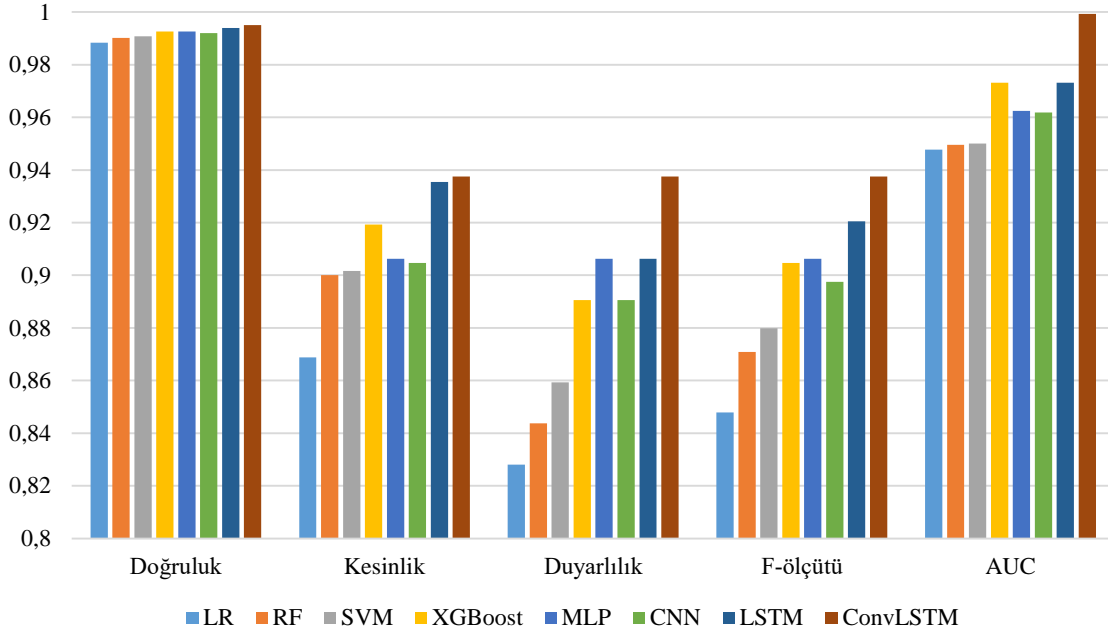
Tablo 10. ConvLSTM için Deneysel Sonuçlar

Doğruluk	Kesinlik	Duyarlılık	F-ölçütü	AUC
0,9951	0,9375	0,9375	0,9375	0,9993

Tablo 10’da görüldüğü gibi ConvLSTM, 1643 örnekten 1635’ini doğru sınıflandırarak %99,51 doğruluğa ulaşmıştır. Tablo 11 ve Şekil 15’te karşılaştırmalı deneysel sonuçlar görülmektedir.

Tablo 11. Karşılaştırmalı Deneysel Sonuçlar

Model	Doğruluk	Kesinlik	Duyarlılık	F-ölçütü	AUC
LR	0,9884	0,8688	0,8281	0,8479	0,9477
RF	0,9902	0,9000	0,8437	0,8709	0,9496
SVM	0,9908	0,9016	0,8593	0,8799	0,9501
XGBoost	0,9926	0,9193	0,8906	0,9047	0,9732
MLP	0,9926	0,9062	0,9062	0,9062	0,9625
CNN	0,9920	0,9047	0,8906	0,8975	0,9618
LSTM	0,9939	0,9354	0,9062	0,9205	0,9732
ConvLSTM	0,9951	0,9375	0,9375	0,9375	0,9993

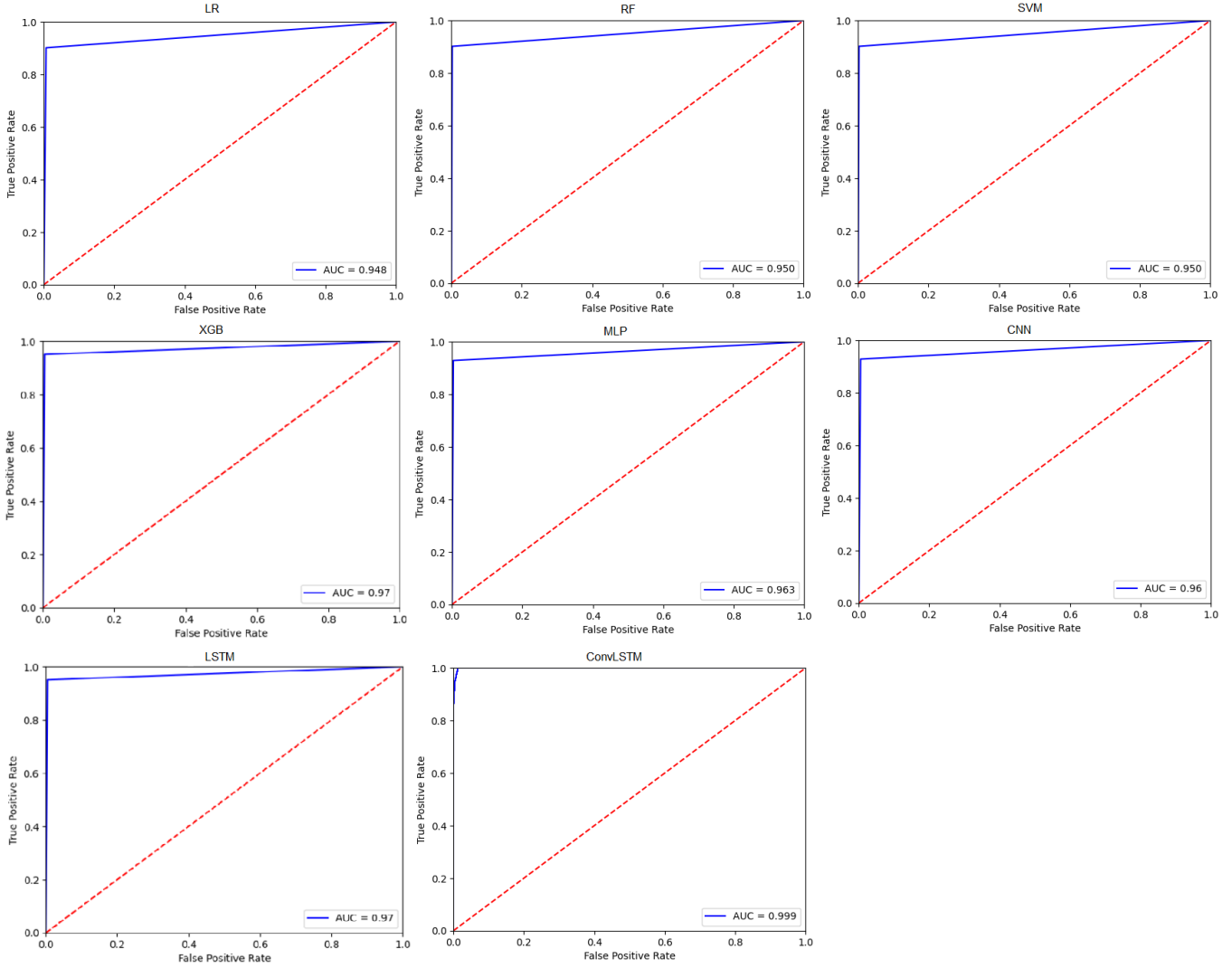
**Şekil 15.** Karşılaştırmalı Deneysel Sonuçlar

Tablo 11 ve Şekil 15'te görüldüğü gibi ConvLSTM 0,9951 doğruluk ve 0,9993 AUC değeriyle karşılaştırılan modellerden daha başarılı olmuştur. ConvLSTM'in ardından sırasıyla LSTM, XGBoost, MLP, CNN, RF ve LR başarılı olmuştur.

Şekil 16'da karşılaştırılan her bir modelin ROC/AUC grafikleri görülmektedir.

Şekil 16'da görüldüğü gibi ConvLSTM karşılaştırılan modellerden daha yüksek bir AUC değerine sahip olmuştur.

ConvLSTM, CNN ve LSTM'in güçlü özelliklerini bir araya getirerek daha etkin bir performansa sahip olmuştur. CNN konvolüsyon katmanları yardımıyla verideki örüntülerin ve özelliklerin çıkarılmasında, LSTM ise zaman serisi verilerindeki uzun-vadeli bağımlılıkların modellenmesinde ve öğrenilmesinde etkilidir. ConvLSTM'in, LR'den daha başarılı olması ConvLSTM'in zaman serileri gibi zamansal yapıları daha iyi anlayabilmesi, LR'nin ise zaman içindeki bu ilişkileri belirlemede yetersiz kalması ile yorumlanabilir. Benzer şekilde RF ve XGBoost verilerdeki zaman bağımlılıkları doğrudan işleyemez. SVM, zaman serilerindeki örüntüleri ve ilişkileri işlemeye ConvLSTM kadar esnek değildir. ConvLSTM'in CNN ve MLP'den daha başarılı olması, ConvLSTM'in zaman serilerindeki mevsimsellik ve trend gibi yapıları daha iyi belirlemesi, CNN ve MLP'nin ise bu tür yapıları belirgin bir şekilde modelleyememesi ile yorumlanabilir. ConvLSTM'in LSTM'den daha başarılı olması, ConvLSTM'in girişler üzerinde konvolüsyon yaparak zaman serilerindeki uzamsal yapıları da yakalayabilmesi yeteneği ile yorumlanabilir.



Şekil 16. ROC/AUC Grafikleri

SONUÇLAR

Yerkabuğunu oluşturan tektonik plakalar sürekli hareket halindedir. Bu plakaların kenarları fay bölgelerinde birbirine doğru kayarken, sürtünme sebebiyle yavaşlar ve uzun süre boyunca basınç oluşmasına yol açabilir. Hareket kuvveti sürtünmeyi yendiğinde, kabuğun bazı bölümleri aniden kırılarak veya yer değiştirerek bastırılmış basıncın sismik dalgalar biçiminde serbest kalmasına neden olur. Depremlerin meydana getirdiği sismik dalgalar, yüzeye ulaştıklarında yeryüzünde hasar meydana getirebilirler. Dünya genelinde çok sayıda insanın hayatını kaybetmesine, yaralanmasına ve maddi kayıp yaşamasına neden olan depremlerin önceden tahmin edilmesine yönelik çalışmalar aktif bir araştırma alanıdır. Yapay zekâ yöntemleri kullanılarak deprem gibi doğal afetlere yönelik erken uyarı sistemlerinin geliştirilmesi amaçlanmaktadır.

Bu çalışmada, USGS tarafından sağlanan 27 Aralık 2023 - 26 Ocak 2024 tarihleri arasında dünya genelinde meydana gelen depremlerden oluşan bir veri seti kullanıldı. Geliştirilen ConvLSTM modelinin etkinliği LR, RF, SVM, XGBoost, MLP, CNN ve LSTM ile kapsamlı olarak karşılaştırılmıştır. Deneysel sonuçlar, ConvLSTM'in 0,9951 doğruluk ve 0,9993 AUC değeriyle karşılaştırılan modellerden daha başarılı olduğunu göstermiştir. ConvLSTM, deprem olasılıklarını tahmin etmek için jeolojik konumlar gibi uzamsal özellikler ile zamansal özellikleri birleştirmektedir. CNN, uzamsal özelliklerin çıkarılmasını, LSTM ise zamansal örüntülerin modellenmesini sağlamaktadır. Bu sayede, hem jeolojik hem de zaman serisi verilerinden elde edilen verilerin birleştirilmesiyle daha başarılı bir tahmin performansı elde edilmiştir. CNN, jeolojik verilerdeki detayları ve ilişkileri belirlemek için konvolüsyon katmanlarını kullanmaktadır. CNN, jeolojik konumların yakınlığı veya belirli jeolojik özelliklerin kombinasyonu gibi faktörleri çıkarmakta ve LSTM ile birleştirerek daha güçlü bir tahmin modeli oluşturmaktadır.

TARTIŞMA

Bu çalışmada, depremlerin meydana gelme zamanlarını ve yerlerini tahmin etmek amacıyla ConvLSTM tabanlı hibrit bir model geliştirilmiş ve modelin etkinliği farklı makine öğrenmesi ve derin öğrenme modelleriyle kapsamlı bir şekilde karşılaştırılmıştır. Deneysel sonuçlar, ConvLSTM modelinin 0,99'un üzerinde doğruluk ve AUC değeriyle karşılaştırılan modellerden daha başarılı olduğunu göstermiştir. Deneysel sonuçlar, literatürdeki benzer çalışmalarla karşılaştırıldığında ön plana çıkmaktadır. Örneğin, Ommi ve Hashemi (Ommi & Hashemi, 2024) tarafından sunulan ANN, RF ve SVM'in karşılaştırmalı analizi, ANN'in %97 doğrulukla en iyi performansı gösterdiğini belirtmiştir. Ancak, bu çalışmada kullanılan ConvLSTM modeli daha yüksek bir doğruluk oranına ulaşmıştır. Benzer şekilde, Utku ve Akcayol (Utku & Akcayol, 2024) tarafından önerilen hibrit CNN-GRU modeli de düşük hata oranlarıyla öne çıkmıştır, ancak ConvLSTM'in doğruluk ve AUC değerleri, bu çalışmanın sonuçlarını da aşmaktadır. Deneysel sonuçlar göz önüne alındığında, ConvLSTM'in karmaşık veri yapılarını daha iyi işleyebildiği görülmektedir.

Çalışmanın güçlü yönleri yüksek performans, hibrit model ve verisetinin güncelliğidir. ConvLSTM modeli, diğer modellerle kıyaslandığında yüksek doğruluk ve AUC değerleri elde etmiştir. ConvLSTM, hem uzamsal hem de zamansal verileri başarılı bir şekilde birleştirerek daha kapsamlı ve doğru tahminler yapabilmektedir. CNN'in uzamsal özellikleri çıkarma yeteneğini ve LSTM'in zamansal desenleri modelleme yeteneğini birleştirerek başarılı bir performans sergilemiştir. Ayrıca çalışmada USGS tarafından sağlanan güncel bir veriseti kullanılmıştır. Literatürde bu veriseti ile yapılmış bir çalışma bulunmaması, çalışmanın özgünlüğünü artırmaktadır.

Çalışmanın zayıf yönleri ve sınırlılıkları verisetinin sınırlılığı, bölgesel özelliklerin verisetinde bulunmaması ve model karmaşıklığı olarak değerlendirilebilir. Çalışmada kullanılan veriseti 27 Aralık 2023 - 26 Ocak 2024 aralığını kapsamaktadır. Daha uzun zaman dilimlerini kapsayan verisetleri kullanılarak modelin genelleme yeteneği daha kapsamlı değerlendirilebilir. Veriseti, belirli bölgelerin jeolojik özelliklerine özelleştirilmemiştir. Bölgesel özelliklerin daha detaylı bir şekilde verisetine dâhil edilmesi, uygulanan modellerin performansını artırabilir. Ayrıca ConvLSTM, diğer modellere göre daha karmaşık bir yapıya sahiptir ve daha fazla hesaplama gücü gerektirmektedir.

Gelecek çalışmalarda, daha geniş zaman dilimlerini ve jeolojik özellikleri içeren ve farklı bölgelerdeki depremleri kapsayan verisetleri kullanılarak modelin genelleştirme yeteneğinin artırılması amaçlanmaktadır. Ayrıca transfer öğrenme ve daha gelişmiş optimizasyon tekniklerinin kullanılması amaçlanmaktadır.

KAYNAKLAR

- Abebe, E., Kebede, H., Kevin, M., & Demissie, Z. (2023). Earthquakes magnitude prediction using deep learning for the Horn of Africa. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 170, 107913. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2023.107913>
- Abri, R., & Artuner, H. (2022). LSTM-based deep learning methods for prediction of earthquakes using ionospheric data. *Gazi University Journal of Science*, 35(4), 1417-1431. <https://doi.org/10.35378/gujs.950387>
- Ahire, P., Lad, H., Parekh, S., & Kabrawala, S. (2021). LSTM based stock price prediction. *International Journal of Creative Research Thoughts*, 9(2), 5118-5122. <https://doi.org/10.6084/m9.doi.one.IJCRT2102617>
- Ali, Z. A., Abduljabbar, Z. H., Taher, H. A., Sallow, A. B., & Almufti, S. M. (2023). Exploring the power of eXtreme gradient boosting algorithm in machine learning: A review. *Academic Journal of Nawroz University*, 12(2), 320-334. <https://doi.org/10.25007/ajnu.v12n2a1612>
- Al-Selwi, S. M., Hassan, M. F., Abdulkadir, S. J., & Muneer, A. (2023). LSTM inefficiency in long-term dependencies regression problems. *Journal of Advanced Research in Applied Sciences and Engineering Technology*, 30(3), 16-31. <https://doi.org/10.37934/araset.30.3.1631>
- Amjad, M., Ahmad, I., Ahmad, M., Wróblewski, P., Kamiński, P., & Amjad, U. (2022). Prediction of pile bearing capacity using XGBoost algorithm: modeling and performance evaluation. *Applied Sciences*, 12(4), 2126. <https://doi.org/10.3390/app12042126>
- Backhaus, K., Erichson, B., Gensler, S., Weiber, R., & Weiber, T. (2023). Logistic regression. In *Multivariate Analysis: An Application-Oriented Introduction*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-32589-3>

- Bytchkov, S. (2024). Seismology in the Light of Fundamental Sciences. *Open Journal of Earthquake Research*, 13(1), 84-112. <https://doi.org/10.4236/ojer.2024.131004>
- Cao, J., Li, G., Shen, J., & Dai, C. (2024). IFBCLNet: Spatio-temporal frequency feature extraction-based MI-EEG classification convolutional network. *Biomedical Signal Processing and Control*, 92, 106092. <https://doi.org/10.1016/j.bspc.2024.106092>
- Cervantes, J., Garcia-Lamont, F., Rodríguez-Mazahua, L., & Lopez, A. (2020). A comprehensive survey on support vector machine classification: Applications, challenges and trends. *Neurocomputing*, 408, 189-215. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2019.10.118>
- Chandra, M. A., & Bedi, S. S. (2021). Survey on SVM and their application in image classification. *International Journal of Information Technology*, 13(5), 1-11.
- Chaudhary, M. T., & Piracha, A. (2021). Natural disasters—origins, impacts, management. *Encyclopedia*, 1(4), 1101-1131. <https://doi.org/10.3390/encyclopedia1040084>
- Cinar, A. C. (2020). Training feed-forward multi-layer perceptron artificial neural networks with a tree-seed algorithm. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 45(12), 10915-10938. <https://doi.org/10.1007/s13369-020-04872-1>
- Colombelli, S., Carotenuto, F., Elia, L., & Zollo, A. (2020). Design and implementation of a mobile device app for network-based earthquake early warning systems (EEWSs): Application to the PRESTo EEWS in southern Italy. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 20(4), 921-931. <https://doi.org/10.5194/nhess-20-921-2020>
- Giridhar, U. S., Prajapati, N., & Sonkusare, R. (2021). Analysis and determination of magnitude of earthquake using sta-lta algorithm. In 2021 12th International Conference on Computing Communication and Networking Technologies (ICCCNT), 1-5. <https://doi.org/10.1109/ICCCNT51525.2021.9579939>
- Gomila, R. (2021). Logistic or linear? Estimating causal effects of experimental treatments on binary outcomes using regression analysis. *Journal of Experimental Psychology: General*, 150(4), 700. <https://doi.org/10.1037/xge0000920>
- He, S., Chen, T., Vennes, I., He, X., Song, D., Chen, J., & Mitri, H. (2020). Dynamic modelling of seismic wave propagation due to a remote seismic source: a case study. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 1-25. <https://doi.org/10.1007/s00603-020-02217-w>
- Huang, C. J., Chen, H. Y., Chu, C. R., Lin, C. R., Yen, L. C., Yin, H. Y., & Kuo, B. Y. (2022). Low-Frequency Ground Vibrations Generated by Debris Flows Detected by a Lab-Fabricated Seismometer. *Sensors*, 22(23), 9310. <https://doi.org/10.3390/s22239310>
- Kaggle. USGS Earthquakes Dataset. (2024) <https://www.kaggle.com/datasets/rupindersinghrana/usgs-earthquakes-2024> Accessed 15.03.24
- Kavianpour, P., Kavianpour, M., Jahani, E., & Ramezani, A. (2023). A CNN-BiLSTM model with attention mechanism for earthquake prediction. *The Journal of Supercomputing*, 79(17), 19194-19226. <https://doi.org/10.1007/s11227-023-05369-y>
- Kim, H. S., Choi, D., Yoo, D. G., & Kim, K. P. (2022). Hyperparameter Sensitivity Analysis of Deep Learning-Based Pipe Burst Detection Model for Multiregional Water Supply Networks. *Sustainability*, 14(21), 13788. <https://doi.org/10.3390/su142113788>
- Landi, F., Baraldi, L., Cornia, M., & Cucchiara, R. (2021). Working memory connections for LSTM. *Neural Networks*, 144, 334-341. <https://doi.org/10.1016/j.neunet.2021.08.030>
- Li, Y., Zeng, H., Zhang, M., Wu, B., Zhao, Y., Yao, X., & Wu, F. (2023). A county-level soybean yield prediction framework coupled with XGBoost and multidimensional feature engineering. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 118, 103269. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2023.103269>
- Muhammad, D., Ahmad, I., Khalil, M. I., Khalil, W., & Ahmad, M. O. (2023). A generalized deep learning approach to seismic activity prediction. *Applied Sciences*, 13(3), 1598. <https://doi.org/10.3390/app13031598>
- Nievas, C. I., Bommer, J. J., Crowley, H., van Elk, J., Ntinalexis, M., & Sangirardi, M. (2020). A database of damaging small-to-medium magnitude earthquakes. *Journal of Seismology*, 24(2), 263-292. <https://doi.org/10.1007/s10950-019-09897-0>

- Ommi, S., & Hashemi, M. (2024). Machine learning technique in the north zagros earthquake prediction. *Applied Computing and Geosciences*, 22, 100163. <https://doi.org/10.1016/j.acags.2024.100163>
- Pribadi, K. S., Abduh, M., Wirahadikusumah, R. D., Hanifa, N. R., Irsyam, M., Kusumaningrum, P., & Puri, E. (2021). Learning from past earthquake disasters: The need for knowledge management system to enhance infrastructure resilience in Indonesia. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 64, 102424. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2021.102424>
- Sadhukhan, B., Chakraborty, S., & Mukherjee, S. (2022). Investigating the relationship between earthquake occurrences and climate change using RNN-based deep learning approach. *Arabian Journal of Geosciences*, 15(1), 31. <https://doi.org/10.1007/s12517-021-09229-y>
- Sadhukhan, B., Chakraborty, S., & Mukherjee, S. (2023). Predicting the magnitude of an impending earthquake using deep learning techniques. *Earth Science Informatics*, 16(1), 803-823. <https://doi.org/10.1007/s12145-022-00916-2>
- Shafapourtehrany, M., Batur, M., Shabani, F., Pradhan, B., Kalantar, B., & Özener, H. (2023). A comprehensive review of geospatial technology applications in earthquake preparedness, emergency management, and damage assessment. *Remote Sensing*, 15(7), 1939. <https://doi.org/10.3390/rs15071939>
- Singh, P., Raj, P., & Namboodiri, V. P. (2020). EDS pooling layer. *Image and Vision Computing*, 98, 103923. <https://doi.org/10.1016/j.imavis.2020.103923>
- Utku, A., & Akcayol, M. A. (2024). Hybrid Deep Learning Model for Earthquake Time Prediction. *Gazi University Journal of Science*, 27(3). <https://doi.org/10.35378/gujs.1364529>
- Utku, A. (2023). Deep learning based hybrid prediction model for predicting the spread of COVID-19 in the world's most populous countries. *Expert Systems with Applications*, 231, 120769. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.120769>
- Zakka, L., Wuyep, L. C., Monday, I. A., Kadiri, U. A., Thomas, H. Y., Ogugua, E. P., & Gambo, S. (2024). Earthquake Dynamics in Nigeria: Insights, Challenges, and Preparedness Measures. *Asian Journal of Geological Research*, 7(1), 58-73.
- Zhou, S., & Mentch, L. (2023). Trees, forests, chickens, and eggs: when and why to prune trees in a random forest. *Statistical Analysis and Data Mining: The ASA Data Science Journal*, 16(1), 45-64. <https://doi.org/10.1002/sam.11594>
- Zhou, H., Che, A., Shuai, X., & Cao, Y. (2024). Seismic vulnerability assessment model of civil structure using machine learning algorithms: a case study of the 2014 Ms6. 5 Ludian earthquake. *Natural Hazards*, 1-28. <https://doi.org/10.1007/s11069-024-06465-9>



Kahramanmaraş Sütçü İmam University

Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 29.04.2024
Kabul Tarihi : 25.07.2024

Received Date : 29.04.2024
Accepted Date : 25.07.2024

ENHANCING DEEP LEARNING PERFORMANCE THROUGH A GENETIC ALGORITHM-ENHANCED APPROACH: FOCUSING ON LSTM

GENETİK ALGORİTMA DESTEKLİ BİR YAKLAŞIM İLE DERİN ÖĞRENME PERFORMANSININ GELİŞTİRİLMESİ: LSTM ODAKLI

Tarık Üveys ŞEN¹ (ORCID: 0009-0000-0297-6064)
Gökhan BAKAL^{1*} (ORCID: 0000-0003-2897-3894)

¹ Abdullah Gul University, Computer Engineering Department, Kayseri, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Gökhan BAKAL, gokhan.bakal@agu.edu.tr

ABSTRACT

Deep learning has shown remarkable success in various applications, such as image classification, natural language processing, and speech recognition. However, training deep neural networks is challenging due to their complex architecture and the number of parameters required. Genetic algorithms have been proposed as an alternative optimization technique for deep learning, offering an efficient alternative way to find an optimal set of network parameters that minimize the objective function. In this paper, we propose a novel approach integrating genetic algorithms with deep learning, specifically LSTM models, to enhance performance. Our method optimizes crucial hyper-parameters including learning rate, batch size, neuron count per layer, and layer depth through genetic algorithms. Additionally, we conduct a comprehensive analysis of how genetic algorithm parameters influence the optimization process and illustrate their significant impact on improving LSTM model performance. Overall, the presented method provides a powerful mechanism for improving the performance of deep neural networks, and thus, we believe that it has significant potential for future applications in the artificial intelligence discipline.

Keywords: genetic algorithm, hyper-parameter optimization, deep learning, lstm

ÖZET

Derin öğrenme, görüntü sınıflandırma, doğal dil işleme ve konuşma tanıma gibi çeşitli uygulamalarda dikkat çekici başarılar elde etmiştir. Ancak, derin sinir ağlarını eğitmek, karmaşık mimarileri ve gereken parametre sayısı nedeniyle zorlu bir süreçtir. Genetik algoritmalar, derin öğrenme için alternatif bir optimizasyon teknik olarak önerilmiştir ve optimal bir ağ parametre setini minimize eden bir amaç fonksiyonu bulmak için etkili bir alternatif yöntem sunar. Bu makalede, derin öğrenme ile genetik algoritmaları entegre eden, özellikle LSTM modellerini kullanarak performansı artırmayı amaçlayan yeni bir yaklaşım öneriyoruz. Yöntemimiz, genetik algoritmalar aracılığıyla öğrenme hızı, grup boyutu, katman başına nöron sayısı ve katman derinliği gibi kritik hiper-parametreleri optimize eder. Ayrıca, genetik algoritma parametrelerinin optimizasyon sürecini nasıl etkilediğine dair kapsamlı bir analiz yaparak, LSTM model performansını iyileştirmedeki önemli etkilerini gösteriyoruz. Genel olarak, sunulan yöntem, derin sinir ağlarının performansını artırmak için güçlü bir mekanizma sunmakta olup bu nedenle yapay zekâ disiplininde gelecekteki uygulamalar için önemli bir potansiyele sahip olduğuna inanıyoruz.

Anahtar Kelimeler: genetik algoritma, hiper-parametre optimizasyonu, derin öğrenme, lstm

INTRODUCTION

Machine learning (ML), as a subfield of artificial intelligence, has been boosted by deep learning approaches, which have enabled remarkable performance improvement in distinct application domains such as image recognition, natural language processing, and speech recognition. However, training deep neural networks is a complex process due to having intricate architectures and learning a variety of parameters (Şen and Bakal, 2023). One of the most challenging yet critical aspects here is selecting the optimal hyper-parameters, such as the learning rate, batch size, number of layers, and number of neurons in each layer. The learning rate controls how much to change the model in response to the estimated error each time the model weights are updated, while the batch size determines the number of samples to be used in each training iteration. The number of layers and neurons per layer defines the depth and width of the neural network, respectively, crucially influencing the model's capacity to learn complex patterns and achieve state-of-the-art results. Several optimization techniques, such as stochastic gradient descent and Adam optimizer, have been proposed for optimizing hyper-parameters in deep learning models. However, these techniques are often too sensitive to the choice of hyper-parameters themselves, and finding their optimal set can be a time-consuming task for a given problem. The primary reason for genetic algorithm usage instead of commonly used grid search tuning is to utilize the genetic algorithms' power for hyper-parameter tuning. This claim is because genetic algorithms can offer advantages over the grid search approach. These advantages include balanced exploration and exploitation, the capability to handle complex search spaces, adaptability to non-gradient scenarios, parallelizability, robustness to local optima, and flexibility to adapt to changing landscapes. Consequently, genetic algorithms can provide an efficient and effective strategy for optimizing configurations in hyper-parameter tuning tasks.

The proposed study investigated the changes in fitness levels across three generations within a particular population by addressing the challenge of fitness (Kramer and Kramer, 2017). The obtained results suggest that the optimized model varies significantly with the percentage of data used for the training process. For 5% of the dataset, there was an observed decrease in fitness of approximately 0.47%. In contrast, a 10% dataset was associated with an increase in fitness of 4.2%, and a 20% dataset resulted in a fitness increase of 3.45%. Our fitness score, accuracy, measures the model's predictive accuracy, with higher values indicating better performance. Since our problem is a maximizing problem, the goal is to maximize the accuracy score to achieve optimal model performance.

To effectively manage computational resources while still maintaining scientific rigor, a subset approach was adopted for data analysis. This approach involved utilizing varying percentages of the dataset (5%, 10%, and 20%) to evaluate its impact on observed outcomes, specifically focusing on fitness metrics. The rationale behind this strategy lies in its ability to provide insights into the relationship between dataset size and analytical outcomes, allowing for a nuanced understanding of the dataset's characteristics without overwhelming computational resources.

Results indicate that, despite the reduced dataset sizes, meaningful trends in fitness were still discernible. For instance, the analysis revealed that a 5% dataset was associated with a slight decrease in fitness of approximately 0.47%, suggesting potential limitations in capturing finer details due to the reduced sample size. Conversely, both the 10% and 20% datasets exhibited notable increases in fitness, showcasing the potential benefits of larger dataset size in enhancing analytical outcomes. These findings underscore the importance of carefully selecting dataset sizes relative to available computational resources, ensuring that analytical objectives are met while mitigating resource constraints.

Overall, this study highlights the critical role of genetic algorithms for hyperparameter selection to achieve an optimal deep learning performance and expresses the need for further research to address this challenge. The obtained outcomes also demonstrate valuable insights into the impact of dataset size on fitness levels in evolutionary dynamics.

In the subsequent sections, we first discuss the general background and some related work in Section 2. We provide details regarding the dataset used in our experiments in Section 3. Then, we present thorough explanations of the models we constructed in Section 4, including feature extraction, data preprocessing, and technical aspects of genetic algorithms, such as selection and mutation. Section 5 demonstrates the results and discussion from unique angles. Ultimately, we conclude with critical remarks in Section 6.

BACKGROUND

In this section, we provide a comprehensive overview of genetic algorithms (GAs). We begin by discussing the basic principles of GAs, including the representation of solutions, the fitness function, and the genetic operators. We then discuss the different types of GAs and the factors that affect their performance. Finally, we discuss related literature in the parallel domain.

Genetic Algorithms

Genetic algorithms (GAs) are a class of optimization algorithms inspired by the process of natural selection and genetics concepts. GAs are broadly employed to solve widespread optimization problems, including but not limited to engineering design, finance, production systems, and many others. The idea of using the genetics principles for optimization was first proposed by Holland (1992a, 1992b) in the 1960s. Since then, GAs have been developed and refined by many researchers and are now known as one of the most powerful optimization techniques available.

The basic idea behind GAs is to simulate the natural selection process for solving problems in computational studies. In a GA, a population of candidate solutions is evolved over many generations using three basic operations: selection, crossover, and mutation (Katoch, Chauhan, and Kumar, 2021; Kramer and Kramer, 2017; Lambora, Gupta, and Chopra, 2019). Selection is the process by which fitter individuals are selected from the current population to form the basis of the next generation. Crossover involves exchanging genetic information between two individuals to create new offspring. Mutation introduces random changes in the genetic makeup of individuals to help explore distinct regions of the solution space.

GAs offer several unique advantages compared to traditional methods of problem-solving. One of their key benefits is their ability to function without requiring imitative information, which is often not even available in real-life problems. In addition, genetic algorithms are more effective and efficient compared to primitive methods, possessing well-aligned capabilities that can optimize both continuous and distinct functions and multi-purpose problems. Another critical advantage is that genetic algorithms aim to provide not just one but the best possible solutions, ensuring a comprehensive exploration and resolution of the corresponding problem. Additionally, genetic algorithms continually improve the accuracy and refinement of their solutions over time, providing satisfactory answers to complex problems in various fields, such as engineering, finance, and computer science, particularly in cases of large search spaces with multiple parameters (Hajireza, Darabi, and Najafi Moghaddam, 2023; Lambora et al., 2019).

In summary, genetic algorithms are a subclass of stochastic optimization techniques extensively studied and applied in various fields (Haldurai, Madhubala, and Rajalakshmi, 2016). GAs are inspired by the natural selection process, in which individuals with better traits are more likely to survive and reproduce. GAs use this principle to search for optimal solutions to problems by iteratively generating and evaluating a population of candidate solutions. The fundamental steps of a GA are as follows:

1. Initialize a population of candidate resolutions.
2. Evaluate the fitness of each solution.
3. Select the best solutions to form a new population.
4. Generate new solutions by recombining and mutating the best solutions.
5. Repeat steps 2-4 until yielding a stopping criterion.

Since the utilization of GAs is practical, researchers intensively employ them in solving various optimization problems, including scheduling, routing, and machine learning (Peng et al., 2019; Zivkovic et al., 2021).

DATASET DETAILS

In data analysis studies, the accuracy and interpretability of the results heavily depend on the quality and relevance of the dataset. This section outlines the collection process and key statistics of the dataset. The data instances were collected and generated as a Drug Review Dataset by Kallumadi and Grer (2018) from the drugs.com website. Each data sample consists of a personal opinion about a drug taken for a condition, corresponding drug and disease names, and a rating score between 1 and 10. The original data set contains 215,063 data records and the distribution of the records is visually represented in Figure 1.

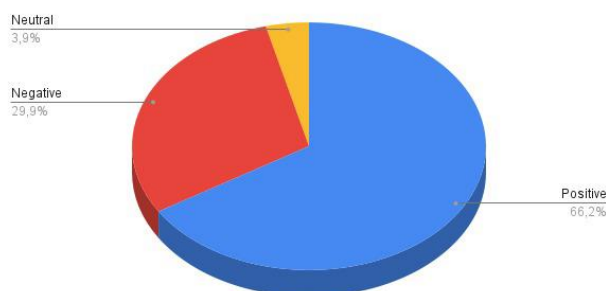


Figure 1. Class Distribution of Drug Review Examples in the Dataset

We categorized them into three groups based on their “rating” value, resulting in 142,306 annotated positive-class instances, 64,295 annotated negative-class instances, and 8,462 labeled neutral-class examples. The records were annotated as positive if the rating score was greater than or equal to 7. Conversely, the records were labeled as negative if the rating value was less than or equal to 5. The rest of the records sharing a rating value of 5 were annotated as neutral.

METHODOLOGY

This section provides a comprehensive overview of our proposed approach. In particular, we covered the principal details of data pre-processing and the structure of a deep learning model we built through the genetic algorithms’ utilization in detail, as well as the fundamental concepts in genetic algorithms in the following subsections. This work adheres to the ethical standards and principles governing scientific research and publication.

Data Preprocessing and Partitioning

In our investigation, we chose not to perform any text cleaning or n-gram separation. Instead, we used the Tokenizer function available in the Keras library (Chollet et al., 2015) to convert the textual review column into an array. This strategy resulted in the average, maximum, and minimum lengths of the text instances being 89, 1992, and 0, respectively. Based on these length values, we set the maximum length for the padding sequence to 1000. As mentioned in Section 3, we utilized the rating scores to establish the class distribution for categorizing the unprocessed drug reviews in the dataset. Then, we exploited the label-encoder package from the Sklearn library (Pedregosa et al., 2011) to convert the resulting class distribution into multi-class digital data. Here, the obtained annotated data will be employed to train machine learning models that can predict the sentiment of the drug review instances in the test set. Lastly, we divided the data set into three separate collections, with 70% assigned to training, 20% to testing, and 10% to validation.

Selection in Genetic Algorithms

In genetic algorithms, the selection concept chooses individuals from a population to participate in reproduction processes. The main goal is to ensure that the best individuals in the population are more likely to be selected for reproduction so that their genes can be transferred to the next generation. In our experiments, we employ a selection operator based on fitness proportionate selection to determine the parents for the next generation, commonly referred to as roulette wheel selection (Jebari, 2013; Katoch et al., 2021; Lipowski and Lipowska, 2012; Rathore and Rathore, 2016). This approach gives individuals with higher fitness scores a greater likelihood of being selected as parents. Then, we normalize the fitness scores of all individuals such that they sum up to one for satisfying proportionality. Subsequently, we randomly selected two parents from the population based on their normalized fitness scores. Apart from the proportionate fitness selection, there are several selection methods available in genetic algorithms, such as those mentioned below:

- *Tournament selection:* In this method, a few individuals are randomly selected from the population, and chosen the best among them as a parent for the next generation. This process is repeated to select the second parent (Fang and Li, 2010; Greenstein, Elsey, and Hutchison, 2023; Jebari, 2013; Katoch et al., 2021; Rathore and Rathore, 2016).

- *Rank-based selection*: This approach assigns ranks to individuals based on their fitness scores and selects parents based on their ranks rather than their fitness scores (Jebari, 2013; Katoch et al., 2021; Pencheva, Atanassov, and Shannon, 2009; Rathore and Rathore, 2016; Zheng and Wen, 2023).
- *Stochastic universal sampling*: This strategy assigns probabilities to candidate solutions based on fitness and selects them using a roulette wheel approach. This method promotes diversity while favoring fitter solutions (Jebari, 2013; Katoch et al., 2021; Pencheva et al., 2009).

Crossover in Genetic Algorithms

The crossover is a genetic operator that combines the genetic information of two parents to generate new offspring. It is one way to stochastically generate new solutions from an existing population and is naturally analogous to the crossover that happens during sexual reproduction in biology. In this study, we utilize a one-point crossover (Katoch et al., 2021; Pachuau, Roy, and Kumar Saha, 2021; Rathore and Rathore, 2016) operator that involves choosing a random crossover point and exchanging the values of the parameters before and after that point between two parents to generate two offspring. Specifically, we select a random crossover point for each parent pair and swap the values of the parameters before and after that point. We add the offspring produced by each parent pair to the next generation. We repeat this process until we obtain the desired number of offspring. Additionally, other crossover techniques used in genetic algorithms are listed below:

- *Multi-point crossover*: This approach involves selecting multi-crossover points instead of one and exchanging the parameter values between the parents within that segment (Katoch et al., 2021; Pachuau et al., 2021; Rathore and Rathore, 2016).
- *Uniform crossover*: In this method, each parameter value of the offspring is randomly selected from either parent with equal probability (Katoch et al., 2021; Pachuau et al., 2021; Rathore and Rathore, 2016).
- *Arithmetic crossover*: This operator considers taking a weighted average of the parameter values of the parents to generate the offspring (Kora and Yadlapalli, 2017; Pachuau et al., 2021; Rathore and Rathore, 2016).

Mutation in Genetic Algorithms

The mutation is a genetic operator that introduces random changes to an individual's genetic structure (Katoch et al., 2021; Rathore and Rathore, 2016). It is analogous to the usual mutation process that happens during biological reproduction. Technically, it is advantageous to introduce new genetic characteristics into the population, which can help to improve the population's diversity and prevent it from becoming stagnant. In this study, the mutation probability was 0.5, so each parameter is randomly mutated for each offspring in the current generation. If a parameter is selected for mutation, a new random value is generated for that parameter within its search space limits. By incorporating this technique, the population can explore new and unexplored search space areas beyond those generated by the crossover operator. This process can potentially lead to the identification of more optimal solutions and the avoidance of local optima. There are various mutation techniques applicable in genetic algorithms, including:

- *Gaussian mutation*: This method adds a random value drawn from a Gaussian distribution to the parameter value (Rathore and Rathore, 2016; Yan, 2023).
- *Boundary mutation*: This operator perturbs the parameter value by a fixed amount and ensures that the new value remains within the search space limits (Katoch et al., 2021; Rathore and Rathore, 2016).
- *Non-uniform mutation*: This approach involves applying a varying amount of perturbation to the parameter value depending on the generation number or the fitness score of the individual (Katoch et al., 2021; Rathore and Rathore, 2016).

Search Space and Optimization Parameters for Hyper-parameter Tuning

This section describes the search space and optimization parameters used in hyperparameter tuning. Hyper-parameters are parameters specified before model training and can significantly affect the model's performance. The hyper-parameter tuning identifies the optimal combination of hyper-parameters to optimize the model performance. The search space consists of the distinct value spectrums explored for each hyper-parameter during optimization. In this study, we address the following mentioned six hyper-parameters and their respective ranges:

- *Embedding size*: an integer value between 32 and 128.
- *Number of neurons in the first hidden layer*: an integer between 1 and 4.

- *Number of neurons in the second hidden layer*: an integer between 1 and 8.
- *Learning rate*: a float value between 0.0001 and 0.1.
- *Batch size*: an integer value between 32 and 256.
- *Number of epochs*: an integer value between 1 and 20.

These parameters are carefully chosen to explore a wide range of possibilities while optimizing the model's performance. For instance, an embedding size of 85 is selected from the range of 32 to 128, balancing computational efficiency with embedding dimensionality. Similarly, a learning rate of 0.0473, chosen from the float range of 0.0001 to 0.1, facilitates efficient gradient descent during model training. Each parameter's range ensures thorough exploration, aiming to discover the most effective configuration that enhances model accuracy and generalization. During the optimization, the hyper-parameters are randomly sampled from the corresponding sub-search space, and the model's performance is evaluated using these hyper-parameter values. Furthermore, we specify the population size and the number of generations used in the genetic algorithm optimization to discover the best combination of hyper-parameters. In our investigation, we set the population size of six and evolved the models for up to three generations. In conjunction with the decision to employ a population size of six and restrict the number of generations to three, our choice was also informed by the nature of our dataset, which exhibits characteristics conducive to rapid learning due to its size and inherent simplicity. Given the dataset's substantial volume and straightforward patterns, we anticipated that the genetic algorithm would efficiently navigate the hyper-parameter space and converge to optimal or near-optimal solutions within a relatively short span of generations. Therefore, our experimental design aligns with the advantageous properties of the dataset, enabling us to leverage its ease of learning to achieve effective optimization outcomes within the specified constraints. Finally, we employed a mutation rate of 0.5 to introduce additional variation in the population.

Experimental Model Configurations

In this section, we present the deep learning models conducted for our sentiment analysis experiments, which incorporate LSTM architecture and genetic algorithms.

Long Short-Term Memory (LSTM) Model

Long short-term memory (LSTM) is a typical recurrent neural network (RNN) used to process sequential data. RNNs are a class of neural networks designed to process data in a sequence form, such as text or speech (Bozkurt et al., 2024; Kolukisa et al., 2021; Sherstinsky, 2020). Nevertheless, LSTMs are specifically designed to address the vanishing gradient issue, which can occur in RNNs when they are trained on long data sequences.

In our study, we constructed our deep-learning model for LSTM algorithms using the Keras deep neural network library (Chollet et al., 2015). The model architecture comprised an input layer with a dimension of 1000 as the input array was padded using the pad sequence arrangement. We then added an embedding layer with the size of which we used a number chosen randomly from the search space using genetic algorithms. Following, we incorporated a bidirectional Bi-LSTM layer (which is a powerful component for understanding long-range dependencies in the data by learning from both the antecedent and subsequent parts of a sequence), also with a number randomly chosen from the search space by genetic algorithms and included a dropout layer for fixing overfitting issues. Finally, we repeated this process for Bidirectional LSTM and dropout layers before adding a dense layer to serve as the output layer. The activation function was "Softmax", while the optimizer function was the "Adam" algorithm for the model. The loss function was determined as the sparse-categorical-cross-entropy for the LSTM model. In the training phase, the batch size was set to a number selected randomly from the search space using genetic algorithms. Then, we trained the entire LSTM network for several epochs randomly picked by the genetic algorithms while maintaining a dropout value of 0.5.

Mechanism of Genetic Algorithm-Driven Approach

In this experimental effort, we operate a population-based optimization approach to create the initial generation of candidate solutions. Specifically, we initialize the population by generating a list object called population. The population capacity is determined by the population size defined in Section 4.5. The whole process is graphically illustrated in Figure 2 with the subfigures. Technically, we iterate over each parameter space in the "search space" list using a loop mechanism to generate each candidate solution. We use the "random.uniform" function to generate a random value within the lower and upper bounds of the corresponding space for continuous variables. However, we round the relevant value to the nearest integer for discrete variables. Each parameter value is then appended to a list of parameters for that iteration. Finally, we append the list of parameters to the "population" list. This process is

repeated for each iteration of the population size, resulting in a population of randomly generated parameter values sampled from the search space explained in Section 4.5. After generating the initial population, the next step is to evaluate the fitness of each candidate solution, and thus, for assessment purposes, we use accuracy as our fitness measure. Once we have calculated the fitness scores, we normalize them to ensure they sum up to one. This operation is achieved by dividing each fitness score by the sum of all fitness scores. The resulting normalized fitness scores are then treated as probabilities for selecting parents for the reproduction process described in Section 4.2. To select parents, we use a stochastic method called roulette wheel selection, where the probability of picking a candidate solution as a parent is proportional to its normalized fitness score expressed in Section 4.2. Specifically, we randomly choose two parent candidates from the population for each offspring. Next, we make new offspring through the reproduction mechanism. In this work, we utilize a crossover operator to produce the offspring. In particular, we randomly choose a crossover point for each parent pair and swap the values of the parent parameters before and after the crossover point. This procedure is repeated until we have the desired number of offspring, as stated in Section 4.3. Finally, the newly generated offspring are added to the population by replacing the least fit members of the previous generation. This process is repeated for a fixed number of generations or until a solution that meets the desired criteria is discovered. Afterward, we implement a mutation operator in some of the offspring to promote additional diversity in the population. Specifically, we randomly select an offspring in the current generation and apply the mutation operator to one of its parameters with a probability score of 0.5. As applied for each selected parameter, we generate a new random value within its corresponding search space bounds using the “random.uniform” function.

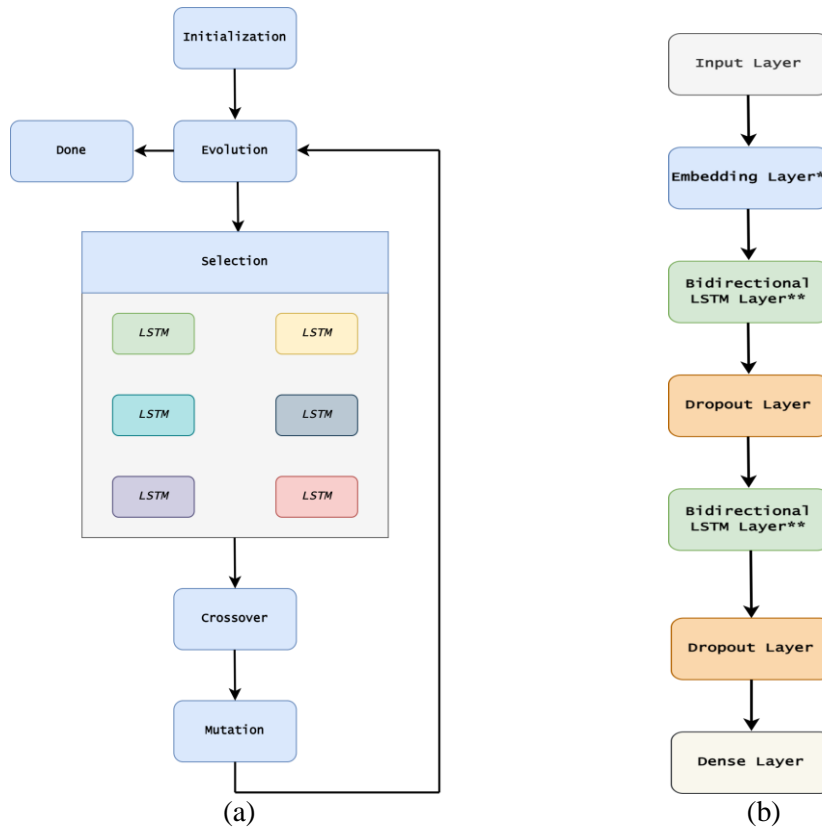


Figure 2. The sub-figure (a) represents the overall flow diagram of the proposed approach with LSTM integration, while the sub-figure (b) shows the internal LSTM architecture. The Genetic Algorithm selects *Embedding size and **Number of neurons in the corresponding layers.

RESULTS AND DISCUSSION

We conducted an experimental study to investigate the effectiveness of using a genetic algorithm-driven approach for hyper-parameter optimization in deep learning models. We specifically built LSTM models for sentiment analysis and found that the genetic algorithm approach was highly successful in tuning the hyper-parameters of the models, resulting in improved performance. Our results suggest that the genetic algorithm approach is a promising

technique for hyper-parameter optimization in deep learning, especially when an adequate amount of data is available.

As seen in Table 1 and inspected from Figures 3a, 3b, and, 3c, the fitness results indicate that exploiting genetic algorithms in deep learning can yield improved performance (the fitness score represents the accuracy achieved by the LSTM model using the hyperparameters determined by the genetic algorithm at each generation), but the amount of data used is a critical factor. When using only 5% of the data, a decrease of approximately 0.47% is observed. Nevertheless, we noticed increases in performance of 4.2% and 3.45%, respectively. These outcomes illustrate the potential value of genetic algorithms in deep learning and underscore the importance of considering the quantity of data when evaluating their efficacy.

Table 1. Fitness Scores of Models

Percentage	Generation Steps		
	1	2	3
5%	0.716690	0.706872	0.712014
10%	0.696820	0.738896	0.733286
20%	0.733021	0.726826	0.767504

These results have important implications for the deep learning models. Hyperparameter tuning is a crucial aspect of deep learning, as it can significantly impact the model’s performance. Traditional methods for hyper-parameter tuning, such as grid search and random search, can be computationally expensive and time-consuming, specifically when dealing with large and complex models. However, genetic algorithms offer a more efficient and automated approach to hyper-parameter tuning, potentially saving significant time and resources. Still, it is important to note that the effectiveness of genetic algorithms for hyper-parameter tuning may vary depending on the specific characteristics of the data and model being used. For instance, the optimal hyperparameters for a given model may differ depending on the data set being used, and the effectiveness of the genetic algorithm may depend on the model’s complexity and the hyper-parameter space’s size. Therefore, it is important for future research to explore the effectiveness of genetic algorithms across a range of data sets and model types

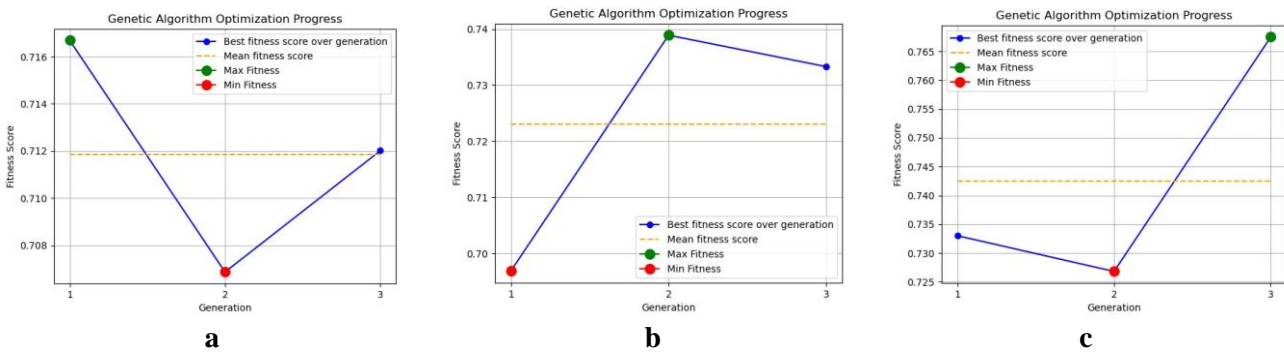


Figure 3. Overall Graphical Representation of the Fitness Scores with Unique Dataset Usage Rates. From Left to Right Images, **a.** 5% Fitness over Generation, **b.** 10% Fitness over Generation, **c.** 20% Fitness over Generation, Respectively.

In addition, it may be valuable to investigate the impact of other factors on the efficacy of genetic algorithms for hyper-parameter tuning. For example, the population size and selection criteria used in the genetic algorithm can significantly impact its performance. Similarly, the choice of hyper-parameter search space and encoding method can also play a role in determining the algorithm’s effectiveness. By exploring these factors, researchers can gain a better understanding of the conditions under which genetic algorithms are most effective for hyper-parameter tuning. In addition to the merits of the genetic approach used, we presented classification results based on the cumulative use of the dataset, as shown in Figure 4, by confusion matrices. The average correct classification

percentage increased by 4% when the dataset size was increased from 5% to 10%. A further increase in the dataset size from 10% to 20% resulted in a 7% improvement. These findings underscore the direct correlation between dataset size and classification accuracy, reinforcing the importance of data volume in enhancing the efficacy of our genetic approach. Plus, these results suggest that the genetic method is a promising method for classification tasks, even with a small amount of data, and offers valuable insights into the potential scalability and robustness of our methodology across diverse dataset scales. Ultimately, they highlight the promising applicability of our approach to various real-world scenarios characterized by varying data availability.

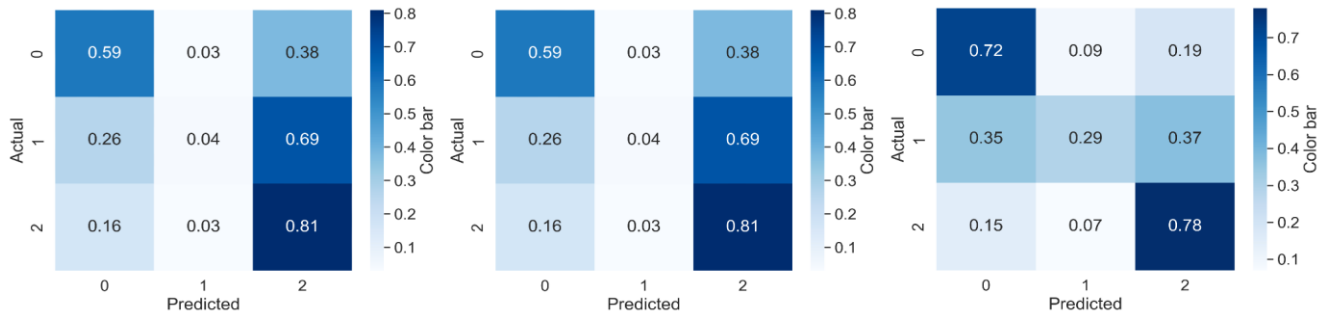


Figure 4. Confusion Matrix Representation of the Models Constructed by 5, 10, and 20 Percentages of the Dataset (0: negative, 1: neutral, 2: positive).

Overall, the findings of this study demonstrate the potential of genetic algorithms as a tool for hyper-parameter tuning in deep learning, mainly when large amounts of data are available. By further exploring the factors that impact the effectiveness of genetic algorithms, researchers can continue to refine and improve this approach, potentially leading to even more significant advancements in deep learning.

CONCLUSION

In conclusion, this study highlights the effectiveness of genetic algorithms for hyperparameter tuning in deep learning, specifically when ample amounts of data are available. The results show that increasing the data amount used for training can lead to performance improvements, indicating the potential of genetic algorithms to explore the hyperparameter space and identify better configurations. The findings have important implications for deep learning applications, as hyperparameter tuning is crucial for optimizing model performance. Genetic algorithms offer a more efficient and automated approach to hyper-parameter tuning, potentially saving time and resources compared to traditional methods. Nevertheless, the effectiveness of genetic algorithms may depend on the specific characteristics of the data and model chosen, and further research is needed to explore the impact of other factors, such as population size and selection criteria. Overall, this study suggests that genetic algorithms have great potential as a tool for hyper-parameter tuning in deep learning, and continued research in this area could lead to even better advancements.

FUTURE WORK

In the context of future research directions, this study suggests exploring the efficacy of various hyperparameter optimization techniques, including genetic algorithms, grid search, Bayesian optimization, and random search. By conducting a comprehensive comparison of these optimization approaches in terms of their time efficiency and performance, researchers can gain valuable insights into their respective strengths and limitations for addressing the problem at hand. Moreover, considering ensemble-based methods and meta-learning techniques for hyperparameter optimization could also be promising avenues for future investigation. By systematically investigating and integrating these diverse approaches, researchers can make significant strides in improving the optimization process and furthering advancements in the field.

REFERENCES

- Bozkurt, B., Coskun, K., & Bakal, G. (2024). Building a challenging medical dataset for comparative evaluation of classifier capabilities. *Computers in Biology and Medicine*, 178, 108721.
- Chollet, F., et al. (2015). Keras. <https://keras.io>.

- Fang, Y., & Li, J. (2010). A review of tournament selection in genetic programming. *Advances in computation and intelligence: 5th international symposium, isica 2010, wuhan, china, october 22-24, 2010. proceedings 5* (pp. 181–192).
- Greenstein, B.L., Elsey, D.C., Hutchison, G.R. (2023). Determining best practices for using genetic algorithms in molecular discovery. *The Journal of Chemical Physics*, 159 (9).
- Hajireza, M., Darabi, R., Najafi Moghaddam, A. (2023). The impact of accruals and free cash flow on financial stability using genetic algorithm. *Accounting and Auditing Studies*.
- Haldurai, L., Madhubala, T., Rajalakshmi, R. (2016). A study on genetic algorithm and its applications. *Int. J. Comput. Sci. Eng*, 4 (10), 139–143.
- Holland, J.H. (1992a). *Adaptation in natural and artificial systems: an introductory analysis with applications to biology, control, and artificial intelligence*. MIT Press.
- Holland, J.H. (1992b). Genetic algorithms. *Scientific American*, 267 (1), 66–73, Retrieved 2023-05-07, from <http://www.jstor.org/stable/24939139>.
- Jebari, K. (2013, 12). Selection methods for genetic algorithms. *International Journal of Emerging Sciences*, 3, 333-344.
- Kallumadi, S., & Grer, F. (2018). Drug Review Dataset (Drugs.com). UCI Machine Learning Repository. (DOI: <https://doi.org/10.24432/C5SK5S>).
- Katoch, S., Chauhan, S.S., Kumar, V. (2021). A review on genetic algorithm: past, present, and future. *Multimedia Tools and Applications*, 80 , 8091–8126.
- Kolukisa, B., Dedeturk, B.K., Dedeturk, B.A., Gulsen, A., Bakal, G. (2021). A comparative analysis on medical article classification using text mining & machine learning algorithms. 2021 6th International Conference on Computer Science and engineering (UBMK) (p. 360-365).
- Kora, P., & Yadlapalli, P. (2017, 03). Crossover operators in genetic algorithms: A review. *International Journal of Computer Applications*, 162, 34-36, <https://doi.org/10.5120/ijca2017913370>.
- Kramer, O., & Kramer, O. (2017). *Genetic algorithms*. Springer.
- Lambora, A., Gupta, K., Chopra, K. (2019). Genetic algorithm-a literature review. 2019 international conference on machine learning, big data, cloud and parallel computing (comitcon) (pp. 380–384).
- Lipowski, A., & Lipowska, D. (2012). Roulette-wheel selection via stochastic acceptance. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 391 (6), 2193–2196.
- Pachua, J.L., Roy, A., Kumar Saha, A. (2021). An overview of crossover techniques in genetic algorithm. *Modeling, Simulation and Optimization: Proceedings of CoMSO 2020*, 581–598.
- Pedregosa, F., Varoquaux, G., Gramfort, A., Michel, V., Thirion, B., Grisel, O., . . . others (2011). Scikit-learn: Machine learning in python. *the Journal of machine Learning research*, 12, 2825–2830.
- Pencheva, T., Atanassov, K., Shannon, A. (2009). Modelling of a stochastic universal sampling selection operator in genetic algorithms using generalized nets. *Proceedings of the tenth international workshop on generalized nets, sofia* (pp. 1–7).
- Peng, K., Du, J., Lu, F., Sun, Q., Dong, Y., Zhou, P., Hu, M. (2019). A hybrid genetic algorithm on routing and scheduling for vehicle-assisted multi-drone parcel delivery. *IEEE Access*, 7, 49191–49200.
- Rathore, H., & Rathore, H. (2016). Genetic algorithms. *Mapping Biological Systems to Network Systems*, 97–106.
- Sherstinsky, A. (2020). Fundamentals of recurrent neural network (rnn) and long short-term memory (lstm) network. *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 404, 132306.
- Yan, J. (2023). Adaptive scheduling of agricultural machinery equipment production lines for intelligent manufacturing. *International Journal of Manufacturing Technology and Management*, 37 (3/4), 349–361.
- Zheng, L., & Wen, Y. (2023). A multi-strategy differential evolution algorithm with adaptive similarity selection rule. *Symmetry*, 15 (9), 1697.

Zivkovic, M., K, V., Bacanin, N., Djordjevic, A., Antonijevic, M., Strumberger, I., Rashid, T.A. (2021). Hybrid genetic algorithm and machine learning method for covid-19 cases prediction. Proceedings of international conference on sustainable expert systems: Icses 2020 (pp. 169–184).

Şen, T. Ü., & Bakal, G. (2023). A transfer learning application on the reliability of psychological drugs' comments. 2023 international conference on smart applications, communications and networking (smartnets) (p. 1-6).



Kahramanmaraş Sutcu Imam University

Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 30.04.2024
Kabul Tarihi : 15.07.2024

Received Date : 30.04.2024
Accepted Date : 15.07.2024

KÖK ŞİFRE ALGORİTMA TASARIMI VE PERFORMANS ANALİZİ

ROOT PASSWORD ALGORITHM DESIGN AND PERFORMANCE ANALYSIS

Çağlar AKTÜRK^{1*} (ORCID: 0009-0004-9850-1176)

Ahsen GÖKBOĞA¹ (ORCID: 0009-0007-6230-0630)

Zeynep YEKELER¹ (ORCID: 0009-0004-1702-3417)

¹ Milli Eğitim Bakanlığı, Şehit Osman Arslan Kız AİHL, Çorum, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Çağlar AKTÜRK, cakturkmat@hotmail.com

ÖZET

Geçmişten günümüze kadar verilerin eksiksiz ve güvenli bir şekilde aktarılması sorun olmuştur. Şifreleyerek verileri aktarma yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir. Farklı şifreleme algoritmaları geliştirilmiştir. Bu algoritmaların birbirlerine göre avantaj ve dezavantajları vardır. Kullanılan şifreleme yöntemlerinin genelde yabancı kaynaklı olduğu görülmektedir. Bu çalışmada hızlı ve veri bütünlüğünü koruyan, yerli ve özgün bir algoritma tasarlanması amaçlanmıştır. King (2010)'un "Matematik Sanatı" kitabındaki metinlerden yararlanılmıştır. Farklı boyutlardaki metinlerle algoritmanın şifreleme ve şifre çözme performansı incelenmiştir. Metinsel verileri şifrelemek için simetrik şifreleme yöntemi kullanılmıştır. Algoritma, irrasyonel sayıların rasgeleliğinden yararlanılarak tasarlanmıştır. Algoritmada ortak anahtar kullanılmaktadır. Algoritma Python ile uygulama haline getirilmiş ve UTF-8 karakter seti kullanılmıştır. Şifreli metinde harf frekans analizi yapılmıştır. Orijinal metin ile arasında dağılım olarak benzerlik olmadığı görülmüştür. Metinler orijinal hale getirildiğinde herhangi bir veri kaybı olmadığı tespit edilmiştir. Şifreleme ve çözme süresi ile metinlerin boyutları ölçülmüştür. Elde edilen sonuçlar yaygın olarak kullanılan TEA, XTEA, AES, DES, RSA ve RC5 şifreleme algoritmaları ile karşılaştırılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Algoritma tasarımı, irrasyonel sayılar, performans analizi, şifreleme, şifre çözme

ABSTRACT

Complete and secure transfer of data has been a problem since the past. Transferring data by encryption is a widely used method. Different encryption algorithms have been developed. These algorithms have advantages and disadvantages compared to each other. It seems that encryption is generally of foreign origin. In this study, it was aimed to design a local and original algorithm that is fast and maintains data integrity. Texts in King's (2010) book "The Art of Mathematics" were used. The performance of the algorithm with texts of different sizes was examined. Symmetric encryption method was used to encrypt textual data. The algorithm is designed by taking advantage of the randomness of irrational numbers. A public key is used in the algorithm. The algorithm was implemented with Python and the UTF-8 character set was used. Letter frequency analysis was performed. It was seen that there was no similarity with the original text. It has been determined that there is no data loss when the texts are restored to their original form. The encryption and decryption time and the size of the texts were measured. The results obtained were compared with commonly used TEA, XTEA, AES, DES, RSA and RC5 encryption algorithms.

Keywords: Algorithm design, irrational numbers, performance analysis, encryption, decryption.

GİRİŞ

ToCite: AKTÜRK, Ç., GÖKBOĞA, A., & YEKELER, Z., (2024). KÖK ŞİFRE ALGORİTMA TASARIMI VE PERFORMANS ANALİZİ. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 27(4), 1361-1374.

Teknolojinin hızlı bir şekilde gelişmesiyle elden yapılan birçok işlem sanal ortam üzerinden gerçekleştirilmeye başlanmıştır. Bu ortamlarda önemli bilgilerin ve verilerin paylaşıyor oluşu güvenlik ihtiyacının önemini ortaya koymaktadır. Bilgilerin ve verilerin güvenli şekilde saklanması ve iletimi için günümüzde çoğu alanda kullanılan şifreleme yöntemlerinde güvenlik ve verimlilik gibi problemler ortaya çıkmıştır (İşçimen, 2023). İnternet kullanımının yaygınlaşması ile bilgilerin güvenliğinin sağlanmasının daha ciddi bir şekilde ele alınmasını gerektirmektedir, (Süküt, 2024). Bu sorunun çözülmesi için yapılan çok sayıdaki araştırmada bilginin güvenliği için gizlilik, bütünlük ve erişilebilirliğin sağlanmasının ve korunmasının insanlar açısından önemli olduğu açık bir şekilde görülmektedir (Topaloğlu vd., 2016). Bugünkü iletişim sistemleri verileri anlamlı olmayan cümleler haline getirip şifreleyerek alıcıya gönderilmesini, alıcının ise yapılan işlemin tam tersini yaparak asıl metne ulaşabilmesini sağlar (Yerlikaya, 2006). Hassanpour (2015), şifrelemeyi gizliliğin zayıf olduğu ortamlarda bilgiyi güvenli şekilde koruma ve bilginin anahtar olmadan okunmasını engelleme olarak ifade etmektedir. Bu şekilde bilgi kötü niyetli biri tarafından anlaşılmasın ve bilginin ele geçirilmesinin önüne geçilmeye çalışılır.

Şifreleme, insanların çok eski tarihlerden beri bilgilerini korumak amacıyla tercih ettiği bir yöntemdir. Fakat bilgi ve bilginin aktarım yöntemleri de zamanla değişime uğramıştır. Günümüz şartları her ne kadar daha hızlı ve büyük miktarda bilgi ulaşımına imkan sağlasa da bu durum ciddi bir güvenlik açığına ortam hazırlamıştır. Bu noktada siber güvenlik, bu açığın kapatılması ve bilgi güvenliğinin sağlanması alanında önemli bir role sahiptir (Üstün, 2022). Şifreleme ilk olarak Eski Mısırlıların anıtları üzerindeki yazılarda, daha sonrasında İbranilerin kutsal kitaplarında kullanılan kelimelerde görülmüştür (Soyalıç, 2005). Şifrelemenin tarihteki en bilinen örneklerinden biri, Julius Caesar'ın askerleri ve komutanlarıyla iletişim kurmak için kullandığı Sezar şifreleme yöntemidir (Stinson, 2002). Bu yöntemde veri, harflerin belirli ve sabit bir sayı kadar ötelenmesiyle şifrelenir. Anadolu'da geçmiş dönemlerde şifreleme ile haberleşmenin sağlandığı bazı olaylara rastlanmaktadır. Şifrelemenin kullanımının görüldüğü önemli olaylardan biri Kurtuluş Savaşı'nın dönüm noktalarından olan Büyük Taarruz'dur (Yeşilbaş, 2016). Bu savaşta askerlerin halk ile oldukça basit bir şifreleme yöntemi kullanarak haberleştikleri tespit edilmiştir.

Bilgi güvenliğinde verilerin gizli kalması, bütünlük içermesi ve doğrulanabilmesi gereken özelliklerdendir (Etem, 2022). Şifrelenen verilerin şifresi çözüldüğünde veri kaybı olmamalı, veri en yüksek düzeyde korunmalı, şifreli veri ile orijinal veri arasında kolay ilişki kurulamamalı, şifreleme işlemi basit şekilde gerçekleştirilmeli fakat şifre kolay çözülmemelidir (Yeşilbaş, 2016). Şifreleme yöntemlerinde doğal olarak güçlü ve zayıf taraflar bulunmaktadır. Şifrelenmek istenen verilere diğer kişilerin ulaşılması istenmediğinden, algoritma karmaşık hale getirilmeye çalışılmaktadır. Tercih edilecek şifreleme algoritması iyi incelenerek tercih edilmeli, hangi amaç doğrultusunda kullanılacağına göre karar verilmelidir. Şifreleme sisteminin güvenliği ne kadar iyi olursa olsun işlem hızının yavaş olması kullanım alanlarını kısıtlayacaktır. Bu nedenle, daha güvenli ve hızlı şifreleme algoritmalarının seçimine dikkat edilmelidir, (Şengel vd., 2020).

Tüm şifreleme ve şifre çözme işlemlerinde algoritma ve anahtar bulunmaktadır. Şifreleme ve şifre çözme işlemleri belirli kuralları olan algoritmalar ile yapılmaktadır. Algoritmalar matematiksel temele dayanarak oluşturulur. Nabiyeve ve Zeka (2016), verilerin gizliliğini sağlamak için yerine koyma, yer değiştirme ve cebirsel yöntemler kullanıldığını ifade ederler. Yerine koymada metindeki harflerin olduğu aynı yere başka sayı ya da semboller konulur, yer değiştirmede metindeki harfler değiştirilmeden yerleri aynı şekilde değiştirilir. Cebirsel yöntemler ise matematiksel işlemler kullanılarak oluşturulan şifrelemelerdir.

Metnin şifrelenmesi ve şifresinin çözülebilmesi için anahtara da ihtiyaç duyulmaktadır. Anahtarların aynı olduğu durumlarda bu işlemler simetrik veya gizli anahtarlı şifreleme sistemleri olarak; anahtarlar farklı olduğunda ise asimetrik ya da açık anahtarlı sistemler olarak adlandırılır (Soyalıç, 2005). Simetrik anahtarlı şifreleme, gönderici ve alıcının bilgiyi hem şifrelemede hem de şifre çözümede ortak bir anahtar kullandıkları şifrelemedir. Simetrik şifreleme, bilgiyi şifreleme ve şifreli bilgiyi çözümede çok hızlı olmasından kaynaklı günümüzde yaygın kullanılmaktadır. Simetrik anahtarın kullanıldığı sistemler asimetrik anahtarın kullanıldığı sistemlerden daha kolay ve hızlıdır; fakat bilgilerin güvenliği açısından iki tarafın anahtarı değiştirme zorunluluğu bir dezavantajdır (Aghayev, 2017). Asimetrik şifreleme yöntemleri anahtarın paylaşımı açısından daha güvenlidir. Taraflar görüşmelerine gerek kalmadan kişisel anahtarlar oluşturabilir ve bilgilerini bu anahtarla şifreleyebilirler. Sadece simetrik yöntemlerin değil asimetrik şifreleme yöntemlerinin de dezavantajları bulunmaktadır. Asimetrik şifrelemeler çok büyük sayılar ve karmaşık cebirsel işlemlerle yapılır (Kodaz ve Botsalı, 2010). Bu durum şifrelerin çözümlenmesinin ciddi bir zaman ve iyi bir donanım gerektireceği anlamına gelmektedir.

Şifrelemede geleneksel olarak bilinen ve kaydırma şifreleme diye adlandırılan Sezar şifreleme çok tercih edilmemektedir. Polat (2022), kaydırma şifrelemede aynı sayıda öteleme yapıldığı için pek güvenilir bir yöntem olmadığını, bu nedenle şifre çözmenin çok uzun zaman almayacağını ifade etmiştir. Şifrelemede geleneksel yöntemlerin yanında bir de modern yöntemler vardır. Modern şifrelemenin tüm şifreleme ve şifre çözüme algoritmalarında anahtar kullanılmaktadır (Üstün, 2022). Veriyi şifreleme ve şifre çözüme bu anahtarla yapılmaktadır. Simetrik şifreleme yöntemlerinden Veri Şifreleme Standardı (Data Encryption Standard-DES) şifreleme algoritmasında veriler sabit uzunluktaki bloklara ayrılır ve anahtar yardımıyla her blok ayrı ayrı şifrelenir. Anahtarın uzunluğuna göre şifre çözüme işlemi kolaylaşıp zorlaşmaktadır (Buhurcu, 2022). Simetrik şifreleme algoritmalarından biri de Gelişmiş Şifreleme Standardı'dır (Advanced Encryption Standard-AES). Blok şifreleme algoritması olan AES, güçlü ve hızlı bir şifreleme algoritmasıdır (Topaç, 2023). Bu algoritmanın dezavantajı basit bir matematiksel algoritma olmasına rağmen büyük bloklara sahip olduğu için fazla güç ve kaynak harcamasıdır (Kaya ve Türkoğlu, 2023). Küçük Şifreleme Algoritması (Tiny Encryption Algorithm-TEA) şifreleme algoritması blok şifrelemeyi kullanır. Diğer algoritmalarla göre basit oluşu ve daha az satırdan oluşan algoritma yapısıyla dikkat çekmektedir (Günden, 2010). Genişletilmiş Küçük Şifreleme Algoritması (Extended Tiny Encryption Algorithm-XTEA) genişletilmiş TEA olarak adlandırılır ve TEA gibi aritmetik işlemleri kullanır (Ökdem ve Kırtay, 2018). Rivest Cipher 5 (RC5) şifreleme algoritması blok ve anahtar büyüklüğü, tur sayısı ile veriye bağlı değişken özelliği bakımından diğer algoritmalarından farklıdır (Polat, 2022). Asimetrik şifreleme algoritmalarından olan Rivest-Shamir-Adleman (RSA) günümüzde de kullanılmaktadır. RSA'da gönderilecek mesaj belirli aralıktaki pozitif tam sayı bloklarına dönüşümü yapılarak şifrelenir (Topaç, 2023). Günümüzde kullanımı oldukça yaygın olan bu şifreleme sistemlerinin çoğu yabancı kaynaklıdır. Bilgi güvenliğine ciddi bir tehdit oluşturacağından yerli sistemlerin tercih edilmesi oldukça önemlidir (Ülker, 2014).

Günümüzde algoritmaların güvenliği anahtarlar ile sağlanır. Şifreleme ve şifre çözüme işlemlerinin tümünde anahtarlar kullanılır. Anahtar, gönderici ve alıcı tarafından önceden belirlenen ve başkalarının bilmediği özel verilerdir. Gönderici bu anahtarı kullanarak bilgiyi şifreler ve bir kanal üzerinden alıcıya gönderir; alıcı ise kendisine gelen bilgiyi yine anahtar yardımıyla çözerek asıl bilgiye ulaşılır (Soyalıç, 2005). Algoritmalar anahtar kullanımının en önemli avantajı uygulamaya zorla giriş yapan herhangi birinin anahtarı bilmeden hiçbir işlem yapamaması ve bilgilerin bu şekilde güvende tutulabilmesidir (Günden, 2010). Gizli anahtarlı şifreleme ve şifre çözümede aynı anahtar kullanılmaktadır (Hassanpour, 2015). Açık anahtarlı şifrelemede ise tüm kullanıcıların hem şifreleme hem de şifreyi çözümede kullandığı açık ve gizli olan iki tür anahtarı vardır (Aghayev, 2017). Açık anahtarı herkes görebilir. Gizli anahtar ise sahibi dışında kimsenin bilmediği bir anahtardır. Şifreleme işlemleri tamamlandıktan sonra şifrelenen metin gizli bir anahtarla birlikte alıcıya güvenlik ve gizlilik ilkelerine uygun bir şekilde gönderilir (Özyılmaz, 2014).

Şifrelemede en önemli unsurlardan biri de anahtar değişiminin nasıl yapıldığıdır. Şifrelemede sürekli olarak aynı anahtar kullanılmamalı, kullanılan gizli anahtar belirli ve kısa periyotlarla değiştirilmelidir. Daha önceden birbiriyle tanışmayan kişiler arasında anahtar alışverişi yapılması güvenlik açığı ortaya çıkarabilir (Soyalıç, 2005). Diffie-Hellman anahtar değişimi algoritması şifreleme alanında bir dönüm noktası kabul edilebilir; çünkü bu zamana kadar önemli bir sorun teşkil eden anahtar değişiminde kişilerin yüz yüze görüşmesi gibi bir güvenlik açığı oluşturmadan çözüm getirmiştir (Ülker, 2014). Bu yöntem ile simetrik şifreleme algoritmasında kullanılan gizli anahtar belirli aralıklarla değiştirilebilir ve değişimdeki güvenlik sorunu ortadan kalkmış olur.

Güçsüz bir şifreleme algoritması beraberinde dezavantajdan başka hiçbir şey getirmeyecektir. Şifreleme algoritmaları sistemin hızı ve maliyeti gibi kriterler de göz önünde bulundurularak tasarlanmalıdır. Sistemin güvenliğini kanıtlamak için literatürde kabul görmüş bazı analizler kullanılmalıdır. Bunlardan biri de harf frekans analizidir (Etem, 2022). Şifrelemenin hangi dilde yazıldığı bilirse frekans analizi yapmak daha kolay olmaktadır (Çimen vd., 2008). Bu yöntem bir dilin sahip olduğu belirli yapısal nitelikleri kullanarak şifre çözüme işlemi gerçekleştirilmeyi hedeflemektedir (Arda ve Buluş, 2003). Türkçede en çok kullanılan sesli harfler A, E, İ ve sessiz harfler ise N, R, L, K, D; en az kullanılan harfler ise C, Ö, P, F, J'dir (Dalkılıç ve Dalkılıç, 2002). Harf frekans analizinde metnin oluşturulduğu dilde en çok kullanılan harfler ile şifrelenmiş metinde en çok bulunan harflerin sıklığı belirlenmekte, en çok kullanılan harfler karşılıklı olarak eşleştirilip ve yerine koyulmaktadır (Buluş, 2006). Bu şekilde işlem tüm harflere uygulanarak metin çözülmeye çalışılmaktadır. Frekans analizi en çok kullanılan harften en az kullanılanlara kadar eşleşmelerle yapıldığında şifre çözüme işlemindeki başarı oranı artmaktadır (Çimen vd., 2008). Bu analiz aynı

zamanda şifreli metni çözmek için kullanılan bir saldırı yöntemidir. Algoritmaların da bu gibi saldırılara karşı güçlü olması gerekmektedir.

Bu çalışmanın amacı, gelişen teknoloji ile birlikte güvenlik ihtiyacına yönelik güvenli ve verimli bir şifreleme algoritması tasarlanması ve incelenmesidir. Çalışmada tasarlanan algoritma ile geleneksel ve günümüz şifreleme yöntemlerini ele alarak avantaj ve dezavantajlarını analiz etmektedir. Bilginin aktarımı ve siber güvenli açısından daha etkin stratejilerin geliştirilmesi açısından literatüre katkı sağlaması beklenmektedir.

Literatür Araştırması

Literatürde şifreleme ile ilgili birçok çalışma vardır. Sivan vd. (2023), Buhurcu (2022), Eskicioğlu ve Işık (2022), Topaloğlu vd. (2016) yeni bir şifreleme algoritma tasarımı yapmışlardır. Sivan vd. (2023), yaptıkları çalışmada verileri üç anahtar kullanarak ASCII kodu ile şifrelemiştir. Veriler yüksek hızda ve kayıpsız şekilde metin ve rakamlar olan her veri şifrelenmiştir. Yapılan testler sonucunda yüksek verilerde bile oldukça hızlı bir sonuç elde edildiği sonucuna ulaşmışlardır. Üç anahtar kullanılıyor olması şifrelemede güvenliği artırmasına rağmen anahtar yönetiminde karmaşıklık oluşturabilmektedir. Buhurcu (2022) çalışmasında, simetrik anahtarlı AES algoritması kullanarak güvenli bir iletişim modeli önermiştir. Gizli anahtar için asimetrik şifreleme algoritması olan RSA kullanmıştır. Mobil cihazlar için bir mesajlaşma uygulaması geliştirerek uygulamanın performansını incelemiştir. Uygulama yüksek güvenlik sağlamıştır. Her veri türünde etkili sonuç vermemektedir. Eskicioğlu ve Işık (2022), çalışmalarında hibrit bir şifreleme algoritması tasarlamışlardır. Üç kademededen oluşan algorithmada verilerin güvenliği sağlanmaya çalışılmıştır. Şifreleme durağan olarak belirlenen anahtarlar ve değişken indislerle gerçekleştirilmektedir. Algorithmada pi sayısı ile fibonacci dizisi kullanılmıştır. Algoritmanın mobil ortamlarda sorunsuz çalıştığı, uygulanabilirliği farklı yöntemlerle denendiği ve yüksek doğruluk sonuçları elde edildiği görülmüştür. Dinamik indis değişimi ve rasgele sayı ataması düşük performanslı cihazlarda kaynak tüketimin artırabilmektedir. Topaloğlu vd. (2016), çalışmalarında bilgi güvenliğini sağlamak için alfabetik yer değiştirme tekniğine dayanan özgün bir şifreleme algoritması geliştirmişlerdir. Algoritma tasarımında Sezar Şifreleme, Çoklu Alfabe ve Enigma tekniklerinden yararlanılmışlardır. Bu algoritma ile metinler şifrelenerek güvenli şekilde saklanabilmekte ve gerektiğinde de şifresi çözümlenerek eski haline getirilmektedir.

Simetrik ve asimetrik şifreleme algoritmalarının incelenmesi ve karşılaştırması ile ilgili olarak Ülker (2014), Günden (2010), Kodaz ve Botsalı (2010), Buluş (2006) ve Yerlikaya (2006); şifreleme algoritmalarının performans analizi ile ilgili olarak Rameel ve Asif (2024), Kaya ve Türkoğlu (2023), Karagöz (2022), Ökdem ve Kırtay (2018) çalışmaları bulunmaktadır. Garipcan ve Erdem (2024) çalışmalarında rasgelelik kavramından bahsetmişlerdir. Rasgele sayı üreticilerinin nasıl çalıştığını açıklamışlardır. Çalışmalarının etkinliğini ve güvenilirliğini istatistiksel testlerle incelemiştir.

Mevcut çalışma ve algoritmalarda farklı yöntemler kullanılmaktadır. Yerli algoritmalarla literatürde daha az karşılaştırıldığı görülmüştür. Bu çalışmanın yapılma nedeni verilerin saklanması ve aktarılmasının her zaman güncel bir konu olması ve yerli bir şifreleme algoritma tasarımına katkı sağlamak olmuştur. Bu çalışmada yeni ve özgün bir algoritma tasarlanmış, performans analizi yapılarak güncel algoritmalarla karşılaştırılmıştır. Kök Şifre algoritmasının diğer çalışmalardan farkı; algorithmada irrasyonel sayıların rasgeleliğinin kullanılmasıdır. Yapılan çalışmanın kriptoloji alanına katkı sağlaması düşünülmektedir.

YÖNTEM

Bu çalışmada, metinsel verilerin şifrelenip güvenli şekilde gönderilmesi ve eksiksiz şekilde şifrenin çözülmesi için simetrik şifreleme yöntemi kullanılmıştır. İrrasyonel sayıların rasgeleliğinden yararlanılarak özgün bir şifreleme ve şifre çözme algoritması tasarlanmıştır. Metinsel veriler şifrelenip metinsel veriler elde edilmiştir. Bu algoritma için sözde kodu Şekil 1'deki gibidir. Bu algoritma Python dilinde kodlanarak uygulama haline getirilmiştir.

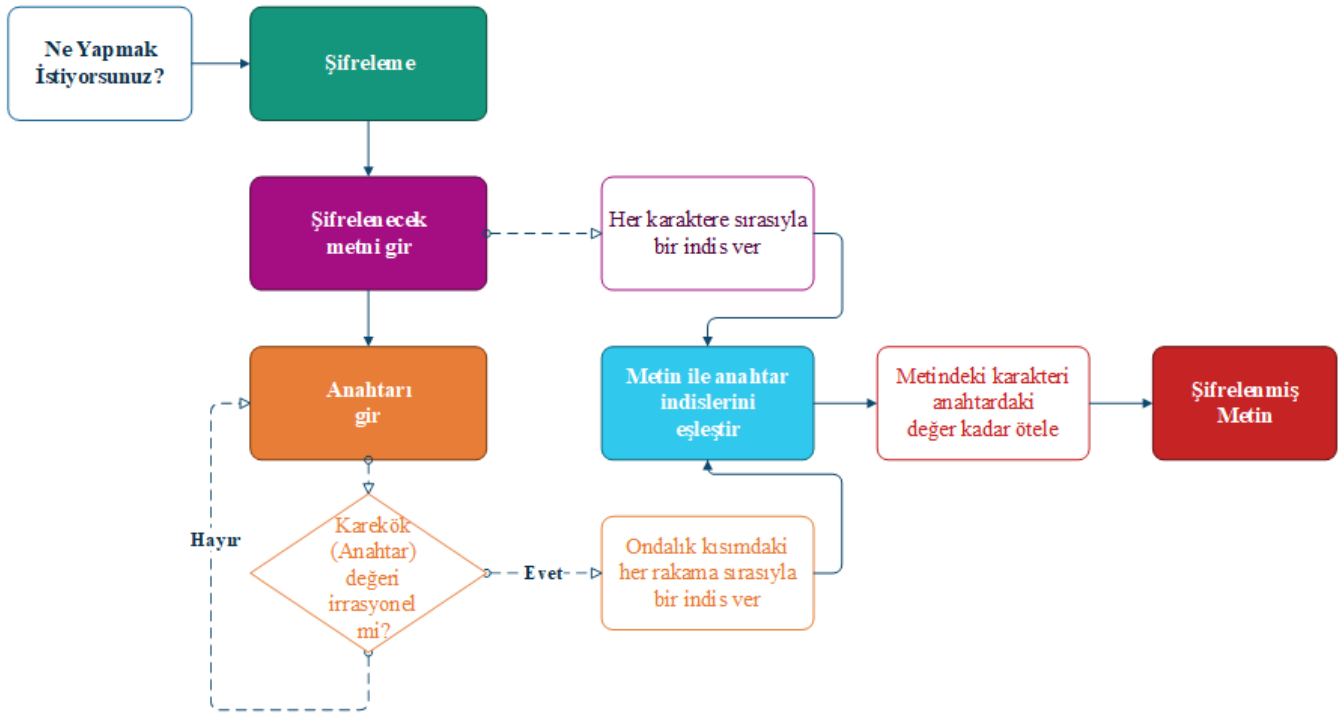
Programlamada Türkçe karakterleri de kapsadığı için UTF-8 karakter seti seçilmiştir. Algoritmanın şifreleme ve şifre çözme performansları incelenmiştir. Şifrelenen ve şifresi çözülen verinin boyutu (byte), şifreleme ve şifre çözme süreleri (milisaniye) program yardımıyla ölçülmüştür. Kök Şifre olarak adlandırdığımız algoritmanın performansının incelenmesinde King (2010)'un "Matematik Sanatı" kitabındaki metinlerden faydalanmıştır. Literatürde yaygın olarak kullanılan güncel şifreleme algoritmaları ile aynı boyuttaki metinler üzerindeki şifreleme ve şifre çözme performansları karşılaştırılmıştır.


```
1 Başla
2 Göster "Şifrelenecek metni gir:"
3 metin = Kullanıcı_Girdisi()
4 Göster "Şifreleme anahtarını gir:"
5 anahtar = Kullanıcı_Girdisi()
6 Eğer Karekök_Irrasyonel_Mi(anahtar) ise:
7     anahtar_rakamları = Ondalık_Rakamları_Al(Karekök(anahtar))
8     şifrelenmiş_metin = ""
9     For i = 0 to Uzunluk (metin) - 1:
10        öteleme_değeri = anahtar_rakamları [i % Uzunluk(anahtar_rakamları)]
11        şifrelenmiş_metin += Karakter_Ötele(metin[i], öteleme_değeri)
12    Göster "Şifrelenmiş Metin: " + şifrelenmiş_metin
13 Değilse:
14    Göster "Anahtar irrasyonel değil, lütfen başka bir anahtar girin."
15 Bitir
```

Şekil 1. Kök Şifre Algoritmasının Söзде Kodu

Şifreleme Algoritması

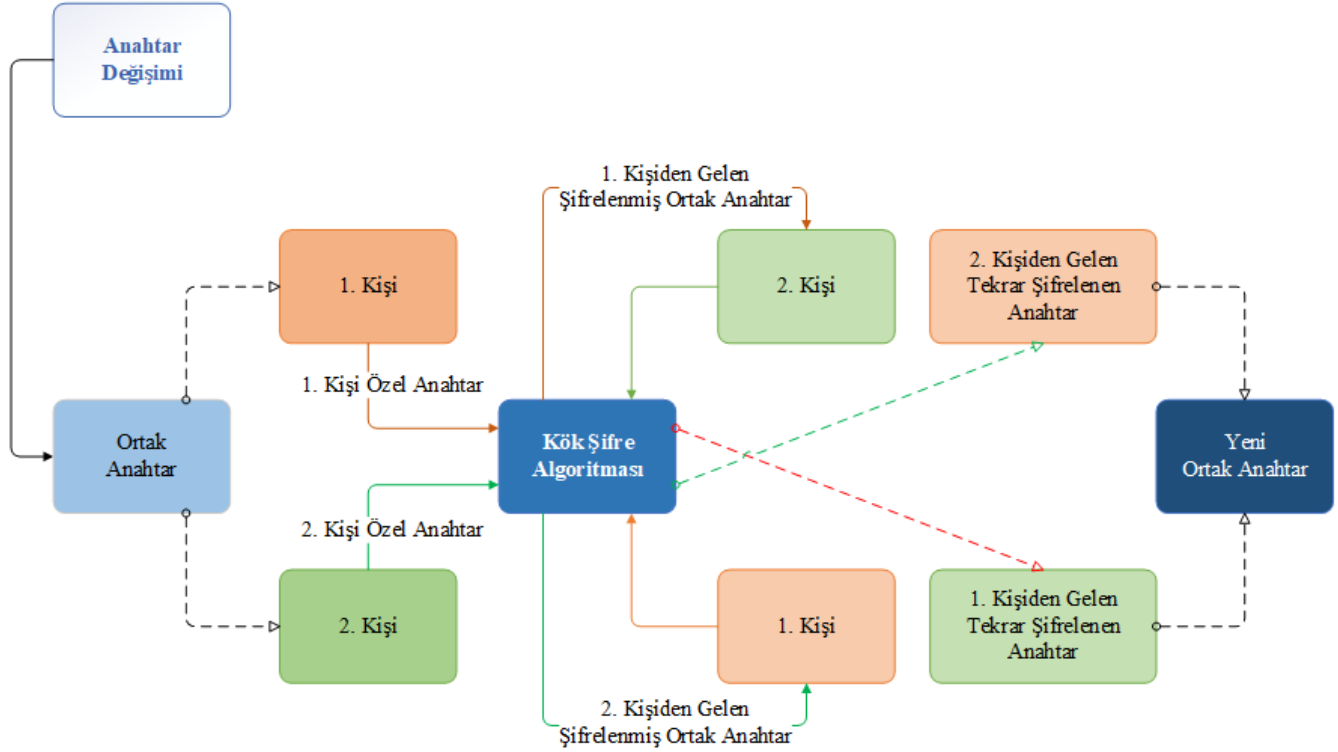
Şifreleme iki kısımdan oluşmaktadır. İlk kısımda şifreleme anahtarı uygun şekilde seçilmekte; ikinci kısımda metindeki harf, rakam ve boşluk gibi karakterler anahtar ile eşleştirilip şifrenmektedir. Metnin şifrenmesi ve şifrenin çözülmesi için ortak bir anahtar kullanılmaktadır. Anahtar için seçilen sayının karekök değeri bulunmaktadır. Bu değer ondalık kısmındaki her rakama bir indis atanmaktadır. Şifrenmek istenen metindeki her karaktere de birer indis atanmakta ve bu karakterler aynı indisli anahtar değeri ile eşleştirilmektedir. Daha sonra her karakter eşleşmedeki anahtar değeri kadar ötelenmektedir. Bu şekilde her karaktere karşılık yeni bir karakter tanımlanmaktadır. Şifreleme algoritması Şekil 2’de gösterilmiştir. Şifreleme yapılan anahtar ile şifre çözme işlemi yapılmaktadır, aksi takdirde metin eski haline getirilememektedir.



Şekil 2. Şifreleme Algoritması

Anahtar Seçimi

Şifreleme algoritması irrasyonel sayıların ondalık kısmındaki rakamların düzensiz sıralanmasından faydalanılarak oluşturulmuştur. Thomas vd., (2014) irrasyonel sayıları, ondalık açılımları tekrarlı olmayan ve rasyonel olmayan reel sayılar olarak tanımlamıştır. İrrasyonel sayıların ondalık kısmındaki rakamlar düzenli değil rasgele şekilde gelmektedir. Bunun sonucunda hangi karaktere ne kadar öteleme yapılacağı belli değildir. Anahtar seçiminde irrasyonel sayılar olması istenmektedir. Eğer karekökten çıkabilen rasyonel bir sayı anahtar olarak girilecek olursa program uyarı vererek farklı bir değer girilmesini istemektedir. Sıfır rakamı ile eşleşen karaktere öteleme yapmamaktadır. Her anahtar değişiminde farklı ötelemelerle yeni şifrelenmiş metinler ortaya çıkmaktadır. Şifre çözme sürecinde ise şifreleme algoritması ters şekilde çalışmaktadır.



Şekil 3. Anahtar Değişimi

Anahtar Değişimi

Anahtar güvenlik açısından ya da istenildiği zaman değiştirilebilmektedir. Anahtar değişimi de aynı şifreleme algoritması ile yapılmaktadır. Şekil 3'te anahtar değişim algoritması gösterilmektedir. Asimetrik şifreleme yöntemlerinde olduğu gibi ortak anahtarın yanı sıra anahtar değişiminde kullanmak için herkesin kendine özgü bir özel anahtarı vardır. Ortak anahtar şifreleme ve şifre çözme için, özel anahtar da anahtar değişiminde gereklidir. Ortak anahtar iki kişi tarafından karşılıklı olarak bilinse de özel anahtar sadece kişiler bilmektedir. En son kullanılan ortak anahtar kişilerin kendine özel anahtarları ile şifrelenip birbirine gönderilir. Gelen şifreli mesaj tekrar kişiye özel anahtarla şifrelendiğinde aynı anda iki tarafta da ortak bir karakter oluşmaktadır. Programda karaktere karşılık gelen sayı değeri anahtar olarak kabul edilmekte, bir sonraki anahtar değişimine kadar güvenli şekilde kullanılmaktadır.

BULGULAR

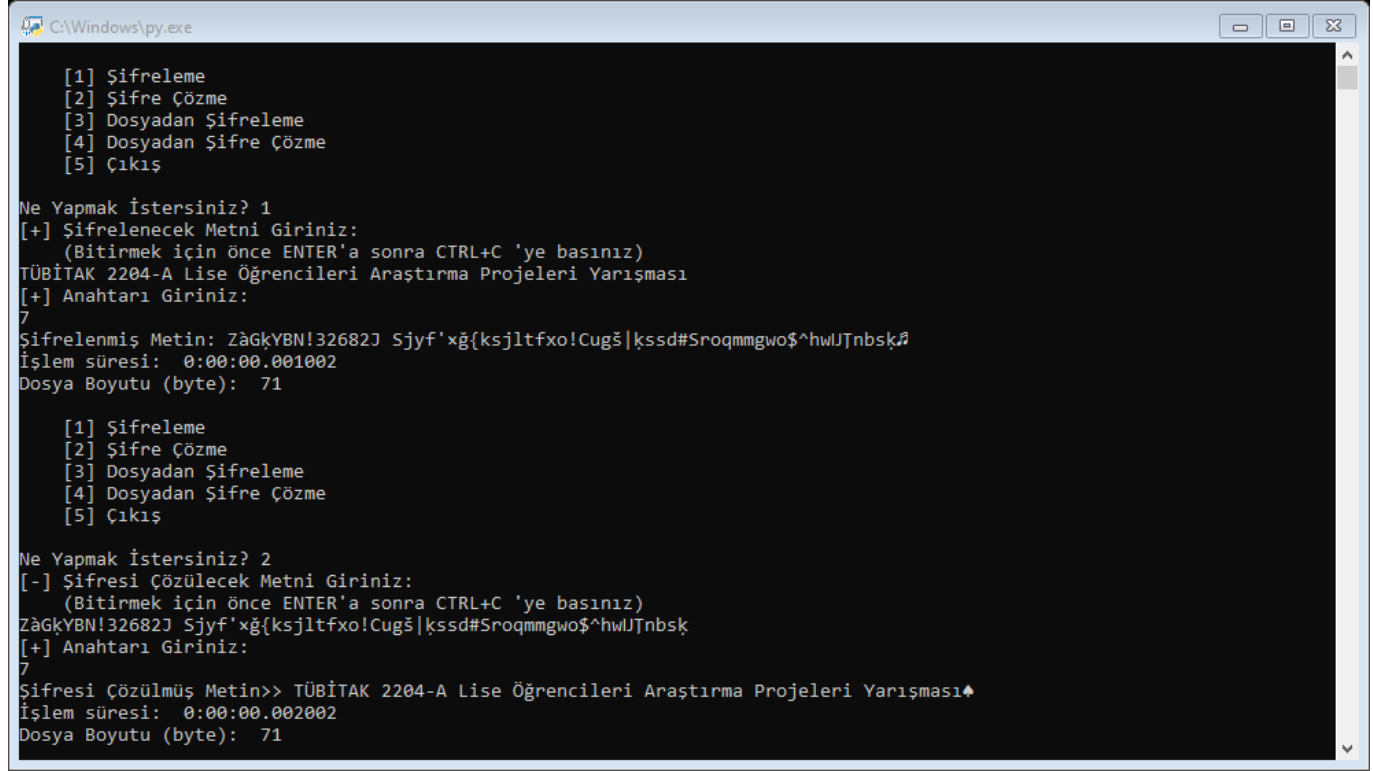
Bu kısımda farklı dosya boyutundaki metinlerin şifreleme ve şifre çözme süreleri ile elde edilen verilerin boyutları gösterilmiştir. Programda süreler milisaniye (ms) ve dosya boyutları byte (B) ile gösterilmektedir. Dosya boyutlarında kilobyte (KB) dönüşümü yapılarak incelenmeye başlanmıştır (1KB = 1024B). Bu işlemler AMD A4-5000 APU Radeon, HD 1.50 GHz İşlemci, 4.00 GB RAM donanıma sahip bilgisayarda yapılmıştır.

Metin Şifreleme ve Şifre Çözme Bulguları

Kök Şifre algoritmasının uygulaması "TÜBİTAK 2204-A Lise Öğrencileri Araştırma Projeleri Yarışması" metni üzerinde gösterilsin. Şifreleme için öncelikle uygun bir anahtar seçimi yapılır. Burada anahtar olarak karekök değeri

irrasyonel sayı olan “7” sayısı alınsın. Karekök sayısının değeri 2,6457513... şeklindedir. Anahtarın ondalık kısmında yer alan 6457513... rakamları örnek metindeki her karakter ile eşleştirilir ve anahtardaki her bir rakam değeri kadar ötelenir. “T” karakteri 6, “Ü” karakteri 4, “B” karakteri 5, ... kadar ötelenmektedir. UTF-8 karakter setinde öteleme sonucu “T” karakteri “Z”, “Ü” karakteri “à”, “B” karakteri “G”, ... karakterlerine dönüşerek örnek metin “ZàGkYBN!32682J Sjyf'xğ{ksjltfxo!Cugš|kssd#Sroqmmgwo\$^hwIJŦnbsk” olarak şifrelenir.

Yapılan işlemler tersten yapılarak şifreli metin orijinal hale gelmektedir. Örnek metnin “7” anahtarı ile şifrelenmesi ve şifrenin çözülmesi Şekil 4’te verilmiştir. Şifrelenen metnin şifresi çözüldükten sonra orijinal metinle aynı olduğu görülmüştür.



```
C:\Windows\py.exe

[1] Şifreleme
[2] Şifre Çözme
[3] Dosyadan Şifreleme
[4] Dosyadan Şifre Çözme
[5] Çıkış

Ne yapmak istersiniz? 1
[+] Şifrelenecek Metni Giriniz:
(Bitirmek için önce ENTER'a sonra CTRL+C 'ye basınız)
TÜBİTAK 2204-A Lise Öğrencileri Araştırma Projeleri Yarışması
[+] Anahtarı Giriniz:
7
Şifrelenmiş Metin: ZàGkYBN!32682J Sjyf'xğ{ksjltfxo!Cugš|kssd#Sroqmmgwo$^hwIJŦnbsk
İşlem süresi: 0:00:00.001002
Dosya Boyutu (byte): 71

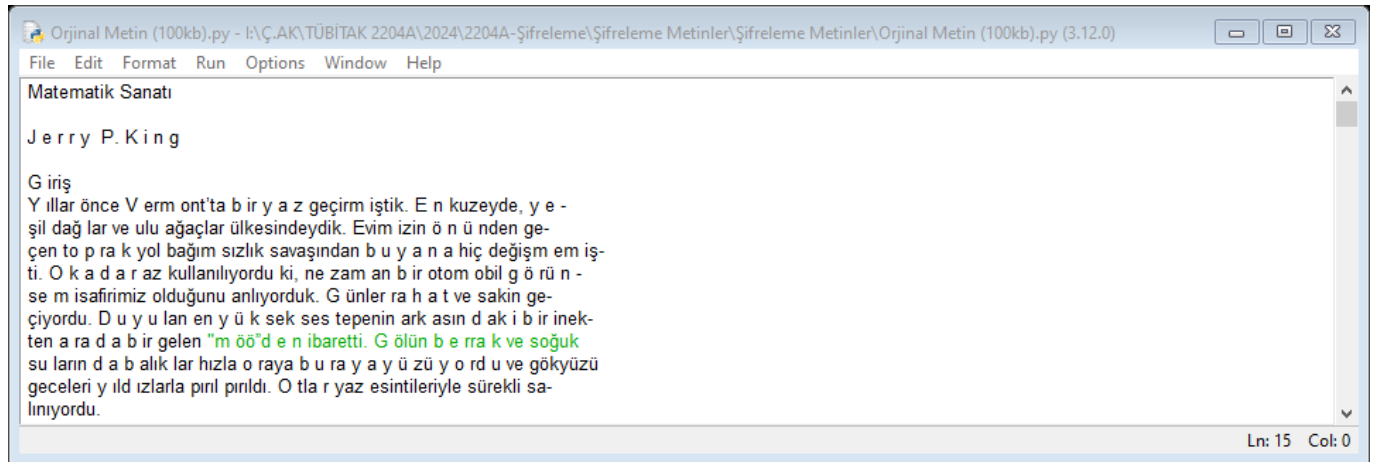
[1] Şifreleme
[2] Şifre Çözme
[3] Dosyadan Şifreleme
[4] Dosyadan Şifre Çözme
[5] Çıkış

Ne yapmak istersiniz? 2
[-] Şifresi Çözülecek Metni Giriniz:
(Bitirmek için önce ENTER'a sonra CTRL+C 'ye basınız)
ZàGkYBN!32682J Sjyf'xğ{ksjltfxo!Cugš|kssd#Sroqmmgwo$^hwIJŦnbsk
[+] Anahtarı Giriniz:
7
Şifresi Çözülmüş Metin>> TÜBİTAK 2204-A Lise Öğrencileri Araştırma Projeleri Yarışması
İşlem süresi: 0:00:00.002002
Dosya Boyutu (byte): 71
```

Şekil 4. Şifreleme ve Şifre Çözme Uygulaması

Metin Dosyası Şifreleme ve Şifre Çözme Bulguları

Algoritmanın performansının incelenmesinde King (2010)’un “Matematik Sanatı” kitabından faydalanmıştır. Boyutu yüksek olan metinsel veriler dosya olarak şifrelenmekte ve şifresi çözülebilmektedir.



```
Orjinal Metin (100kb).py - I:\Ç.AK\TÜBİTAK 2204A\2024\2204A-Şifreleme\Şifreleme Metinler\Şifreleme Metinler\Orjinal Metin (100kb).py (3.12.0)
File Edit Format Run Options Window Help

Matematik Sanatı

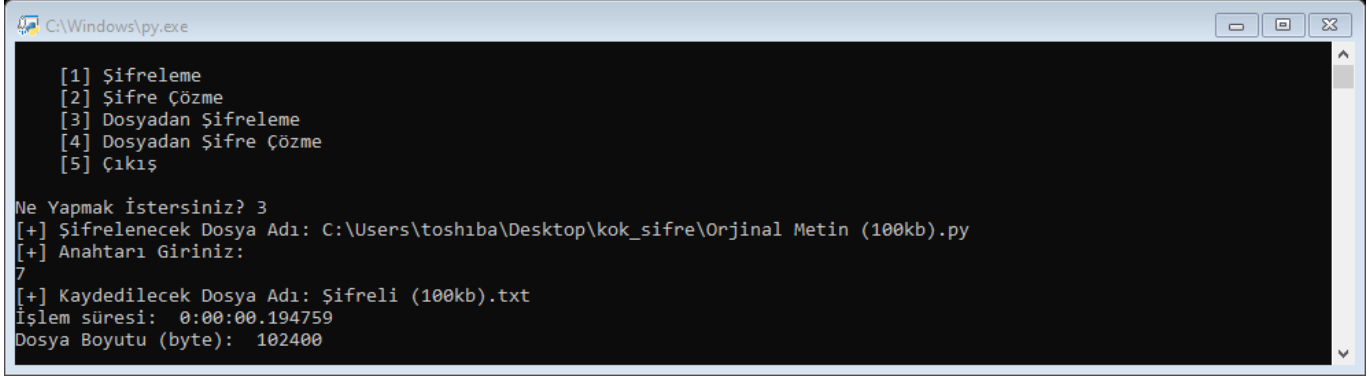
Jerry P. King

Giriş

Yıllar önce Vermont'ta b ir y a z geçirm iştik. E n kuzeyde, y e -
ş il dağ lar ve ulu ağaçlar ülkesindeydik. Evim izin ö n ü nden ge-
ç en to p r a k yol başım sızlık savaşından b u y a n a hiç de ğ iş m em iş-
ti. O k a d a r az kullanılıyordu ki, ne zam an b ir otom obil g ö r ü n -
se m isafirimiz olduğunu anlıyorduk. G ünler ra h a t ve sakin ge-
ç iyordu. D u y u lan en y ü k sek ses tepenin ark asın d ak i b ir inek-
ten a r a d a b ir gelen "m ö ö'd e n ibaretti. G ö lün b e r r a k ve soğuk
su ların d a b alık lar hızla o r a y a b u r a y a y ü z ü y o r d u ve gökyüzü
geceleri y ild izlarla p ırl p ırlıdı. O tla r yaz esintileriyle sürekli sa-
lınyordu.
```

Şekil 5. 100KB’lık Orijinal Metin

Kitaptaki metinler 100 KB, 200 KB, 300 KB, 400 KB ve 500 KB olarak bölümlere ayrılmış ve Şekil 5’deki gibi .py uzantılı şekilde metinsel dosya haline getirilmiştir. Şifreleme yapılması için Kök Şifre uygulamasına yüklenmiş ve şifreleme anahtarı “7” olarak seçilmiştir. Şekil 6’da 100 KB’lık dosyanın şifreleme uygulamasındaki şifreleme süresi ve dosya boyutu gösterilmektedir. Şifrelenen metin Şekil 7’deki gibi .txt dosyası olarak kaydedilmiştir.

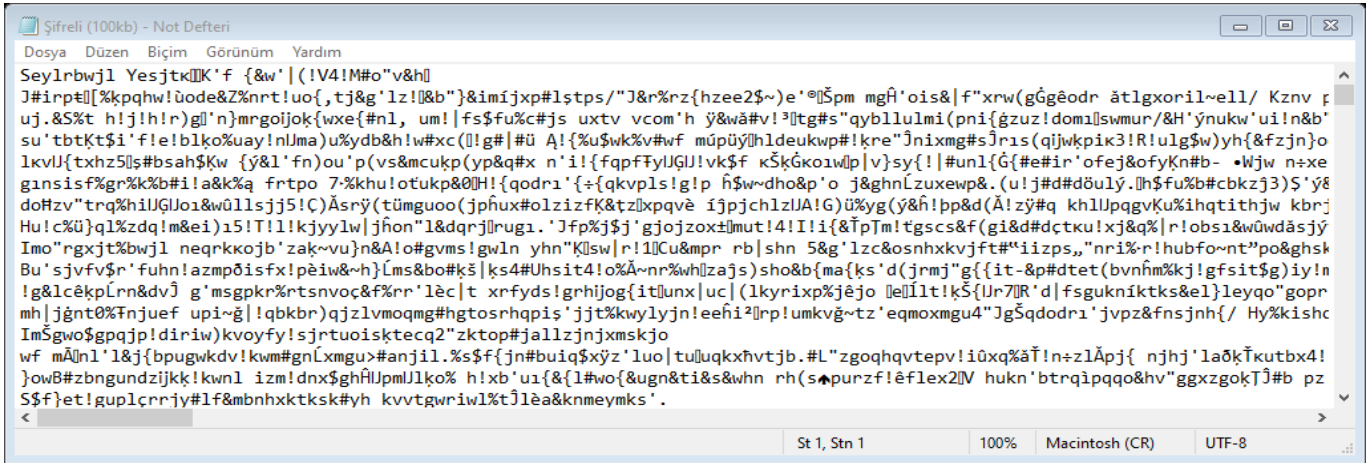


```
C:\Windows\py.exe

[1] Şifreleme
[2] Şifre Çözme
[3] Dosyadan Şifreleme
[4] Dosyadan Şifre Çözme
[5] Çıkış

Ne yapmak istersiniz? 3
[+] Şifrelenecek Dosya Adı: C:\Users\toshiba\Desktop\kok_sifre\Orjinal Metin (100kb).py
[+] Anahtarı Giriniz:
7
[+] Kaydedilecek Dosya Adı: Şifreli (100kb).txt
İşlem süresi: 0:00:00.194759
Dosya Boyutu (byte): 102400
```

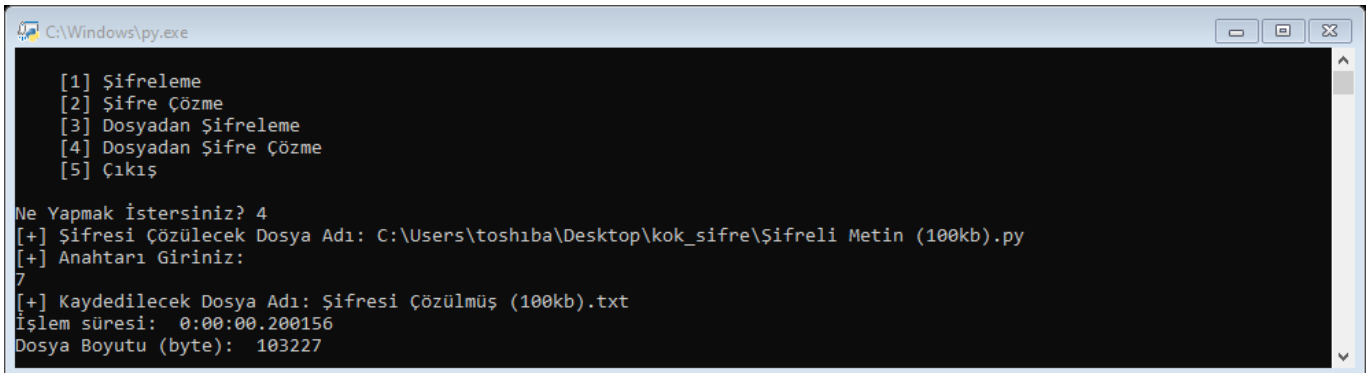
Şekil 6. Kök Şifre ile 100KB’lık Metin Dosyasını Şifreleme



```
Şifreli (100kb) - Not Defteri
Dosya Düzen Biçim Görünüm Yardım
Seylrwbwl YesjtkK'f {&w}|(IV4!M#o"v&h|
J#irpE|[%kppqhw!üode&Z%nrnt!uo{,tj&g'lz!&B"}&imijxp#lstsps/"J&nrz{hzee2$~}e'°İşpm mgâ'ois&|f"xrw(gGgêodr ätlgxoril~ell/ Kzmv f
uj.&S%t h!j!h!r)gl'n)mrgoijoj{xwe{#nl, um!|fs$fu#c#js uxtv vcom'h ý&wâ#v!³İtg#s"qybl1ulmi(pni{ğzuz!domlİswmur/&H'ýnukw'ui!n&b'
su'tbtKt$î'f!e!blkø%uay!nlJma)u%ydb&h!w#xc(!|g#|#ü A!{|%u$wk%v#wf müpüýİhldeukwp#!kre"Jnixmg#sJrİs(qijwkpik3!R!ulğ$w)yh{&fzjn)o
lkvJ{txhz5İş#bsah$kw {ý&l'fn)ou'p(vs&mcukp{yp&q#x n' i!{fqpFyIJGJ!vk$F kŞkGkoıw|p|v}sy{!|#unl{G{#e#ir'ofej&ofyKn#b- •Wjw n×e
gansisf%gr%k%b#i!a&k%a frtpo 7-%khu!otukp&0İH!{qodrı'{-{qkvpls!|p h$w~dho&p'o j&ghnLzuxewp&. (u!j#d#düly.İh$fu%b#cbkzj3)$'ýê
doHzv"trq%hiIJGJoi&wüİllsj5!Ç)Äsrý(tümguo(jphux#olzizf&k&t&zlxpqvé İjPjchlzİA!G)ü%yg(ý&h!pp&d(Ä!zý#q khllpqqvKu%ihqtithjw kbrj
Hu!cÜ}ql%zdq!m&ei)ı5!T!l!kyyIwl|jñon"l&dqrlİrugı. 'Jfp%j$'gjozoxİmut!4!İ!i{&İpİm!tgscs&f(gİ&d#dçtku!xj&q%|r!obsı&wüwdásjý
İmo"rgxjt%bwjl neqrkkojb'zaç~vu}n&A!o#gvm!gwl n yhn"Kİsw|r!İİCu&mp r b|shn 5&g'lzc&osnhxkvjft#"iizps,"nri%-r!hubfo~nt"po&ghsk
Bu'sjvfv$'r'fuhn!azmpdisfx!pèiw&~h)İms&bo#k$|ks4#Uhsit4!o%Ä~nr%whlZajs)sho&b{ma{ks'd(jrmj"g{{it~&p#dtet(bvñm%kj!gfsit$g)iy!n
!g&lç&kpLrn&dvj} g'msgpkr%r%tsnvoç&f%rr'lèc|t xrfyds!grhijog{itİunx|uc| (lkyrixp%jêjo İeİİlt!kŞ{İr7İR'd|fsgukniktk&e1}leyqo"gopr
mh|jğnt0%Tnjuef upi~ğ!|qbkbr)qjzlvmoqmg#hgtosrhapis'jjet%kwylyjn!eehİ²İrp!umkvğ~tz'eqmoxmgu4"JgŞqdodrı'jvpz&fnsjnh{/ Hy%kishc
İmŞgwo$gpqj|diriw)kvoyfy!sjrtuoisktec2"zktop#jallzjnJxmskjo
wf mÄİn'l&j{bpugwkdv!kwm#gñLxmgü>#anjil.%s$F{jn#buiq$xyZ'luo|tuİuqkxhvTjb.#L"zgoqhqvtepv!iüxq%ãİ!n+z1ÄPj{ njhj'lağkİkutbx4!
}owB#zbnğundzjkk!kwnl izm!dnx$ghİUpmİlko% h!xb'ui{&{l#wø{&ğn&ti&s&whn rh(s&purzf!êflex2İV hukn'btrqİpqqo&hv"ggxzgokİJb pz
S$F}et!guplçrrjy#İf&mbnhxktksk#yh kvvtgwrİw1%tİlèa&knmeymks'.
```

Şekil 7. 100KB’lık Şifrelenmiş Metin

Şekil 8’deki gibi .py uzantılı şekilde şifreli metin Kök Şifre uygulamasına yüklenmiştir. Aynı anahtar ile şifresi çözülmüştür. Şifresi çözülen metin Şekil 9’deki gibi .txt uzantılı olarak gösterilmiştir.

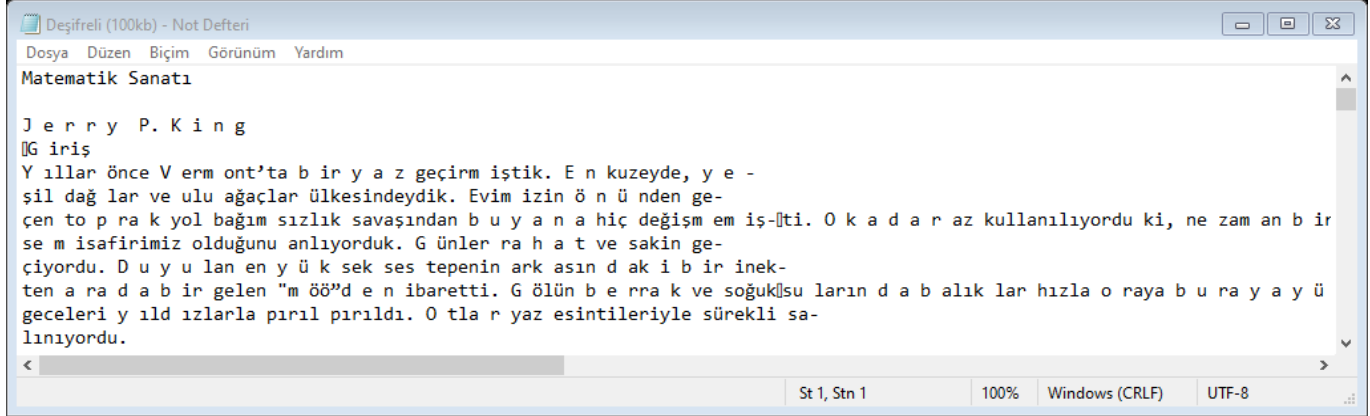


```
C:\Windows\py.exe

[1] Şifreleme
[2] Şifre Çözme
[3] Dosyadan Şifreleme
[4] Dosyadan Şifre Çözme
[5] Çıkış

Ne yapmak istersiniz? 4
[+] Şifresi Çözülecek Dosya Adı: C:\Users\toshiba\Desktop\kok_sifre\Şifreli Metin (100kb).py
[+] Anahtarı Giriniz:
7
[+] Kaydedilecek Dosya Adı: Şifresi Çözülmüş (100kb).txt
İşlem süresi: 0:00:00.200156
Dosya Boyutu (byte): 103227
```

Şekil 8. Kök Şifre ile 100KB’lık Metin Dosyasının Şifresini Çözme



Şekil 9. 100KB'lık Şifresi Çözülmüş Metin

Şifreleme ve Şifre Çözme Süresi Bulguları

Kök Şifre uygulamasına metin dosyası olarak yüklenen verilerin şifreleme ve şifre çözme çıktıları için farklı zamanlarda 10 ölçüm yapılmıştır. Ölçümlerde oluşan süreler milisaniye olarak Tablo 1'de gösterilmiştir. Algoritmanın performansının değerlendirilmesinde kullanmak için ölçümlerin ortalaması alınmıştır.

Tablo 1. Şifreleme ve Şifre Çözme Ölçüm Süreleri

Ölçümler	Şifreleme Süresi (ms)					Şifre Çözme Süresi (ms)				
	100KB	200KB	300KB	400KB	500KB	100KB	200KB	300KB	400KB	500KB
1. Ölçüm	203	390	562	765	968	203	390	578	765	968
2. Ölçüm	187	374	562	765	968	203	390	578	765	984
3. Ölçüm	203	375	578	765	953	203	406	562	781	984
4. Ölçüm	187	390	562	781	953	203	390	593	796	953
5. Ölçüm	187	390	593	781	953	187	390	578	781	953
6. Ölçüm	203	390	578	765	953	203	406	593	781	953
7. Ölçüm	187	390	578	781	953	187	390	578	765	984
8. Ölçüm	203	374	562	765	953	187	390	562	812	953
9. Ölçüm	203	390	578	781	953	187	390	593	796	953
10. Ölçüm	187	390	562	781	953	187	390	578	765	953
ORTALAMA	195	385,3	571,5	773	956	195	393,2	579,3	780,7	963,8

Yapılan ölçümler sonucunda ortaya çıkan şifreleme ve şifre çözme ortalama süreleri Tablo 2'de gösterilmiştir. Şifreleme işleminin şifre çözmeden daha kısa sürdüğü tespit edilmiştir. 100 KB'lık metin dosyasının şifreleme ve şifre çözme süreleri ortalamasının aynı çıktığı; 200 KB, 300 KB, 400 KB ve 500 KB'lık metin dosyalarında yapılan şifreleme ve şifre çözme işlemlerindeki süre farkı birbirine çok yakın olduğu belirlenmiştir.

Tablo 2. Kök Şifre Şifreleme ve Şifre Çözme Ortalama Süreleri

Dosya Boyutları	Şifreleme Süresi (ms)	Şifre Çözme Süresi (ms)	Toplam Süre (ms)	Aradaki Süre Farkı (ms)
100 KB	195	195	390	0
200 KB	385,3	393,2	778,5	7,9
300 KB	571,5	579,3	1150,8	7,8
400 KB	773	780,7	1553,7	7,7
500 KB	956	963,8	1919,8	7,8

Şifreleme ve Şifre Çözme Dosya Boyut Bulguları

Kök Şifre ile yapılan şifreleme ve şifre çözme işlemi sonucu oluşan dosyaların boyutları kilobyte (KB) olarak Tablo 3'te gösterilmiştir. Dosya boyutları her ölçümde aynı çıkmıştır. Şifrelenip şifresi çözüldükten sonra orijinal metinde herhangi bir veri kaybının olmadığı tespit edilmiştir. Şifresi çözülen dosyaya boyutunun orijinal metin daha fazla olduğu görülmüştür.

Tablo 3. Şifreleme ve Şifre Çözme Dosya Boyutları

Dosya Boyutları	Şifreli Dosya Boyutu (KB)	Şifresi Çözülüş Dosya Boyutu (KB)	Şifresi Çözülüş ve Şifreli Dosya Farkı	Şifresi Çözülüş ve Orijinal Dosya Farkı
100 KB	100,80	101,30	0,50	1,30
200 KB	201,63	202,69	1,06	2,69
300 KB	302,24	304,06	1,82	4,06
400 KB	403,00	405,39	2,39	5,39
500 KB	503,70	506,75	3,05	6,75

Harf Frekans Analizi Bulguları

Örnek olarak Şekil 4'teki gibi şifrelenen "TÜBİTAK 2204-A Lise Öğrencileri Araştırma Projeleri Yarışması" metninin harf frekans analizi Tablo 4'te gösterilmiştir. Büyük-küçük harfleri farklı veri olarak saymamak için tüm metin küçük karaktere dönüştürülerek harf frekans analizi yapılmıştır. Ayrıca analize sadece harfler alınmış, rakam ya da boşluk gibi karakterler tabloda yer almamıştır. Bu analize göre sesli harflerden en çok A, İ, E ve I; sessiz harflerden en çok R, T ve L'nin bu metinde yer aldığı görülmüştür.

Tablo 4. Orijinal Metnin Harf Frekans Analizi

Harf	a	r	i	e	t	l	ı	s	ş	m	ü	b	k	ö	ğ	n	c	p	o	j	y
f	7	7	5	5	3	3	3	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

"ZàGkYBN!32682J SjyF×ğ{ksjltfxo!Cugş|kssd#Sroqmmgwo\$^hwIJṽnbsk" şeklinde oluşan şifreli metnin harf frekans analizi Tablo 5'te gösterilmiştir. Bu analizde sesli harflerden en çok O; sessiz harflerden S, G, K ve J'nin bu metinde yer aldığı görülmüştür. Şifreli olarak ortaya çıkan karakterle metin eşleştirildiğinde aynı şifreli harflerin farklı orijinal harfleri temsil ettiği görülmüştür. Şifreli metinde Türkçe'ye özgü harflerin dışında UTF-8 karakter yapısının zengin içeriği sayesinde evrensel sembollerin de olduğu görülmüştür.

Tablo 5. Şifreli Metnin Harf Frekans Analizi

Harf	s	g	k	j	o	y	b	n	f	m	w	z	à	ğ	k	l	t	x	c	u	ş	d	r	q	h	ij	ṽ	ṽ
f	6	3	3	3	3	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Anahtar Değişimi Bulguları

Şifreleme algoritmasında güvenliğin sağlanması için hem ortak hem bireysel anahtar kullanılmaktadır. Güvenlik açısından da ortak anahtarların değiştirilmesi gerekmektedir. Şekil 3'teki anahtar değişimi için "7" ortak anahtarın değişimi örnek üzerinden gösterilsin. Ortak anahtar her iki kişi tarafından bilinmektedir. Fakat özel anahtarlar kişiye özeldir ve kişiden başkası bilmemektedir.

1. kişinin kişisel anahtarı "5" ve 2. Kişinin kişisel anahtarı "6" olsun. Ortak anahtar 1. kişinin özel anahtarı ile Kök Şifre algoritması ile şifrelenip "9" elde edilir ve 2. kişiye gönderilir. Daha sonra 2. kişi gelen şifreli metni kendi özel anahtarı ile aynı algoritma ile tekrar şifreler. Bunun sonucunda şifreli karakter "=" olarak bulunur.

Aynı şekilde "7" ortak anahtarı 2. kişinin özel anahtarı, şifreleme algoritması ile şifrelenip ";" elde edilir ve 1. kişiye gönderilir. 1. kişi de 2. kişiden gelen şifreli metni kendi özel anahtarı ile tekrar şifreleyip "=" aynı şifreli karaktere ulaşır. Anahtarlar sayı kullanılacağı için Şekil 10'daki gibi "=" karakterinin sayı karşılığı bulunur. Bu şekilde ortak anahtarın her iki tarafta da "61" olarak güncellendiği ve değiştirildiği görülmüştür.

```

Python 3.12.0 (tags/v3.12.0:0fb18b0, Oct 2 2023, 13:03:39) [MSC v.1935 64 bit (AMD64)] on win32
Type "help", "copyright", "credits" or "license()" for more information.
>>>
>>> ord("=")
61
>>>
Ln: 6 Col: 0

```

Şekil 10. Karakterin Sayı Karşılığının Bulunması

Farklı Çalışmalara Dair Bulgular

Simetrik ve asimetrik şifreleme algoritmaları ile ilgili olarak yapılan performans analizi çalışmaları vardır. Değişik boyutlardaki metinlerin şifrelenmesinde Ökdem ve Kırtay (2018) TEA, XTEA, AES, DES, RSA ve RC5; Kaya ve Türkoğlu (2023) AES ve RSA algoritmalarının performans analizlerini yapmışlardır. Çalışmalardan elde edilen sonuçlar Tablo 6'da milisaniye ve Tablo 7'de saniye olarak gösterilmiştir.

Tablo 6. Şifreleme Algoritmalarının Şifreleme ve Çözme Süreleri (Ökdem ve Kırtay, 2018)

ŞİFRELEME	TEA	XTEA	AES	DES	RSA	RC5
100 KB	13148	14069	550	15786	5360	803
200 KB	68592	71650	2792	90345	32364	4740
300 KB	192907	185324	8969	239743	84167	16569
400 KB	489996	366183	19526	468525	180224	31239
500 KB	625274	625373	36363	820021	299300	53713

ÇÖZME	TEA	XTEA	AES	DES	RSA	RC5
100 KB	31	29	509	12208	5546	826
200 KB	62	59	3694	89249	32066	4676
300 KB	95	91	9357	244583	84880	17044
400 KB	163	173	20198	471627	171995	33597
500 KB	222	207	36937	885027	290633	57051

Tablo 7. Şifreleme Algoritmalarının Şifreleme ve Çözme Süreleri (Kaya ve Türkoğlu, 2023)

BOYUT	ALGORİTMA	SÜRE	
		Şifreleme	Çözme
100 KB	AES	0.12	0.5
	RSA	1.8	1.2

Metinsel verileri şifreleme sonucu Ökdem ve Kırtay (2018)'in algoritmaları karşılaştırmasından elde ettikleri veri boyutları Tablo 8'de gösterilmiştir.

Tablo 8. Şifreli Metin Boyutları (Ökdem ve Kırtay, 2018)

VERİ BOYUTU	100 KB	200 KB	300 KB	400 KB	500 KB
TEA	604	1208	1812	2416	3020
XTEA	596	1192	1788	2382	2978
AES	150	300	449	600	749
DES	147	294	441	588	734
RSA	138	275	412	549	686
RC5	149	298	446	595	743

SONUÇ, TARTIŞMA ve ÖNERİLER

Bu çalışmada, irrasyonel sayıların rasgeleliğinden yararlanılarak özgün bir şifreleme ve şifre çözme algoritması tasarlanmıştır. Oluşturulan Kök Şifre uygulamasıyla 5 farklı boyuttaki metinsel dosyanın şifreleme ve şifre çözme süreci ile tasarımın performansı incelenmiştir. Metinsel veriler şifrelenerek metinsel veriler elde edilmiştir. Şifreleme sonucu oluşan metnin orijinal metinle benzerliğini incelemek için harf frekans analizi yapılmıştır.

Simetrik şifreleme algoritmaları, bilgiyi şifreleme ve şifreli bilgiyi çözmeye çok hızlı olmasından dolayı günümüzde yaygın kullanılmaktadır (Özyılmaz, 2014). Şifreleme ve şifre çözmeye asimetrik şifreleme yöntemi yerine simetrik şifreleme yönteminin tercih edilmesinin performans açısından daha yararlı olacağı yönünde Karagöz (2022) bir çalışma ortaya koymuştur. Kaya ve Türkoğlu (2023), tek anahtar kullanıldığı için simetrik şifreleme algoritmalarının yüksek boyuttaki verileri daha hızlı şekilde şifrelediğini ifade etmişlerdir. Bu nedenle Kök Şifre algoritmasının tasarımında simetrik şifreleme algoritması tercih edilmiştir. Ayrıca; Polat (2022), aynı sayıda öteleme yapılarak oluşturulan şifrelemenin güvenilir bir yöntem olmadığından ve şifre çözmenin kolay yapılacağından bahsetmektedir. Bu çalışmada şifreleme algoritması irrasyonel sayılardan yararlanılarak rasgele öteleme ile oluşturulmuştur. Rasgelelik unsuru, şifreleme algoritmasının güvenilirliğini artırmada kritik bir rol oynamaktadır (Garipcan ve Erdem, 2024). Tasarlanan algoritma bu anlamda kaydırma şifrelemeden daha güvenilir bir yapıdadır.

Kök Şifre algoritmasının şifreleme süresi TEA, XTEA, AES, DES, RSA ve RC5 şifreleme algoritmalarından daha kısa sürmekte midir?

Algoritmanın performansı incelenirken metin dosyalarının şifreleme ve şifre çözme sürelerine bakılmıştır. Tablo 2'de

de gösterildiği gibi 100 KB'lik metin 195 ms, 200 KB'lik metin 385 ms, 300 KB'lik metin 571 ms, 400 KB'lik metin 773 ms ve 500 KB'lik metin 956 ms gibi ortalama sürelerde şifrelemeyi gerçekleştirmiştir. Eskicioğlu ve Işık (2022), metin dosyasının boyutlarındaki artışın şifreleme ve şifreyi çözme süresinde artışa neden olduğunu ifade etmişlerdir. Benzer şekilde bu çalışmada dosya boyutu arttıkça şifreleme süresi artmıştır.

Ökdem ve Kırtay (2018), simetrik ve asimetrik şifreleme algoritmalarının performans analizlerini yapmışlardır. Tablo 6'da görüldüğü gibi şifreleme süresinde AES'in en başarılı olduğunu tespit etmişlerdir. Yaptığımız çalışmadan elde edilen şifreleme süreleri ile Ökdem ve Kırtay'ın (2018) elde ettikleri sonuçlar karşılaştırılmıştır. Kök Şifre algoritmasının şifreleme süre performansının TEA, XTEA, AES, DES, RSA ve RC5 algoritmalarından daha iyi olduğu tespit edilmiştir. Kaya ve Türkoğlu'nun (2023) yaptıkları çalışmada AES ve RSA algoritmalarına ait şifreleme süreleri Tablo 7'de gösterilmiştir. Kök Şifre algoritması ile karşılaştırıldığında Kök Şifre algoritmasının şifreleme performansının RSA'dan daha iyi olduğu sonucu da elde edilmiştir. AES algoritmasının şifreleme süresi açısından Kök Şifre algoritmasından daha başarılı olduğu görülmüştür. Kök Şifre algoritması metinleri TEA, XTEA, DES, RSA ve RC5 şifreleme algoritmalarından daha kısa sürede şifrelemektedir.

Kök Şifre algoritmasının şifre çözme süresi TEA, XTEA, AES, DES, RSA ve RC5 şifreleme algoritmalarından daha kısa sürmekte midir?

Şifre çözme süreleri açısından algoritmaya bakıldığında Tablo 2'deki gibi 100 KB'lik metin 195 ms, 200 KB'lik metin 393 ms, 300 KB'lik metin 579 ms, 400 KB'lik metin 780 ms ve 500 KB'lik metin 963 ms gibi ortalama sürelerde şifreli metnin çözüldüğü tespit edilmiştir. Şifre çözümede kullanılan metin dosyasının boyutu arttıkça sürenin de arttığı görülmüştür. Ökdem ve Kırtay (2018), yaptıkları çalışmada metinlerin şifre çözme süreleri açısından TEA ve XTEA'nın en iyi performansına sahip olduğunu Tablo 6'daki gibi ifade etmişlerdir. Elde edilen süreler arası karşılaştırma yapıldığında Kök Şifre algoritmasının şifre çözme süresi açısından AES, DES, RSA ve RC5 algoritmalarından daha başarılı olduğu; TEA ve XTEA algoritmalarından daha başarısız olduğu söylenebilir.

Rameel ve Asif (2024) çalışmalarında güvenlik ve hız olarak AES'i başarılı bulurken DES'i başarısız bulmuştur. Ayrıca RSA'yı güvenli bir seçenek olmasına rağmen işlem süresinin uzun olduğunu ifade etmişlerdir. Kaya ve Türkoğlu'nun (2023) şifreli metni çözme sürelerine ait sonuçlar Tablo 7'de gösterilmiştir. Buradan elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında; Kök Şifre algoritmasının şifre çözme performansının AES ve RSA algoritmalarından daha iyi olduğu tespit edilmiştir. Kök Şifre algoritması şifreli metinleri AES, DES, RSA ve RC5 şifreleme algoritmalarından daha kısa sürede çözmektedir.

Kök Şifre algoritmasının şifrelemede dosya boyutu TEA, XTEA, AES, DES, RSA ve RC5 şifreleme algoritmalarından daha düşük müdür?

Şifreleme sonucu oluşan dosya boyutunun orijinal metinden daha büyük olduğu Tablo 3'te gösterildiği şekilde tespit edilmiştir. Kök Şifre ile şifreli metin çözüldükten sonra boyutunda artış meydana gelmiştir. Bu artışın nedeni kullanılan programın uzun boşluklar arasına [] sembolünü koymasından kaynaklanmaktadır. Şifrelenmiş verilerin boyutları ile ilgili olarak Ökdem ve Kırtay (2018) orijinal metin şifrelendiğinde dosya boyutunun AES, DES, RSA ve RC5'te %150; TEA ve XTEA'da %600 kata ulaştığını Tablo 8'deki gibi ifade etmektedir. Kök Şifre algoritmasında elde edilen artış oranı ise %0,5'tir. Bu haliyle diğer algoritmalara göre şifreleme sonunda daha az yer kaplamaktadır. Şifreli ve şifresi çözülmüş metin arasında herhangi bir boyut farkının olmadığı sonucuna ulaşan çalışmalar da vardır. Sivan vd., (2023) oluşturdukları şifreleme algoritmasında şifrelenen metin ile düz metnin aynı boyutta olduğu sonucuna ulaşmışlardır.

Kök Şifre algoritması harf frekans analizine karşı güçlü müdür?

Türkçede sesli A, E ve İ ile sessiz N, R, L, K ve D en çok kullanılan harflerdir (Dalkılıç ve Dalkılıç, 2002). Şifreleme örneği olarak kullanılan "TÜBİTAK 2204-A Lise Öğrencileri Araştırma Projeleri Yarışması" metninde sesli harflerden en çok A, İ, E ve I; sessiz harflerden R, T ve L'nin yer aldığı görülmüştür. Türkçe'de çok kullanılan harflerle benzerlik göstermektedir. Şifreleme algoritması şifre çözme saldırılarına karşı gerekli direnci göstermelidir (Etem, 2022). Metnin şifresini çözümede kullanılan saldırı yöntemlerinden biri olan harf frekans analizine karşı algoritma güçlü olmalıdır. Şifreli metnin harf frekans analizine bakıldığında sesli harflerden en çok O; sessiz harflerden S, G, K ve J'nin şifreli metinde yer aldığı görülmüştür. Orijinal metindeki aynı harflerin farklı karakterle şifrelendiği görülmektedir. Şifreli metinde aynı karakterler de orijinal metindeki farklı harfleri temsil ettiği

görülmüştür. Orijinal metin ile şifreli metin arasında bu anlamda benzerlik olmadığı tespit edilmiştir. Bu haliyle harf frekans analizi saldırısına karşı algoritmasının güçlü olduğu görülmektedir.

Kök Şifre algoritmasının şifreleme ve şifre çözümede veri kaybı var mıdır?

Verilerin güvenliği için gizlilik ve bütünlüğün sağlanmasının öneminden Topaloğlu vd., (2016) bahsetmektedir. Kök Şifre algoritması ile metinler şifrelenmiş, şifrelenen metinler orijinal haline getirilerek incelenmiştir. Şifrelenen metnin Kök Şifre algoritması ile şifresi çözüldükten sonra eksiksiz ve başarılı bir şekilde eski haline getirildiği tespit edilmiştir. Orijinal metne ait herhangi bir eksikliğin ve veri kaybının olmadığı, verilerin bütünlüğünü koruduğu belirlenmiştir.

Bu çalışmada anahtar olarak kareköklü sayılar kullanılmıştır. Farklı kök dereceleri ile anahtarlar elde edilebilir. Sadece köklü sayılar değil farklı irrasyonel sayılar kullanılabilir. Şifrelemede rasgele pozitif yönlü öteleme yapılmıştır; negatif yönlü öteleme tercih edilebilir. Bu çalışmada sadece metin dosyaları incelenmiştir; ses ve resim gibi farklı dosya türleri şifrelenip algoritmanın performansına bakılabilir. Harf frekans analizi için daha farklı uzunluktaki metinler incelenebilir. Kök Şifre uygulamasına ara yüz eklenebilir. Daha farklı donanıma sahip bilgisayarda algoritmanın performansı incelenebilir.

KAYNAKLAR

- Aghayev, M. (2017). *Kriptoloji ve veri şifreleme teknikleri üzerine* (Yüksek Lisans Tezi). Ege Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- Arda, D. ve Buluş, E. (2003). Türk Alfabeti ve Yapısal Özellikleri Kullanılarak Tek Alfabeli Yerine Koymada Şifreleme ve Kriptanaliz. *20. Türkiye Bilişim Kurultayı*, İstanbul.
- Buhurcu, H. (2022). *Kriptoloji ve steganografiyle güvenli iletişim sistemi tasarımı* (Yüksek Lisans Tezi). Selçuk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- Buluş, H. N. (2006). *Temel şifreleme algoritmaları ve kriptanalizlerinin incelenmesi* (Yüksek Lisans Tezi). Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Edirne.
- Çimen, C., Akleylek, S. ve Akyıldız, E. (2008). *Şifrelerin matematiği: kriptografi*. ODTÜ.
- Dalkılıç, M. E. ve Dalkılıç, G. (2002). On the cryptographic patterns and frequencies in Turkish language. In *International Conference on Advances in Information Systems* (pp. 144-153). Springer Berlin Heidelberg. https://doi.org/10.1007/3-540-36077-8_14
- Eskicioğlu, Ö. C. ve Işık, A. H. (2022). Mobil Uyumlu Çoklu Dil Destekli Hibrit Şifreleme Algoritması. *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 24(72), 1007-1019. <https://doi.org/10.21205/deufmd.2022247228>
- Etem, T. (2022). *Kriptografi-Bilgi güvenliği için rastgele sayı üretici geliştirilmesi* (Doktora Tezi). Fırat Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- Garipcan, A. M. ve Erdem, E. (2024). Kriptografide Rasgelelik Kavramı ve Gerçek Rasgele Sayı Üreteçlerinin Test Metodolojisi. *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, 15(1), 61-75. <https://doi.org/10.24012/dumf.1384343>
- Günden, Ü. (2010). *Şifreleme algoritmalarının performans analizi* (Yüksek Lisans Tezi). Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- Hassanpour, A. A. (2015). *Asal sayıların şifreleme teorisindeki uygulamaları* (Yüksek Lisans Tezi). Atatürk Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Erzurum.
- İşçimen, N. (2023). *Asimetrik Şifreleme Algoritmasının Kullanılmasıyla Veri Güvenliğinin Sağlanması* (Doktora Tezi). Trakya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Edirne.
- Karagöz, F. (2022). *Bulut veri güvenliğinde şifreleme yöntemlerinin performans değerlendirmesi* (Yüksek Lisans Tezi). Necmettin Erbakan Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.
- Kaya, A. ve Türkoğlu, İ. (2023). Simetrik ve Asimetrik Şifreleme Algoritmalarının Performans Karşılaştırılması. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 35(2), 891-900.

<https://doi.org/10.35234/fumbd.1296228>

King, J. P. (2010). Matematik sanatı (19. baskı). Ankara: TÜBİTAK Popüler Bilim Kitapları.

Kodaz, H. ve Botsalı, F. M. (2010). Simetrik ve asimetrik şifreleme algoritmalarının karşılaştırılması. *Selçuk University Journal of Engineering Sciences*, 9(1), 10-23.

Nabiyev, V. V. ve Zeka, Y. (2016). İnsan-bilgisayar etkileşimi. *Seçkin Yayıncılık, Sözkese Matbaacılık: Ankara*, 2-55.

Ökdem, S., ve Kırtay, M. (2018). Kablosuz ağlarda şifreleme algoritmalarının performans analizi. In *ISAS 2018 1st International Symposium on Innovative Approaches in Scientific Studies* (pp. 11-13). <http://hdl.handle.net/20.500.11787/4916>

Özyılmaz, Ç. (2014). *Kriptolojiye giriş* (Yüksek Lisans Tezi). Karabük Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Karabük.

Polat, F. (2022). *Kriptoloji bilimi ve anahtar dağıtım şemaları* (Yüksek Lisans Tezi). İbrahim Çeçen Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Ağrı.

Rameel, M., & Asif, Z. (2024). Fortifying Information Security: A Comparative Analysis of AES, DES, 3DES, RSA, and Blowfish Algorithm. EasyChair Preprint no. 13536. *Communications*, 2, 5. <https://easychair.org/publications/preprint/Kjzbz>

Sivan, İ., Selman, H., Akhter, A. F. M. ve Cevat, A. (2023). Veritabanı Güvenliğini Sağlamak için Yeni Bir Veri Şifreleme Algoritması. *Acta Infologica*, 7(1), 1-16. <http://dx.doi.org/10.26650/acin.1134979>

Soyalıç, S. (2005). *Kriptografik hash fonksiyonları ve uygulamaları* (Yüksek Lisans Tezi). Erciyes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kayseri.

Stinson, D. R. (2002). *Classical Cryptograph, Cryptography Theory and Practice*, Ed: Rosen, K. H., Chapman ve Hall / CRC, New York, 2: 1-20.

Süküt, F. (2024). Arşivcilik ve Belge Yönetimi Faaliyetlerinde Blokzincir Teknolojisi: Bilgi Güvenliği Bağlamında Bir Değerlendirme. *Library Archive and Museum Research Journal*, 5(1), 1-35. <https://doi.org/10.59116/lamre.1357399>

Şengel, Ö., Aydın, M. A., & Sertbaş, A. (2020). Determining the cryptography algorithm and model for mobile payment systems. *Acta Infologica*, 4(1), 21-33.

Thomas, G. B., Weir, M. D., Hass, J. R., ve Bayram, M. (2014). *Thomas Calculus*. Pearson.

Topaç, Ç. (2023). *Mobil haberleşmede şifreleme algoritmaları ile güvenli kısa mesaj servisi uygulaması* (Yüksek Lisans Tezi). Trakya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Edirne.

Topaloğlu, N., Calp, M. H. ve Türk, B. (2016). Bilgi güvenliği kapsamında yeni bir veri şifreleme algoritması tasarımı ve gerçekleştirilmesi. *Bilişim Teknolojileri Dergisi*, 9(3), 291. <https://doi.org/10.17671/btd.36875>

Ülker, Ü. (2014). *Klasik teknikler kullanılarak bir kriptografi algoritması geliştirilmesi ve des algoritması ile performans analizlerinin karşılaştırılması* (Yüksek Lisans Tezi). Gazi Üniversitesi, Bilişim Enstitüsü, Ankara.

Üstün, M. (2022). *Fark denklemleri kullanılarak tasarlanan şifreleme algoritmasının güvenlik analizi* (Yüksek Lisans Tezi). Necmettin Erbakan Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya.

Yerlikaya, T. (2006). *Yeni şifreleme algoritmalarının analizi* (Doktora Tezi). Trakya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Edirne.

Yeşilbaş, E. (2016). *Cebirsel kriptoloji yöntemleri ve bazı uygulamaları* (Yüksek Lisans Tezi). Recep Tayyip Erdoğan Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Rize.



Kahramanmaraş Sutcu Imam University

Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 02.05.2024
Kabul Tarihi : 22.07.2024

Received Date : 02.05.2024
Accepted Date : 22.07.2024

SİBERUZAMDA SUÇ TİPOLOJİLERİ VE SİBER İLETİŞİM TABANLI ÇÖZÜMLEME MODELİNİN ANALİZİ

TYOLOGIES OF CRIME IN CYBER SPACE AND ANALYSIS OF CYBER COMMUNICATION BASED ANALYSIS MODEL

*Mustafa AYDEMİR*¹ (ORCID: 0000-0001-9414-4053)

¹Ege Üniversitesi, Uluslararası Bilgisayar Enstitüsü, İzmir, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Mustafa AYDEMİR, dr.mustafa.aydemir@gmail.com

ÖZET

İnternet tabanlı ağ teknolojilerinin hızlı dönüşümü, bireylerin sanal ortamlarda gösterdikleri katılımı günden güne artırmaktadır. İnternet ortamı diğer kişilerin verilerini illegal olarak elde etmeyi hedefleyen kişiler tarafından da yoğun olarak kullanılmaktadır. Siber dünyada kazanma davranışı ve korsanlık sorunsalı fiziksel alanlardan dijital alanlara doğru geçiş yapmaktadır. Bu çalışmada, siber uzamda yapılan yasadışı işlemlere karşı getirilen özelleştirilmiş Alan Adı Sistemi üzerinden sorgu takipleri yapılmıştır. Uygulama sürecinde, bir aylık tam ölçümlü ve kesinlikli veri akışları dizgesi ile sorgu ve diğer analizlerin takibi yapılmıştır. İçerik analizi kapsamında uygulama üzerinden yapılan izlemede, 64 toplam filtreleme listesi içinde 48 adet yabancı filtre (%87,3) Türk filtre olarak 7 adet (%12,7), ve 9 adet ortak filtre tipolojisi özelliği gösteren filtreler ortaya çıkmaktadır. Sorgulama konusunda; dört temel değer sistemi oluşturularak Alan Adı Sistemi Sorgu Sayısı, Engel Sayısı, Kötü Amaçlı Yazılım ve Kimlik Avı ile Yetişkin İçerikli Siteler şeklinde sistem oluşturulmuştur. Çalışmada, ilgili yönerge üzerinden IP ve Alan Adı Sistemi örnekleri üzerinden suç tipolojilerinin düzeyleri istatistiksel olarak analiz edilmektedir.

Anahtar Kelimeler: Siber suç, siber uzam, filtreleme, alan adı sistemi, içerik analizi

ABSTRACT

The rapid transformation of Internet-based network technologies increases the participation of individuals in virtual environments day by day. The internet environment is also used extensively by individuals who aim to illegally obtain other people's data. In the cyber world, the problematic of acquisition behavior and piracy is shifting from physical to digital spaces. In this study, query monitoring was carried out through the customized Domain Name System introduced against illegal transactions in cyberspace. During the implementation process, queries and other analyses were tracked using a one-month set of fully measured and precise data streams. Follow content primarily conducted through the application specified in the scope of the analysis for filtering, filtering in the list according to the analysis of a total of 64, 48 foreign filter (%87,3) Turkish as a filter 7 units (%12,7), and 9 common feature filters which filter typology emerges. Regarding the query; four basic value systems have been created and the system has been created in the form of the Number of Domain Name System Queries, the Number of Obstacles, Malware and Phishing, and Adult Content Sites. In the study, the levels of crime typologies are statistically analyzed through IP and DNS samples over the relevant directive.

Keywords: Cybercrime, cyberspace, filtering, dns, content analysis

GİRİŞ

Bilgi ve iletişim teknolojilerinin ağ üzerinden biçimlendiği yeni yüzyılda kullanıcıların ağ hareketlerinin sanal düzlemde kimlik kazanmasıyla web tabanlı dijital eğilimler önem kazanmaya başlamıştır. Web teknolojilerinin yapay zekayla olan etkileşimli yapısı dijital alanın tasarım modellerini değiştirmektedir. Sanal sistemlerin kullanıcılar üzerinde ağ kimliğini belirleyen deneyimleme modeli, yeni medya düzeninin internet uzantısını oluşturmaktadır. Sanal kimliğin sınırlarının internet üzerinden sınırsızlık halini alması, kuralsızlaşma ve hakimiyet yitimi gibi bazı negatif görüşlerin de etkinlik kazanmasına neden olmaktadır. Zira sınırsız bir sanal evren tasarımının web alanı üzerinden gerçekleşmesiyle yasadışı işlemlerde yaşanan artış suç ve ceza kavramlarını sorgulanır hale getirmektedir. İnternet, kullanıcının deneyimleme alanı olarak, suç ve şiddet gibi zarar etkisi oluşturan dijital bir ortamın da betimlemesi dahilindedir.

İnternet içerikleri ve içeriklere yönelik ortaya çıkan “virüs, siber saldırı, sanal dolandırıcılık, haksız kazanç elde etme ve sosyal mühendislik gibi” yönelimler, sanal ortamda kaos yaratmaktadır. Bu noktada, kaosu çözümü için ilgili platform ve hizmet sağlayıcılarının kurumsal (ticari ve kamu kaynaklı) ve kişisel (bireysel kullanıcı) çözümler ile muhtemel siber zararlara karşı koruyucu politikalar oluşturulmaktadır. Siber güvenlik, ağ oluşturma ve programlama teknolojileri kullanarak tüm cihazları ve verileri dışarıdan gelebilecek siber saldırılara karşı kontrol etme uygulamasıdır. Siber güvenliğin temel amacı, siber saldırılarla ilgili tüm riskleri azaltmanın yanı sıra iş sistemi teknolojisinin ve ağların yetkili kullanımına karşı koruma sağlamaktır (Lippert ve Cloutier, 2021; Rass vd., 2020; Fielder vd., 2018).

Siber alanda öz varlığını temel altyapı ve satın alma konusundaki önemli ekonomik yatırımlar ile güvence altına almaya çalışan kurumlar karşısında bireysel kullanıcıların kendini ve ailesini muhtemel problemlere karşı korumak üzere sorumluluk ve inisiyatif alma düzeyleri değişmektedir. Günümüzde söz konusu siber saldırıların önlenmesi konusunda tespit edilme konusunda özellikle “veri paylaşım modeli ve tehdit avcılığı” (Yetimoğlu, 2022) gibi çeşitli çalışmalar yapılmaktadır. İnternet tabanlı uygulamaların kurulum ve kullanma süreçlerinde yaşanan veri ihlallerini engellemek üzere erişim ve güvenlik konularında çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Sanal dünyada ağ kullanıcılarının iletişim bilgilerinin yanı sıra çift doğrulama gibi çeşitli güvenlik onayları zorunlu tutulabilmektedir. Bu politikalar, ağ kullanıcıları üzerinde veri güvenliği ile siber denetim konularında bilinçli olması konusunun önemli olduğuna dikkat çekmektedir. Zira kullanıcıların yaş, cinsiyet ve diğer kimlik bilgilerinin internet tabanlı mecralarda arşivlenmesi dışında veri analiz şirketlerince pazarlanması veri güvenliğini tehditlere açık duruma getirmektedir. Kimliğin sanal dünyada kontrollü yayılımına ek olarak siber saldırılarla yasadışı amaçlarla kullanılması, ağ yönelimi konusunda bireylere önleyici sistemler kullanmaları için alternatif yol arayışına yönlendirmektedir. Ağ üzerinde kullanım ve dijital adımlarının tespit edilmesi için yapılan saldırılar karşısında koruyucu program ve bir dizi denetim çabaları sonucunda güvenli internet alanı yaratılmaktadır. Siber uzam, sanal dünyada tüm ağ trafiklerinin kapladığı sanal bütünlüğü sağlamış yapıyı ifade etmektedir. Bireylerin küresel medya sistemi içinde kendini ifade edebilmesinin en kolay ve hedef odaklı hali, sanal dünyada açtığı hesaplar ve bu hesaplardaki ağ hareketlerinin düzeyi ile ilişkilidir.

Günümüz medya ve iletişim teknolojileri dış etkilere açık bir yapıdadır. Bireylerin ve kurumların açtıkları hesaplar, içerik yapıları ve veritabanı gibi hassas alanları içerdiğinden düzenli bir saldırı ve tehdit altındadır. Son yıllarda sanal hesaplar (e-posta, sosyal medya hesapları, web tabanlı hesaplar, banka hesapları vb.) diğer kullanıcılar tarafından siber saldırılarla ele geçirme çabaları karşısında koruma, yüksek güvenlikli çözümler ve önleyici koruma politikalarıyla desteklenmektedir. Bu noktada kişisel ya da kurumsal nitelikli hesaplara ulaşmak, bu hesapların sahte biçimlerini üreterek, ilgili hesapların kullanıcı adı ve şifrelerine erişmek sıklıkla karşılaşılan yasadışı çalışmalardır. Yine ilgili hesap veya bir sistem üzerinden veri tabanını yasadışı yollarla yedeklemek ve diğer kullanıcılara satışı yapmak gibi sızma eylemleri karşısında kullanıcıların çözümler üretmesi gerekmektedir. Kullanıcılar kendi medyaları ile hesaplarını düzenli taramak, güncel şifreleme sistemlerinde değişiklik yapmak ve en güncel riskleri takip ederek etkin çözümler üretmekle yükümlüdür. Zira kullanıcıların sistem ya da medya ağının da daha yüksek ölçekte siber saldırıya uğraması ve büyük ölçeklerde zarar görmesi olasıdır. Yeni medya düzeninde sanal ortamlarda ön plana çıkmak ve imaj üretmek için yapılan saldırılar dışında ekonomik kazanç elde etmek, sosyal mühendislik yapmak, istihbarat faaliyetlerini gerçekleştirmek gibi geniş bir yelpazede siber saldırılar yapılmaktadır. Bu davranışlara ek olarak rakip ya da düşman görülen ticari rekabet halindeki diğer hesaplara zarar verip kurumsal imajını zedeleyerek potansiyel müşteri tarafgirliği oluşturmak, stratejik planlamalarla rakiplerin ticari faaliyetlerini geçici de olsa erteletebilmek üzere yapılan tüm işlemler yapısal benzerlikle birlikte suç açısından farklı tipolojik özellikleri göstermektedir.

Sanal dünya, bireylere sanal bir kimlik oluşturarak eylemlerini gerçekleştirme, diğer kullanıcılarla etkileşimli bir bağ oluşturma, günlük yaşam pratiklerini içeren satın alma, bankacılık, diğer kullanıcıların günlük deneyimlerini takip etme, gündemi yakalama ve kendi içeriğini oluşturma gibi katkılar sağlayabilmektedir. Bu katkılar, bireysel olduğu gibi kurumsal ve ticari bazlı gerçekleşebilmektedir. Sanal hesapların yönetimi ve denetimi ise bu haber akışının sağlanması, verilerin çalınmaması ve diğer kullanıcılara (arkadaş listesi, müşteri listesi gibi) ait özel bilgileri içeren enformasyon alanlarına dair veri güvenliği politikalarının da tasarlanmasını zorunlu hale getirmektedir. Bireysel kullanıcılar kendi güvenlik önlemlerini geliştirmek adına daha önce ifade ettiğimiz önlemlerin yanı sıra değişen teknolojilere bağlı olarak düzenli şifre değiştirmek ya da antivirüs programı kurmak dışında gerek mobil gerekse masaüstü çözümler de üretmeyi düşünebilmektedir. Kurumsal ve ticari düzeyde daha yüksek veri işleyen kuruluşlar ise müşteri ya da takipçi listelerinin veri güvenliğini sağlamak ve sızma girişimlerini engellemek için karmaşık bir uygulama yönergesi uygulamakla yükümlüdür. Bu noktada kaynağı belirsiz içerikler karşısında antivirüs çözümlerini yeterli görmeyip, alanında uzman siber güvenlik personelini istihdam etmek; web site, kullanıcı hesapları, sosyal medya hesapları ve sanal sunucu güvenliği gibi alanlarda önleyici güvenlik niteliğine sahip koruma politikaları hazırlamak önemli bir husus olarak karşımıza çıkmaktadır.

Bu çalışmada, kuruma özel hedef gözeten saldırıların hızlı bir şekilde bertaraf edilmesi sağlanmaktadır. Bu sayede ilgili kuruma ait bir veritabanı oluşturulmasını sağlamak üzere merkezi olarak izleme ve müdahaleyi kolaylaştıran bir arayüz tasarlanmaktadır. Bu arayüz sayesinde birden fazla yönetimsel ekranı izlemek, güvenlik kuralı oluşturmak ve dağıtık olarak inşa edilen diğer güvenlik sistemlerinin yerine tümleşik ve merkezi bir izlemenin nasıl yapılabileceği örnek bir uygulama üzerinden sunulmaktadır. Çalışmanın bu bağlamda önemi günümüz koşullarında çok çeşitli yazılım ve sistemler tarafından üretilen çıktılarının tek bir arayüz üzerinden analiz edilerek zaman ve personel kaynağının önüne geçilmesi konusunda örnek bir çalışma modelini ortaya koymasındadır. Söz konusu çalışmanın uygulama modeli, kuruma özel güvenlik sistemlerinin kaynak tiyolojileri ve önlem biçimlerini merkezi olarak nasıl yönetilebileceğini göstermesi noktasında referans olarak önemli bir boşluğu doldurmaktadır.

LİTERATÜR TARAMASI

Çalışma kapsamında siber uzam, siber suç, güvenli internet, siber aylaklık, siber psikoloji ve dijitalleşme, yapılan literatür taramasında ön plana çıkan kavramlar arasındadır. Siber uzam; sanal dünya, internet dünyası, telekomünikasyon temelli ağ sistemi ve dijital varlık alanını temsil etmektedir. Siber uzam kavramı, ilk kez William Ford Gibson tarafından bilim kurgu eseri olan *Neuromancer* adlı romanda kullanılmıştır (Gibson, 1984). Medin (2018), internetin değiştirici ve dönüştürücü özelliğini siber uzam konusunun yeni bir kamusal alanı olarak düşünüldüğünü belirtmektedir. Toplumsal ilişkilerin sanal bağlar-ağlar üzerinden yürütülmesi (Zinderen, 2020) şeklinde ifade edilen siber uzam alanı, bireylerin özne ve nesne olma noktasında sanal kimlik kazanma süreçlerindeki dönüşümünü hızlandırmaktadır. Siber uzam, “bilgisayar ağlarının birbirine bağlanması sonucu ortaya çıkan makine-insan ilişkisi temelindeki dönüşümü” ifade etmektedir (Stratton, 2002, s.80). Siberuzam kavramı “elektronların ve elektromanyetik spektrumun birlikte kullanımıyla karakterize edilen, amacı bilgi yaratmak, depolamak, değiştirmek, değiş tokuş etmek, paylaşmak ve çıkarmak, kullanmak, ortadan kaldırmak ve fiziksel kaynakları bozmak olan küresel ve dinamik bir alan olarak tanımlanmaktadır (Kuehl, 2009, s.26-28). Siber uzam konusu ayrıca zaman ve mekândan bağımsız olma, farklı mekanlar arası geçiş sağlama ve internet tabanlı temsillerin gerçekleştiği bir yapıyı ifade etmektedir. Timisi ise siber uzamı “elektronik olarak dolaylanılmış ya da benzeşmiş bir uzamda karşılaşma olanakları olan gerçek ya da hayali ilişkiler” şeklinde tanımlamaktadır (2005, s.91). Siber uzam alanı yapay zekâ ve diğer gelişmelerin de etkisiyle son dönemlerde sosyal ağlarda görüldüğü üzere kişilik özellikleri ve kimliği de şekillendirmektedir.

Nagy ve Koles, siber uzamda yeni gelişmelerin gerçek dünyada gösterilemeyen özelliklerin avatarlar üzerinden sanal gerçekliğe dönüştürülebildiğini (2014, s.4) belirtmektedir. Bauman ve Lyon (2013) ise gözetim konusunun, siber uzam aracılığıyla elde edildiğinden hareketle dolaysız bir biçimde kullanılabilirliğini ifade etmektedir. Bu örnekler ışığında siber uzam konusu bireylerin bedenleri yerine sanal kimlikleri üzerine inşa ettikleri ve ilgili internet altyapısı ve erişim sağladıkları diğer sosyal ağlar üzerinden yarattıkları dijital eylemlerin toplamına karşılık gelmektedir. Turkle (1996) ise otantik ve çoklu bir kimliğin inşa edilmesini olanaklı hale getirmesi açısından siber uzam alanının fırsat yaratabileceğini belirtmektedir. Kimliğin sanal ortamda bedensizleşmesi ya da sanal bedene ve mekanlara dönüşmesi ise siborg, sibernetik ve siber tektonik (Clynes ve Kline, 1960; Akman, 1982; Cutler, 1996; Shusterman, 2000; Haraway, 2006; Kut, 2013) kavramlarıyla temellendirilmektedir. İnsan bedeninin beyin ile makine (bilgisayar temelli) ekseninde oluşturduğu bu yeni form, bedenin fiziksel özelliklerinin sınırlandırılarak ya da organizma özelliklerinin genetik düzeninin elektronik bağlamda değişebileceğini ve böylece siber uzamda beden

yönetimi ve sanal hakimiyetin yeni forma göre düzenleneceğini açıklamaktadır. Siber uzam alanını sosyolojik açıdan değerlendiren ve tipolojilere ayıran Bağrıyanık, (2018) çalışmasında “dijital insan, trol, youtuber ve oyuncu” olmak üzere dört temel formda tipoloji olduğunu belirtmektedir. İnsanın, dijital alanda kültürlenmesi ve kendisi dijital kültürün bir ögesi olarak kimlikten e-kimliğe, insandan e-insana ve diğer alanlarda da “e-leşme” süreci, dijital toplumdaki bireyin siber uzamdaki karşılığını tanımlamaktadır.

Siber Suç, dijitalleşmeyle birlikte ağ toplumunun nesnesine dönüşen bireylerin sanallaşma çabaları bazı riskleri beraberinde getirmektedir. Siber ortamda farklı ağ hesaplarına erişim sağlayan ya da içeriklere yönelen bireylerin kendilerinin yasal sınırdan kalıp kalmaması kadar muhtemel siber saldırılar karşısında suç eyleminin mağduru olması ihtimali de bulunmaktadır. Siber suç konusunu inceleyen araştırmalar; Yapay içeriklerin gerçeğin yerine geçmesi (Metin ve Karakaya, 2017), siber zorbalık (Li, 2006; Erdur-Baker ve Kavşut, 2007; Arıca vd., 2008; Hinduja ve Patchin, 2009; Smith, 2011; Bulut ve Gündüz, 2012; Kowalski vd., 2012; Yaman ve Peker, 2012; Cassidy vd., 2013; Kowalski vd., 2014; Peker ve Ekinci, 2016; Akyüz ve Koç, 2020; İşman ve Açmacı, 2021), Siber Mahremiyet (Simpson ve Murphy, 2014; Do vd., 2017; Wang, 2019), Zararlı İçerik Gönderisi (Bargh ve McKenna 2004; Willard, 2004; Greene, 2006; Lacey, 2007; Lenhart, 2007; Wong-Lo ve Bullock, 2011), Siber Saldırı (Slonje ve Smith, 2008) gibi türlerden oluşmaktadır. Siber suç, bireyin sanal içeriği elde etme ve içeriği yorumlama biçimi, eleştirel söylemlerini paylaşımlarla suça dönüştürme, internet ve bağlı alanları, diğer hesapları ele geçirme, mobil tabanlı saldırılar, siber müdahalede bulunma gibi alanlarla bağlantılı olarak ortaya çıkmaktadır.

Güvenli internet, sanal ortamlarda siber uzamın gelişimi sonucu ortaya çıkan sorunların çözüm amaçlı kavramdır. Günümüzde bilgi ve iletişim teknolojilerinin kuşatıcı etkisiyle bireylerin kendilerini suç ve diğer olası tehditler karşısında korumaya alabilmesi için antivirüs programlarının yanı sıra filtreleme çalışmaları, yazılımsal düzeyde diğer alternatif uygulamalar arasındadır. İnternet mecrasını, eğitim ve öğretim faaliyetleri kapsamında kullanımının yoğunlaştığı pandemi sürecinde özellikle siber zorbalık, şiddet, bağımlılık ve intihar gibi sosyo- psikolojik sorunlar karşısında kullanıcıların güvenli internet alanına duydukları ihtiyacı artırmaktadır. Güvenli internet konusunu ele alan çalışmalar arasında Schroeder, 2002; Korkmaz ve Kıran-Esen, 2012; Kaşıkçı vd., 2014; Aslan ve Karakuş Yılmaz, 2017; Tuparova ve Mehandzhiyska, 2018; Abide ve Gelişli, 2020; Akgün, 2022) yer almaktadır. Bu çalışmalar temel olarak internetin zararlarını en aza indirebilmenin yollarını arasa da yapılan saha araştırmalarıyla internetin olası etkileri, zararları ve baskın yönlerini değerlendirmektedir. Güvenli internet alanı temelde siber güvenlik, (Pusey ve Sadra, 2012; Van Schaik, 2017), siber etik (Brown ve Wang, 2008), siber koruma (Nowicki, 2002) ve sağlıklı internet (Çetin ve Ceyhan, 2014) kavramlarıyla ilişkilendirilmektedir.

Yine ilgili araştırmalarda özellikle öğrenci ve ebeveynlerin bu alanda yaşadıkları olumsuz olaylar karşısında çözüm yolları ve genel tepkileri de incelenmektedir. Güvenli internet, esas itibarıyla, içeriğin özelliği, diğer kullanıcıların doğrudan ya da dolaylı etkileri ile akran zorbalığı, tehdit ve şantaj gibi değişen dolandırıcılık yöntemlerinin de etkisiyle güvensiz bir dijital platforma dönüşen internet alanı ile mobil tabanlı sistemlerin içinde yer alan uygulamalar ve sosyal ağların verebileceği zararlar karşısında bireylerin değişen tercihlerini ifade etmektedir.

Siber Aylaklık kavramı literatürde temel olarak “cyberloafing” ve “cyberslacking” şeklinde kullanılmaktadır. Bu alanda ayrıca siber tembellik, kaytarmacılık şeklinde kullanımlar da yer almaktadır. Siber aylaklık konusunda genel olarak iş motivasyonu, süreç yönetimi, eğitim, zaman kaybı gibi araştırmalar (Lim, 2002; Ugrin.,vd 2007; Blanchard ve Henle 2008; Garrett ve Danziger, 2008; Yağcı ve Yüceler, 2016; Yazgan ve Yıldırım, 2020; Beugre ve Kim, 2006; Kalaycı, 2010; Vitak, vd., 2011; Lim, 2012; Ergün ve Altun, 2012; Yaşar ve Yurdugül, 2013; Akbulut vd., 2016; Arabacı, 2017; Alan, 2019; Şenel vd., 2019) yanında sanal rahatlama ve deneyim gibi konuları ele alan (Anandarajan ve Simmers, 2005) çalışmalar da bulunmaktadır. Siber aylaklık özellikle zaman yönetimi konusunda bireylerin mobil cihazlarda ya da kişisel ve dizüstü tabanlı bilgisayar gibi teknolojik araçlarda yapılması gereken iş yönetimleri konusunda, iş planlarında yaşadıkları aksaklık ya da plansızlık gibi bir işi bırakıp diğer işe yönelerek nitelikli süreç yürütülmemesidir. Bir işlemin sonlandırılmaması ya da geç tamamlanması nitelsiz zaman ve olası masraf artışına da neden olduğundan süreç yönetimi konusunda kaygı ve isteksizlik halinin ortadan kaldırılması için siber dünyada iş eylemlerinde planlama yapılmasının tüm dijital aktivitelerde deneyimleme konusunda aylaklık algısını değiştireceği kabul edilmektedir.

Siber psikoloji, McLuhan’ın (1964) vurguladığı haliyle insanın yeni bir uzantısı olma hali, süreç içinde kimliği ve kişiliğinin uzantısına; psikolojik (Suler,1996) temelli, bilişsel ve iletişimsel özelliklere de dönüşebilmektedir. Siber alan içinde bireyin sanal kimliği ve hesap hareketleri etkileşim halindedir. Kullanıcının gerçek kimliği ve kişiliği sanal dünyada birebir örtüşmek ya da uyumlu olmak zorunda olmadığı gibi sınırlandırmama konusundaki ruh hali;

Sayar'ın "dezinhibisyon etkisi" (2002) olarak tanımladığı yüz yüze iletişim yerine sanal ortamda hareket kısıtlılığını psikolojik bir avantaja dönüştürmesi durumu siber psikoloji alanını tanımlamaktadır. Krueger, sanal ortamda inşa edilen karakterin fiziksel özellikleri ya da görünümünün ne olduğunun önemli olmadığı yapay gerçeklik ile bunun bile üzerinde oynanabileceğini ileri sürmektedir (1991). Bu açıdan sanal ortamda inşa edilen gerçeklik ile bireyin kendi gerçekliği bir izlenim yönetimine (Tedeschi vd., 1985; Becker ve Martin, 1995; Bozeman ve Kocmar, 1997; Ralston ve Kirkwood, 1999; Martin ve Leary, 1999; Özdemir, 2006) dönüştüğünden algı yapısı ve uyumluluk konusundaki psikolojik eşik sanal dünyadaki davranış setleri ve engellenmişlik durumu ile ilişkilendirilmektedir.

Dijitalleşme, dijital ve sanal teknolojiler tarafından çerçevenilmiş ağ toplumu özelliğine dönüşen yapıları ifade etmek için kullanılmaktadır. Dijital olma, yenilikçi, etkileşimli, yakınsak ve küresel medya telekomünikasyon sistemleriyle uyumlu olma davranışlarını ve altyapıları temellendirmektedir. Dijitalleşmenin doğal bir karşılığı olan (Levy, 1997; Castells, 2005; Törenli, 2005; Öztürk, 2013) dijital alan hakimiyeti, bireyin üstünlüğü gibi görülmele birlikte tüm medyalar arası ve yöndeşme yapısıyla kullanıcıların dijital bağlanma ve sanal karakter inşa süreçlerinde birbirinden farklı kullanıcı ve hesap tipleri oluşturabilmektedir. Tek ortamda tüm medyaların sarmal, iç içe geçme hali günümüz dijitalleşme süreçlerinde dijital alanlar ile kullanıcıların iletişim ve etkileşim düzeylerinde değişimler yaratabilmektedir. Dijitalleşme, tek tipli değildir. Kullanıcıların fizyolojik, psikolojik ve bilişsel süreçleri olarak içsel yeterlilikleri; teknoloji, çevre ve eğitim olarak dışsal yeterlilikleri ifade etmektedir. Dijitalleşme konusu, tarihsel süreçte görece daha iyi ve modern olanın seçilmesi olduğu kadar dijital alanların kuşaklar arası geçirgenliği ve aktarım sistemleriyle de ilişkisi bulunmaktadır.

SANAL SUÇ TİPOLOJİLERİ

Günümüz koşullarında gerçek hayatta gerçekleşen suç tanımlarının hemen hemen hepsi sanal dünya içerisinde de karşımıza çıkabilmektedir. İlgili suçlar kapsamında siber zorbalık, aldatma, çalma sıralanabilmektedir. Bu nedenledir ki tüm dünyada internet kullanımının ve güvenlik politikalarının hızla uygulanmasına geçilmiştir. Türkiye'de, Ulusal Siber Olaylara Müdahale Birimi (USOM), 5651 sayılı internet suçlarını kapsayan kanun ile 6698 sayılı kanun Kişisel Verilerin korunması kanunu (KVKK) siber suçlarla mücadele amacıyla oluşturulan güvenlik uygulamalarıdır. Bu bağlamda suç tipleri listesi¹ sıralanmaktadır.

İstenmeyen e-posta (Spam)

E-posta sahteciliği, insanların herhangi bir web sitesine kaydolurken kullanmış oldukları e-posta adreslerinin kişi rızası dışında toplanıp rahatsız edici boyutta reklam amaçlı olarak kullanılmasıdır. Reklamın içerikleri genelde yetişkin içerikli ürün, ilaç gibi reklam yasağı olan ürünlerin tanıtımı amacıyla kullanılmaktadır. İnternet ortamında yasal olmayan içerikleri oluşturmak ve bunları e-posta ve paylaşım gibi formlerde yayılması resmi olarak ilk kez iki avukatın davayı kendi lehlerine çevirmek üzere spam mail göndermeleriyle ortaya çıkmıştır.

Spam kavramından ilk kez 31 Mart 1993'te bahseden Joel Furr, Canter ve Siegel'in spam gönderme çabaları karşısında "Yeşil Kart Avukatları: Dünyayı Spamlamak" yazılı tişörtler satmaya başlamıştır (Öztürk, 2013). Spam saldırıları bir yönüyle kendi reklamını yapmak, diğer kişiyi ve ürünlerini kötülemek gibi rekabet temelli içerikler üzerinden inşa edilebilmektedir. İnceleme spam'leri şeklinde tanımlanan bu eylemler, (TIFO, 2012) makine öğrenimi algoritmalarına dayalı inceleme spam tanımlama bileşenini incelemektedir. Sosyal medya araçlarının kullanımında siber suç konusunu oluşturan spam saldırıların bot olarak kullanımında makine öğrenmesi gibi çeşitli tekniklerle işlenmesinin önemli bir yönü olduğunu belirten Wang, (Li, vd. 2011) konuyu twitter platformu üzerinden ele alırken; Spam gönderenlerin, kötü niyetli bağlantılar içeren çok sayıda yinelenen güncellemeler ile kullanıcılara istenmeyen mesajlar göndermek, yanıtlama işlevini kötüye kullanmak ve trend olan konuları ele geçirmek için bir araç olarak kullandığını belirtmektedir.

Spam konusu tarihsel olarak; e-posta (Wang, 2010) Web (Gyöngyi vd., 2004; Bhowmick ve Hazarika, 2018) bağlamlarında incelenmiştir. Son zamanlarda araştırmacılar fikir spamlerini de incelemeye başlamıştır Raad vd.,2010; Jindal ve Liu, 2008; Wu, 2010). Jindal ve Liu (2008) fikir spamlerinin hem yaygın hem de doğası gereği e-posta ya da Web spamlerinden farklı olduğunu bulmuştur. Buna göre web spam'i iki ana türe ayrılabilir: İçerik spam'i ve bağlantı spam'i. Bağlantı spam'i, incelemelerde bulunmayan köprüler üzerinde yapılan spam'dir, çünkü incelemeler arasında genellikle bağlantı yoktur. İçerik spam'i, arama motorlarını hedef sayfaları üst sıralara

¹ Siber uzamda gerçekleşen siber saldırılara ait suç tiplerinin bilinirlik taşıyan küresel isimleri parantez içerisinde İngilizce olarak yazılmaktadır.

çıkarmak için kandırmak amacıyla hedef sayfalara alakasız veya uzaktan alakalı kelimeler eklemeye çalışmaktadır (Androutopoulos vd., 2000). Söz konusu çalışmalar ağırlıklı olarak e-posta spam tespiti ve Web spam tespiti üzerine odaklanmaktadır (Yoo ve Gretzel, 2009). Spam e-postaları filtrelemek için Bayesci bir yaklaşımı ilk kez uygulamışlardır. Deney sonuçları, sınıflandırıcının e-posta mesajlarının ham metnine ek olarak alana özgü özellikleri de dikkate alarak daha iyi bir performans elde ettiğini göstermektedir.

Makine öğrenimi yardımıyla anti-spam filtreleme konusu önemli hale gelmektedir. Manuel spam veya spam olmayan olarak sınıflandırılmış mesajlar üzerinde eğitim aldıktan sonra spam e-postayı tanımlamayı öğrenen denetimli öğrenme yöntemlerini incelemektedir. Sahami vd., (1998) tarafından anti-spam filtreleme için bir Bayesci bir model üzerinden analizler yaparken, eğitilmiş ve görünmeyen mesajlar üzerinde etkileyici bir performans (Duda ve Hart,1973; Mitchell,1997), analizleri de yapılmıştır. Spam göndericileri yasadışı veya yasal olduğunu söyledikleri yollardan yaptıkları anlaşmalar üzerinden gönderim hizmeti yapmaktadır. İçeriği görüntülemeyle elde edilen gelir ile tıklama başına kazanılan ödeme, spam uygulamasının önemli çıktıları arasında yer almaktadır. Ayrıca e-postaların gönderimi için kullanılacak sunucu ve bilgisayarların kanuni yolla tespit edilip yasal işlem yapılması ihtimaline karşın diğer suçlarla ilişkili kullanılması da söz konusudur.

Kimlik Avı (Phishing)

Bu suç tipolojisi, Türkçe literatüre oltalama saldırısı veya kimlik avı olarak adlandırılan saldırı yöntemi şeklinde girmiştir. Oltalama, “tüketicilerin kişisel kimlik verilerini ve finansal hesap kimlik bilgilerini çalmak için hem sosyal mühendislik hem de teknik hile kullanan bir suç mekanizmasıdır” (Baykara ve Gürel, 2018; Bhavsar vd., 2018).1996'da ortaya atılan bir terim olan oltalama, ilk olarak AOL şifrelerinin ve ilgili hesapların çalınmasını tanımlamak için kullanılmıştır (APWG, 2013). İnsanların internete olan bağımlılığı arttıkça, bilgisayar korsanlığı, saldırı ve diğer güvenlik ihlalleri olasılığı da hızla artmaktadır (Clayton, 2005). Kişisel bilgisayar kullanıcıları, internet teknolojisinin hızlı büyümesi nedeniyle oltalama saldırılarına karşı hassastır Liang ve Xue, 2009; Purkait, 2012). Bireysel kullanıcıları oltalama tehditlerine karşı korumak için oltalama eğitiminin dikkate alınması gerekmektedir (Brody vd., 2007).

Oltalama konusunun engellenmesi konusunu ele alan araştırmalarda; Makine öğrenme tabanlı çözümler (Allen, 2006), istatistiksel sınıflandırıcıları (Fette vd., 2007; Bergholz vd., 2010), E-posta içeriğinin kişiselleştirilmesi, aciliyet derecesi ve e-posta yükü, düşük teknik uzmanlığın yanı sıra duyarlılığın artmasına da katkıda bulunmak üzere çeşitli öneri modelleri geliştirilmektedir. Vishwanath vd., (2011) gibi araştırmacılar özellikle bu saldırılara karşı bilinçli olma ve savunma politikalarının önemine dikkat çekmektedir. Moore ve Clayton'a göre, kimlik avına karşı ilk savunma hattı otomatik tespit olmalıdır. Otomatik kimlik avı tespit yazılımları birkaç farklı seviyede mevcuttur: posta sunucuları ve istemcileri, internet servis sağlayıcıları ve web tarayıcı araçları. Araçlar tespit edilen kimlik avı web sitesine erişimi engelleyebilir ve/veya web sitesinin internet servis sağlayıcısından web sitesini kapatmasını talep edebilmektedir (2007). Oltalama konusunda bazı araştırmacılar (Arachchilage ve Love, 2013) kimlik avı saldırılarını engelleme motivasyonu yoluyla kullanıcı kaçınma davranışını geliştirmek için bir oyun tasarım çerçevesinin geliştirilmesi konusu ele almışlardır. Günümüz koşullarında gönderilen e-posta ekinde enfekte edilmiş pdf dokümanı ile gerçekçi görünen bir saldırı ile kullanıcı kandırılmaktadır ve bu sayede kullanıcıya ait veriler saldırganlara sunucu yoluyla iletilmektedir. Bunu engellemek üzere geliştirilen kişisel ve kurumsal çalışmalar karşısında yasadışı çalışmalar da devam etmektedir.

Zararlı Yazılım (Malware- Spyware)

Malware, Malicious Software kelimelerinin kısaltılmış hali olup zararlı yazılım anlamına gelmektedir. Zararlı yazılım herhangi bir web sitesinden yüklenebileceği gibi kullanıcının bilgisayarına kurulan programlar aracılığı ile de oluşturulmaktadır. Virüs, worm, vb. programlar zararlı yazılımlara örnek teşkil etmektedir. Zararlı yazılımlar sistemsel bütünlüğe zarar verebildiği gibi başka amaçlar için de kullanılabilir. Dijitalleşme, teknoloji kullanıcıları için büyük gelişmeler ve artan karmaşıklık getirmiştir. Ancak aynı zamanda teknolojinin gelişimi, kullanıcıları güvenlik ve mahremiyet ihlalleri konusunda daha yüksek düzeyde riske maruz bırakmıştır.

Messmer, ilk kez 1990 yılında Yisrael Radai tarafından solucan, truva atı ve diğer benzer kötü niyetli varlıkları ifade etmek için kötü amaçlı yazılım terimine öncülük edildiğini belirtmektedir (2023) Kötü amaçlı yazılımlar, yayılma prosedürlerine ve enfekte olmuş sistemde gerçekleştirdikleri faaliyetlere göre karakterize edilmektedir [71]. Siber teknolojilerin ve Yenilenebilir Enerji Kaynaklarının (YEK'ler) yaygın olarak uygulanması, geleneksel güç sistemlerini giderek kötü amaçlı yazılım saldırıları tarafından tehdit edilen yenilenebilir Siber-Fiziksel Güç Sistemlerine (CPPS'ler) dönüştürmüştür (Canavan, 2001; Yohanandhan vd., 2020). Kötü amaçlı yazılım saldırısı,

Siber-Fiziksel Güç Sistemlerine (CPPS'ler) karşı son yıllarda ortaya çıkan yeni bir siber saldırı yöntemidir. CPPS geniş alan izleme ve kontrol için büyük ölçüde siber tesislere dayandığından, bu tür saldırılar genellikle yıkıcı sonuçlara yol açmaktadır (Zhang vd., 2022a). Son zamanlarda mobil telefonlara yüklenerek ortam sesinin dinlenilmesi, görüntü kaydının sağlanması, kiminle ne kadar görüşüldüğü, konuşmanın içeriği, gelen mesajlar ile gönderilen mesajların detayları ilgili yazılımın uygulama özellikleridir. Trojan adı verilen Truva Atı yazılımları bu saldırıda kullanılan yazılımlara örnek olarak gösterilebilmektedir.

Kötü amaçlı yazılımlar kanonik olarak virüsler, solucanlar, Truva atları, rootkitler vb. gibi kategorilerde toplanmıştır. Ancak günümüzün gelişmiş kötü amaçlı yazılımları genellikle farklı işlevlere sahip birçok bileşen içermektedir (Zhang vd., 2022b). Örneğin, aynı kötü amaçlı yazılım bir ana bilgisayar üzerinden yayılırken virüs gibi davranabilir, bir ağ üzerinden yayılırken solucan gibi davranabilir, komuta ve kontrol sunucularıyla iletişim kurarken veya diğer virüslü makinelerle senkronize olurken botnet davranışı sergileyebilir ve kendini gizlerken rootkit davranışı sergileyebilmektedir (Rudd vd., 2017). Malware saldırıları karşısında çeşitli tespit uygulamaları ile güvenlik sistemleri geliştirilmektedir. Bu konuda yapılan çeşitli araştırmalarda makine öğrenmesi üzerinden gerçekleştirilmektedir. Kötü amaçlı yazılım analizi, Makine Öğreniminin önemli ölçüde kullanıldığı en kritik alanlardan biridir. Geleneksel kötü amaçlı yazılım tespit yaklaşımları (Aslan ve Akin, 2022; Siroski ve Honig, 2012; Bin Abbas ve Srikanthan, 2017; Sahoo vd., 2014; Bazrafshan vd., 2013; Zheng vd., 2013) kötü amaçlı yazılım dosyalarının benzersiz tanımlayıcılarının bir veri tabanında tutulduğu ve yeni karşılaşılan şüpheli dosyalardan çıkarılan imzalarla karşılaştırıldığı imzalara dayanmaktadır. Bunun dışında kara kutu öğrenmesi ve Android gibi farklı düzeylerde çözümler üreten olarak çalışmalar da bulunmaktadır. Kara kutu makine öğrenmesi (Barreno vd., 2010; Venugopal ve Hu, 2008) tabanlı tespit modellerini atlayabilen düşmanca kötü amaçlı yazılım örnekleri oluşturmak için MalGAN adlı üretken karşıt ağ (GAN) tabanlı bir algoritma önermektedir. Android tabanlı kötü amaçlı yazılım saldırıları karşı tespit ve çözüm araçları (Hu ve Tan, 2017) güvenlik açıkları, tespit teknikleri ve güvenlik çözümleri konusunda analiz teknikleri, çalışma platformu, veri toplama, operasyonel etki, elde edilen sonuçlar ve ilgili yapay zeka bileşenlerine dayalı yaklaşımları analiz etmektedir.

Fidye-Reklam Engelleme (Ransomware-Adaware)

Ransomware Türkçe literatüre fidye yazılımı olarak girmiştir. Temel olarak işlevi hedef gözetmeksizin maksimum sayıda bilgisayara bulaşmasıdır. Bulaştığı bilgisayardaki verileri kripto algoritmalarıyla şifreleyip çalıştırılmak istenildiğinde kullanıcının kripto cüzdan adresine para yatırıldıktan sonra veri şifresinin üzerine kurgulanmış bir sistemdir. Fidye yazılımları ilk olarak 1980'lerin sonunda ortaya çıkmıştır (Li vd., 2020; Qamar vd., 2019) ve 2013'ten bu yana yeniden gündeme gelmiştir. Son zamanlarda, çok sayıda yaygın fidye yazılımı saldırısı, internet üzerindeki çok sayıda kullanıcı sistemi ve işletmede önemli zararlara neden olmuştur (Kharraz, 2016). Fidye yazılımı, önemli dosyaları şifreleyen ve dosyalara erişime izin vermek için kurbandan fidye talep eden veya hedef sistemi tamamen kilitleyerek kullanılamaz hale getiren bir kötü amaçlı yazılım türüdür (Savage vd., Kharraz vd., 2015; Kara ve Aydos, 2022; Gomez-Hernandez vd., 2018; O'Kane vd., 2018; Kirda, 2017). Temel olarak iki tür fidye yazılımı vardır: kripto fidye yazılımı ve kilitli fidye yazılımı (Ferrante vd., 2017; Akbanov vd., 2019). Fidye yazılımı, çalıştırıldığında bir bilgisayarın işlevselliğini devre dışı bırakan veya içindeki dosyaları şifreleyen bir kötü amaçlı yazılım kategorisidir. Fidye yazılımı, virüs bulaşmış bilgisayarın masaüstünü kilitlemekten tüm dosyalarını şifrelemeye kadar birçok farklı şekilde çalışır (Li vd., 2020). Adaware, istenmeyen reklam olarak Türkçe' de karşılık bulmuştur. Her internet sayfası ziyaretinde pop-up gösterimi şeklinde reklam görünümü ile çalışmaktadır. Bu durum sıklıkla yaşandığında rahatsız edici bir hal almaktadır. Aynı şekilde enfekte edilen bilgisayarda belirli aralıklarla çıkan reklam gösterimleri de olmadık zamanlarda olmadık içeriklere sahip sayfaların açılmasına neden olabilmektedir. Siber suçlular tarafından fidye yazılımları yaymak için kullanılan en yaygın yöntemlerden bazıları kötü niyetli bağlantılar veya ekler içeren Spam e-posta kampanyaları; İnternet trafiğinin kötü niyetli web sitelerine yönlendirilmesi; Drive-by indirmeleri vb. dir (Baldwin ve Dehghantaha, 2018; Tailor ve Patel, 2017; Monica vd., 2016), Fidye yazılımı tehdidi büyüdükçe, suçluların listesi ve mağdur etme tekniklerinin karmaşıklığı da artmaktadır.

Fidye yazılımı aktörleri (özellikle de RaaS sağlayan araçlar), günde milyonlarca kötü niyetli mesaj gönderebilen güçlü botnet'ler ve savunmasız İnternet Protokolü (IP) adreslerini belirleyen İnternet tarayıcıları da dahil olmak üzere gelişmiş dağıtım tekniklerini giderek daha fazla kullanmaktadır. Ayrıca, Dark Web'de anonimleştirilmiş platformların, sahte e-posta reklamlarının ve ödemeler için kripto para birimlerinin kullanılması, saldırganların dijital ayak izlerini gizlemelerini kolaylaştırmaktadır (Meland, 2020). Suçlular tarafından barındırılan ve amatör saldırganlara bile fidye yazılımı kodlarını indirme ve saldırı başlatma ayrıcalığı veren Hizmet Olarak Fidye Yazılımı (RaaS) sağlayan ağlar vardır. Ayrıca Torlocker, TOX vb. gibi fidye yazılımı kodlarını geliştirmek ve

saldırıları başlatmak için çevrimiçi olarak ücretsiz olarak kullanılabilen geliştirme kitleri de bulunmaktadır (Taylor vd., 2019). Fidyeye yazılımları sadece teknik bir sorun değil, disiplinler arası bir sorundur (Reshmi, 2021). Suçlular, ilk giriş noktası olarak kurumsal ağlara nüfuz etmek için sosyal mühendislik tekniklerini giderek daha fazla kullanmaktadır. Bu saldırı tipolojisi içerisinde yapılan çalışmalar arasında (Sittig ve Singh, 2016) tarafından kaleme alınan ve bulgularını küçük örneklemlerle bir anket ve iki mülakata dayandıran bir çalışma bulunmaktadır.

Bunun dışında (Kharraz, 2016) 15 farklı aile içinde kategorize edilmiş bir veri seti kullanarak 2006 ve 2014 yılları arasında vahşi doğada gözlemlenen mevcut fidye yazılımı ailelerinin çoğunu kapsayan bir çalışmada halka açık kötü amaçlı yazılım depolarının manuel ve otomatik olarak taranması ve çeşitli fidye yazılımı örnekleri dahil olmak üzere çoklu kaynaklar kullanılarak oluşturulmuş ve incelemiştir.

Bir başka araştırma (Shinde vd., 2016) kapsamında ise Windows ve Android ortamlarındaki mevcut fidye yazılımı ailelerinden seçilen fidye yazılımı varyantlarının örneklerini analiz ederek, fidye yazılımları tarafından kullanılan şifreleme tekniklerinde önemli bir gelişme olduğunu ve Windows sisteminin Android sistemine oranla ransomware saldırılarının daha yüksek düzeyde tespit edilebilir olduğunu da ortaya çıkarmaktadır.

Zararlı Yazılım (Malicious)

Bu tipoloji² davranışsal olarak zarar görme ya da zarar verici davranışları teşvik edici eylem sınıfına girdiği için genel internet erişimlerinde kullanılmaması amacıyla engellenmektedir. Malicious saldırılar, internetteki kötü niyetlilik kimlik hırsızlığı, dolandırıcılık ve ağ veya sistem izinsiz girişlerini (örneğin, bilgisayar korsanlığı, virüsler ve kötü amaçlı yazılımlar) kapsamaktadır (Monica vd., 2016). Genellikle güvenlik ihlallerinin çoğuna neden olduğu düşünülen bu saldırılar iki yoldan biriyle ortaya çıkabilmektedir: Birincisi kullanıcının (saldırganın) bilinen sistemin açıklarından yararlanmak için tamamen meşru işlemler kullanılarak bir saldırı başlatması, ikinci olarak bir kullanıcının doğrudan bilgisayar sistemi kaynakları kategorisine girmeyen bilgi ve kaynakları kullanarak saldırı başlatmasıdır (Xu, 2016). Bu konuda yapılan bazı araştırmalarda Schneider vd., (2011) bir ağın topolojisinde nispeten küçük değişikliklerle ve toplam bağlantı uzunluğunu artırmadan Etkili bir hafifletme yöntemi geliştirerek belirli, kötü niyetli saldırıların tehlikesini önemli ölçüde azaltmanın mümkün olduğunu keşfetmişlerdir (Ray ve Poolsapassit, 2005). Zeng ve Liu, Siber ağların hem düğüm hem de bağlantı arızası ile karışık kötü niyetli saldırılara karşı sağlamlığını doğrulamaya çalışmaktadırlar (2012). Wu vd., (2022) kötü niyetli verilerin doğrudan eylemcilere bağlanan siber alana enjekte edildiği durumlarda siber-fiziksel sistemler için güvenli kontrol problemini incelemektedir.

Malicious saldırılar, veri sızıntısı ve hırsızlığı, servis kesintileri, verilerin bozulması ve silinmesi, kurumsal itibar kaybı, mali kayıplar, uygulama zafiyetleri ve hatalar, kimlik hırsızlığı ve dolandırıcılık gibi çeşitli sorunlara neden olabilmektedir. Bu saldırılar, kişisel ve kurumsal verilerin ihlali nedeniyle hukuki çatışmalar, sosyo-psikolojik etkilenimler, ulusal güvenlik zafiyetleri gibi ciddi sonuçlar doğurabilen riskli durumlar yaratabilmektedir. Bu saldırıların alt yaş kategorilerine yapılması halinde mahremiyet, siber zorbalık, kötü içeriklere maruz kalma, eğitim süreçlerinin aksaması gibi çeşitli sorunlara neden olabileceği anlaşılmaktadır. Çocuklar ve zararlı eylem gösterebilecek yatkinliğe sahip kişileri engellemek üzere yaygın bir kullanıma sahip yöntemlerden birisidir.

Kripto Hırsızlık (Cryptojacking)

Kullanıcı bilgisayarına bulaştırılan bir yazılım ile cihaz kaynakları kullanılarak madencilik işlemi üzerinden para kazanma yöntemi olarak bahsedilebilmektedir. Etimolojik olarak cryptocurrency ve hijacking olmak üzere iki kelimeden oluşan bu saldırı Cryptojacking olarak adlandırılmaktadır (Kshetri ve Voas, 2022). Cryptojacking, bir saldırı için kar elde etmek için hedef ana bilgisayarda gizlice kripto para madenciliği programını yürüttüğü bir tür kaynak zimmete geçirme saldırısıdır (Xu vd., 2022). Cryptojacking temelde gizli bir ağ tehdididir. Bu saldırı güçlü bir saldırı tarafından hesaplama gücünü artırmak için kullanılabilir ve madencilik dayalı herhangi bir blok zinciri için risk oluşturmaktadır (Carlin vd., 2020) Cryptojacking saldırı yöntemleri; “Uç nokta saldırıları, Bir başka yöntem de bir web sitesine ya da birden fazla web sitesine gönderilen bir reklama bir komut dosyası enjekte etmek, Savunmasız sunucuları ve ağ cihazlarını taramak, Yazılım tedarik zinciri saldırıları” (Aponte-Novoa vd., 2022) olarak yer almaktadır. Bir web sitesinde gezinirken bilgisayarın herhangi bir nedenden dolayı aniden çok yavaşladığını fark ederseniz, bilgisayarınız Cryptojacking saldırısına maruz kalmış olabilir. İyi gizlenmesi nedeniyle, her yıl bu tür milyonlarca saldırı olayı meydana gelmektedir (Chickowski, 2022; Musch vd., 2019).

² Yetişkin site erişimi olarak adlandırılan davranış, toplum ahlakı ile ilgili bir konuya işaret ettiği için ilgili sitelere erişilmemesi, kişilerin zarar görmesini engelleme yöntemi olarak kullanılmaktadır.

Dashevskiy vd., (2020) mobil cihazların pillerinin hızla tükenebileceğini ve hatta madencilik için yoğun bilgi işlem nedeniyle zarar görebileceğini belirtirken; McCombs vd., (2018) araştırmalarında bazı şirketlerin cryptojacking saldırıları nedeniyle bir süre faaliyet gösteremediğini tespit etmiştir.

Cryptojacking saldırılarını “yeni fenomen” olarak tanımlayan bazı araştırmacılar (McCombs vd., 2018) bu saldırıların büyük oranda kripto para biriminin artan piyasa değeri nedeniyle yükselişte olduğunu belirtmektedir. Web siteleri ile web tarayıcısı şeklinde yapılan bu tür saldırılar önemli güvenlik açıklarına neden olabilmektedir. Web sitelerinde cryptojacking saldırılarında kripto para madenciliği yapmak için Javascript kodu kullanılmaktadır. Yasadışı madencilik kodunun kurbanın bilgisayarının tarayıcısında çalışması için kullanıcının virüslü web sitesini tarayıcısına yüklemesi yeterli olarak görülmektedir (Hong vd., 2018).

Tarayıcı içi cryptojacking, web sitesi sahiplerinin bilgisi olmadan popüler web sitelerine kötü amaçlı Javascript kodu enjekte eden ve kendileri için kripto para madenciliği yapan bilgisayar korsanları için bir saldırı yolu olarak hizmet vermektedir. Bu, cryptojacking saldırısı olarak bilinir ve son zamanlarda büyük bir sorun haline gelmiştir (Aponte-Novoa vd., 2022) Tarayıcı tabanlı cryptojacking, fidye yazılımı eğilimlerinin azalmasının ardından hızla büyüyor. Cryptojacking kullanıcının tarayıcısından çalışır ya da popüler web sitelerine yerleştirilebilir, bu da kullanıcının tarayıcısını kullanarak bilgisayarındaki kaynakları kullanmaktadır (Saad vd., 2018; Razali vd., 2019). Saldırganlar tek tek bilgisayarları hedef alarak düşük riskli kötü amaçlı yazılımlar yerleştirmekte ya da bu tür kötü amaçlı yazılımları büyük çevrimiçi portallara yerleştirmek gibi daha basit ve daha popüler bir yolu seçmektedir. Tekiner vd., (2021) tarayıcı uzantıları ve antivirüsler gibi cryptojacking tespit teknikleri, cryptojacking sorununa kısmi bir çözüm sağlayabildiğini zira saldırıların gizleme teknikleri kullanarak veya etki alanlarını veya kötü amaçlı komut dosyalarını nispeten sık sık yenileyerek bunlardan kaçınabilmesini sağladığını belirtmektedirler. Bu yöntem sıklıkla kripto para piyasasının yüksek getiriler sağladığı dönemlerde artmaktadır. Bu saldırıya maruz kalındığında cihaz performansında gözle görülür bir yavaşlama, cihazların aşırı ısınması, kullanılabilir işlem gücünün olmaması nedeniyle kapanan cihazlar, cihazın veya yönlendiricinin üretkenliğinde azalma, elektrik maliyetlerinde beklenmedik artışlar karşılaşılabilecek sorunlar arasındadır.

Kripto Madencilik (Crypto Mining)

Nakamoto, (2008) kripto para sisteminin geleneksel paranın aksine, bir kripto para biriminin gerçekleştirilmesi, dijital parayı elde etmek için iş kanıtı olarak bilinen belirli bir miktar işin tamamlanmasını gerektirdiğini, iş kanıtının gerçekleştirilmesi, çok karmaşık ancak uygulanabilir kriptografik algoritmaların hesaplanmasını içerdiği belirtmektedir. Kripto para birimleri üretmek amacıyla iş kanıtını gerçekleştirmek için yapılan bu çalışmaya kripto madenciliği denilmektedir. Madencilik, blok zinciri sistemlerinde, özellikle de Bitcoin gibi kripto para birimlerinde yeni bloklar üretme yöntemidir. Bu sistemde ağ kullanıcıları (madenciler), yeni bir bloğu blok zincirindeki bir önceki bloğa kriptografik olarak bağlamak için hesaplama açısından pahalı bir bulmacayı çözmek zorundadır. Bu bulmacayı çözenin zorluğu, tüm kullanıcıların birleşik hesaplama gücüne bağlı olduğundan (GPU, FPGA ve ASIC) gibi güçlü makinelere ihtiyaç duyulmaktadır. Madencilere çıkarılan her blok için kripto para verilmektedir. Rütth vd., (2018) bu işlemin, Blok zinciri tabanlı kripto para birimleri, finansal işlemlerin halka açık, kurcalamaya karşı korumalı bir dizi bloğa gömülmesi prensibine dayandığını ve sistemi geliştirmek için, bekleyen işlemleri saklamak üzere sürekli olarak yeni bloklar eklenmesine madencilik denir.

Krishnan vd., (2015) açık ve merkezi olmayan bir sisteme sahip olan ve güvenliği artırmak ve yeni birimlerin oluşturulmasını kontrol etmek için kriptografi kullanan bir dijital para birimi türü olan kripto paranın, geleneksel parasal işlemlerden bir sonraki adımı olarak lanse etmektedir. Madenciler, öngörülebilirliği ve kurcalamaya karşı direnci garanti eden sabit bir blok oranında yeni bloklar üretmek için zorluğu dinamik olarak ayarlanan bir iş kanıtı (PoW) olarak bir kripto bulmacasını çözerler. Srinivasan, siber suçluların mümkün olduğunca az kullanıcı katılımıyla kripto para elde etmenin yollarını bulmakta ve böylece kripto madenciliği saldırılarına başvurmakta olduğunu aktarmaktadır (Srinivasan, 2017).

Cryptomining saldırıları (Mukhopadhyay vd., 2016; Brown, 2016; Carlin vd., 2018; Rütth vd., 2018; Ferrante vd., 2017) için kullanılan tür kötü amaçlı yazılımlar, kurbanların sistemlerini tehlikeye atarak, diğer kötü niyetli faaliyetleri kolaylaştırmak için kullanılabilir diğer güvenlik açıklarını da açabilmektedir. Bu eylemlerin saldırı boyutunu belirten kripto madenciliği saldırısı (tarayıcı tabanlı), kötü amaçlı yazılımın hedeflenen kurbanına değil bir aracıya teslim edilmesi nedeniyle siber saldırılarda bir paradigma değişikliği sunmaktadır. Bu, kurbanda yerleşik bir kötü amaçlı yazılım olmadığından IDS'lerden kaçma gibi önemli bir avantaja sahiptir (Carlin vd., 2018). Tarayıcı tabanlı kripto madenciliği saldırısında üç ana bileşen vardır: saldırı, kötü amaçlı yazılım ana bilgisayarı

(web sunucusu) ve genellikle bir botnet'in parçası olan kurban'dır. Kripto madenciliği botnet'i, iş kanıtı gereksinimini karşılamak için özel olarak tasarlanmıştır. Çoğu durumda, iş ispatı bireysel bir kurban tarafından gerçekleştirilemez (Zimba vd., 2020). Kripto madenciliği saldırılarında CPU tükenmesi nedeniyle aşırı yüklenme ve aşırı ısınmanın yangınlara bile neden olduğu bildirilmiştir (Becker vd., 2013).

Dolandırıcılık (Scam)

Scam, dolandırıcılık anlamında olup e-postalar genellikle kullanıcıyı maddi zarara uğratmak amaçlı içeriklere sahip metinlerdir. Siber suçun tipik olarak üç ana bileşeni vardır: Siber saldırının hedefi olan mağdur, suçluyu saldırıyı gerçekleştirmeye teşvik eden bir güdü ve suçun gerçekleşmesini sağlayan bir güvenlik açığı veya fırsat (Sun, 2018). Web dolandırıcılığı, "bir web sitesinin yanlış veya kasıtlı olarak yanıltıcı iddialarda bulunduğu bir tür siber güvenlik tehdididir" (Little vd., 2008) Scam suçları, dolandırıcılık konusunda web, kumar, iş ilanı vb gibi alanları kapsamaktadır.

Scam saldırılarını ele alan, çevrimiçi iş ilanları dolandırıcılığı konusunda yapılan bir araştırma, istihdam dolandırıcılığı tespiti konusunu araştırmaktadır. Bu araştırmanın katkısı, IESD adında yeni bir veri kümesi oluşturmak ve bir iş ilanının yasal mı yoksa hileli mi olduğunu belirlemek için davranışsal bağlam tabanlı özellikler önermektir. %90 oranında bir doğrulama elde edilmiştir (Sharifi vd., 2011). Çevrimiçi Aşk Dolandırıcılığı, Whitty ve Buchanan, tarafından "2008 yılında ortaya çıkan nispeten yeni bir dolandırıcılık türü" olarak değerlendirilmektedir (Nindyati ve Nugraha, 2019.) Bu suçta, suçlular çevrimiçi arkadaşlık siteleri aracılığıyla bir ilişki başlatmış gibi davranmakta ve ardından kurbanlarını büyük miktarlarda para dolandırmaktadır Genelde yurt dışında yaşıyor olmak ve bir yakınlarının kaybı sonrası miras kaldığını ancak bu işlemler için birtakım ücretleri ödeyerek ilgili mirasın alınabileceği yönünde gelen e-postalar bu saldırı türünü tanımlamaktadır. Bazı durumlarda herhangi bir loto çekilişini kazanmak veya terör örgütü mensubu kişilerle iletişim kurulması yönünde mesajlar ile de banka bilgilerine ulaşılarak, transfer edilen parasal değerle kayba uğramaya neden olan saldırı şeklidir. Bu saldırı yoluyla herhangi bir şekilde kullanıcı bilgisayarını ya da yazılımsal kaynakları enfekte edilmez ancak kişi zafiyetleri kullanılarak sahip olunan paranın kaybedilmesine yol açmaktadır.

MATERYAL VE YÖNTEM

Ağ toplumu olarak tanımlanan ve internet ile teknolojik araçlar üzerinden şekillenen veri yönetim politikalarının doğal bir sonucu olarak bilgisayar sistemleri üzerinde çeşitli politikalar ortaya çıkmaktadır. Bu politikalar arasında, satış, pazarlama, uygulama, denetim ve uyumluluk politikaları yer almaktadır. Araştırmanın temelini oluşturan siber uzam alanında internet ve web tabanlı sistemlerin ortak noktası olarak IP³ ve DNS⁴ kavramları ön plana çıkmaktadır. DNS Politikaları, eğitim temelli çocuk internet erişim yapısını ve kullanım amaçlarına göre filtreleme yoluyla zararlı içeriklerden koruma prensipleri gereğiyle oluşturulabilmektedir. Aynı zamanda kurumsal düzeyde DNS üzerinden zararlı yazılımlara karşı ayrı bir savunma mekanizması geliştirmek ve ticari hakları korumak gibi amaçlarla biçimlendirilmektedir.

Araştırmanın Amacı ve Önemi

Bu araştırma, internet tabanlı gelişen ağ toplumu meselesinde yaşanan olası riskler ve çözüm yollarını ortaya çıkarabilmek için bilgisayar üzerinde gerçekleştirilen bir uygulama tabanlı çözümleme modelini ortaya çıkarmayı hedeflemektedir. Araştırmanın önemi, sistem tabanlı yapılan araştırma projeleri ile kurumsal kaynak kodlu analizlerin yerine tekil kullanıcı bazında nasıl yansıdığını ortaya çıkarabilecek özel bir uygulama modeli ile incelenmesidir. Bu nedenle kurumsal kullanıcılar yerine tekil kullanıcıların olası tehdit ve riskler karşısındaki güncel durumunu ortaya çıkarabilecek örnek- kaynak bir çalışma olacağı düşünülmektedir.

Araştırmanın Evreni ve Örneklemi

Bu araştırma kapsamında ele alınan internet tabanlı hizmetleri kullanan tekil ve çoğul kullanıcılar incelenmektedir. Bu kullanıcılar; kurumsal, kamusal, ticari ve ev tipi kullanıcı olmak üzere dört ana grubu oluşturmaktadır. Söz konusu araştırma evreni içerisinde Statista (2023) tarafından belirlenen 5,4 milyar internet kullanıcısı içerisinde üçte ikisinin internet kullanıcısı olduğu baz alındığında en yaygın kullanım alanına sahip olan ev tipi kullanıcı grupları üzerinden bir analiz geliştirilmeye çalışılmaktadır. Bu bağlamda, araştırma evreni için bu kullanıcı grupları

³ IP (İng. Internet Protocol), İnternet Protokolü olarak tanımlanan; gerçek hayatta kişilere atanan adı-soyadı ve kimlik numarası tanımlarının internet karşılığı olan, mac adresi ve IP adresi şeklinde tekil kullanıcıya ait bir model olarak karşımıza çıkmaktadır.

⁴ DNS (İng. Domain Name System), Alan Adı Sistemi olarak makine dilinde anlaşılabilir formatta rakamlar bütünüyle oluşan IP adresini insanların hatırlayabileceği şekilde anlamlı hale getiren servistir.

seçilmiştir. Tüm kullanıcı gruplarından örneklem olarak ev tipi kullanıcılar belirlenmiştir. Bu kapsamda literatürde de yaygın olarak görülen deneysel nitelikli ve senaryo tabanlı bir saldırı modeli inşa edilerek söz konusu saldırıya ait dönemsel analizleri saptamak üzere örnek bir ev tipi kullanıcının ağ hareketliliğini gösteren teknolojik araçlar belirlenmiştir. Araştırma kapsamında belirlenen çoğul kullanıcının 1 ADSL yönlendirici cihaz, 1 Akıllı TV, 1 Tablet üzerinden DNS sorgu analizi oluşturulmaktadır. Statista (2024) verilerine göre Dünyada ağ penetrasyonu değeri açısından Avrupa %97,4 Kuzey Amerika %96,9 oranında gerçekleşirken örnek uygulama alanı olarak seçilen Türkiye'nin %86,5 ile 36. sırada yer alarak önemli bir ağ trafiğine sahip olduğu anlaşılmaktadır.

Araştırmanın Yöntemi ve Veri Toplama Tekniği

Çalışmanın genel içeriği saldırı tipolojileri ile saldırıların düzeylerini niceliksel olarak belirlemek üzere oluşturulduğu için verileri konuşturmak adına içerik düzeyleri üzerinden ölçümleme yapılması daha uygun görülmüştür. Bu bağlamda araştırmada içerik analiz yöntemi seçilmiştir. İçerik analizi; araştırma çalışmalarında elde edilen verilerin nicelik ve niteliksel açıdan analiz edilmesinde sıklıkla tercih edilen bir yöntemdir. İçerik analizi çalışmaları 16. yüzyılda başlayan bir yöntem olmakla birlikte I. ve II. Dünya Savaşı sırası ve sonrasında tüm disiplinlere yönelik kolaylık sağlayan özellikleri itibarıyla tercih edilmiştir. İçerik analizi çalışmalarının kavramsal tanımlaması Harold D. Laswell tarafından yapılmış olup alana ait ilk sistemli çalışma, Berelson ve Lazarsfeld tarafından "İletişim Çalışmalarında İçerik Analizi" (1948)'dir. Bu çalışmada ortaya çıkarılan suç tipolojilerinin sınıflandırılması ve analizlerin kategorisel düzeyde incelenmesi konusunda içerik analizi uygulama örnekleri içerik analizinin genel özelliklerini inceleyen (Whitty ve Buchanan, 2012; Berelson ve Lazarsfeld, 1948; Berelson, 1952; Aziz, 1990; Bilgin, 2006; Gökçe, 2006; Krippendorff, 2013) çalışmalar ile çalışmanın analiz modelini belirleyen örnek incelemeler (Yüksel, 2019; Herring, 2004; Abdüsselam vd., 2015; Kolukırık ve Gün, 2020) üzerinden veri setleri değerlendirilmektedir. Yine çalışmada uygulama modülü ve arayüzü geliştirilen yeni bir sistemden suç tipolojileri ve filtreleme listelerine göre engelleme listeleri çerçevelenerek DNS sorguları analiz edilmektedir. Bu kapsamda ayrıca örnek uygulamalar içeren (Yang vd., 2023; Goni, 2022; Lippert, ve Cloutier, 2021; Horan ve Saiedian, 2021) çeşitli çalışmalar da incelenerek suç kavramı ile çözümleme alanlarının genel politikaları da derinlikli olarak analiz edilmektedir.

Araştırmanın Kapsamı ve Sınırlılıkları

Siber uzamda gerçekleştirilen ağ temelli saldırılar, sosyal mühendislik temelli saldırılar ve zararlı yazılım kurulumu (yükleme yapılması) temelli saldırılar üzerinden ortaya çıkan suç tipolojileri bulunmaktadır. Araştırma kapsamında Web ve E-posta tabanlı sanal suç tipolojileri seçilmiştir. Araştırmanın temel sınırlılıklarını Türkiye'de yaşayan kişilere yönelik hizmet veren servisler üzerinde zarar verici eylemlere neden olan verilerin bir aylık araştırması analiz edilmektedir.

Araştırmanın Çözümlemesi

Çalışmanın yapılabilmesi için ilk önce sunucu kurulumunun yapılması gerekmektedir. Bu nedenle 64 bit Rocky Linux dağıtımını temel kurulum ile yapılandırılmıştır. Yapılandırma aşamasında SSH kurulumu ile gerekli uzak terminal erişimi etkinleştirilmiştir. Sunucu ortamı hazırlandıktan sonra DNS kurulumu ve yapılandırılması sağlanmıştır. Bu aşamada kurulum işlemi ile birlikte web ara yüzünden yönetilebilir bir yapı oluşturulmuştur. Daha sonrasında asıl web arayüzü üzerinden çalışmanın temelinde vurgulanan filtreler ve diğer erişim ile ilgili ayarlar gerçekleştirilmiştir. Sonraki adım olarak DNS sorgu istekleri izlenmiştir. Bunların içinde zararlı olan bağlantı istekleri tespit edilerek lokal bir kara liste oluşturulmuştur. Bu sayede oluşturulan tek bir listeden bütün DNS kullanıcıları faydalanarak zararlı bağlantılardan korunmuştur. Ayrıca merkezi olarak kurulabilmesi siber istihbarat açısından da kullanışlı ve etkin olarak son kullanıcı katılımı ile de desteklenebilecektir.

Bu çalışmada geliştirilen sistemde kullanılmakta olan web arayüzüne ait görseller çalışma sırasında kullanılan açık kaynak kodlu yazılımlara aittir. Bununla birlikte web arayüzüne ait yazılım dilinin kodlarında diğer yazılımların entegrasyonu nedeniyle değişiklikler yapılmıştır. Yazılımın çalıştırılması için ihtiyaç duyulan arka planda çalışan python ve bash scripting dilinde yazılmış olan betikler ve kodlar da oluşturulmuştur.

Genel Değerlendirme

DNS yönetimi için öncelikle araştırma deseni oluşturulması adına; genel DNS sorgu tipolojilerinin oluşturulması, sorgulama günlüğü için sorgulama tipolojileri, filtrelenen, işlenen engellenen ve ebeveyn denetimi sağlamak üzere modül oluşturulmaktadır. Araştırma projesinin kod temelli mimari tasarımı noktasında ise DNS için yapılandırma ve şifreleme altyapıları, istemci ayarları, hizmet ayarları ile engel listeleri oluşturulmaktadır. DNS çözümleri için kuruluş aşamasında sorgulama ekranının yönetimi konusunda belli istatistiksel prensipler ve yönergeler

oluşturulmaktadır. Sorgulama konusunda “Tüm Sorgular, Filtrelenen, İşlenen, Engellenen, Engellenen hizmetler, Engellenen tehditler, Ebeveyn denetimi tarafından engellendi ve izin verilen” olmak üzere sınıflandırılma gerçekleştirilmektedir. DNS altyapısının sağlıklı işleyebilmesi için cihaz üzerinde bir ağ yapılandırması ile kurulum sağlanmaktadır.

Filtreleme ile ilgili denetimde alan adlarının engellenmesi, web hizmetinin kullanılmasıyla gezinti koruması için engelleme oluşturulup oluşturulmadığı denetlenmiş, kontrolün ve güvenliğin sağlanması adına SHA256 özet algoritmasını kullanarak DNS kayıtlarının güvenliği ile yönetim kolaylığı için PHP tabanlı bir web arayüzü oluşturulmuştur. Bu arayüz içinde belli sorgulama prensipleri oluşturulmuştur. DNS Sorgulama İlk kurulum Sonrası Prensipleri konusunda tüm sorgu alanlarına ait 9 (dokuz) farklı tipoloji geliştirilmiştir. Bu prensipler; “filtrelenen, işlenen, engellenen, engellenen hizmetler, engellenen tehditler, ebeveyn tarafından engellendi, izin verilen, yeniden yazılan ve güvenli arama” şeklinde sıralanmaktadır.

BULGULAR

Araştırma kapsamında oluşturulan arayüz prensiplerinin yanı sıra istatistiksel görünümü sağlamak üzere bir ekran ve sorgulama günlüğü ekranı ayrıca oluşturulmuştur. Aşağıdaki grafiklerde sorgulama ekranı ile sorgulama günlüğü ekranlarının henüz veri olmadan ön izleme hali sunulmaktadır. Bu araştırma, üç aylık bir çalışma sürecinden oluşmaktadır. Araştırmada nitelikli çıktı sağlayabilmek için ilk aşamada 45 günlük süreç içerisinde DNS servisi ile ilgili açık kaynak kodlu tasarım ve yazılımlar incelenmiştir. Açık kaynak kodlu BIND servis yazılımının en güvenli kullanım konfigürasyonu olarak belirtilen DNS-SEC yapılandırması gerçekleştirilmiştir. Bu yapıda DNS kayıtlarını SHA256 özet algoritması ile oluşturulabilecek şekilde konfigürasyon oluşturulmuştur. Ayrıca küresel kullanılan düzeyde kara listelerden Türkiye için uygun olanları tespit edilmiş ve bu listelerin DNS sunucu üzerinde otomatik olarak güncellenmesi sağlanmıştır. Sürecin devamında daha güçlü ve güvenilir bir yapı oluşturmak adına yönetmekte olduğumuz ağa gelen zararlı trafik kaynaklarının IP adresleri ve alan adları yazılan betiklerle sunucu üzerindeki kara listeye eklenmiştir. Bu sayede DNS sunucunun bulunduğu ağa düzenli olarak saldırı gerçekleştiren IP adreslerinin sistem üzerinde sorgu yürütmeleri ve kurum ağına erişimlerinin engellenmesi sağlanmıştır.

Bu engelleme işlemi oluşturulan güvenli DNS sunucusunun günümüzde kullanılan güvenlik duvarlarının birçoğunda bulunan dinamik engelleme özelliği sayesinde iç ağdan zararlı faaliyet gösteren IP adreslerine ve alan adlarına yapacakları trafik engellemiş olup dış ağ üzerinden kayıtlı IP adresi ve alan adlarından kuruma doğru erişim istekleri güvenlik duvarı sayesinde engellenmiştir. Sistemin analiz süreci boyunca 15 günlük ilk veri akışı için izleme süreci oluşturulmuş ve sistem kaynak tüketimine neden olan betiklerdeki ya da kodlardaki hatalar ile ilgili kısımların düzenlenmesi ve kuralların yeniden yazımı gerçekleştirilmiştir. Söz konusu kurallar, false pozitif olarak adlandırılan ve hatalı çıktıya neden olan hatta zararlı olduğu düşünülmeye rağmen sistem tarafından kullanılan DNS filtreleme kuralları ile güvenlik duvarında kullanılan listelerin içerisinde geçen IP adreslerini düzenlenmesini ifade etmektedir. Örnek olarak zararlı yazılım davranışı sergileyen bir isteğe ait IP adresi küresel olarak konumlandırılmış bulut hizmeti veren sunucuların IP adresini engellemek aynı IP adresine sahip herhangi bir zararlı davranış sergilemeyen alan adının da engellenmesine neden olabilmektedir. Bu sebeple bir IP adresine atanmış birden fazla ve farklı hizmetleri yürütebilmek amacıyla kullanılan alan adlarının erişim engeli sorunu yaşamasının önüne geçilmesi sağlanmıştır.

Çalışmada DNS filtrelemesi olarak adlandırılan alan adları, 5651 sayılı kanun kapsamında konusu suç teşkil eden (Yetişkin içerik, yasadışı kumar ve bahis siteleri gibi) alan adları ile USOM (Ulusal Siber Olaylara Müdahale) tarafından yayınlanan alan adı ve IP listesi olarak belirtilmektedir. Kanunlar çerçevesinde zararlı faaliyet gösteren sistem ve sunuculara erişimin engellenmesi ilk olarak DNS servisi düzeyinde gerçekleştirilmektedir.

Bu kapsamda “DNS Sorgu Filtre İsimleri Listesi Görünümü” ile DNS Sorgu Türk ve Yabancı İstenmeyen Reklam Engelleme Listeleri oluşturulmuştur. Aşağıda yer alan grafiklerde bu listelere yer verilmektedir. Araştırmanın ikinci aylık sürecinde ise ilk test süreçleri ile kısıtlı sorgulama yapılarak veri akışı ve verilerin kurallar dizgesi ile nitelik kazanma parametreleri denetlenmiştir.

Türk ve Yabancı Uzantılı DNS Sorgulama Filtre Listesi			
Etkin	İsim	Liste URL'ü	Kural Sayısı
✓	AdGuard DNS Filtre	https://adguardteam.github.io/ad...	47.009
✓	AdAway Default Blocklist	https://adaway.org/hosts.txt	7.040
✓	NoCoin Filter List	https://raw.githubusercontent.co...	686
✓	Spam-s04	https://raw.githubusercontent.co...	6.147
✓	Scam Blocklist by DurableNapkin	https://raw.githubusercontent.co...	396
✓	The Big List of Hacked Malware W.	https://raw.githubusercontent.co...	9
✓	TUR: nurcan Türk ad-list	https://raw.githubusercontent.co...	9.198
✓	BarBlock	https://paulgb.github.io/BarBlock...	550
✓	Dan Pollock's List	https://someonewhocares.org/ho...	10.424
✓	CoskunZ	https://raw.githubusercontent.co...	578
✓	Turk-adlist	https://raw.githubusercontent.co...	1.187
✓	adblock_blockers	https://austinhuang.me/131-bloc...	96
✓	adnriadblockkiller	https://raw.githubusercontent.co...	1.945
✓	youtube-adblock	https://raw.githubusercontent.co...	14
✓	adguard-extra	https://raw.githubusercontent.co...	565
✓	adguard-turkish	https://filters-adtidy.org/extension...	5.845
✓	unlock-turkish	https://filters-adtidy.org/extension...	5.792
✓	porn-list	https://raw.githubusercontent.co...	500.203
✓	ransomware	https://raw.githubusercontent.co...	1.904
✓	scam	https://raw.githubusercontent.co...	1.265
✓	fanboy-Turk	https://fanboy.co.nz/fanboys-turkish	709

(a)

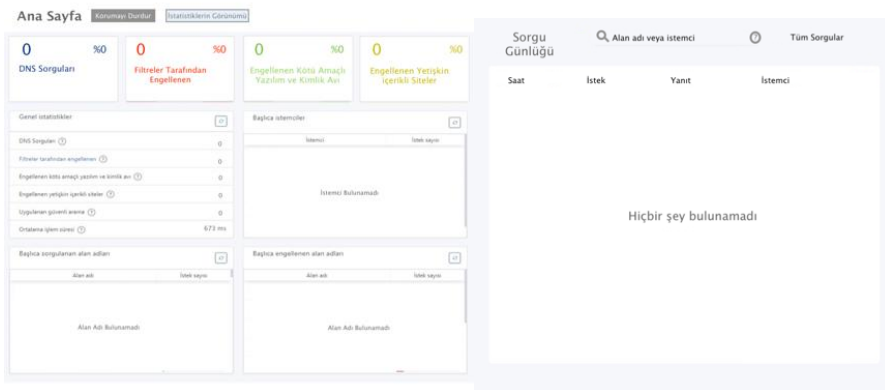
(b)

Şekil 1(a). DNS Sorgulama Filtre İsimleri Listesi Görünümü, (b) DNS Türk Sorgu Ve İstenmeyen Reklam Engelleme Listesi Görünümü

Araştırmanın üçüncü aylık dönemi olan 1-30 Haziran 2023 tarihlerinde ise tam ölçümlü ve kesinlikli veri akışları dizgesi ile sorgu ve diğer analizlerin takibi yapılmıştır. Sorgulama konusunda; dört temel değer sistemi oluşturularak DNS Sorgu Sayısı, Engel Sayısı, Kötü Amaçlı Yazılım ve Kimlik Avı ile Yetişkin İçerikli Siteler şeklinde sistem oluşturulmuştur

TÜRK VE YABANCI LİSTE URL'Sİ	
mikocin.site	kil3rr.com
ip80-ip-51-195-81.eu	meniskon.com
exmo.co.in	findatigali.site
chat.warlab.info	conhost.pw
a2commerce.com	brokenbones.ga
346211-cw53847.tmweb.ru	searchtool.space
343637-cg89835.tmweb.ru	f0457098.xsph.ru
340039-co76336.tmweb.ru	f0457102.xsph.ru
trifly.ru	45-76-47-204.plesk.page
cloacashki.myjino.ru	siweb.xyz
qlaston.net	pma.finansist.xyz
mjlog-vn.com	pma.fin.ex2life.cf
medcarnise.ir	panelaragon.es
kibossuqar.ir	outlook.al
goldrealestate.ga	mc.desmine.ru
a0458390.xsph.ru	ip140.ip-178-32-145.eu
truegreen-cn.com	ip101.ip-51-75-58.eu
malletmissile.ru	finansist.xyz
ldokja.xyz	fin.ex2life.cf
greenzing.top	ex2life.cf
functionalrnh.com	downersnow.tk
cubbiesdo.ru	321042-cy13670.tmweb.ru
www.eos-numerique.com	183.123.235.35.bc.googleusercontent.com
voceconfia.com	vm1265017.ssd.had.yt
mailierppro.blogspot.com	s176448.hostman.com
elhusseinyusmleprep.com	lcba5a9.justinstalledpanel.com
pcmall.ca	brokenbones.ml
brokenskuil.gq	brokenbones.cf
brokenskuil.cf	ifa3231e.justinstalledpanel.com
krockbread.com	E2-34-223-60-188.us-west-2.compute.amazonaws.com
phiheatings.ir	

Şekil 2. DNS Sorgu Yabancı İstenmeyen Reklam Engelleme Listesi Görünümü



(a)

(b)

Şekil 3(a). DNS Sorgulama Ekranının İlk Kurulum Sonrası İstatistiksel Görünümü, (b) DNS Sorgulama Günlüğünün İlk Kurulum Sonrası İstatistiksel Görünümü

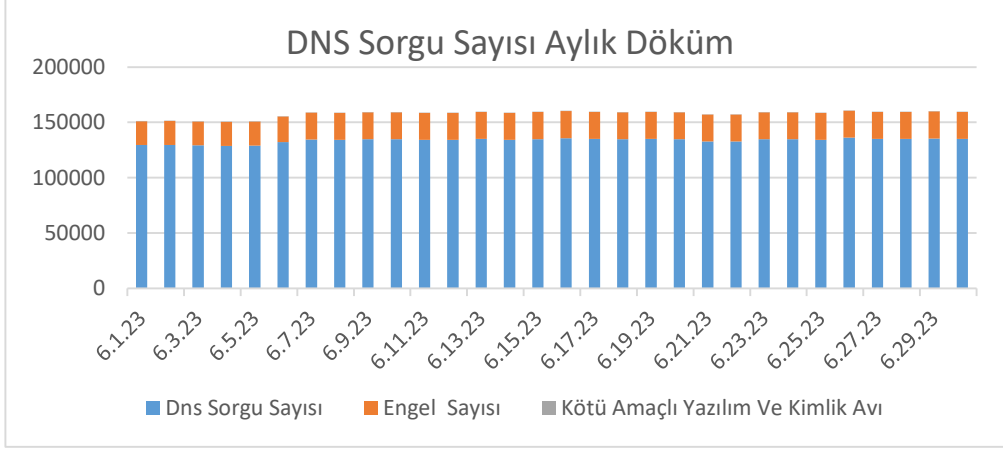
Araştırma kapsamında hazırlanan uygulamanın kurulumu sonrasında Yukarıda **Şekil 3(a)** olarak yer alan şekilde; “DNS Sorgu Sayısı, Engel Sayısı, Kötü Amaçlı Yazılım ve Kimlik Avı ile Yetişkin İçerikli Siteler” şeklinde üst sekmelerde bir bölüm alt sekmelerde ise “Genel istatistikler, başlıca istemciler, Başlıca sorgu alan adları ile başlıca engellenen alan adları” temelinde bir sistem oluşturulmuştur. Aşağıda yer alan **Şekil 3(b)** üzerinde yer alan “Sorgu Günlüğü” bölümünde ise ilk ekran görünümü olarak herhangi bir verinin bulunmadığı başlangıç grafiğinde “Hiçbir şey bulunamadı” ibaresi yer almaktadır.

Aşağıda yer alan **Tablo 1**'de “DNS Sorgularının Bir Aylık Toplam ve Ortalama Değer Görünümü” incelendiğinde ilk beş günlük dilimde en düşük sorgu sayısının olduğu, sorgu sayısında ayın ortasına karşılık gelen 16.06.2023 ve 17.06.2023 tarihlerinde en yüksek sorgulama sayısına ulaşıldığı görülmektedir. DNS sorgu sayılarında toplamda 4.010.360 rakamına ve 133.678 ortalama değere karşılık gelen istatistiksel veriler elde edilmiştir. Engel sayılarında da benzer bir şekilde aynı zaman parametrelerinde aynı değer özelliğine rastlanıldığı, 15.06.2023 ile 16.06.2023 tarihlerinde en yüksek ve aynı sayıda engel düzeye ulaşıldığı anlaşılmaktadır. Engel sayılarında toplamda 715.989 rakamına ve 23,866 ortalama değere karşılık gelen istatistiksel veriler elde edilmiştir. Kötü amaçlı yazılım ve kimlik avı değerlerinde ilk gün içinde 161 rakamına en yüksek değer olarak ulaşıldığı, ikinci olarak 17.06.2023 tarihinde 152 ile ikinci en yüksek değere ulaşıldığı, toplam sayının 2944 olduğu, genel ortalamasının ise 98 olarak ortaya çıktığı görülmektedir. Yetişkin içerikli sitelerde ise yapılan etkin filtrelemelere bağlı olarak herhangi bir veri akışının olmadığı dolayısıyla veri sağlanmadığı anlaşılmaktadır.

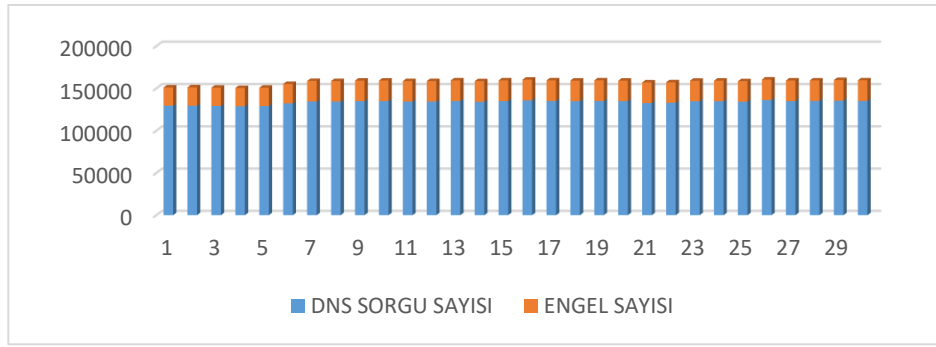
Tablo 1. DNS Sorgularının Bir Aylık Toplam Ve Ortalama Değer Görünümü

DNS Sorgularının Bir Aylık Toplam ve Ortalama Değer Görünümü				
DNS Sorgu Tarihi	DNS Sorgu Sayısı	Engel Sayısı	Kötü Amaçlı Yazılım Ve Kimlik Avı	Yetişkin İçerikli Siteler
01.06.2023	129436	21612	161	0
02.06.2023	129515	21640	94	0
03.06.2023	129209	21600	86	0
04.06.2023	128808	21614	74	0
05.06.2023	129131	21621	72	0
06.06.2023	132189	23008	85	0
07.06.2023	134442	24330	110	0
08.06.2023	134290	24328	107	0
09.06.2023	134848	24320	132	0
10.06.2023	134866	24341	85	0
11.06.2023	134259	24321	81	0
12.06.2023	134244	24330	79	0
13.06.2023	134985	24419	116	0
14.06.2023	134084	24420	96	0
15.06.2023	134861	24516	95	0
16.06.2023	135763	24516	96	0
17.06.2023	135024	24389	152	0
18.06.2023	134792	24392	90	0
19.06.2023	135034	24464	83	0
20.06.2023	134813	24363	78	0
21.06.2023	132673	24318	77	0
22.06.2023	132856	24294	112	0
23.06.2023	134729	24297	100	0
24.06.2023	134790	24322	86	0
25.06.2023	134197	24298	96	0
26.06.2023	136166	24298	81	0
27.06.2023	134932	24363	92	0
28.06.2023	134970	24383	119	0
29.06.2023	135366	24451	117	0
30.06.2023	135088	24421	92	0
TOPLAM SAYI	4010360	715989	2944	0
ORTALAMA DEĞER	133678,6667	23866,3	98,13333333	0

Aşağıda yer alan “DNS Sorgu Bir Aylık Sorgu, Engel ve Kötü Amaçlı Yazılım ve Kimlik Avı Pasta Görünümü” grafiğinde DNS sorgu sayısı ile engel, kötü amaçlı yazılım ve kimlik avı değerlerinde belirgin düzeyde farklılıklar olduğu ortaya çıkmaktadır. Yine “DNS Sorgu Bir Aylık Sorgu ve Engel Pasta Görünümü” grafiğinde sadece iki değer olarak sorgu ve engel sayılarının ikili analizinde yüksek ve farklı düzeylerde değerlere erişildiği görülmektedir.



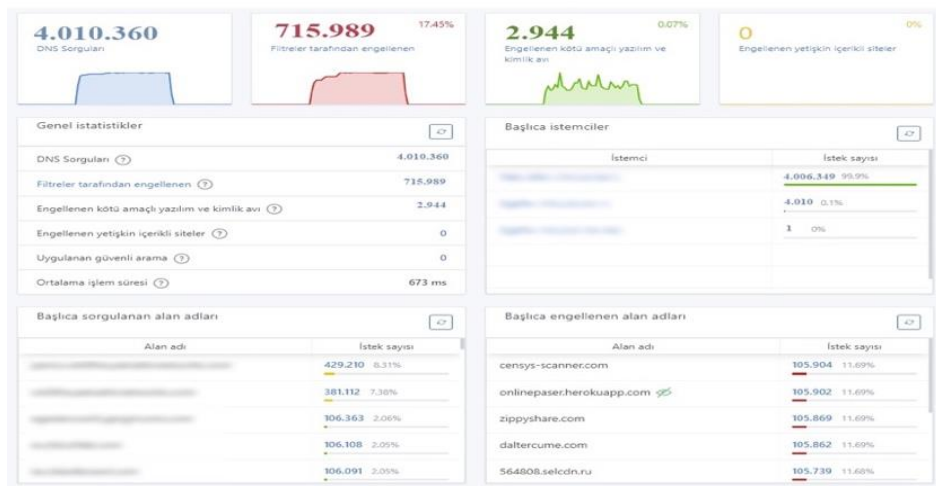
Şekil 4. DNS Sorgularının Bir Aylık Sorgu, Engel Ve K.A.Y.K.A Pasta Görünümü



Şekil 5. DNS Sorgularının Bir Aylık Sorgu Ve Engel Pasta Görünümü

Araştırma kapsamında “Sorgu, Engel ve Kötü Amaçlı Yazılım ve Kimlik Avı (K.A.Y.K. A) Bir Aylık Çizgisel Analiz Görünümü” ayrı ayrı değerlendirildiğinde; DNS Sorgu sayısında bir aylık incelemelerde yükseliş yönünde bir çizgisel değere sahip olduğu anlaşılmaktadır. DNS Sorgu, Bir Aylık Engel Sayılarına ait grafik incelendiğinde ilk haftadan itibaren yükselişe geçen daha sonra yatay eksenle seyreden çizgisel değere sahip noktasal yükseliş ortaya çıkmaktadır.

SİBERUZAM SUÇ TİPOLOJİLERİ ÇÖZÜMLEME MODELİ ANA EKRANI



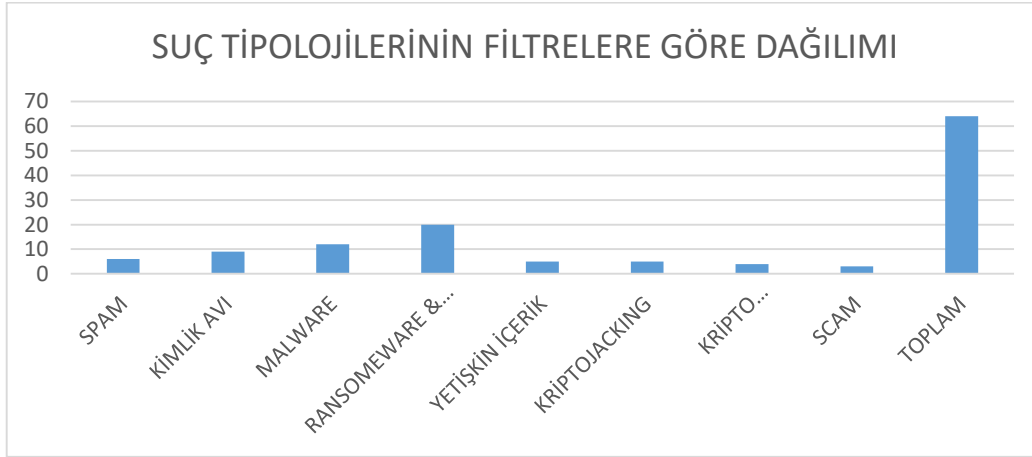
Şekil 6. DNS Sorgu Bir Aylık İzleme Sonrası Genel İstatistik Görünümü

Bilimsel çalışmaların en önemli uygulama alanlarından birisi olarak bu çalışma özelinde yeni bir yazılım şeklinde oluşturulan sistem arayüzü üzerinden tüm veriler ışığında elde edilen “DNS Sorgu Bir Aylık İzleme Sonrası Genel İstatistik Görünümü” değerlendirildiğinde; sadece bir aylık analiz sürecinde yüksek ortalama değere sahip olduğu anlaşılmaktadır. Zira, “sorgulama, engelleme, kötü amaçlı yazılım ve kimlik avı” ölçütlerinde suç tipolojilerinin filtreleme sistemi üzerinden hangi alanlarda suç tipolojileri ile zararlı bir yapıya dönüşebileceği renklendirilmiş bir ana ekran ile ortaya çıkmaktadır.

Tablo 2. Suç Tipolojileri Filtre Dağılım Sayılarının Genel Görünümü

Filtreleme Oranlarının Görünümü			
No	Türü	Oranı	Yüzdesi
1	Spam	6	9,37
2	Kimlik Avı	9	14,06
3	Malware	12	18,75
4	Ransomware ve Adaware	20	31,25
5	Malicious Zararlı Yazılım	5	7,81
6	Yetişkin İçerik	5	7,81
7	Kriptojacking	4	6,25
8	Kripto Madenciliği	3	4,68
8	Scam	3	4,68
Toplam	8	64	%100

Yukarıda yer alan “Suç Tipolojileri Filtre Dağılım Sayılarının Genel Görünümü ve Grafikselsel Genel Görünümü” verileri değerlendirildiğinde; 8 tane tür olduğu görülmektedir. Bu türler; Spam, Kimlik Avı, Malware, Ransomware ve Adaware, Yetişkin içerik, Kriptojacking, Kripto Madenciliği ve Scam olmak üzere belirlenmiş ve oran ve yüzde değerleri açısından farklı sayısal ölçümlere ulaşılmıştır. Spam oranları 6 ve yüzdesi %9,37; Kimlik Avı oranları 9 ve yüzdesi 14,06; Malware oranları 12 ve yüzdesi 18,75; Ransomware ve Adaware oranları 20 ve yüzdesi 31,25; Yetişkin içerik oranları 5 ve yüzdesi 7,81; Kriptojacking, oranları 5 ve yüzdesi 7,81; Kripto Madenciliği oranları 4 yüzdesi 6,25 ve Scam oranları 3 yüzdesi ise 4,68 şeklinde sıralanmaktadır.



Şekil 7. Suç Tipolojileri Filtre Dağılım Sayılarının Grafikselsel Genel Görünümü

Yukarıda yer alan “Suç Tipolojileri Filtre Dağılım Sayılarının Genel Görünümü ve Grafikselsel Genel Görünümü” verileri değerlendirildiğinde; 64 toplam filtreleme listesi içinde yapılan analize göre 48 adet yabancı filtre (%87,3) ve Türk filtre olarak 7 adet (%12,7), 9 adet ortak filtre tipolojisi özelliği gösteren filtreler olmak üzere belirtilen oranlarda gerçekleştiği ortaya çıkmaktadır.

SONUÇLAR

Yeni nesil ağ teknolojilerinde internet tabanlı gelişim ile birlikte kullanıcıların eğilimleri evrilmektedir. Günümüzde dijitalleşme çabaları sanal düzlemde karşılık bulmaktadır. Farklı kullanıcı tipolojilerinin oluşması sonucu, içerik ve siber uzamda mahremiyet konusunda beklentiler değişebilmektedir. Söz konusu beklentiler, siber dünyada sanal kullanıcıların suç ve zarar konularıyla yüzleşmeleri nedeniyle güvenli internet kullanma tercihlerinde de belirleyici rol üstlenebilmektedir.

Bu çalışma, internet kullanıcılarının kendi internet ağları üzerinden gerçekleşen dijital hareketlerinin IP ve DNS örnekleri üzerinden suç tiyolojileri karşısında yaşayabileceği siber saldırı ve zorbalık nedeniyle hangi muhtemel suç tiyolojileriyle karşılaşabileceklerini ve muhtemel çözüm önerilerini ortaya çıkarabilmek üzere DNS yapıları üzerinden kural ve filtreleme yoluyla oluşturulan ağ hareketine odaklanmaktadır.

Araştırma kapsamında ilk aşamada DNS ve IP arasındaki teknik ilişkiyi ortaya çıkarabilmek üzere yapılan test süreçlerinde tek tip dijitalleşme ve kullanıcı profili olmadığı ortaya çıkmaktadır. Yapılan arayüz tasarımında ve uygulama çalışmasında elde edilen bir aylık verilere göre özellikle içerik endüstrisinin reklam ve dolandırıcılık yoluyla hedef kitleyi temsil eden kullanıcılar üzerinde kurduğu baskılayıcı yapının suç tiyolojilerinin niceliksel oranlarıyla örtüştüğü anlaşılmaktadır. Zira, araştırma kapsamında bir aylık veriler içerisinde Tablo 2’de yer aldığı üzere reklam ve dolandırıcılık tabanlı suç tiyolojisinin 20 oran ve %31,25 ile en yüksek değere sahip olması, içerik tabanlı erişimler üzerinden kitlelere karşı yapılan saldırıların daha yüksek risk barındırdığını da ortaya çıkarmaktadır. Siber uzamda gerçekleşen tüm saldırılar ile suç kavramının dijital alanı ve sanal kimlikleri de etkilemesiyle muhtemel teknik ve hukuki çözümlerin üretilmesinin de zorunlu hale geldiği görülmektedir. Yine çalışma kapsamında, DNS üzerinden ağ temelli suçlara ilişkin yapının genel görüntüsünün ortaya çıkarılması, mahremiyet ve kullanıcı tabanlı koruma yöntemlerinin iyileştirilmesinin nasıl sağlanabileceği ile ilgili kurallar, satırlar ve filtreleme biçimleriyle anlamlı ilişkilendirilmektedir.

Kullanıcı tabanlı DNS filtresinin onarılması ve DNS sunucusu üzerinden yürütülecek tüm sorguların gizliliği için SSL (İng. Secure Socket Layer) adı verilen Güvenli Giriş Katmanı gibi güvenli web sorgulama yapılarının oluşturulması gerekmektedir. Bu çözümleme yöntemleri, internete erişim için kullanılan yönlendirici ya da güvenlik duvarı üzerinde gerekli önlemler alındıktan sonra ilgili yapının daha güvenilir olmasını ve ağda daha iyi hizmet verebilir hale getirilebilmesini sağlayabilmektedir.

Sonuç olarak, analiz çerçevesinde ev tipi çoğul kullanıcı örneği üzerinden DNS yapısındaki “sorgu, engelleme, zararlı içerik ve kimlik avı” yapılarındaki değişim yüzdeleri siber suç tiyolojilerinin genel yönelim yapılarını da ortaya çıkarmaktadır. İnternet tabanlı teknolojilerinin tam anlamıyla güvenli olmadığı, güvenli internet alanının sadece hizmet satın alma ve yazılımsal bir süreç içermediği aynı zamanda kullanıcının bilinç düzeyi, araştırmacı yapısı ve ağ sistemleri üzerinde engelleyici güvenli çözümlerinin üretilmesindeki çabalarına göre değişiklik gösterdiği de görülmektedir.

KAYNAKLAR

Abdüsselam, M. S., Burnaz, E., Ayyıldız, H., & Demir, İsmail K. (2015). web teknolojilerinin e-ticaret ortamlarında kullanımı ile ilgili içerik analizi: Türkiye’deki ilk 500 e-ticaret sitesi. *KTÜ, SBE Sos. Bil. Dergisi*, 2015(10), 263-284.

Abide, Ö. F., & Gelişli, Y. (2020). Sosyal bilgiler ders kitaplarının ve öğretim programlarının çocukların güvenli internet kullanımları açısından incelenmesi. *JRES*, 7(1), 248-269.

Akbanov, M., Vassilakis, V.G., & Logothetis, M.D. (2019). Ransomware detection and mitigation using software-defined networking: The case of WannaCry. *Computers & Electrical Engineering*, 76, 111-121. <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2019.03.012>

Akbulut, Y., Dursun, Ö.Ö., Dönmez, O., & Şahin, Y.L. (2016). In search of a measure to investigate cyberloafing in educational settings. *Computers in Human Behavior*, 55, 616-625.

Akgün, E. (2022). Güvenli internet ile ilgili tezlerdeki yöntemsel eğilimlerin sistematik incelenmesi. *Instructional Technology and Lifelong Learning*, 3(1), 64-87. <https://doi.org/10.52911/itall.1062981>

Akman, T. (1982). *bilimler bilimi sibernetik*. Karacan Yayıncılık.

Akyüz, A., & Koç, Z. (2020). Empati yönelimli siber zorbalık psiko-eğitim programının lise 9. ve 10. sınıf öğrencilerinin siber zorbalık ve empati düzeylerine etkisi. *Gazi Üniversitesi Gazi Eğitim Fakültesi Dergisi*, 40(1), 75-111. <https://doi.org/10.17152/gefad.695923>

Alan, H. (2019). Sosyal ağ kullanımı yoğunluğu ve sanal kaytarma davranışları: Üniversite öğrencileri üzerine bir inceleme. *Çağdaş Yönetim Bilimleri Dergisi*, 6(2), 112-129. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/cybd/issue/49666/495333>

Allen, M. (2006). *Social engineering: A Means to violate a computer system*. Tech. Rep., SANS Institute.

- Anandarajan, M., & Simmers, C. A. (2005). Developing human capital through personal web use in the workplace: Mapping employee perceptions. *Communications of The Association For Information Systems*, 15, 776-791. <https://doi.org/10.17705/1CAIS.01541>
- Androutsopoulos, I., Paliouras, G., Karkaletsis, V., Sakkis, G., Spyropoulos, C.D., & Stamatopoulos, P. (2000). Learning to filter spam e-mail: a comparison of a naive bayesian and a memory-based approach. Zaragoza H, Gallinari P, Rajman M. (Eds.), *Proceedings of the workshop, Machine Learning and Textual Information Access*, (pp.1-13), 4th European Conference on Principles and Practice of Knowledge Discovery in Databases (PKDD-2000), Lyon, France, September 2000.
- Aponte-Novoa, F.A., & Villanueva-Polanco, R. (2022a). On proof-of-accuracy consensus protocols. *Mathematics*, 2022(10), 2540, 1-27. <https://doi.org/10.3390/math10142504>
- Aponte-Novoa, F.A, Povedano Álvarez, D., Villanueva-Polanco, R., Sandoval Orozco, A.L., & García Villalba, L.J. (2022b). On detecting cryptojacking on websites: Revisiting the use of classifiers. *Sensors*, 22(23), 9219, 1-15. <https://doi.org/10.3390/s22239219>
- APWG. (Anti-Phishing Working Group). (2013). Phishing Activity Trends Report-4th Quarter 2013. <http://apwg.org/resources/apwg-reports> Accessed:17.11.2023.
- Arabacı, İ. (2017). Investigation faculty of education students cyberloafing behaviors in terms of various variables. *The Turkish Online Journal of Educational Technology*, 16(1), 72-82.
- Arachchilage, N.A.G, & Love, S.A (2013). Game design framework for avoiding phishing attacks. *Computers in Human Behavior* 29(2013) 706-714. <http://dx.doi.org/10.1016/j.chb.2012.12.018>
- Arıca, T., Siyahhan, S., Uzunhasanoglu, A., Saribeyoglu, S., Çıplak, S., Yılmaz, N., & Memmedov, C. (2008). Cyberbullying among Turkish adolescents. *CyberPsychology Behavior*, 11(3), 253-261. <https://doi.org/10.1089/CPB.2007.0016>
- Aslan, A. & Karakuş Yılmaz, T. (2017). Türkiye’de güvenli internet kullanımına yönelik gerçekleştirilen uygulamalar. *Dumlupınar Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 53. Sayı-Temmuz 2017, 121-143.
- Aslan, O, & Akin, E. (2022). Malware detection method based on file and registry operations using machine learning. *Sakarya University Journal of Computer and Information Sciences*, 5(2), 134-146. <https://doi.org/10.35377/saucis...1049798>
- Aziz, A. (1990). *Araştırma yöntemleri-teknikleri ve iletişim*. A. Ü Siyasal Bilgiler Fakültesi ve Basın-Yayın Yüksekokulu Basımevi.
- Bağrıyanık, M. F. (2018). Dijital alanın tipolojileri: dijital kültüre dair sosyolojik bir okuma, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, Konya, 111s.
- Baldwin, J., & Dehghantaha A. (2018). Leveraging support vector machine for opcode density based detection of crypto-ransomware. In *Cyber Threat Intelligence*, Cham: Springer, 107-136, https://doi.org/10.1007/978-3-319-73951-9_6
- Bargh, J.A., & McKenna, K.Y.A (2004). The internet and social life. *Annual Review of Psychology*, 55, 573-590.
- Barreno, M., Nelson, B., Joseph, A., & Tygar, J. (2010). The security of machine learning. *Machine Learning*, 81, 121-148.
- Baykara, M., & Gürel, Z.Z. (2018). Detection of phishing attacks. 2018 6th International Symposium on Digital Forensic and Security Antalya, Turkey, 2018, (pp.1-5), ISDFS. <https://doi.org/10.1109/ISDFS.2018.8355389>
- Bazrafshan, Z., Hashemi, H., Fard, S.M.H., & Hamzeh, A. (2013). A Survey on heuristic malware detection techniques. In *IEEE Conference on Information and Knowledge Technology*, (pp.113-120), IEEE.
- Becker, J., Breuker, D., Heide, T., Holler, J., Rauer, H.P., & Böhme, R. (2013). Can we afford integrity by proof-of-work? Scenarios inspired by the Bitcoin currency. *The Economics of Information Security and Privacy*; 2013, Springer: Berlin, Heidelberg, 135-156.
- Becker, T.E., & Martin, S.L. (1995). Trying to look bad at work: Methods and motives for managing poor impressions in organisations, *Academy of Management Journal*, 28(1), 174-200.
- Berelson, B. (1952). *Content analysis in communication research*. Free Press.

- Berelson, B., & Lazarsfeld, P. F. (1948). *The Analysis of communication content*. University of Chicago and Columbia University.
- Bergholz, A., DeBeer, J., Glahn, S., Moens, MF, Paaß, G., & Strobel, S. (2010). New filtering approaches for Phishing e-mail. *Journal of Computer Security*, 18(1), 7-35.
- Beugre, C. D., & Daeryong, K. (2006). Cyberloafing: Vice or Virtue? Mehdi Khosrow Pour (Ed.), *Emerging Trends and Challenges in Information Technology Management*, (pp.834-835), Idea Group Inc.
- Bhavsar, V., Kadlak, A., & Sharma, S. (2018). Study on phishing attacks. *International Journal of Computer Applications*, (0975-8887), 182(33), December 2018, 27-29.
- Bhowmick, A., & Hazarika, S. (2018). E-Mail spam filtering: a review of techniques and trends, Bhowmick, Kalam A, Das S, Sharma K. (Eds.) *Advances in Electronics, Communication and Computing. Lecture Notes in Electrical Engineering*, Vol 443, (pp.583-590), Springer, Singapore. https://doi.org/110.1007/978-981-10-4765-7_61
- Bilgin, N. (2006). *Sosyal bilimlerde içerik analizi teknikler ve örnek çalışmalar*. İkinci Baskı. Siyasal.
- Bin Abbas, M.F., & Srikanthan, T. (2017). Low-complexity signature-based malware detection for IOT devices. In *International Conference on Applications and Techniques in Information Security*, (pp.181-189), Springer.
- Blanchard, A. & Henle, C. (2008). Correlates of different forms of cyberloafing: The Role of norms and external locus of control. *Computers in Human Behavior*, 24(3), 1067-1084.
- Bozeman, D. P., & Kacmar, K.M. (1997). A Cybernetic model of impression management processes in organisations. *Organisational Behaviour and Human Decision Processes*, 69(1), 9-30.
- Brody, R.G., Mulig, E., & Kimball, V. (2007). Phishing, pharming and identity theft. *Journal of Academy of Accounting and Financial Studies*, 11, 43-56.
- Brown, D.S. (2016). Cryptocurrency and criminality. *The Police Journal: Theory Practice and Principles*, 89(4), 327-339. <https://doi.org/10.1177/0032258x16658927>
- Brown, D. S., & Wang, T. (2008). Cyberethics: identifying the moral, legal and social issues of cybertechnology in k-12 classrooms. *College Teaching Methods & Styles Journal*, 4(2), 29-36.
- Bulut, S. & Gündüz, S. (2012). Exploring violence in the context of Turkish culture and schools. S. R. Jimerson, A. B. Nickerson, M. J. Mayer, & M. J. Furlong (Eds.), (In.) *Handbook of School Violence and School Safety: International Research and Practice* (2nd Ed.) (pp.165-174), Routledge.
- Canavan, J.E. (2001). *Fundamentals of network security*. London, UK, Artech House.
- Carlin, D., Burgess, J., O’Kane, P., & Sezer S. (2020). You could be mine(d): The Rise of cryptojacking. *IEEE Security & Privacy*, 2020(18), 16-22. <https://doi.org/10.1109/MSEC.2019.2920585>
- Carlin D, O’Kane P, Sezer S, & Burgess J. (2018). Detecting cryptomining using dynamic analysis. In: 2018 *16th Annual Conference on Privacy, Security and Trust (PST)*, (pp.1-6), IEEE. <https://doi.org/10.1109/pst.2018.8514167> (08.05.2023).
- Cassidy, W., Faucher, C., & Jackson, M. (2013). Cyberbullying among youth: a comprehensive review of current international research and its implications and application to policy and practice, *School Psychology International*, 34(6) 2013, 575-612. <https://doi.org/10.1177/0143034313479697>
- Castells, M. (2005). *Ağ toplumunun yükselişi, enformasyon çağı: ekonomi, toplum, kültür*. (çev. Ebru Kılıç). Birinci Cilt, İstanbul Bilgi Üniversitesi Yayınları.
- Chickowski, E. (2022). Cryptojacking Explained: How To Prevent, Detect, and Recover From it. <https://www.csoonline.com/article/564521/what-is-cryptojacking-how-to-prevent-detect-and-recover-from-it.html> Accessed: 22.09.2023.
- Clayton R. (2005). Insecure Real World Authentication Protocols (or why is phishing so profitable). <http://www.cl.cam.ac.uk/users/rnc1/phishproto.pdf>. Accessed: 21.09.2023.
- Clynes, M. E., & Kline, N. S. (1960). Cyborgs and Space. *Astronautics*, September, 26-76.
- Cutler, R. (1996). Technologies, relations, and selves. (In.) L. Strate, R. Jacobson, & S. Gibson (Eds.), *Communication and Cyberspace: Social Interaction in an Electronic Environment*, (pp.317-333), Hampton.

- Çetin, B. A., & Ceyhan, A. A. (2014). Ergenlerin İnternet’te Kimlik Denemeleri ve Problemlı İnternet Kullanım Davranışları. *The Turkish Journal on Addictions*, 1(2), 5-46.
- Dashevskiy, S., Zhauniarovich, Y., Gadyatskaya, O., Pilgun, A., & Ouhssain, H. (2020). Dissecting android cryptocurrency miners. *ACM*, 2020, 191-202.
- Do, C. T., Tran, N. H., Hong, C., Kamhoua, C.A., Kwiat, K. A., Blasch, E., Ren, S., Pissinou, N. & Iyengar, S. S. (2017). Game theory for cyber security and privacy. *ACM Computing Surveys*, 50(2), Article 30, (May 2017), 1-37. <http://dx.doi.org/10.1145/3057268>
- Doss, A. F. (2020). *Cyber Privacy: Who Has Your Data And Why You Should Care*. (1st Ed.) Ben Bella Books Inc.
- Duda, R.O., & Hart, P.E. (1973). *Bayes Decision Theory*. Chapter 2, Pattern Classification and Scene Analysis, 10-43, New York, John Wiley.
- Erdur-Baker, Ö., Kavşut, F. (2007). Akran zorbalığının yeni yüzü: siber zorbalık cyber bullying: a new face of peer bullying. *Eurasian Journal of Educational Research*, 27, 2007, 31-42.
- Ergün, E., & Altun, A. (2012). Öğrenci gözüyle siber aylıklık ve nedenleri. *Eğitim Teknolojisi Kuram ve Uygulama*, 2(1), 2012, 36-53.
- Erkoç, M. F. (2018). Güvenli internet kullanımı, *Bilişim Teknolojileri*, (İçinde) Serdar Bahadır Kert, (Ed.), (s.399-422), Nobel Yayın Dağıtım,
- Ferrante, A., Malek, M., Martinelli, F., Mercaldo, F., & Milosevic, J. (2017). Extinguishing ransomware-a hybrid approach to android ransomware detection. In *International Symposium on Foundations and Practice of Security*, (pp. 242-258), Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-75650-9_16
- Fette, I., Sadeh, N., Tomasic, A. (2007). Learning to detect Phishing emails. In *Proceedings of the 16th International Conference on World Wide Web (WWW)*, ACM, May 2007, (pp.649-656), Banff, Canada.
- Fielder, A., König, S., Panaousis, E., Schauer, S., & Rass, S. (2018). Risk Assessment Uncertainties in Cybersecurity Investments. *Games* 2018, 9, 34. <https://doi.org/10.3390/g9020034>
- Garrett, R.K. & Danziger, J.N. (2008). On Cyberslacking: workplace status and personal internet use at work, *Cyberpsychology & Behaviour*, (11)3, 287-292.
- Gibson, W. (1984). *Neuromancer*. Penguin Putnam Inc.
- Gomez-Hernandez, J.A., Alvarez-Gonzalez, L., & García-Teodoro, P. (2018). R-Locker: Thwarting ransomware action through a honeypot-based approach. *Computers & Security*, 73, 389-398. <https://doi.org/10.1016/j.cose.2017.11.019>
- Goni, O. (2022), Cyber crime and its Classification, *Int. J. of Electronics Engineering and Applications*,10(1), 01-17, <https://doi.org/10.30696/IJEEA.X.I.2021.01-17>
- Gökçe, O. (2006). *İçerik çözümlemesi kuramsal ve pratik bilgiler*. Siyasal Kitabevi.
- Greene, M.B. (2006). Bullying in school: A Plea for measure of human rights. *Journal of Social Issues* 62, 63-69.
- Gyöngyi, Z., Garcia-Molina, H., & Pedersen, J. (2004). Combating web spam with trustrank. In *Proceedings of The Thirtieth International Conference on Very Large Data Bases*, Volume 30, (pp.576–587), VLDB Endowment.
- Haraway, D. (2006). *Siborg manifestosu: Geç yirminci yüzyılda bilim, teknoloji ve sosyalist-feminizm*. (Çev.) O. Akinhay. Agora Yayıncılık.
- Herring, S. C. (2004). Content Analysis for New Media: Rethinking the Paradigm, *New Research for New Media: Innovative Research Methodologies Symposium Working Papers and Readings*, 47-66.
- Hinduja, S., & Patchin, J.W. (2009). *Bullying beyond the schoolyard: Preventing and responding to cyberbullying*. Carwin Press.
- Hong, G., Yang, Z., Yang, S., Zhang, L., Nan, Y., Zhang, Z., Yang, M., Zhang, Y., Qian, Z., Duan, H. (2018). How you get shot in the back: A Systematical study about cryptojacking in the real world. In *2018 ACM SIGSAC Conference on Computer and Communications Security (CCS '18)*, (pp.1701-1713), ACM, NY, USA, 15-19 October 2018. <https://doi.org/10.1145/3243734.3243840>

- Horan, C., & Saiedian, H. (2021). Cyber Crime Investigation: Landscape, Challenges, and Future Research Directions. *J. Cybersecur. Priv.* 2021, 1, 580–596. <https://doi.org/10.3390/jcp1040029>
- Hu, W., & Tan Y. (2017). Generating adversarial malware examples for black-box attacks based on GAN, arXiv:1702.05983, 1-7. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1702.05983>
- İşman, A. & Açmacı, N. (2021). Siber zorbalık kavramı üzerinden bir film incelemesi: Cyberbully (sanal zorbalık), *IETC-IDEA 21, IQC 21, ITEC 21, ISTECA 21, INTE 21, IWSC 21, ITICAM 21, Conference Paper*, (s.503-527).
- Jindal, N., & Liu, B. (2008). Opinion spam and analysis. In *Proceedings of The International Conference on Web Search And Web Data Mining*, (pp.219-230), New York, ACM.
- Kalaycı, E. (2010). Üniversite öğrencilerinin siber aylıklık davranışları ile öz düzenleme stratejileri arasındaki ilişkilerin incelenmesi, (Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi), Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Kara, I., & Aydos, M. (2022). The Rise of ransomware: Forensic analysis for Windows based ransomware attacks. *Expert Systems With Applications*, 190(2022), 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2021.116198>
- Kaşıkçı, D. N., Çağıltay, K., Karakuş, T., Kurşun, E., & Ogan, C. (2014). Türkiye ve Avrupa'daki çocukların internet alışkanlıkları ve güvenli internet kullanımı, *Eğitim ve Bilim 2014*, 39(171), 230-243.
- Kharraz, A. (2016). UNVEIL: A Large-Scale, Automated Approach to Detecting Ransomware, In *Proceedings of the 25th USENIX Security Symposium (USENIX Security 16)*, (pp.757-772), USENIX Association.
- Kharraz, A., Robertson, W., Balzarotti, D., Bilge, L., Kirda, E. (2015). Cutting the Gordian Knot: A Look Under the Hood of Ransomware Attacks, in *Detection of Intrusions and Malware, and Vulnerability Assessment, Vol. 9148 of Lecture Notes in Computer Science*, (pp.3-24), Springer International Publishing, Cham.
- Kirda, E. (2017). UNVEIL: a large-scale, automated approach to Detecting ransomware (keynote). In *2017 IEEE 24th International Conference on Software Analysis, Evolution and Reengineering (SANER)*, (pp.1-1), IEEE. <https://doi.org/10.1109/SANER.2017.7884603>.
- Kolukırık, S. & Gün, E. (2020). Bilişim teknolojilerinin suç eylemi üzerindeki etkisi: İnternet haberlerinde dijital suç örneği. *ZfWT* 12(3), (2020), 323-339.
- Korkmaz, M., & Kıran-Esen, B. (2012). The Effects of peer-training about secure internet use on adolescents. *Turkish Psychological Counseling and Guidance Journal*, 2012, 4(38), 180-187.
- Kowalski, R.M., Limber, S. P. & Agatston, P.W. (2012). *Cyberbullying: Bullying in the digital age*. Wiley & Blackwell.
- Kowalski, R. M., Giumetti, G. W., Schroeder, A. N., & Lattanner, M. R. (2014). Bullying in the digital age: A critical review and meta-analysis of cyberbullying research among youth. *Psychological Bulletin*, 140(4), 1073-1137. <https://doi.org/10.1037/a0035618>
- Krippendorff, K. (2013). *Content analysis: An Introduction to its methodology* (3.Ed.). Sage.
- Krishnan, H.R., Saketh, S.Y., Vaibhav, V.T.M. (2015). Cryptocurrency mining-transition to cloud. (*IJACSA International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, 6(9), 2015, 115-124.
- Krueger, M. (1991). *Artificial reality II*. Addison-Wesley, Reading.
- Kshetri, N., & Voas, J. (2022). Cryptojacking. *Computer. IEEE, Computer Society*, 55(1), 18-19. <https://doi.org/10.1109/MC.2021.3122474>
- Kuehl, D.T. (2009). *From Cyberspace to Cyber-power: Defining the Problem, in Cyberpower and National Security*, ed. by F.D. Kramer, S. Starr, L.K. Wentz, National Defense University Press, Washington (D.C.).
- Kut, S. (2013). Sibertektonik mekân. (Yayımlanmamış Doktora Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Lacey, B. (2007). Social aggression: a study of internet harassment. (Unpublished Doctoral Dissertation), Long Island University. New York, USA.
- Lenhart, A. (2007). Cyberbullying and online teens. <http://www.pewinternet.org/pdfs/PIP%20Cyberbullying%20Memo.pdf>. Accessed:12.10.2023.

- Levy, P. (1997). *Collective intelligence: Mankind's emerging world in cyberspace*. Perseus Books.
- Li, F., Huang, M., Yang, Y., & Zhu, X. (2011) Learning to Identify Review Spam, DBLP Conference IJCAI 2011, January 2011, *Proceedings of the 22nd International Joint Conference on Artificial Intelligence*, 16-22, July 2011, (pp.2488-2493), Barcelona, Catalonia, Spain. <https://doi.org/10.5591/978-1-57735-516-8/IJCAI11-414>
- Li, H., Zhou, S.Y., Yuan, W., Li, J., & Leung, H. (2020). Adversarial-example attacks toward android malware detection system. *Fellow, IEEE Systems Journal*, 14(1), March 2020, 653-656. <https://doi.org/10.1109/JSYST.2019.2906120>
- Li, Q. (2006). Cyberbullying in Schools: A Research of Gender Differences. *School Psychology International*. 2006; 27(2),157-170. <https://doi.org/10.1177/0143034306064547>
- Liang, H., & Xue, Y. (2009). Avoidance of information technology threats: A Theoretical perspective. *MIS Quarterly*, 33(1), 71-90.
- Lim, V.K., & Chen, D.J. (2012). Cyberloafing at the workplace: Gain or drain on work? *Behaviour & Information Technology*, 31(4), 343-353.
- Lippert, K.J., & Cloutier, R. (2021). Cyberspace: A Digital Ecosystem. *Systems* 2021, 9-48. <https://doi.org/10.3390/systems9030048>
- Little, D., Shinder, J., & Cross, M. (2008). *Scene of the cybercrime*. New York, USA, Elsevier.
- Martin, K.A & Leary, M.R. (1999). Would you drink after a stranger? the influence of self-presentational motives on willingness to take a health risk. *Personality & Social Psychology Bulletin*, 25(9), 1092-1111.
- McCombs, R., Barnes, J., Sood, K., & Barton, I. (2018). Wannamine Cryptomining: Harmless Nuisance or Disruptive Threat? <https://www.crowds-trike.com/blog/cryptomining-harmless-nuisance-disruptive-threat> Accessed: 21.04.2023.
- McLuhan, M. (1964). *Understanding media: The Extensions of man*. McGraw Hill.
- Medin, B. (2018). Dijital kültür, dijital yerliler ve günümüzdeki yeni film seyir deneyimleri, *Erciyes İletişim Dergisi Akademia*, 2018, 5(3), 142-158.
- Meland, P.H., Bayoumy, Y., & Sindre, G. (2020). The Ransomware-as-a-service economy within the darknet. *Computers & Security*, 92. 101762. <https://doi.org/10.1016/j.cose.2020.101762>
- Messmer, E. (2023). Tech talk: Where'd it come from, anyway?, *Pc World: Business Cen*. <https://www.pcworld.com/article/147698/tech.html> Accessed: 14.08.2023.
- Metin, O. & Karakaya, Ş. (2017). Jean Baudrillard perspektifinden sosyal medya analizi denemesi. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi*, 19(2), 109-121.
- Mitchell, T.M. (1997). *Machine learning*. New York, USA, McGraw-Hill.
- Monica, Z.P, & Lindskog, D. (2016). Experimental analysis of ransomware on Windows and android platforms: Evolution and characterization. *Procedia Computer Science*, December 2016, 94, 465-472.
- Moore, T., & Clayton, R. (2007). Examining the impact of website take-down on Phishing. In *Proceedings of The Anti-Phishing Working Group's Annual Ecrime Researchers Summit*, (pp.1-13), ACM.
- Mukhopadhyay, U., Skjellum, A., Hambolu, O., Oakley, J., Yu, L., Brooks, R. (2016). A Brief survey of Cryptocurrency systems. In *2016 14th Annual Conference on Privacy, Security and Trust (PST)*. (pp.745-752), IEEE. <https://doi.org/10.1109/PST.2016.7906988>
- Musch, M., Wressnegger, C., Johns, M., Rieck, K. (2019). Thieves in the browser: web-based cryptojacking in the wild, In *The 14th International Conference*, (pp.1-10), ACM.
- Nagy, P., & Koles, B. (2014). The Digital transformation of human identity: Towards a conceptual model of virtual identity in virtual worlds. *Convergence*, 20(3), 276-292.
- Nakamoto, S. (2008). Bitcoin: A Peer-To-Peer Electronic Cash System. 1-9, 2008. https://www.uscc.gov/sites/default/files/pdf/training/annual-national-training-seminar/2018/Emerging_Tech_Bitcoin_Crypto.pdf Accessed: 11.06.2023.

- Nindyati, O., & Nugraha, I.G.B.B. (2019). Detecting scam in online job vacancy using behavioral features extraction. *2019 International Conference on ICT for Smart Society (ICISS)*, (pp.1-4), Bandung, Indonesia. <https://doi.org/10.1109/ICISS48059.2019.8969842>
- Nowicki, J. M. (2020). Data Security: Recent K-12 Data Breaches Show that Students are Vulnerable to Harm, *GAO Reports, September 2020*, 1-22. <https://www.gao.gov/assets/710/709463.pdf> Accessed: 23.12.2023.
- O’Kane, P., Sezer, S., & Carlin, D. (2018). Countering cyber threats for industrial applications: An automated approach for malware evasion detection and analysis”. *Journal of Network and Computer Applications*, 7(5), 321-327. <https://doi.org/10.1049/ntw2.v7.510.1049/iet-net.2017.0207>
- Özdemir, N. G. (2006). Sanal topluluklarda izlenimi yönetme. (Yayımlanmamış Yüksek Lisans Tezi), Ankara Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü, 179s.
- Öztürk, G. (2013). *Dijital reklamcılık ve gençlik*. Beta Yayınları.
- Peker, A., & Ekinci, E. (2016). Genel öz-yeterliğin siber zorbalıkla başa çıkma davranışları üzerindeki yordayıcı etkisi. *Uluslararası Türkçe Edebiyat Kültür Eğitim (TEKE) Dergisi*, 5(4), 2126-2140. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/teke/issue/26927/283128>
- Purkait, S. (2012). Phishing counter measures and their effectiveness literature review. *Information Management & Computer Security*, 20(5), 382-420. <http://dx.doi.org/10.1108/09685221211286548>
- Pusey, P., & Sadera, W. A. (2012). Cyberethics, cybersafety, and cybersecurity: Preservice teacher knowledge, preparedness, and the need for teacher education to make a difference. *Journal of Digital Learning in Teacher Education*, 28(2), 82-88.
- Qamar, A., Karim, A., & Chang, V. (2019). Mobile malware attacks: Review, taxonomy & future directions. *Future Generation Computer Systems*, 97(2019), 887-909. <https://doi.org/10.1016/j.future.2019.03.007>
- Raad, M., Yeassen, N.M., Alam, G.M., Zaidan, B.B., & Zaidan, A.A. (2010). Impact of spam advertisement through e-mail: A Study to assess the influence of the anti-spam on the e-mail marketing. *African Journal of Business Management*, 4(11), 2362-2367.
- Ralston, S. M. & Kirkwood, W. G. (1999). The Trouble with applicant impression management. *Journal of Business and Technical Communication*, 13(2), 190-207.
- Rass, S., Schauer, S., König, S., & Zhu, Q. (2020). *Cyber-Security in Critical Infrastructures A Game-Theoretic Approach*, Springer, Cham, Switzerland.
- Ray, I., & Poolsapassit, N. (2005). *Using Attack Trees to Identify Malicious Attacks from Authorized Insiders*. S. De Capitani di Vimercati et al. (Eds.), ESORICS 2005, LNCS 3679, (pp.231-246), Springer-Verlag, Berlin Heidelberg.
- Razali, M.A., & Mohd, S.S. (2019). CMBlock: In-Browser detection and prevention cryptojacking tool using blacklist and behavior-based detection method. In Badioze Zaman, H., et al. *Advances in Visual Informatics, IVIC 2019*. Lecture Notes in Computer Science, Vol 11870. (pp.1-12), Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-34032-2_36
- Reshmi, T.R. (2021). Information security breaches due to ransomware attacks- A systematic literature review. *International Journal of Information Management Data Insights*, 1(2021), 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.jjime.2021.100013>
- Rudd, E.M., Rozsa, A., Günther, M., Boulton, T.E. (2017). A Survey of Stealth Malware Attacks, Mitigation Measures, and Steps Toward Autonomous Open World Solutions. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 19(2), Second Quarter, 1145-1172.
- Rüth, J., Zimmermann, T., Wolsing, K., & Hohlfeld, O. (2018). Digging into browser-based crypto mining. In: *Proceedings of the Internet Measurement Conference 2018*, (pp.70-76), ACM. <https://doi.org/10.1145/3278532.3278539>
- Saad, M., Khormali, A., & Mohaisen, A. (2018). End-to-End analysis of in-browser cryptojacking, *arXiv: Cryptography and Security*, 1-15. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1809.02152>

- Sahami, M., Dumais, S., Heckerman, D., Horvitz, E. (1998). A Bayesian Approach to Filtering Junk E- Mail. In Learning for Text Categorization-Papers from the AAAI Workshop, Madison Wisconsin. AAAI Technical Report, WS-98-05, 55-62.
- Sahoo, A.K., Sahoo, K.S., Tiwary, M. (2014). Signature based malware detection for unstructured data in Hadoop. In *International Conference on Advances in Electronics Computers and Communications*, (pp.1-6), IEEE.
- Savage, K., Coogan, P., Lau, H. (2015). The Evolution of Ransomware. *Symantec Security Tech. Report Version 1.0-August 6*, Mountain View, CA, USA.
- Sayar, K. (2002). Psikolojik mekân olarak siberalan. *Yeni Symposium* 40(2). 60-67.
- Schneider, C.M., Moreira, A.A., Andrade, José, S. Jr., Havlin, S., & Herrmann, H.J. (2011). Mitigation of malicious attacks on networks. *PNAS*, March 8, 2011, 108(10), 3838-3841. <https://dx.doi.org/10.1073/pnas.1009440108/-/DCSupplemental>
- Schroeder, K. (2002). Safe Internet Use. *The Education Digest*; Nov. 2002; 68(3), *ProQuest Central*, 70-73.
- Schroeder, A., & Lattanner, M. (2014). Bullying in the Digital Age: A Critical Review and Meta-Analysis of Cyberbullying Research Among Youth. *Psychological Bulletin*.
- Sharifi, M., Fink, E., & Carbonell, J.G. (2011). Smartnotes: Application of crowdsourcing to the detection of web threats. *Carnegie Mellon University. Journal Contribution, IEEE*, 1-2.
- Shinde, R., Veeken, P., Schooten, S., Berg, J. (2016). Ransomware: Studying transfer and mitigation. *2016 International Conference on Computing, Analytics and Security Trends*, (CAST), 19-21 December 2016, (pp.90-95), IEEE.
- Shusterman, R. (2000). *Performing live: Aesthetic alternatives for the ends of art*. Cornell University Press.
- Sırakaya, M. & Seferoğlu, S. S. (2018). Çocukların çevrim-içi ortamlarda karşılaştıkları riskler ve güvenli internet kullanımı. B. Akkoyunlu, A. İşman ve H. F. Odabaşı (Ed). *Eğitim Teknolojileri Okumaları 2018, 12. Bölüm*, (s.185-202), Pegem Akademi.
- Simpson, B. & Murphy, M. (2014). Cyber-privacy or cyber-surveillance? legal responses to fear in cyberspace. *Information & Communications Technology Law*, 23(3), 189-191. <https://doi.org/10.1080/13600834.2014.978551>
- Siroski, M., & Honig, A. (2012). *Practical Malware Analysis: The Hands-On Guide to Dissecting Malicious Software*. San Francisco, CA, USA, No Starch Press,
- Sittig, D.F, & Singh, H. (2016). A socio-technical approach to preventing, mitigating, and recovering from ransomware attacks". *Appl Clin Inform* 7(2), 624-632. <http://dx.doi.org/10.4338/ACI-2016-04-SOA-0064>
- Slonje, R., & Smith, P.K. (2008). Cyberbullying: Another main type of bullying? *Scandinavian Journal of Psychology*, 49, 147-154.
- Slonje, R., Smith, P. K. & Frisén, A. (2013). The Nature of cyberbullying, and strategies for prevention, *Computers in Human Behavior*, 29(2013), 26-32.
- Smith, P. K. (2011). Cyberbullying and cyber aggression, *Handbook of school violence and school safety: International research and practice* (2nd ed.). Jimerson, S.R., Nickerson, A.B., Mayer, M.J., & Furlong, M. J. (Eds.), Routledge. <https://doi.org/10.4324/9780203841372>
- Srinivasan, C.R. (2017). Hobby hackers to billion-dollar industry: the evolution of ransomware, *Computer Fraud & Security*, 2017(11), 7-9. [https://doi.org/10.1016/S1361-3723\(17\)30081-7](https://doi.org/10.1016/S1361-3723(17)30081-7)
- Statista (2023). Internet usage worldwide- Statistics & Facts. <https://www.statista.com/topics/1145/internet-usage-worldwide/#statisticChapter>
- Statista (2024). Countries with the highest internet penetration rate as of April 2024 <https://www.statista.com/statistics/227082/countries-with-the-highest-internet-penetration-rate/>
- Stratton, J. (2002). *Siberalan ve kültürün küreselleştirilmesi*. Mehmet Doğan (Çev.), Cogito Sayı: 30, Yapı Kredi Yayınları.
- Suler, J. (1996). *The Psychology of cyberspace*. <http://www.rider.edu/suler/psyber/psyber.html> Accessed: 13.11. 2023

- Şenel, S., Günaydın, S., Sarıtaş, M.T., & Çiğdem, H. (2019). Üniversite öğrencilerinin siber aylıklık seviyelerini yordayan faktörler. *Kastamonu Education Journal*, 27(1), 95-105. <https://doi.org/10.24106/kefdergi.2376>
- Tailor, J.P., Patel, A.D. (2017). A Comprehensive survey: Ransomware attacks prevention, monitoring and damage control. *International Journal of Research and Scientific Innovation (IJRSI)*, IV(VIS), June 2017, 116-121.
- Taylor, P.J, Dargahi, T., Dehghantaha, A., Parizi, R.M., & Choo, K. (2019). A systematic literature review of blockchain cyber security. *Digital Commun. Netw.*, 154, 3-13.
- Tedeschi, J.T.; Lindskold, S. & Rosenfeld, P. (1985) Introduction to Social Psychology, West Publishing.
- Tekiner, E., Acar, A., Uluagac, A.S., Kirda, E., Selcuk, A.A. (2021). SoK: Cryptojacking malware. In *Proceedings of the 2021 IEEE European Symposium on Security and Privacy (EuroS P)*, 6-10 September 2021, (pp.120-139), IEEE. <https://dx.doi.org/10.1109/EuroSP51992.%202021.00019>
- The Sun. (2018). Illegal Bitcoin Mining Factory Sparks Massive Blaze Thanks to Overheating Computers Used to Create Cryptocurrency. <https://www.thesun.co.uk/news/5538526/bitcoin-mining-factory-cryptocurrency-illegal-russia-fire-overheating-computers/> Accessed: 07.05.2023.
- TIFO-Today I Found Out (2012). This Day in History: The First Mass Commercial Internet Spam Campaign is Launched. <https://www.todayifoundout.com/index.php/2012/04/this-day-in-history-the-first-mass-commercial-internet-spam-campaign-is-launched/> Accessed: 15.05.2023.
- Timisi, N. (2005). Sanallığın gerçekliği: internetin kimlik ve topluluk alanlarına girişi, M. Binark & B. Kılıçbay (Der.). *İnternet, Toplum, Kültür*, (s.89-106), Epos Yayınları.
- Törenli, N. (2005). *Yeni medya, Yeni iletişim ortamı*. Bilim ve Sanat Yayınları.
- Tuparova, D., & Mehandzhiyska, K. (2018). Online educational computer games related to topic internet safety, analysis of case studies. *Proceedings of the National Conference on Education and Research in the Information Society*. (pp.057-066), Scitepress.
- Turkle, S. (1996). Parallel lives: working on identity in virtual space. (In.) D. Grodin & T. R. Lindlof (Eds.), *Constructing the self in a Mediated World*, (pp.156-175), Sage. <https://doi.org/10.4135/9781483327488.N10>
- Ugrin, C. J., Pearson, M.J. & Odom, M.D. (2007). Profiling cyber-slackers in the workplace: demographic, cultural, and workplace factors, *Journal of Internet Commerce*, 6(3), 75-89.
- Van Schaik, P. (2017). Risk perceptions of cyber-security and precautionary behavior. *Computers in Human Behavior*, 75, 547-559.
- Vishwanath, A., Herath, T., Chen, R., Wang, J., & Rao, H.R. (2011). Why do people get phished? Testing individual differences in Phishing vulnerability with in an integrated, information processing model. *Decision Support Systems*, 51(3), 576-586.
- Venugopal, D., & Hu, G. (2008). Efficient signature based malware detection on mobile devices. *Mobile Information Systems*, 4(1), 33-49.
- Vitak, J., Crouse, J. & LaRouse, R. (2011). Personal internet use at work: Understanding cyberslacking, *Computers in Human Behavior*, 27, 1751-1759. <https://doi.org/10.1016/j.chb.2011.03.002>
- Willard, N. (2004). An educator's guide to cyberbullying and cyberthreats. <http://cyberbully.org/docs/cbcteducator.pdf> Accessed: 12.10.2023.
- Wang, A.H. (2010). Don't follow me: Spam detection in Twitter. *2010 International Conference on Security and Cryptography (SECRYPT)*, (pp.1-10), Athens, Greece.
- Wang, E. Shih-Tse (2019.) Effects of brand awareness and social norms on user-perceived cyber privacy risk. *International Journal of Electronic Commerce*, 23(2), 272-293. <https://doi.org/10.1080/10864415.2018.1564553>
- Whitty, M.T., & Buchanan, T. (2012). The Online dating romance scam: A Serious crime. *CyberPsychology, Behavior, and Social Networking*, 15(3), 181-183. <https://doi.org/10.1089/cyber.2011.0352>
- Wong-Lo, M., & Bullock, L. M. (2011). Digital aggression: Cyberworld meets school bullies. *Part of a Special Issue: Cyberbullying By: Preventing School Failure*, 55(2), 64-70. <https://doi.org/10.1080/1045988X.2011.539429>

- Wu, C., Yao, W., Pan, W., Sun, G., Liu, J., & Wu, L. (2022). Secure control for cyber-physical systems under malicious attacks, in *IEEE Transactions on Control of Network Systems*, June 2022, 9(2), (pp.775-788), IEEE. <https://dx.doi.org/10.1109/TCNS.2021.3094782>
- Wu, G., Greene, D., Smyth, B., & Cunningham, P. (2010). Distortion as a Validation Criterion in the Identification of Suspicious Reviews. Technical Report, UCD-CSI-2010-04, Dublin, Ireland, University College Dublin, 2010.
- Xu, G., Dong, W., Xing, J., Lei, W., Liu, J., Gong, L., Feng, M., Zheng, X., & Liu, S. (2022). Delay-CJ: A novel cryptojacking covert attack method based on delayed strategy and its detection. *Digital Communications and Networks*, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.dcan.2022.04.030>
- Xu, J.J. (2016). Are blockchains immune to all Malicious attacks?. *Financial Innovation*, 2(25),1-9. <https://dx.doi.org/10.1186/s40854-016-0046-5>
- Yağcı, M. & Yücel, A. (2016). Kavramsal boyutlarıyla sanal kaytarma. *International Journal of Social Sciences and Education Research*, 2(2), 531-540.
- Yaman, E., & Peker, A. (2012). The perceptions of adolescents about cyberbullying and cybervictimization. *Gaziantep University Journal of Social Sciences*, 11(3), 819-833. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/jss/issue/24238/256940>
- Yang, A., Lu, C., Li, J., Huang, X., Ji, T., Li, X., & Sheng, Y. (2023). Application of meta-learning in cyberspace security: a survey, *Digital Communications and Networks*, 9(1), 2023,67-78. <https://doi.org/10.1016/j.dcan.2022.03.007>.
- Yaşar, S. & Yurdugül, H. (2013). The Investigation of Relation Between Cyberloafing Activities and Cyberloafing Behaviors in Higher Education, *Procedia- Social and Behavioral Sciences*, 83, 600-604.
- Yazgan, Ç. Ü. & Yıldırım, A. F. (2020). Üniversite gençliğinde internet bağımlılığı ve derslerde siber aylıklık davranışları, *Gençlik Araştırmaları Dergisi, Aralık 2020, 8 (Özel Sayı)*, 5-23.
- Yetimoğlu, B. (2022). Siber tehdit istihbaratıyla özgün tehdit aktörleri veri kümesi oluşturma ve sınıflandırma, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 69s.
- Yohanandhan, R.V., Elavarasan, R.M., Manoharan, P., Mihet-Popa, L. (2020). Cyber-Physical Power System (CPPS): A review on modeling, simulation, and analysis with cyber security applications. *IEEE Access*, 2020(8),151019-64.
- Yoo, K.H., & Gretzel, U. (2009). Comparison of Deceptive and Truthful Travel Review. *Information and Communication Technologies in Tourism*, 1(1), 37-47.
- Yüksel, E. (2019). Türkiye’de iletişim araştırmalarında içerik analizi uygulamaları, sorunlar ve çözüm önerileri, *International Euroasia Congress on Scientific Researches and Recent Trends-V, 16-19 DEC, 2019*, The Book of Full Texts Volume-II, Editors. Prof. Dr. Gülzar İbrahimova & Dr. Terane Nağıyeva ISBN 978-625-7029-51-3, (s.134-152), Bakü, Azerbaycan.
- Zeng, A., & Liu, W. (2012). Enhancing network robustness against malicious attacks, *Physical Rev. E* 85, 1-7. <https://dx.doi.org/10.1103/PhysRevE.85.066130>
- Zhang, X., Ma, H., & Tse, C.K. (2022a). Assessing the robustness of cyber-physical power systems by considering wide-area protection functions. *IEEE J Emerg Sel Top Circ Syst*, 12(1), 107-114.
- Zhang, X., Liu, D., Tu, H., & Tse CK. (2022b). An integrated modeling framework for cascading failure study and robustness assessment of cyber-coupled power grids. *Reliability Engineering & System Safety*, 226, 108654.
- Zheng, M., Sun, M., Lui, J.C.S. (2013). Droid analytics: A Signature based analytic system to collect, extract, analyze and associate android malware. In *IEEE Conference on Trust, Security and Privacy in Computing and Communications*, 2013.
- Zimba, A., Wang, Z., Mulenga, M., Odongo, N.H. (2020). Crypto mining attacks in information systems: An emerging threat to cyber security. *Journal of Computer Information Systems*, 60(4), 297-308. <https://doi.org/10.1080/08874417.2018.1477076>
- Zinderen, İ. E. (2020). Yeni medyada kimlik inşası: youtuber kimliğine ilişkin bir inceleme, *Erciyes İletişim Dergisi, Ocak/January 2020, 7(1)*, 415-434. <https://doi.org/10.17680/erciyesiletisim.650956>



Kahramanmaraş Sütçü İmam University Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 08.05.2024
Kabul Tarihi : 25.06.2024

Received Date : 08.05.2024
Accepted Date : 25.06.2024

İSTEM MÜHENDİSLİĞİNİN BÜYÜK DİL MODELLERİNİN PERFORMANSINDAKİ ROLÜ: ANALİZ VE UYGULAMA ÖRNEKLERİ

THE ROLE OF PROMPT ENGINEERING IN THE PERFORMANCE OF LARGE LANGUAGE MODELS: ANALYSIS AND APPLICATION EXAMPLES

Fatma Gülşah TAN^{1*} (ORCID: 0000-0002-2748-0396)

Asım Sinan YÜKSEL¹ (ORCID: 0000-0003-1986-5269)

Muhammed Abdulhamid KARABIYIK² (ORCID: 0000-0001-7927-8790)

¹ Süleyman Demirel Üniversitesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Isparta, Türkiye

² Niğde Ömer Halisdemir Üniversitesi, Bor Meslek Yüksekokulu, Niğde, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Fatma Gülşah TAN, gulshtan@sdu.edu.tr

ÖZET

İstem mühendisliği, büyük dil modellerinin yeteneklerini artırmak için kritik bir teknik olarak ortaya çıkmıştır. İstem adı verilen talimatlar ile model parametrelerini değiştirmeden ince ayar yapma imkânı sunarak, bu modellerin çeşitli görevlerde üstün performans göstermesini sağlar. Bu çalışmanın temel amacı, büyük dil modeli performansını iyileştirmek, hesaplama maliyetlerini azaltmak ve kullanıcı deneyimini geliştirmek için istem mühendisliğinin nasıl etkili kullanılacağını göstermektir. Çalışmada, farklı uygulama alanlarına göre kategorize edilen ve son teknoloji 15 istem mühendisliği tekniği analiz edilmiştir. Bu teknikler, sıfır atış ve birkaç atış istemlerinden düşünce zinciri ve otomatik düşünce zinciri istemlerine kadar çeşitlilik göstermektedir. Her bir tekniğin avantajları ve dezavantajları detaylı olarak değerlendirilmiş ve performans artışının nasıl sağlandığı örnek senaryolarla gösterilmiştir. Araştırmanın sonuçları, istem mühendisliğinin büyük dil modellerinin çeşitli görev ve uygulamalarda performansını artırmada önemli bir rol oynadığını göstermektedir. Özellikle az verili öğrenme senaryolarında verimliliği artırmak ve önyargı, tutarsızlık gibi zorlukları azaltmak için yenilikçi istem mühendisliği tekniklerinin başarılı performans sergiledikleri görülmüştür. Bu bulgular, araştırmacılar ve uygulayıcılar için yol gösterici bir kaynak olarak hizmet edecek ve büyük dil modellerinin geniş çapta uygulanabilirliğini artıracaktır. Çalışmamız, istem mühendisliğinin daha iyi anlaşılmasına katkı sağlayacak ve gelecekteki araştırmalara ışık tutacaktır.

Anahtar Kelimeler: Büyük dil modelleri, istem mühendisliği, doğal dil işleme, yapay zekâ

ABSTRACT

Prompt engineering has emerged as a critical technique for increasing the capabilities of large language models. It enables these models to perform superiorly in various tasks by providing the opportunity to fine-tune the model without changing the parameters through instructions called prompts. The main goal of this work is to show how to effectively use prompt engineering to improve large language model performance, reduce computational costs, and improve user experience. In the study, 15 state-of-the-art prompt engineering techniques, categorized according to different application areas, were analyzed. These techniques range from zero-shot and few-shot prompts to chain-of-thought and automatic-chain-of-thought prompts. The advantages and disadvantages of each technique are evaluated in detail and how the performance increase is achieved is shown with example scenarios. The results of the research show that prompt engineering plays an important role in improving the performance of large language models in a variety of tasks and applications. Innovative prompt engineering techniques have been shown to perform successfully to increase efficiency and reduce difficulties such as bias and inconsistency, especially in low-data learning scenarios. These findings will serve as a guiding resource for researchers and practitioners and will

ToCite: TAN, F.G., & YÜKSEL, A.S., & KARABIYIK, M.A., (2024), İSTEM MÜHENDİSLİĞİNİN BÜYÜK DİL MODELLERİNİN PERFORMANSINDAKİ ROLÜ: ANALİZ VE UYGULAMA ÖRNEKLERİ. Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 27(4), 1401-1420.

increase the broad applicability of large language models. Our study will contribute to a better understanding of prompt engineering and shed light on future research.

Keywords: Large Language Models, prompt engineering, natural language processing, artificial intelligence

GİRİŞ

Büyük dil modellerinin (BDM) optimize edilmesinde son yıllarda önemli ilerlemeler kaydedilmiştir. Bu modeller derin öğrenme mimarilerine dayanmaktadır ve büyük veri kümeleri üzerinde eğitilmektedir. İstem mühendisliği, BDM'lerin verimli bir şekilde uygulanması ve optimize edilmesinde belirli amaç ve hedeflere odaklanan bir yaklaşımdır. Bu hedefler genellikle dil modeli performansının iyileştirilmesini, hesaplama maliyetlerinin azaltılmasını, gizliliğin korunmasını ve kullanıcı deneyiminin iyileştirilmesini içerir. Dil modellerini etkili bir şekilde uygularken ve optimize ederken istem mühendisliğinin ana amaç ve hedeflerini dikkate almak önemlidir. Bu hedeflere başarıyla ulaşılması, büyük dil modellerinin yaygın kullanımının ve getirdikleri faydaların anlaşılmasına yardımcı olacaktır.

Literatürde, çeşitli çalışmalar istem mühendisliğinin BDM'lerin performansına olan katkılarını vurgulamıştır. Örneğin, (Lester vd., 2021), benzersiz görevleri yerine getirmek için dil modelinin koşullandırılmasının yardımıyla güçlü bir mekanizma geliştirmişlerdir. (Polverini, ve Gregorcic, 2024a), fizik eğitimi bağlamında ChatGPT-4 ile birlikte dil modellerinin genel performansını artırmak için istem mühendisliği tekniklerinin kapasitesini gözlemlemişlerdir. İstem mühendisliği literatürüne hızlı bir bakış sunarak fizik eğitimi alanındaki BDM'lerin kapasitesinden bahsetmişlerdir. (Seo vd., 2022), özellikle az verili öğrenme senaryolarında verimliliği artırmak için yenilikçi istem mühendisliği tekniklerini tanıtmışlardır. Veri eksikliğinin üstesinden gelmek için küçük örnekli bir öğrenme yöntemi ve basit bir şablon ekleme yöntemi geliştirip bunları Kore veri setine uygulamışlardır. Dil modelleri farklı alanlara genişletildikçe uyarlanabilirlik ve etkililik açısından zorluklar ortaya çıkmaktadır. (K. Zhou vd., 2022), bu zorlukların belirlenmesinde ve etkili bir şekilde ele alınmasında istem yönetiminin önemli rolünü vurgulamıştır. Çeşitli görüntü tanıma görevlerini yerine getirmek için iki farklı uygulama önermişlerdir. Çok sayıda deneyde, 16 atış için ortalama kazancı yaklaşık %15 olduğunu, maksimum kazancı ise %45'in üzerinde olduğunu bildirmişlerdir. Geliştirilen yöntem öğrenmeye dayalı bir yaklaşım olmasına rağmen, bu yaklaşımın manuel sıfır atış istemi uygulayan modellere kıyasla üstün genelleme performansı sağladığını göstermişlerdir.

Gerçek hayattaki sorunları çözmek için BDM'leri etkili bir şekilde uygulamak ve optimize etmek, ölçeklenebilirlik, verimlilik ve gizlilik gibi önemli teknik zorlukları içerir. Bu nedenle, bu zorlukları etkili bir şekilde ele almak için istem mühendisliği gibi yenilikçi yöntem ve stratejiler kullanılmalıdır. Bu çalışmada, istem mühendisliği teknikleri detaylı olarak incelenmiş ve sundukları avantajlar, performans artışının nasıl sağlandığı örnek senaryolarla değerlendirilmiştir. Farklı uygulama alanlarına göre kategorize edilen istem mühendisliği teknikleri artıları ve eksileri tartışılmıştır.

MATERYAL VE YÖNTEM

İstem Mühendisliği

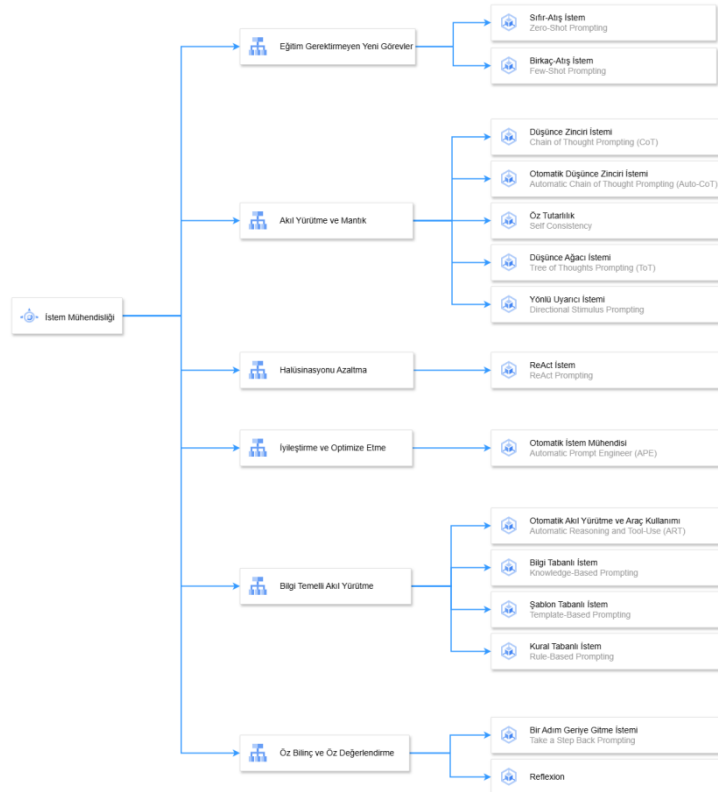
İstem mühendisliği, doğal dil işleme alanında büyük dil modellerinin (BDM) performansını optimize etmeye odaklanan bir yöntemdir. Bu yöntem, uygun ve doğru yanıtları ortaya çıkaracak özel istemlerin tasarlanması ve oluşturulmasını içerir. İstem mühendisliği, BDM'nin çeşitli görev ve uygulamalardaki performansını artırmada önemli bir rol oynar. Araştırmacılar ve uygulayıcılar, istemleri dikkatlice hazırlayarak dil modellerinin belirli hedeflerle uyumlu sonuçlar üretmesini sağlar. Tekrarlanan deneyler ve iyileştirilmiş istemler, BDM'nin etkinliğini ve güvenilirliğini artırabilir. Aynı zamanda önyargı, tutarsızlık ve yorumlanamama gibi zorlukları azaltma potansiyeline sahiptir. BDM'ler, farklı bağlamlara ve alanlara uyarlanabilir, böylece geniş bir uygulama potansiyeline sahip olabilir.

İstem mühendisliği, büyük dil modelleri (BDM) ile etkileşimde bulunurken kullanılan etkileşimlerin düzeni ve kullanımını içeren önemli bir prosedürdür. Bu prosedür, BDM'nin tercih edilen girişi etkili bir şekilde tanınmasına olanak sağlar (Sahoo vd., 2024). Önemli istem bileşenleri şunlardır:

- **Bağlam:** BDM'nin istemin amacını kavramasını sağlamaya yardımcı olur. Bu, konu hakkındaki bilgileri, kullanıcının önceki beyanlarını veya sorularını ve ilgili arka plan bilgilerini içerebilir.
- **Amaç:** BDM'nin ne yapmasını veya neyi yanıtlaması gerektiğini belirtmek için kullanılır. BDM'ye verilecek görev veya aranılan yanıtın türü konusunda net ifadeler kullanılmalıdır. Örneğin, bir paragrafın özetlemesi mi yoksa bir sorunun yanıtlanması mı istenildiği belirtilmelidir.
- **Örnekler:** Kullanıcının niyetini netleştirmesine yardımcı olur ve yanıtlar oluşturmak için BDM'ye referans noktaları sağlar. Bunlar örnek cümleler veya görevle ilgili sorgular olabilir.
- **Format:** Yanıtın takip etmesi gereken formatı veya yapıyı belirtmek için kullanılır. Bu, yanıtın türünü (örneğin bir cümle veya paragraf), tonunu (resmi veya resmi olmayan) veya diğer ilgili biçimlendirme ayrıntılarını belirlemeyi sağlar.
- **Kısıtlamalar:** BDM'nin üreteceği yanıtın kullanıcı gereksinimlerini karşıladığından emin olmaya yardımcı olur. Örneğin, yanıt uzunluğunu sınırlanabilir, belirli içerik türleri kısıtlanabilir veya yanıtın belirli yönleri vurgulanabilir.
- **Kullanıcı girişi:** Kullanıcının sormak istediği sorgu veya girişi içerir.

İstem Mühendisliği Yöntemleri

İstem mühendisliği teknikleri, belirli görevleri veya sorunları çözmek için büyük dil modellerini (BDM) kullanmanıza olanak tanıyan talimatlardır. Bu yöntemler, modelin belirli bir bağlamda belirli bir şekilde davranmasını sağlayarak istenilen çıktıyı üretir. Kullanıcıların, model performansını iyileştirmek, istenmeyen davranışları önlemek ve daha doğru sonuçlar elde etmek amacıyla kesin talimatlar vermesi gerekir. Bu teknikler genellikle çeviri, özetleme, soru cevaplama ve doğal dil işleme uygulamaları gibi metin tabanlı görevlerde kullanılır. İstem mühendisliği sayesinde yapay zekâ sistemleri daha etkin ve güvenilir bir şekilde kullanılabilir. Şekil 1, istem mühendisliği yöntemlerinin uygulama alanlarına göre sınıflandırılmasını göstermektedir. Çalışmamızda (Sahoo vd., 2024) tarafından yapılan sistematik araştırmada ele alınan 6 popüler uygulama alanında son teknoloji 15 farklı istem mühendisliği tekniği incelenmiş ve bu tekniklerin BDM'lerin performansına etkileri oluşturulan örnek senaryolarla analiz edilmiştir.



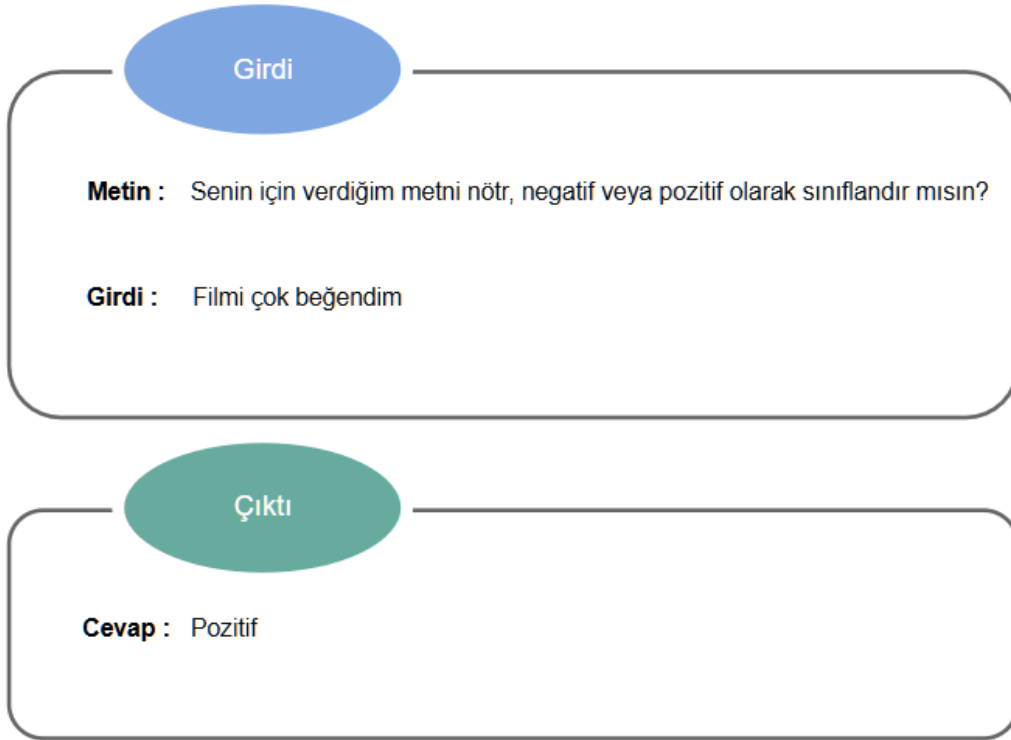
Şekil 1. Uygulama Alanlarına Göre İstem Mühendisliği Teknikleri

Eğitim Gerektirmeyen Yeni Görevler

BDM'lerin kapsamlı eğitim gerektirmeden yeni görevlere uyum sağlayabilmesi için uygulanan bir tekniktir. Bu yaklaşım, BDM'lerin daha önce eğitilmedikleri görevlerde başarıya ulaşmak için mevcut dil modellerinin temel özelliklerinden yararlanmayı amaçlamaktadır. Kapsamlı bir eğitim gerektirmeden yeni görevlere uyum sağlama yeteneği, dil modellerinin esnekliğini artırır ve bunların daha geniş yelpazede kullanılmasını sağlar.

Sıfır Atış İstem (Zero-Shot Prompting)

Geleneksel dil modelleri, eğitim verilerinde yer alan sınıfları veya görevleri öğrenir ve sadece bu sınıflar veya görevler için kullanılabilir. Sıfır atış istem yöntemi ise, dil modellerinin eğitim sırasında hiç görmedikleri veya daha önce tanımlanmamış görevleri gerçekleştirmelerine olanak tanır. Bu yöntemeye dayalı istemler, modelin eğitim verilerinde bulunmayan ancak belirli istemlerle sağlanan yeni görevleri ve sınıfları anlamasını ve başarılı bir şekilde ele almasını sağlar. Özellikle birden fazla sınıflandırmayı veya dili kapsayan uygulamalar gibi karmaşık görevler için kullanışlıdır. BDM'ler, göreve özgü ince ayar veya etiketlenmiş verilere ihtiyaç duymadan, sıfır atış yöntemlerini kullanarak çeşitli doğal dil işleme görevlerini gerçekleştirebilir (Kojima vd., 2022). Örneğin, sıfır atışlı düşünce zinciri yaklaşımı, aritmetik akıl yürütme, sembolik akıl yürütme ve mantıksal akıl yürütme gibi çeşitli akıl yürütme görevlerinde oldukça başarılı olmuştur (Shu vd., 2022). Ayrıca, BERT gibi çok dilli büyük dil modelleri (BDM'ler), sıfır atışlı ortamlarda diller arasında genelleştirilebilir. Ek olarak, sıfır atış teknikleri, BDM'lerin denetimsiz çoklu görevlerde öğrenici olarak kullanılmasına olanak tanır (Radford vd., 2019). Şekil 2, sıfır atış yöntemi kullanılarak gerçekleştirilen bir duygu sınıflandırma görevini göstermektedir. Modelin herhangi bir duygusal etiketleme eğitimi almadan metinlerin duygusal içeriğini başarılı bir şekilde analiz ettiği ve sınıflandırdığı görülmektedir. Bu yöntem sayesinde, BDM belirli bir etiketleme görevi için özel eğitim verilerine ihtiyaç duymadan yeni metinleri sınıflandırabilmiştir.



Şekil 2. Sıfır Atış Yöntemi ile Duygu Analizi

Birkaç Atışlı İstem (Few-Shot Prompting)

Birkaç atışlı istem yöntemi, dil modellerine eğitim sırasında sınırlı sayıda örnek veri sunarak görevleri veya sınıfları öğretme imkânı tanır (Brown vd., 2020). Geleneksel olarak, dil modelleri geniş bir örnek kümesinden öğrenir. Ancak, birkaç atışlı istem yaklaşımları kullanılarak model, yalnızca birkaç örnekle yeni görevleri veya sınıfları anlayabilir ve işleyebilir. Bu, modelin yeni görevlere ve sınıflara hızla uyum sağlamasına ve daha az etiketli veri ile çalışmasına olanak tanır (Yang vd., 2022). Birkaç atışlı istem, özellikle etiketleme maliyetlerinin yüksek olduğu veya sınırlı etiketli veri bulunan durumlarda kullanışlıdır. Sınırlı veri senaryolarının zorluklarını ele

almak için prototip tabanlı gösterimler kullanan ve küçük veri öğrenimi alanında başarılı olan yaklaşımlar vardır (Snell vd., 2017). Bu yöntem, modelin sınırlı eğitim verilerini kullanarak yeni sınıflara iyi genelleme yapmasını sağlar ve bu da modeli veri eksikliği nedeniyle geleneksel derin öğrenme yöntemlerinin zor olduğu senaryolar için uygun hale getirir. Prototip kavramları ve farklılaştırılabilir eşleştirme mekanizmalarından yararlanan bu ağlar, tek seferlik öğrenme görevleri için esnek ve etkili çözümler sunar (Vinyals vd., 2016). Bu yenilikçi yaklaşım, tek atışlı öğrenme yönteminin ilerlemesine önemli katkılarda bulunmuş ve bu alanda daha fazla araştırmaya ilham vermiştir (Wu, 2022). Şekil 3, birkaç atış yöntemi kullanılarak gerçekleştirilen bir duygu sınıflandırma görevini göstermektedir. Model, sunulan çoklu girdi ve çıktı örneklerine göre başarılı bir şekilde sınıflandırma yapmıştır.



Şekil 3. Birkaç Atış Yöntemi ile Duygu Analizi

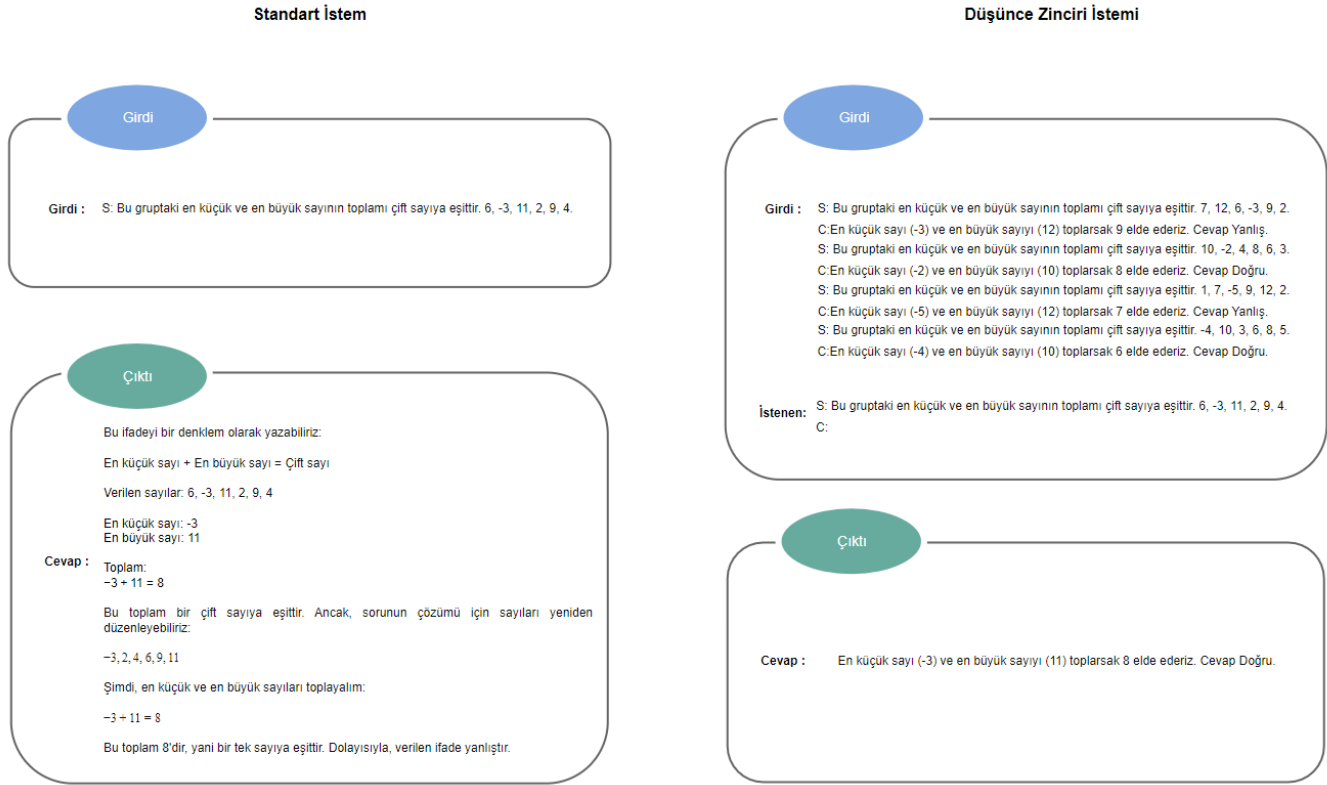
Akil Yürütme ve Mantık

Bu uygulama alanındaki yöntemler, dil modellerinin metinler arasında bağlantılar kurarak mantıksal sonuçlar çıkarmasına olanak tanır. Akıl yürütme ve mantık becerileri geliştirilen dil modelleri daha karmaşık görevleri başarıyla gerçekleştirebilir ve gerçek dünya uygulamalarında daha etkili bir şekilde kullanılabilirler.

Düşünce Zinciri İstemi (Chain-of-Thought (CoT) Prompting)

Düşünce zinciri yönteminin temel amacı, dil modelinin daha tutarlı metinler oluşturmasını sağlamaktır. Bu yöntemde modele bir metin verilir ve model bu metne göre bir sonraki metni tahmin eder. Tahmin edilen metin parçaları, modelin doğruluğunu değerlendirmek için gerçek metinle karşılaştırılır. Bu süreç, modelin metinler arasındaki bağlantıları anlamasına ve daha tutarlı metinler oluşturmasına yardımcı olur. Düşünce zinciri istemleri, doğal dil anlama, metin oluşturma, metin sınıflandırma ve çeşitli dil işleme görevleri için kullanılabilir. Düşünce zincirinin önemi, dil modellerinin gerçek verilere dayalı olarak daha doğru ve tutarlı sonuçlar üretmesine yardımcı olmasıdır. Bu teknik, dil modellerinin daha geniş bağlamı anlamasına ve metinler arasındaki bağlantıları daha iyi yakalamasına yardımcı olarak dil işleme uygulamalarının performansını artırır. Son yıllarda, düşünce zinciri yöntemi önemli bir araştırma alanı olarak dikkat çekmektedir. Çeşitli çalışmalar, geniş ölçekli dil modelleri için akıl yürütme becerilerinin geliştirilmesinde düşünce zinciri yöntemlerinin uygulanabilirliğini ve etkinliğini incelemiştir. Örneğin, (Polverini ve Gregorcic, 2024b), düşünce zinciri yaklaşımının büyük ölçekli dil modellerinin aritmetik, genel bilgi ve sembolik akıl yürütme gibi karmaşık görevlerdeki performansını geliştirmek için etkili bir strateji olduğunu vurgulamıştır. (Taveekitworachai vd., 2023) ise düşünce zincirinin, bir sonuca ulaşma adımlarını açıklamak için modelden başlayarak mantıksal bir düşünme sürecine rehberlik ettiğini ileri sürmüştür. Şekil 4, düşünce zinciri yöntemi kullanılarak gerçekleştirilen süreci göstermektedir. Modele akıl yürütmeye dayalı problemler ve çözüm adımları girdi olarak sunulmuştur. Bu yöntem, modelin çıkarım sürecini adım adım takip

etmesini ve tutarlı çıktı üretmesini sağlamıştır. Şekil 4'te görüldüğü gibi, model standart istemde en küçük ve en büyük sayıyı bulmasına rağmen, toplamının tek olduğunu belirtmiştir. Bu yanlış bir cevaptır. Düşünce zinciri isteminde ise model, en küçük ve en büyük sayıyı bularak, toplamının çift bir sayıya eşit olduğunu doğru bir şekilde belirtmiştir.



Şekil 4. Düşünce Zinciri Yöntemi ile Akıl Yürütme

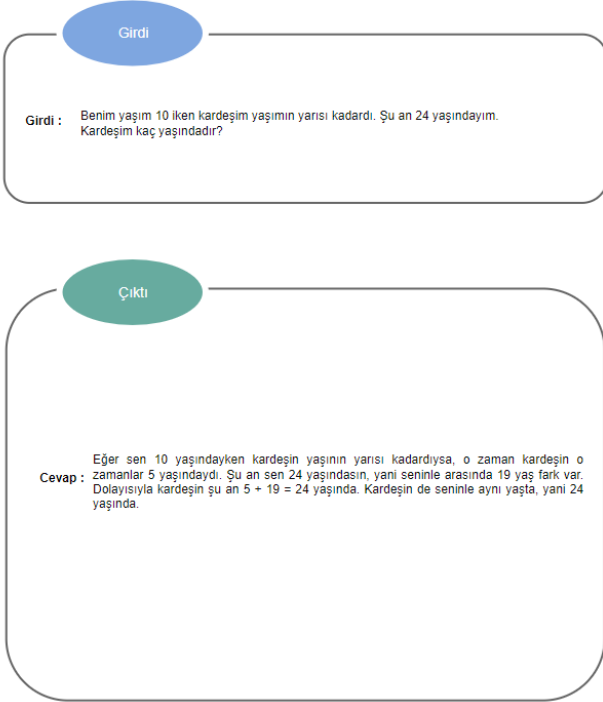
Otomatik Düşünce Zinciri İstemi (Automatic Chain-of-Thought (Auto-CoT) Prompting)

Otomatik düşünce zinciri yöntemi, dil modellerinin karmaşık akıl yürütme görevlerinde etkinliğini artırmayı amaçlayan bir yaklaşımdır (Zhang vd., 2022). Bu yöntemde dil modeli, belirli bir metin parçasını alır ve bu metnin mantıksal devamı olan bir dizi metin parçası üretir. Bu süreç, modelin metin ile düşünce zinciri arasında tutarlı bir akış sağlamasına yardımcı olur. Otomatik düşünce zincirleri tarafından gerçekleştirilen istemler, dil modellerinin karmaşık muhakeme görevlerinde etkili kullanımını göstermektedir (Chen vd., 2024). Şekil 5, standart istem ve otomatik düşünce zinciri yöntemiyle gerçekleştirilen süreci karşılaştırmaktadır. Standart istemde sorulara yanlış cevap verilmişken, otomatik düşünce zinciri yöntemi kullanılarak yapılan istemde "Adım Adım Düşünelim" tetikleyicisinin kullanılması doğru cevabın elde edilmesini sağlamıştır.

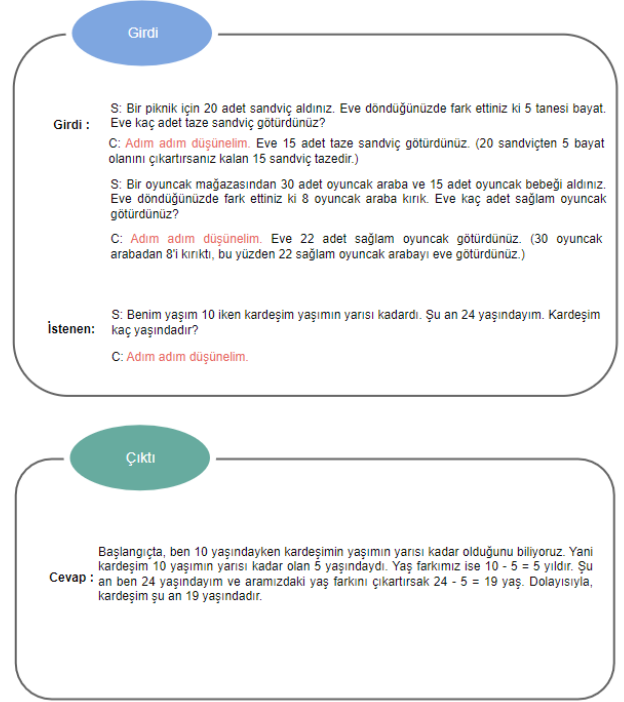
Öz Tutarlılık (Self Consistency)

Öz tutarlılık, BDM'nin belirli bir girdiye dayanarak kendi çıktılarının tutarlılığını değerlendirmesi anlamına gelir (Wang vd., 2022). Bu yöntemin amacı, modelin ürettiği metin, çeviri veya diğer çıktılarının tutarlı ve mantıklı olmasını sağlamaktır. Örneğin, bir metin verildiğinde modelden bu metne dayanarak bir sonraki cümleyi oluşturması istenir. Model daha sonra bu sonuçların belirtilen metne uyup uymadığını değerlendirir. Üretilen sonuç kaynak metinle uyumluysa, bu sonuç kendi içinde tutarlı olarak kabul edilir. Tutarlılık, modelin genellenebilirliğini artırır ve doğru sonuçlar üretmesini sağlar. Şekil 6, öz tutarlılık yöntemi kullanılarak oluşturulan bir istemi göstermektedir. Standart istemde elde edilen cevaplar yanlışken, öz tutarlılık yöntemi kullanılarak elde edilen cevaplar doğrudur. Öz tutarlı yöntem, modelin kendi kendine oluşturduğu yanıtları değerlendirmesine olanak tanıyarak daha tutarlı ve doğru sonuçlar elde edilmesini sağlamıştır.

Standart İstem



Otomatik Düşünce Zinciri İstemi

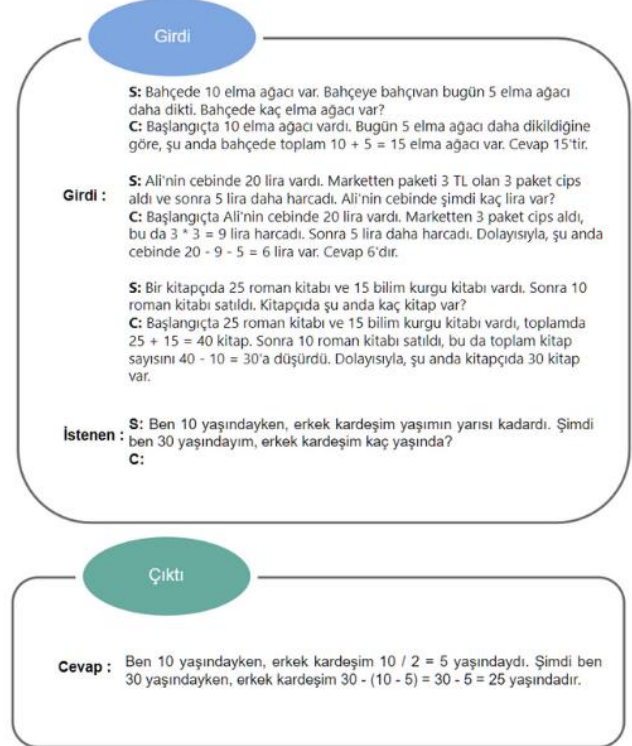


Şekil 5. Otomatik Düşünce Zinciri Yöntemi ile Adım Adım Düşünme

Standart İstem



Öz Tutarlılık Yöntemi İle İstem

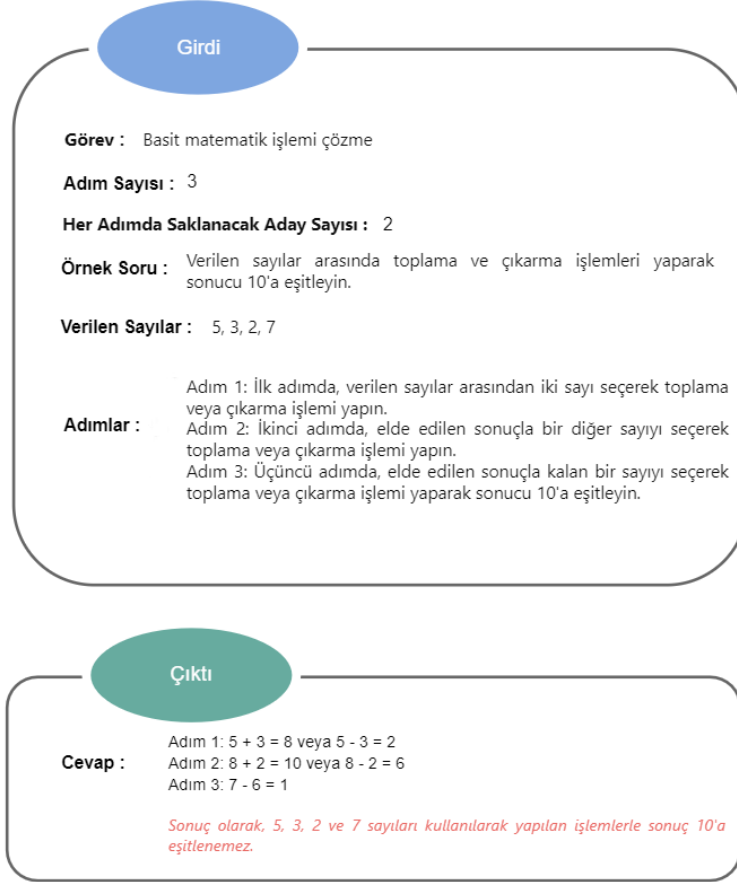


Şekil 6. Öz Tutarlılık Yöntemi ile Tutarlı Sonuçlar Üretme

Düşünce Ağacı İstemi (Tree of Thoughts (ToT) Prompting)

Düşünce ağacı yöntemi, problem çözme sürecinde ara bir adım olarak hizmet eden ve tutarlı bir dil dizisini temsil eden bir modeldir. Bu yaklaşım, dil modellerinin ilerlemelerini öz değerlendirmelerle yönlendirmelerine olanak

tanır (Yao vd., 2023). Dil modelinin düşünceleri üretme ve değerlendirme yeteneği, düşünceleri ileri ve geri izleyerek sistematik olarak keşfetmek için arama algoritmalarıyla birleştirilir (Long, 2023). Şekil 7, düşünce ağacı yöntemi kullanılarak bir matematiksel işlemin adım adım nasıl çözüleceğini göstermekte ve belirli bir matematiksel işlemin adımlarını listelemektedir. Her adımda, modelin düşünce sürecini ve süreç adımlarını açıklamak için düşünce ağacı yöntemi kullanılmaktadır.



Şekil 7. Düşünce Ağacı Yöntemi ile Matematiksel Bir İşlemin Adım Adım Çözülmesi

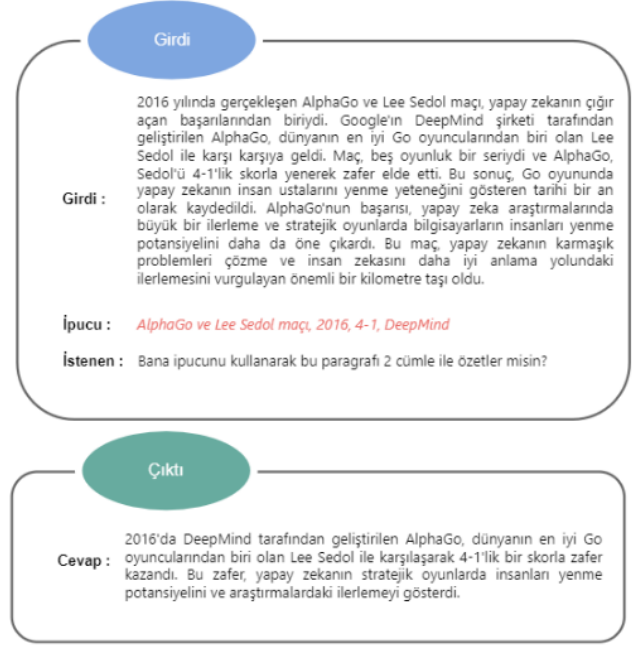
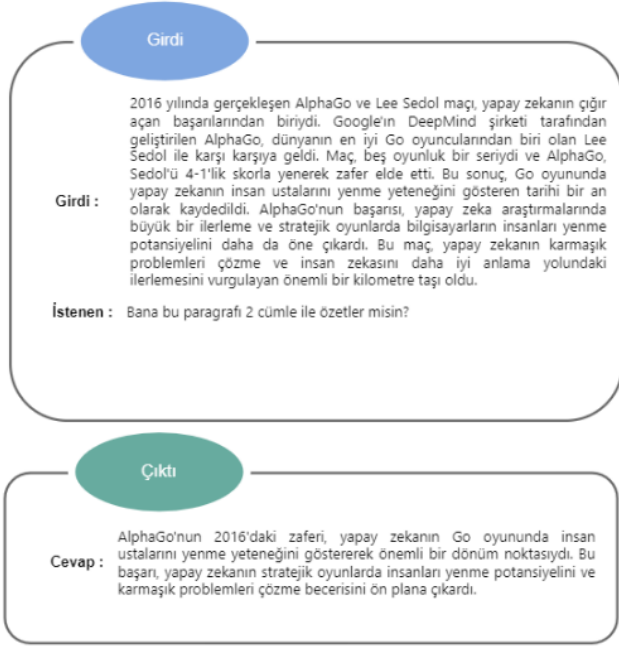
Yönlü Uyarıcı İstemi (Directional Stimulus Prompting)

Yönlü uyarıcı istemi, belirli anahtar kelimeler veya kelime öbekleri kullanarak kullanıcıları doğru bilgiye yönlendiren özelleştirilmiş bir sorgulama tekniğidir. Bu yöntem, bilgi arama sürecini kolaylaştırarak kullanıcıların ihtiyaç duydukları bilgiye hızlı ve etkili bir şekilde ulaşmalarını sağlar. Kullanıcıların daha kesin sorgularla bilgiye erişimini sağlayarak gereksiz bilgi karmaşıklığını azaltır ve verimliliği artırır. Genellikle bilgi yönlendirme sürecini iyileştirirken kullanıcı deneyimini optimize etmek için kullanılır.

Şekil 8, standart istem ve yönlü uyarıcı yöntemi kullanılarak yapılan bir istemi ve sonuçlarını göstermektedir. Her iki yöntem için de girdi ve istenilen çıktı aynıdır. Ancak yönlü uyarıcı yöntemde ek ipuçları sağlanır. Sonuçlar, yönlü uyarıcı yönteminin daha net ve doğru sonuçlar verdiğini göstermektedir. Bu yöntem, modelin istenen çıktıyı daha spesifik ve odaklanmış bir şekilde üretmesini sağlar ve bu nedenle standart istem yöntemlerinden daha iyi performans gösterir.

Standart İstem

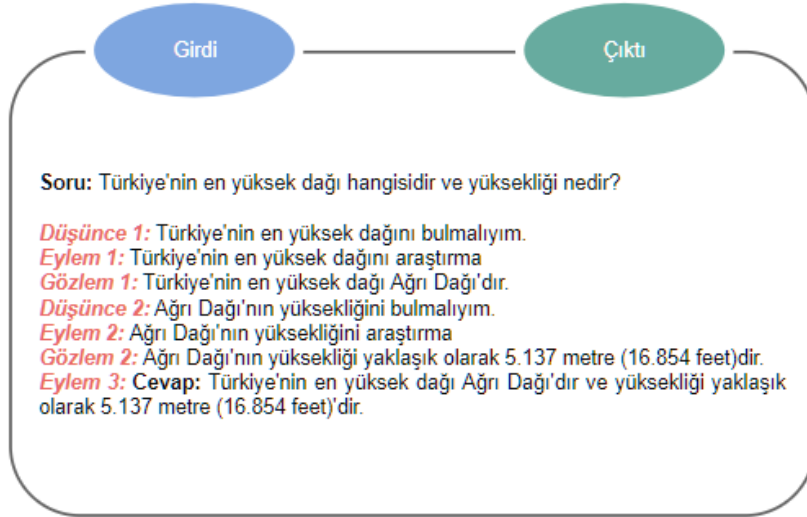
Yönlü Uyarıcı Yöntemi İle İstem



Şekil 8. Standart İstem ve Yönlü Uyarıcı Yöntemi ile İstem

Halüsinasyonu Azaltma

Halüsinasyonlar, dil modelleri yanlış veya anlamsız bilgiler ürettiğinde ortaya çıkar. İstem mühendisliği, dil modellerindeki yanlışlama düzeyini azaltmak için çeşitli yollar sağlamaktadır. Bu yöntemler, gerçekliği artırmak ve yanlış bilgi üretme olasılığını azaltmak için bir dil modeli tarafından üretilen çıktıyı dikkatlice filtreler veya temizler. Halüsinasyonları azaltma yöntemleri, dil modellerinin uygulamalarda kullanımını daha güvenilir hale getirir.



Şekil 9. ReAct Yöntemi ile İstem

ReAct İstem (ReAct Prompting)

(Yao vd., 2022) çalışmasında ReAct yöntemi tanıtılmıştır. Yöntem iki aşamadan oluşmaktadır: Akıl Yürütme (Reasoning) ve Harekete Geçme (Act). Bu aşamalar, BDM tarafından üretilen yanıtları değerlendirme ve hataları düzeltme işlevini sağlar. Amaç, BDM'nin yanıtlarını kontrol etmek ve değiştirmek için bir mekanizma sağlamaktır. Model tarafından üretilen yanıtlar genellikle hatalı veya eksik olabilmektedir; bu nedenle, bu hataların tespit edilip düzeltilmesi önemlidir. Çalışmanın mantığı, model tarafından üretilen yanıtların değerlendirilmesi ve hataların belirlenmesidir. Ardından, modelin bu hataları düzeltmesi veya yanıtlarını iyileştirmesi için yeni talimatlar

verilerek bir geri bildirim döngüsü oluşturulur. Bu süreç, modelin hataları fark etmesine ve bunlardan ders çıkarmasına olanak tanır. Böylece, gelecekte daha doğru ve tutarlı yanıtlar sağlayabilir. Şekil 9, ReAct yöntemini uygulayan bir istemi göstermektedir. ReAct yöntemi, BDM'nin sorulara daha etkili ve uygun yanıtlar vermesini sağlamıştır.

İyileştirme ve Optimize Etme

Bu uygulama alanındaki teknikler, dil modellerinin verimliliğini artırarak işlem maliyetlerini azaltır ve kullanıcı deneyimini geliştirir. İyileştirme ve optimizasyon teknikleri ise, dil modellerinin daha hızlı ve daha güvenilir çalışmasını sağlayarak, gerçek zamanlı uygulamalarda kullanımını kolaylaştırmaktadır.

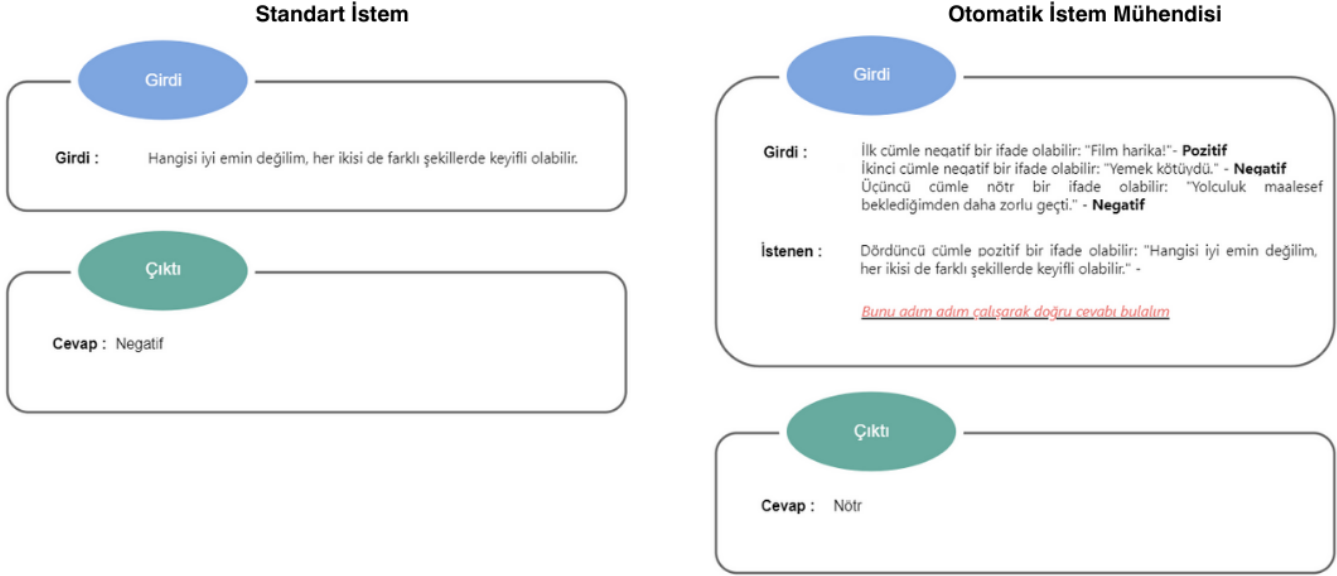
Otomatik İstem Mühendisi (Automatic Prompt Engineer (APE))

APE yöntemi, istemlerin otomatik oluşturulması ve seçilmesi için kullanılır. Bu yöntemin nasıl çalıştığını anlamak için öncelikle tetikleyici cümleler kavramını anlamak gerekmektedir. Tetikleyici cümle, metni belirli bir konuya odaklayan bir açılış cümlesidir. Bu ifade, dil modelinin belirli bir görevi yerine getirmesini ve modelin istenen çıktıyı üretmesini sağlar. Sonuç olarak APE yöntemi doğal dil sentezi yoluyla çözüm üretirken tetikleyicinin ilk cümlesini kullanarak bir ifade oluşturur. Tetikleyici başlatma ifadesi, APE'nin istemlerin etkinliğini değerlendirmesine yardımcı olur. Tablo 1, açılış cümlesi tetikleyicilerine göre kategorize edilen öğretim performansı verilerini göstermektedir (Y. Zhou vd., 2022).

Tablo 1. Tetikleyici Başlangıç Cümlesi ile Düşünce Zinciri Performans Sonuçları

No	Kategori	Tetikleyici Başlangıç Cümlesi	Doğruluk
1	APE	Bu işi adım adım çözelim, doğru cevaba ulaştığımızdan emin olalım.	82,0
2	İnsan Tasarımı	Adım adım düşünelim (Kojima vd., 2022)	78,7
3	İnsan Tasarımı	İlk olarak, (Ahn vd., 2022)	77,3
4	İnsan Tasarımı	Bunu mantıklı bir şekilde düşünelim.	74,5
5	İnsan Tasarımı	Bu problemi adımlara ayırarak çözelim. (Reynolds ve McDonell, 2021)	72,2
6	İnsan Tasarımı	Gelin gerçekçi olalım ve adım adım düşünelim.	70,8
7	İnsan Tasarımı	Gelin adım adım bir dedektif gibi düşünelim.	70,3
8	İnsan Tasarımı	Haydi düşünelim.	57,5
9	İnsan Tasarımı	Cevaba dalmadan önce,	55,7
10	İnsan Tasarımı	Cevap, kanıttan sonra gelir.	45,7
11	-	Zero Shot	17,7

Tablo 1, APE'nin insan tasarımı "Adım Adım Düşünelim" istemlerinden daha iyi bir sıfır atış düşünme istemi olduğunu göstermektedir. Şekil 10, standart bir istem ve bir tetikleyici başlangıç cümlesi ile APE yöntemini kullanan bir istemi göstermektedir. Şekilde gösterilen metin, standart istemler kullanılarak kategorize edildiğinde yanlış yanıtlar üretmiş, ancak tetikleyici cümleler kullanarak düşünce zincirleri oluşturmak için kullanıldığında doğru yanıtlar üretmiştir. Sonuçlar, metin sınıflandırması için tetikleyici cümlelerinin kullanılmasının, doğruluk ve verimlilik açısından model performansını artırabileceğini kanıtlamaktadır.



Şekil 10. APE Yöntemini Uygulayan Bir İstem Örneği

Bilgi Temelli Akıl Yürütme

Bilgiye temelli akıl yürütme, dil modellerinin metinler arasındaki ilişkileri anlayarak bilgiye dayalı sonuçlar çıkarmasına olanak tanımaktadır. İstem mühendisliği, dil modelinin daha derin, daha anlamlı sonuçlar üretmesini sağlayan yöntemler geliştirmek için bir dil modelinin sahip olduğu bilgileri kullanır. Bu yaklaşım, dil modellerinin daha geniş bir bilgi tabanından yararlanmasına ve daha karmaşık görevleri başarıyla gerçekleştirmesine olanak tanır.

Otomatik Akıl Yürütme ve Araç Kullanımı (Automatic Reasoning and Tool-Use (ART))

Otomatik akıl yürütme yöntemlerinin ve araçlarının kullanılması, belirli bir görev için gerekli adımları belirler. ART, görev tanımlamayı ve bu görevlere uygun araçları seçmeyi sağlar. Örneğin, BDM'lerin plan oluşturma, araçları ve uygulama programlama arayüzlerini kullanma yeteneği, karmaşık çıkarım görevlerinde başarılı olmalarını sağlayabilir (Paranjape vd., 2023). Kod yazma, test etme ve hata ayıklama gibi görevleri otomatik olarak yönetmeye ve bu görevleri tamamlamak için ihtiyaç duyulan araçları kullanmaya olanak tanır. Şekil 11, otomatik akıl yürütme ve araç kullanımına yönelik istemleri göstermektedir. Bu yöntemin uygulanabilirliği ve önemi, BDM işlevselliğini ve verimliliğini artırmak için kodların ve araçların nasıl entegre edilebileceği gösterilerek vurgulanmıştır.

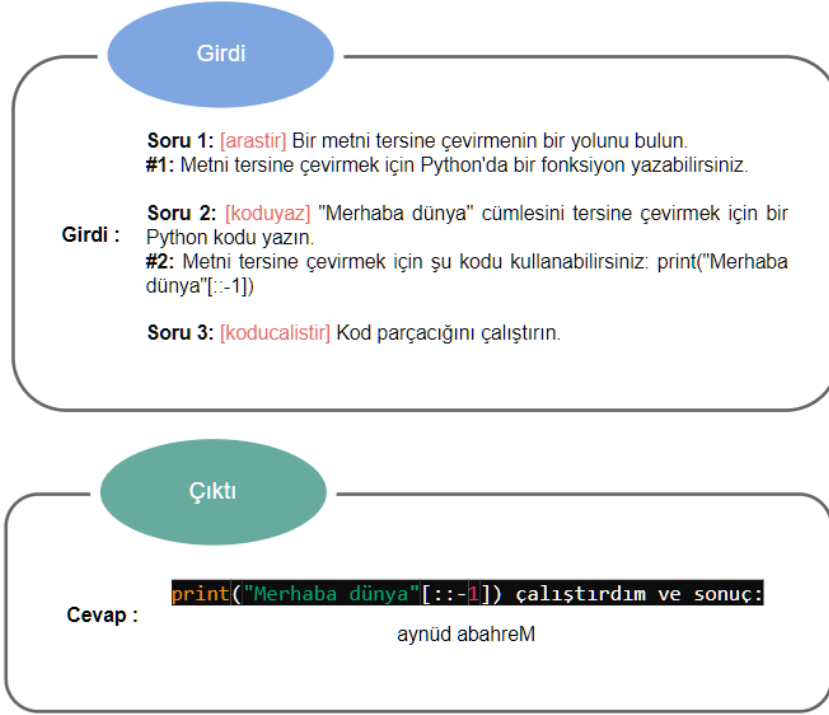
Bilgi Tabanlı İstem (Knowledge-Based Prompting)

Bilgiye dayalı istem yöntemi, dil modelinin bilgisini genişletmek ve belirli konulara odaklanmak için belirli kaynaklardan alınan bilgileri kullanmanın bir yoludur. Bu yöntem daha spesifik ve doğru sonuçların üretilmesini kolaylaştırarak doğal dil işleme, bilgi tabanlı sistemler ve eğitim gibi birçok alanda daha etkin ve verimli uygulamalara olanak sağlar. Dolayısıyla yapay zekâ ve dil işleme alanlarında oldukça önemli bir tekniktir. Dil modellerini bilgi yönlendirme süreçlerine entegre ederek daha tutarlı yanıtlar üretilebilir (Liu vd., 2021). Şekil 12 bilgiye dayalı istem tekniğinin bir örneğini göstermektedir. Bu örnekte yöntem, sorguyu işlemek ve yanıtlamak için bilgi tabanındaki verileri kullanır. Bir bilgi tabanındaki bilgilerin analiz edilmesi, istemlere uygun yanıtlar oluşturur ve dil modellerinin karmaşık görevleri yerine getirmesine sağlar.

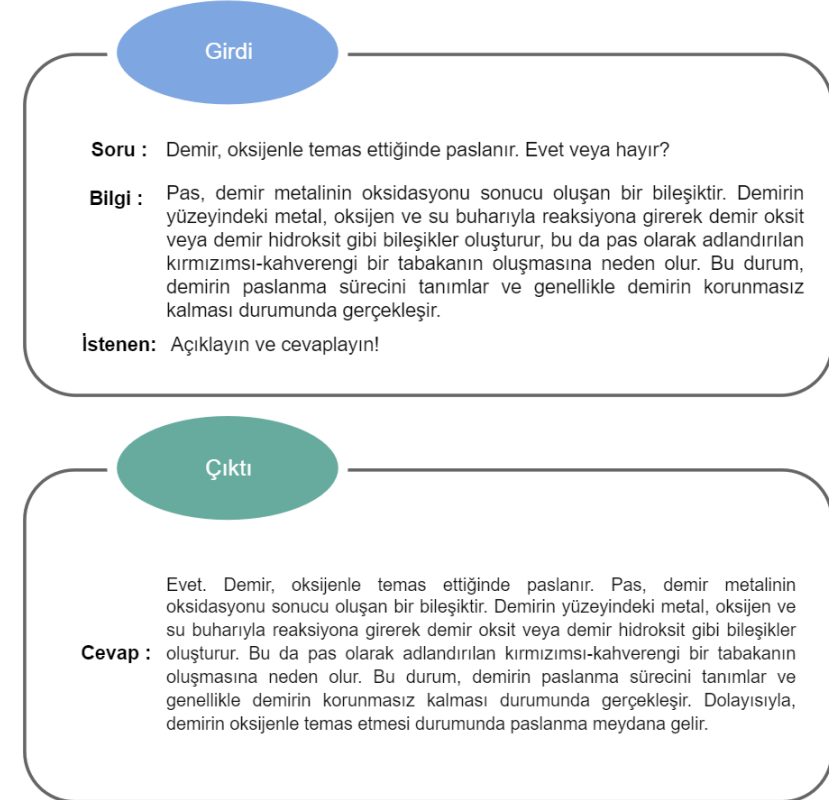
Şablon Tabanlı İstem (Template-Based Prompting)

Bu yöntem, bir dil modeline belirli bir görev veya konu hakkında metin oluşturmak için belirli bir şablonu veya modeli kullanması talimatını vermeyi içerir (Ma vd., 2021). Şablon tabanlı bilgi istemlerinin temel amacı, dil modellerinin belirli bir yapıya veya formata uygun metin üretmesine yardımcı olmaktır. Bu şablonlar genellikle belirli görevleri veya konuları vurgular ve istenen çıktıyı üretmek için dil modeline rehberlik eder. Ek olarak, dil modelleri belirli görevlere veya konulara odaklanarak daha spesifik ve etkili sonuçlar doğurabilir (Shaier vd., 2024). Şekil 13, şablon tabanlı yöntemin nasıl çalıştığını ve dil modelinin belirli kalıplar veya yapılarla sorguları

nasıl ele alabileceğini göstermektedir. Bu yöntem özellikle belirli istem türlerine hızlı ve tutarlı yanıtlar oluşturulmasını sağlamak için kullanılır.



Şekil 11. ART Yöntemini Kullanan Bir İstem Örneği

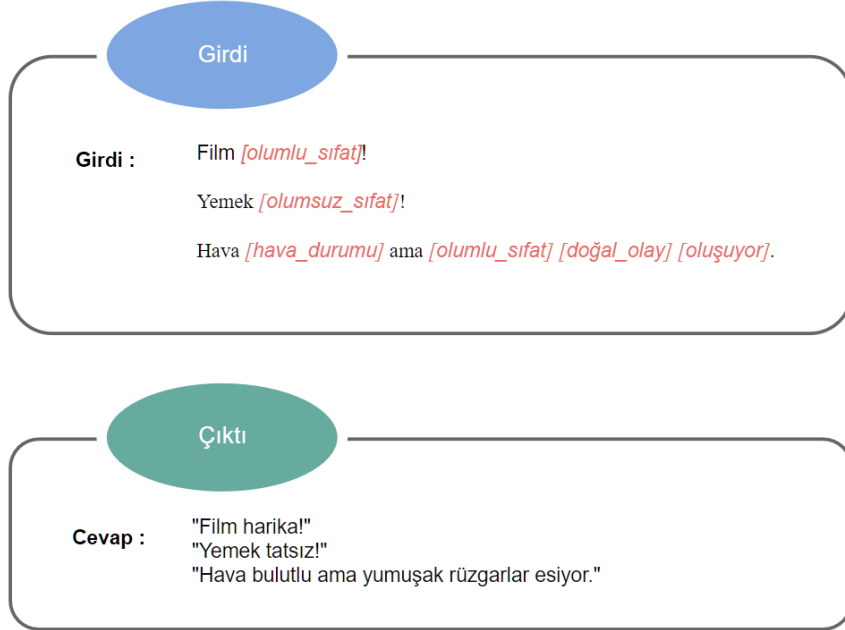


Şekil 12. Bilgi Tabanlı İstem Örneği

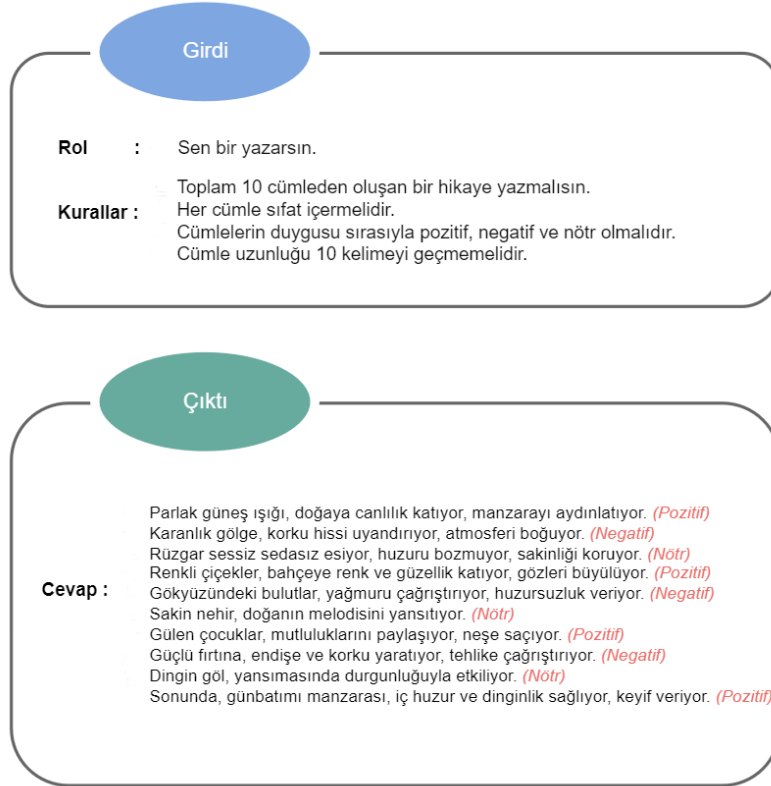
Kural Tabanlı İstem (Rule-Based Prompting)

Kural tabanlı istem yöntemi, bir dil modelini belirli bir dizi kurala göre kontrol etmek için kullanılan bir tekniktir. Bu kural kümeleri, dil modelinin belirli bir görev veya konu için ürettiği metnin türünü belirler. Özellikle belirli görev veya konuları ele alan dil modellerinin performansını artırmak için kullanılır. Ayrıca belirli kuralların

uygulanmasını sağlayarak dil modellerinin istenen sonuçlara ulaşmasına yardımcı olur ve son kullanıcılar için daha güvenilir ve anlamlı çıktılar elde edilmesini sağlar. Bu teknik birçok uygulama alanında önemli bir rol oynar ve dil modellerinin eğitimi ve dağıtımı için sıklıkla kullanılır. Şekil 14, dil modelinin istemleri işlemek için belirli kuralları nasıl kullandığını, yöntemin nasıl çalıştığını göstermektedir.



Şekil 13. Şablon Tabanlı Yöntem ile İstem

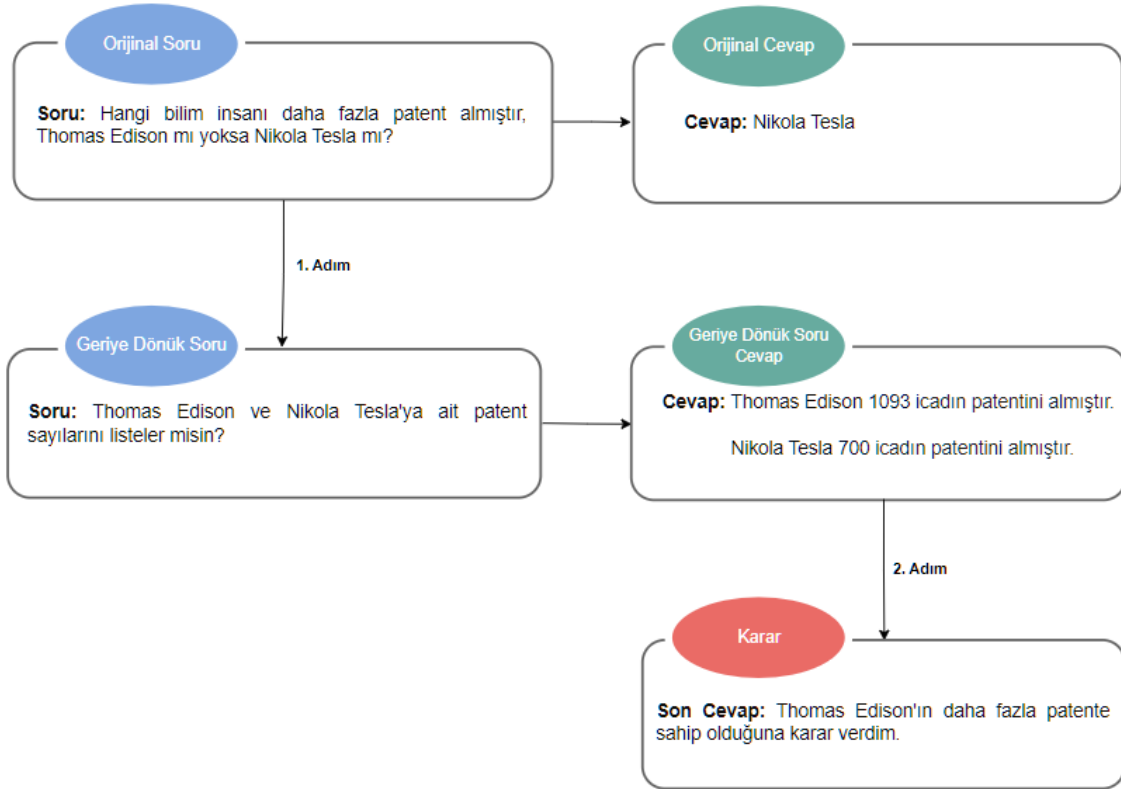


Şekil 14. Kural Tabanlı Yöntem ile İstem

Bu alandaki yöntemler dil modelinin sınırlamalarını anlamamıza ve kusurlarını belirlemenize yardımcı olur. Dil modelleri, öz farkındalık ve öz değerlendirme geliştirerek öğrenmeye daha açık hale gelir ve sürekli gelişmeyi mümkün kılar. Sonuç olarak bu alandaki yöntemler dil modelinin güvenilirliğini ve kullanılabilirliğini artırır.

Bir Adım Geriye Gitme İstemi (Take a Step Back Prompting)

Bir adım geriye gitme istemi, dil modellerini daha geniş bir bağlamı ve daha geniş bir bilgi yelpazesini dikkate almaya zorlamak için kullanılan bir yöntemdir. Bu tür bir rehberlik, modellerin daha derinlemesine anlamasını ve daha karmaşık soruları yanıtlamasını kolaylaştırır. Belirli bir soruyu yanıtlarken, bir model yalnızca mevcut metni değil aynı zamanda daha geniş bağlamı da hesaba katabilir. Bu yaklaşım özellikle aritmetik, sembolik akıl yürütme ve diğer karmaşık düşünme senaryoları gibi görevler için etkilidir (Zheng vd., 2024). Şekil 15, daha geniş bağlamın hesaba katılmasının ve geri adım atmanın, modelin sorulan soruya doğru yanıt vermesini nasıl sağladığını göstermektedir.



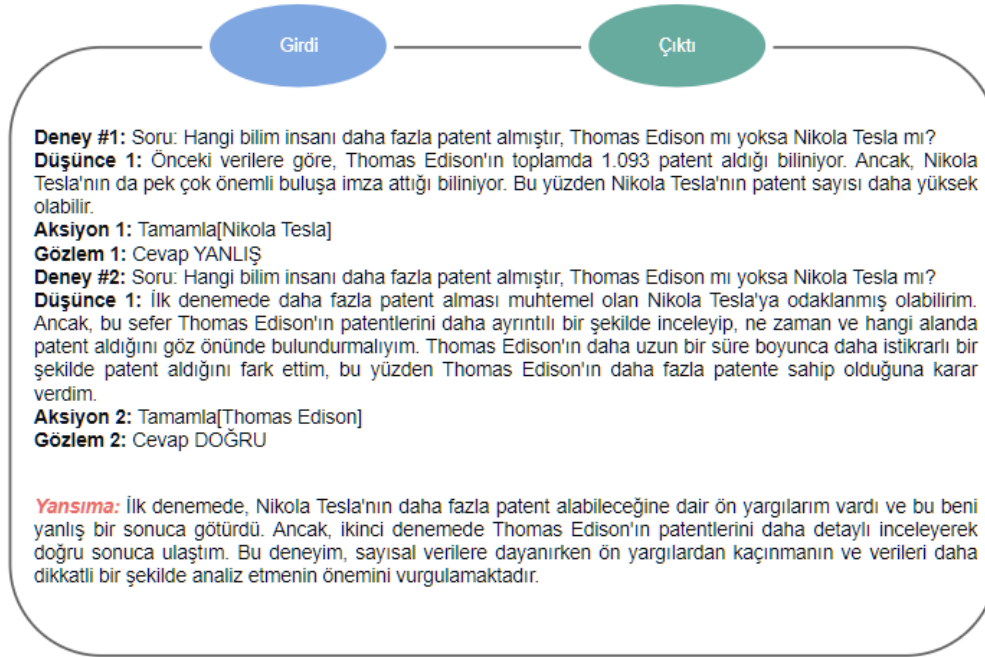
Şekil 15. Bir Adım Geriye Gitme Yöntemini Uygulayan İstem Örneği

Reflexion

Bu yöntem modelin sorulara yanıt vermeden önce bu soruları içeren bir bilgilendirme metniyle karşılaştırarak bir görevin daha geniş bağlamını anlamasını sağlar (Shinn vd., 2023). Modelin daha kapsamlı düşünmesine ve daha doğru ve bilinçli yanıtlar vermesine olanak tanır. Şekil 16, bir dil modelinin, bir görevle ilgili bir soruyu yanıtlamadan önce soruyu içeren bilgilendirme metnini dikkate alması durumunda doğru cevaba nasıl ulaştığını göstermektedir.

İstem Mühendisliği Uygulama Alanları

Tablo 2 istem mühendisliğinin çeşitli uygulama alanlarını listelemektedir. İstem mühendisliği doğal dil işleme, metin sınıflandırma, duygu analizi, çeviri ve daha birçok alanda kullanılmaktadır. Tablo 2'de her bir uygulama alanı için açıklayıcı istem girdileri ve çıktıları sunulmuştur.



Şekil 16. Reflexion Yöntemini Uygulayan Bir İstem Örneği

Tablo 2. İstem Mühendisliği Örnek Uygulama Alanları

Uygulama Alanı	İstem	Çıktı
İçerik oluşturma ve pazarlama	"Sağlıklı Beslenme İçin 10 Kolay ve Lezzetli Tarif" içeriği oluşturur musun?	1- Fırında Tavuk ve Sebzeler: Tavuk göğsü dilimlerini sebzelerle birlikte fırında pişirerek sağlıklı bir ana yemek elde edebilirsiniz. Tavuk dilimlerini zeytinyağı, taze otlar ve baharatlarla marine edin, ardından brokoli, havuç, biber ve patates gibi sebzelerle birlikte fırına verin.
Tasarım ve prototipleme	Bana yeni açtığım kafe için içerisinde kahve figürü olan bir logo tasarlar mısın?	Bu logo, kahve figürünü zarif ve çağdaş bir tarzda kullanıyor. Kahve çekirdekleriyle çevrelenmiş stilize bir kahve fincanı, kafanızın ana unsurlarını temsil ediyor. Umarım beğenirsiniz! (logo linki)
Metin özetleme	"Sefiller" romanının ana temasını özetleyebilir misiniz?	"Sefiller" romanının ana teması adalet, insanlık ve umuttur. Hikâye, farklı sosyal sınıflardan gelen karakterlerin hayatlarını ve içsel çatışmalarını anlatırken, adaletin ve merhametin önemini vurgular. Roman, temelde insanların geçmiş hatalarından ve toplumun onlara bakış açısından kurtulma ve yeniden doğma şansına sahip olduklarına dair güçlü bir mesaj ile doludur. Umut, roman boyunca süregelen bir tema olup, karakterlerin zorluklarla ve acılarla dolu hayatlarında bile umutlarını kaybetmemelerini vurgular.
Soru cevaplama	Türkiye'nin en yüksek dağı Ağrı Dağı mıdır?	Evet, Türkiye'nin en yüksek dağı Ağrı Dağı'dır. Ağrı Dağı, Türkiye'nin doğu sınırında bulunur ve en yüksek noktası olan 5.137 metrelik (16,854 feet) yüksekliğiyle ülkenin en yüksek zirvesidir. Ayrıca, bu dağ uluslararası tanımlamada Ararat Dağı olarak da bilinir.

Metin-SQL dönüşümü	Bana adında "ül" geçen kişilerin listesini getiren SQL kodunu yazar mısın? Tablo Adım: Kullanıcılar Tablo Alanlarım: Id, Adı, Soyadı	SELECT Adı, Soyadı FROM Kullanıcılar WHERE Adı LIKE '%ül%'
Çoklu dil çevirisi	"Fizik, kimya ve biyoloji gibi çeşitli disiplinler, doğa olaylarını anlamak ve açıklamak için gözlemler, deneyler ve teoriler kullanır." cümlesini Fransızca ve Almancaya çevirir misin?	Fransızca: "Des disciplines variées telles que la physique, la chimie et la biologie utilisent des observations, des expériences et des théories pour comprendre et expliquer les phénomènes naturels." Almanca: "Verschiedene Disziplinen wie Physik, Chemie und Biologie verwenden Beobachtungen, Experimente und Theorien, um natürliche Phänomene zu verstehen und zu erklären."
Metin sınıflandırma	Film harika! -Pozitif Hangisi iyi emin değilim. - Nötr Yolculuk iğrençti! --	Negatif
Rol yapma	Bilgisayar mühendisliği alanında uzman 2 kişinin rolünü üstleneceksin. Amacın, sana önereceğim ders adının uygunluğunu lisans eğitimi düzeyinde değerlendirmek. Her kişi değerlendirme sonuçlarını nedenleriyle açıklamalı. Ders Adı: "Çocuk Psikiyatrisi"	Profesör: Değerlendirme: Bu dersin bilgisayar mühendisliği programında yer alması akademik olarak uygun değil. Açıklama: Akademik danışman, öğrencilerin lisans eğitimleri boyunca aldıkları dersleri ve program gereksinimlerini yönetir. "Çocuk Psikiyatrisi" adlı bir ders, bilgisayar mühendisliği alanıyla ilgili değildir ve program gereksinimlerini karşılamaz. Doktor Öğretim Üyesi: Değerlendirme: Bu ders, bilgisayar mühendisliği öğrencileri için uygun değil. Açıklama: Temel bilgisayar bilimleri, matematik, programlama ve mühendislik prensipleri gibi konuları içeren derslere odaklanmalıdır. "Çocuk Psikiyatrisi" adlı bir ders, bu öğrencilerin program gereksinimlerini karşılamaz.

BDM'ler, yapay zekâ sistemlerinin beyinleri olarak algılanabilirler. Verilen talimatları algılama ve bu talimatlara göre eylemler üretme yeteneklerine sahiptirler. Ancak, BMD'lerin kapasite sınırlamaları vardır ve eğitim verilerinde zamansal gecikmeler yaşamaktadırlar. Örneğin, ChatGPT'nin en son eğitim verileri Ekim 2023'e kadar sınırlıdır. Gerçek zamanlı bilgi ve trendlere erişemezler ve belirli terimleri veya alanla ilgili bilgileri doğru bir şekilde anlamakta zorlanabilirler. Bazen eksik veya yanlış yanıtlara, hatta yanılsamalara neden olabilirler. Ek olarak, arama motorlarını kullanma, veri tabanlarını sorgulama ve harici araçları kullanma veya uygulama programlama arayüzlerini çağırma gibi harici uzman modellerle doğrudan etkileşime geçme yeteneğine sahip değildirler. Bu da BDM'lerin kullanılabilirliklerini sınırlamaktadır.

BDM'lerin karşılaştığı zorlukları aşmak önemli bir çalışma alanı haline gelmiştir. Bu noktada, bu zorlukları aşmak için istem mühendisliği tekniklerinin bir çözüm olabileceğinin ve sağladığı faydaların altını çizmek mümkündür. İstem mühendisliğinin uygulanması, BDM'lerin bilgiyi daha etkili bir şekilde işlemeleri; gerçek zamanlı bilgi ve trendlere daha hızlı erişim; belirli terimler veya alanlarla ilgili bilgileri daha doğru anlama imkanları sağlamaktadır. Ayrıca, BDM'lerin verimliliğini artırarak, eksik veya yanlış yanıtları ve kullanıcıların yanılsamalara düşme olasılığını azaltmaktadır. Sonuç olarak, istem mühendisliği tekniklerinin uygulanması, BDM'lerin karşılaştığı zorlukların üstesinden gelmek ve onların işlevselliğini artırmak için önemli bir adımdır. Bu tekniklerin kullanılması, BDM'lerin daha etkili ve güvenilir bir şekilde kullanılmasını sağlayarak, çeşitli uygulama alanlarında önemli faydalar sağlayabilir.

İstem mühendisliği alanındaki gelişmelerin bazı zorluklarla da karşılaşabileceği öngörülmektedir. Özellikle, karmaşık görevler için optimize edilmiş istemlerin geliştirilmesi ve kullanımının yaygınlaştırılması zaman alabilir. Ayrıca, BDM'lerin performansını iyileştirmek için kullanılan istem mühendisliği tekniklerinin etkili bir şekilde kullanılması için daha fazla araştırma ve geliştirme gerekebilir. İstem mühendisliği tekniklerinin kullanılmaması durumunda, BDM'lerin performansı genellikle belirli görevler veya konularla ilgili daha düşük olabilir. Özellikle spesifik veya karmaşık görevlerde, doğru sonuçlar elde etmek zorlaşabilir ve BDM'lerin kullanımı sınırlı olabilir. Ayrıca, kullanıcıların istedikleri cevapları veya sonuçları elde etme olasılığı azalabilir.

İstem mühendisliğinin geleceği oldukça umut vericidir. Bu tekniklerin daha yaygın bir şekilde benimsenmesiyle, BDM'lerin kullanım alanı genişleyecek ve daha fazla endüstri ve sektörde kullanılacaktır. Örneğin, edebiyat, sanat, sağlık ve müşteri hizmetleri gibi birçok alanda önemli yenilikler ve ilerlemeler getirebilir. Edebiyat alanında, özellikle yaratıcı yazma bağlamında fikir üretmek, yaratıcılığı harekete geçirmek ve yazma engelini aşmak için değerli bir araç olarak hizmet edebilir. Yazarlar, hayal güçlerini teşvik etmek ve duygularını uyandırmak için özel olarak hazırlanmış özel istemler hazırlayarak çeşitli temalar, karakterler oluşturabilirler. Bu yönlendirmeler, basit cümle başlangıçlarından daha karmaşık senaryolara veya görsel ipuçlarına kadar çeşitlilik gösterebilir ve yazarlara yaratıcı çabaları için bir sıçrama tahtası sağlayabilir. Ek olarak, yazmanın ortam, diyalog veya karakter gelişimi gibi belirli yönlerini hedef alan yönlendirmeleri stratejik olarak tasarlayarak yazarlar becerilerini geliştirebilirler. Sonuç olarak, hızlı mühendislik, yazarlara yeni fikirleri keşfetme ve repertuarlarını genişletme konusunda yapılandırılmış bir yaklaşım sunarak yaratıcı yazma sürecini zenginleştirir.

Müşteri hizmetleri alanında, müşteri sorularının ele alınmasında verimlilik ve hız artışı sağlayabilir. Müşteri sorunları veya sık sorulan sorular için standartlaştırılmış istemler geliştirilerek otomatik cevap oluşturan destek botları oluşturulabilir. Bu istemler, teknik sorunların giderilmesinden ürün bilgilerinin sağlanmasına veya hesap yönetimi konusunda yardıma kadar çok çeşitli senaryoları kapsayabilir. Ayrıca, istem mühendisliği, destek ekiplerinin yanıtlarını bireysel müşterilerin özel ihtiyaçlarına ve tercihlerine göre uyarlamasına olanak tanıyarak genel hizmet kalitesini artırabilir.

Tıp alanında karar verme süreçlerini ve teşhis doğruluğunu geliştirebilecek önemli bir potansiyele sahiptir. İstem mühendisliği, sağlık profesyonellerine teşhis protokolleri ve tedavi yolları boyunca rehberlik eden yapılandırılmış istemler oluşturarak, hasta semptomlarının ve tıbbi geçmişinin sistematik olarak değerlendirilmesine yardımcı olabilir. Tıp eğitiminde, öğrencilerin ve stajyerlerin kontrollü bir ortamda eleştirel düşünme ve klinik akıl yürütme uygulamalarına olanak tanıyacak şekilde klinik senaryoları simüle etmek için yönlendirmeler kullanılabilir. Ayrıca hasta iletişimi bağlamında, gerekli tüm bilgilerin açık ve kapsamlı bir şekilde iletilmesini sağlayarak etkileşimlerin standartlaştırılmasına yardımcı olabilir. Bu yaklaşım aynı zamanda hasta verilerine dayalı gerçek zamanlı destek ve öneriler sağlamak ve böylece daha bilinçli ve etkili klinik kararları kolaylaştırmak için elektronik sağlık kayıtları sistemlerine de entegre edilebilir. Sonuç olarak, istem mühendisliği, gelecekte BDM'lerin daha etkili bir şekilde kullanılmasını sağlayacak ve yapay zekâ teknolojilerinin yaygınlaşmasına katkıda bulunacaktır.

SONUÇ

BDM'ler, geniş bir bilgi birikimine erişme yeteneği ve çeşitli görevleri yerine getirme esnekliği ile dikkat çekerken, bazı eksiklikler ve problemler de içerirler. Örneğin, sınırlı eğitim verisi, zamansal gecikmeler ve belirli konularla ilgili anlayış eksikliği gibi sorunlar BDM'lerin performansını etkileyebilir. Ayrıca, harici uzman modellerle doğrudan etkileşime geçme yeteneklerinin bulunmaması da kullanılabilirliklerini sınırlayabilir.

İstem mühendisliği geniş bir uygulama ve araştırma alanına sahip BDM'lerin potansiyelini açığa çıkaran, onları etkili bir şekilde kullanmak için istemleri geliştirmeye ve optimize etmeye odaklanan yeni bir disiplindir. Bu nedenle, BDM'lerin karşılaştığı sorunlara çözüm sunabilir. Ancak her bir tekniğin avantajlarının yanında dezavantajları da vardır. Örneğin, sıfır atış istem ve birkaç atışlı istem, önceden eğitilmiş bir modelin genel bilgisini kullanarak yeni görevlerin çözülmesini sağlar. Birkaç atışlı istem, modele az miktarda örnek vererek daha iyi performans gösterir. Her iki yöntemin avantajı, önceden etiketlemeye ihtiyaç duymamalarıdır. Dezavantajları ise, karmaşık görevlerde performanslarının düşmesi ve her zaman doğru sonuçlar üretmemeleridir.

Düşünce zinciri istemi, modelin mantıksal bir sıra izleyerek cevap vermesini sağlayarak daha tutarlı ve bilgilendirici yanıtlar üretmesine katkıda bulunur. Otomatik düşünce zinciri ise bu işlemi otomatik hale getirerek zamandan tasarruf sağlar. Bu iki yöntem karmaşık problemlerde zorlanabilmekte ve her zaman doğru sonuçlar üretmemektedir. ReAct istemi, kullanıcının geri bildirimlerini kullanarak modeli dinamik olarak uyarlar ve daha iyi performans göstermesini sağlar. Öz tutarlılık ise modelin ürettiği yanıtların tutarlılığını kontrol ederek hataları minimuma indirir. Her iki yöntem modelin performansını ve güvenilirliğini arttırmaktadır. Dezavantajları ise, ek işlem gücü gerektirmeleri ve her zaman uygulanabilir olmamalarıdır.

Öz tutarlılık yöntemi modelin ürettiği yanıtların tutarlılığını kontrol ederek hataları minimuma indirir. Bu sayede modelin anlamsız yanıtlar üretmesini engelleyerek hata yapma olasılığını azaltır. Daha güvenilir ve doğru sonuçlar üretir. Ek işlem gücü gerektirdiği için her zaman kullanılması uygun olmayabilir. Düşünce ağacı yöntemi ise modelin birden fazla olası çözümü göz önünde bulundurarak en iyi sonuca ulaşmasını sağlar. Modele farklı bakış açıları kazandırdığı için daha yaratıcı ve özgün çözümler sunar. Karmaşık problemlerdeki performansı daha iyidir. Zaman ve ek işlem gücü gerektirir. Yönlü uyarıcı yöntemi modele, yanıtını yönlendirmek için ek bilgiler sağlar. Modelin dikkatini belirli bir konuya yönlendirerek modelin daha tutarlı ve doğru yanıtlar üretmesine yardımcı olur. Ek bilgi gerektirdiği için her alanda uygulanamayabilir. Modelin yaratıcılığı kısıtlanmaktadır.

Bilgi tabanlı yöntemde modele, yanıtını oluşturabileceği bilgi kaynağı sağlanır. Model bu sayede yeni bilgiler edinir ve daha doğru yanıtlar üretmektedir. Dezavantajlarında ise modele her zaman güncel ve doğru bilgi aktarımı yapmak zor olabilir. Ek işlem gücü gerekmektedir. Şablon tabanlı yöntemde ise modele, yanıtını oluşturabileceği önceden tanımlanmış bir format sağlanır. Bu sayede model belirli bir formata uyum sağlayarak hatalı, eksik yanıtlar üretmesi engellenir. Bu model kullanımında da modelin yaratıcılığı engellenmektedir. Her alanda kullanımı uygun değildir.

Kural tabanlı yöntem, modele yanıtını oluşturmak için kullanabileceği kurallar sağlar. Bu şekilde model belirli bir mantığa göre yanıt vermektedir. Modelin amaca yönelik yanıtlar vermesi sağlanır. Her alanda modele karmaşık kurallar eklemek ve bunları yönetmek kolay olmayabilir. Bir adım geriye gitme yöntemi modelin, yanıtını tekrar gözden geçirmesine ve gerekirse düzeltmesine olanak tanır. Model bu sayede daha doğru ve tutarlı yanıtlar üretmektedir. Model hataları fark eder ve düzeltebilir. Ek işlem gerektirdiği için zamana ihtiyaç duyulmaktadır. Reflexion yöntemi ise modele, kendi düşünme sürecini yansıtma ve analiz etme yeteneği kazandırır. Bu sayede model hatalarını fark ederek diğer cevaplarda daha doğru yanıtlar üretir, problem çözme becerisi kazanır. Karmaşık yöntemlerde uygulanması ek işlem gücü gerektirdiği için her alanda uygulanmak uygun olmayabilir.

Sonuç olarak, istem mühendisliği teknikleri BDM'lerin potansiyelini daha iyi bir şekilde değerlendirmek ve zorlukları aşmak için önemli bir araç haline gelmiştir. Ancak her yöntemin kendine özgü avantajları ve dezavantajları vardır. Hangi yöntemin kullanılacağı, sorunun türüne, modelin özelliklerine ve kullanıcının ihtiyaçlarına bağlıdır. Farklı yöntemlerin bir arada kullanımı, BDM'lerin performansını daha da geliştirmenin bir yoludur. Gelecekte, bu alandaki gelişmelerin hızlanması beklenmektedir. İstem mühendisliği teknikleri, BDM'lerin daha iyi anlaşılmasını sağlayacak ve kullanıcıların ihtiyaçlarını daha iyi karşılayacak şekilde geliştirilecektir. Özellikle, daha akıllı ve esnek istemler, BDM'lerin daha karmaşık görevleri yerine getirebilmesini sağlayacak ve kullanıcı deneyimini iyileştirecektir.

KAYNAKLAR

- Brown, T., Mann, B., Ryder, N., Subbiah, M., Kaplan, J. D., Dhariwal, P., ... Amodei, D. (2020). Language Models are Few-Shot Learners. İçinde H. Larochelle, M. Ranzato, R. Hadsell, M. F. Balcan, & H. Lin (Ed.), *Advances in Neural Information Processing Systems* (C. 33, ss. 1877-1901). Curran Associates, Inc. Geliş tarihi gönderen https://proceedings.neurips.cc/paper_files/paper/2020/file/1457c0d6bfc4967418bfb8ac142f64a-Paper.pdf
- Chen, S., Wang, W., Chen, X., Lu, P., Yang, Z., & Du, Y. (2024). LLaMA-LoRA Neural Prompt Engineering: A Deep Tuning Framework for Automatically Generating Chinese Text Logical Reasoning Thinking Chains. *Data Intelligence*, 1-53. https://doi.org/10.1162/dint_a_00251
- Kojima, T., Gu, S. (Shane), Reid, M., Matsuo, Y., & Iwasawa, Y. (2022). Large Language Models are Zero-Shot Reasoners. İçinde S. Koyejo, S. Mohamed, A. Agarwal, D. Belgrave, K. Cho, & A. Oh (Ed.), *Advances in Neural Information Processing Systems* (C. 35, ss. 22199-22213). Curran Associates, Inc. Geliş tarihi gönderen https://proceedings.neurips.cc/paper_files/paper/2022/file/8bb0d291acd4acf06ef112099c16f326-Paper-Conference.pdf
- Lester, B., Al-Rfou, R., & Constant, N. (2021). The Power of Scale for Parameter-Efficient Prompt Tuning. *Proceedings of the 2021 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing*, 3045-3059. Stroudsburg, PA, USA: Association for Computational Linguistics. <https://doi.org/10.18653/v1/2021.emnlp-main.243>
- Liu, J., Liu, A., Lu, X., Welleck, S., West, P., Bras, R. Le, ... Hajishirzi, H. (2021). Generated Knowledge Prompting for Commonsense Reasoning. *arXiv* . <https://doi.org/10.48550/arXiv.2110.08387>
- Long, J. (2023). Large Language Model Guided Tree-of-Thought. *arXiv* . <https://doi.org/10.48550/arXiv.2305.08291>
- Ma, R., Zhou, X., Gui, T., Tan, Y., Li, L., Zhang, Q., & Huang, X. (2021). Template-free Prompt Tuning for Few-shot NER. *arXiv* . <https://doi.org/10.48550/arXiv.2109.13532>
- Paranjape, B., Lundberg, S., Singh, S., Hajishirzi, H., Zettlemoyer, L., & Ribeiro, M. T. (2023). ART: Automatic multi-step reasoning and tool-use for large language models. *arXiv* . <https://doi.org/10.48550/arXiv.2303.09014>
- Polverini, G., & Gregorcic, B. (2024a). How understanding large language models can inform the use of ChatGPT in physics education. *European Journal of Physics*, 45(2), 025701. <https://doi.org/10.1088/1361-6404/ad1420>
- Polverini, G., & Gregorcic, B. (2024b). How understanding large language models can inform the use of ChatGPT in physics education. *European Journal of Physics*, 45(2), 025701. <https://doi.org/10.1088/1361-6404/ad1420>
- Radford, A., Wu, J., Child, R., Luan, D., Amodei, D., Sutskever, I., & others. (2019). Language models are unsupervised multitask learners. *OpenAI blog*, 1(8), 9.
- Sahoo, P., Singh, A. K., Saha, S., Jain, V., Mondal, S., & Chadha, A. (2024). A Systematic Survey of Prompt Engineering in Large Language Models: Techniques and Applications. *arXiv* . <https://doi.org/10.48550/arXiv.2402.07927>
- Seo, J., Moon, H., Lee, C., Eo, S., Park, C., Kim, J., ... Lim, H. (2022). Plain Template Insertion: Korean-Prompt-Based Engineering for Few-Shot Learners. *IEEE Access*, 10, 107587-107597. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3213027>
- Shaier, S., Bennett, K., Hunter, L. E., & von der Wense, K. (2024). Comparing Template-based and Template-free Language Model Probing. *arXiv* . <https://doi.org/10.48550/arXiv.2402.00123>
- Shinn, N., Cassano, F., Gopinath, A., Narasimhan, K., & Yao, S. (2023). Reflexion: language agents with verbal reinforcement learning. İçinde A. Oh, T. Naumann, A. Globerson, K. Saenko, M. Hardt, & S. Levine (Ed.), *Advances in Neural Information Processing Systems* (C. 36, ss. 8634-8652). Curran Associates, Inc. Geliş tarihi

gönderen https://proceedings.neurips.cc/paper_files/paper/2023/file/1b44b878bb782e6954cd888628510e90-Paper-Conference.pdf

Shu, M., Nie, W., Huang, D.-A., Yu, Z., Goldstein, T., Anandkumar, A., & Xiao, C. (2022). Test-Time Prompt Tuning for Zero-Shot Generalization in Vision-Language Models. İçinde S. Koyejo, S. Mohamed, A. Agarwal, D. Belgrave, K. Cho, & A. Oh (Ed.), *Advances in Neural Information Processing Systems* (C. 35, ss. 14274-14289). Curran Associates, Inc. Geliş tarihi gönderen https://proceedings.neurips.cc/paper_files/paper/2022/file/5bf2b802e24106064dc547ae9283bb0c-Paper-Conference.pdf

Snell, J., Swersky, K., & Zemel, R. (2017). Prototypical Networks for Few-shot Learning. İçinde I. Guyon, U. Von Luxburg, S. Bengio, H. Wallach, R. Fergus, S. Vishwanathan, & R. Garnett (Ed.), *Advances in Neural Information Processing Systems* (C. 30). Curran Associates, Inc. Geliş tarihi gönderen https://proceedings.neurips.cc/paper_files/paper/2017/file/cb8da6767461f2812ae4290eac7cbc42-Paper.pdf

Taveekitworachai, P., Abdullah, F., Dewantoro, M. F., Thawonmas, R., Togelius, J., & Renz, J. (2023). ChatGPT4PCG Competition: Character-like Level Generation for Science Birds. *2023 IEEE Conference on Games (CoG)*, 1-8. IEEE. <https://doi.org/10.1109/CoG57401.2023.10333206>

Vinyals, O., Blundell, C., Lillicrap, T., kavukcuoglu, koray, & Wierstra, D. (2016). Matching Networks for One Shot Learning. İçinde D. Lee, M. Sugiyama, U. Luxburg, I. Guyon, & R. Garnett (Ed.), *Advances in Neural Information Processing Systems* (C. 29). Curran Associates, Inc. Geliş tarihi gönderen https://proceedings.neurips.cc/paper_files/paper/2016/file/90e1357833654983612fb05e3ec9148c-Paper.pdf

Wang, X., Wei, J., Schuurmans, D., Le, Q., Chi, E., Narang, S., ... Zhou, D. (2022). Self-Consistency Improves Chain of Thought Reasoning in Language Models. *arXiv* . <https://doi.org/10.48550/arXiv.2203.11171>

Wu, P. (2022). A Survey of Few-Shot Learning Research Based on Deep Neural Network. *Frontiers in Computing and Intelligent Systems*, 2(1), 110-115. <https://doi.org/10.54097/fcis.v2i1.3177>

Yang, J., Guo, X., Li, Y., Marinello, F., Ercisli, S., & Zhang, Z. (2022). A survey of few-shot learning in smart agriculture: developments, applications, and challenges. *Plant Methods*, 18(1), 28. <https://doi.org/10.1186/s13007-022-00866-2>

Yao, S., Yu, D., Zhao, J., Shafran, I., Griffiths, T., Cao, Y., & Narasimhan, K. (2023). Tree of Thoughts: Deliberate Problem Solving with Large Language Models. İçinde A. Oh, T. Naumann, A. Globerson, K. Saenko, M. Hardt, & S. Levine (Ed.), *Advances in Neural Information Processing Systems* (C. 36, ss. 11809-11822). Curran Associates, Inc. Geliş tarihi gönderen https://proceedings.neurips.cc/paper_files/paper/2023/file/271db9922b8d1f4dd7aaef84ed5ac703-Paper-Conference.pdf

Yao, S., Zhao, J., Yu, D., Du, N., Shafran, I., Narasimhan, K., & Cao, Y. (2022). ReAct: Synergizing Reasoning and Acting in Language Models. *arXiv* . <https://doi.org/10.48550/arXiv.2210.03629>

Zhang, Z., Zhang, A., Li, M., & Smola, A. (2022). Automatic Chain of Thought Prompting in Large Language Models. *arXiv* . <https://doi.org/10.48550/arXiv.2210.03493>

Zheng, H. S., Mishra, S., Chen, X., Cheng, H.-T., Chi, E. H., Le, Q. V., & Zhou, D. (2024). Take a Step Back: Evoking Reasoning via Abstraction in Large Language Models. *The Twelfth International Conference on Learning Representations*. Geliş tarihi gönderen <https://openreview.net/forum?id=3bq3jsvcQ1>

Zhou, K., Yang, J., Loy, C. C., & Liu, Z. (2022). Learning to Prompt for Vision-Language Models. *International Journal of Computer Vision*, 130(9), 2337-2348. <https://doi.org/10.1007/s11263-022-01653-1>

Zhou, Y., Muresanu, A. I., Han, Z., Paster, K., Pitis, S., Chan, H., & Ba, J. (2022). Large Language Models Are Human-Level Prompt Engineers. *arXiv* . <https://doi.org/10.48550/arXiv.2211.01910>



Kahramanmaraş Sutcu Imam University

Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 10.05.2024
Kabul Tarihi : 31.07.2024

Received Date : 10.05.2024
Accepted Date : 31.07.2024

A SECURE ONLINE EXAMINATION SYSTEM USING SMART CONTRACTS

AKILLI SÖZLEŞMELER KULLANIMIYLA GÜVENLİ BİR ÇEVİRİMİÇİ SINAV SİSTEMİ

Ozgur OKSUZ¹ (ORCID: 0000-0001-5568-6116)

¹ Konya Technical University, Department of Software Engineering, Konya, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Ozgur OKSUZ, ooksuz@ktun.edu.tr

ABSTRACT

Covid19 pandemic has affected many sectors including education. All types of schools (public and private) have started to provide online education systems to their students to prevent spreading the disease. The online education system has brought many advantages besides stopping the spread of the disease. The students have more time since the lectures are not in class, it reduces the cost for the students since they physically do not go to school, and it provides flexibility in the lectures that students decide their schedule to attend the classes. However, there are some challenges in the online education system. The system needs to be available for the students when they take exams, view their exam results, and upload their exams for assessment. Since the lectures and exams are taken online, the data is very crucial. The data contains sensitive information such as exams, answers, scores, name, date of birth, address, phone number, government identification number, etc. A traditional online education system has a centralized infrastructure governed and managed by a single entity. This results in the system having single-point-of-failure attacks. This paper proposes an online examination system based on a smart contract and a blockchain. The blockchain eliminates single-point-of-failure attacks. The teachers write questions and store them in the blockchain. Only authorized students retrieve the exams from the blockchain by using smart contracts. The students submit their completed exams at predefined times. Then, the teachers evaluate the students' exams and put the results into the blockchain. Their exam scores are protected from any unauthorized entities by encryption. Students can freely see and view their scores at any time. Then, the students can show their results to any other third parties (once they apply for an internship or job) that they have completed the courses successfully. The system also uses a decentralized storage (off-chain) system to eliminate scalability problems. Off-chain storage (InterPlanetary File System) stores students' exams, answers, and exam results while the corresponding content identifiers of the files are stored in the blockchain. The proposed system is resilient to malicious teachers who can manipulate the exam results. In addition, the proposed system also provides a method for dishonest students who can complain about their exam results. In other words, the proposed system solves any conflicts between entities.

Keywords: Blockchain, encryption, online-test, privacy, smart-contracts

ÖZET

Kovid19 salgını eğitim başta olmak üzere birçok sektörü etkiledi. Hastalığın yayılmasını önlemek amacıyla tüm okul türleri (kamu ve özel), öğrencilerine çevrimiçi eğitim sistemleri sunmaya başladı. Online eğitim sistemi hastalığın yayılmasını durdurmanın yanı sıra birçok avantajı da beraberinde getirdi. Derslerin sınıfta olmaması nedeniyle öğrencilere daha fazla zaman kalıyor, fiziki olarak okula gitmedikleri için öğrenciler için maliyet düşüyor ve öğrencilerin derse katılım programlarını kendilerinin belirlemesi derslerde esneklik sağlıyor. Ancak çevrimiçi eğitim sisteminde bazı zorluklar var. Öğrencilerin sınava girmeleri, sınav sonuçlarını görüntülemeleri ve sınavlarını değerlendirmek üzere yüklemeleri sırasında sistemin kullanılabilir olması gerekmektedir. Dersler ve sınavlar online olarak yapıldığı için veriler çok önemlidir. Veriler sınavlar, cevaplar, puanlar, isim, doğum tarihi, adres, telefon numarası, resmi kimlik numarası vb. gibi hassas bilgileri içerir. Geleneksel bir çevrimiçi eğitim sistemi, tek bir kuruluş tarafından yönetilen ve idare edilen merkezi bir altyapıya sahiptir. Bu, sistemin tek hata noktası saldırılarına sahip olmasına neden olur. Bu makale akıllı sözleşmeye ve blokzincirine dayalı bir çevrimiçi sınav sistemi

ToCite: OKSUZ, O., (2024). A SECURE ONLINE EXAMINATION SYSTEM USING SMART CONTRACTS. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 27(4), 1421-1436.

önermektedir. Blokzincir, tek nokta başarısızlık saldırılarını ortadan kaldırır. Öğretmenler sorular yazar ve bunları blokzincir'de saklar. Akıllı sözleşmeleri kullanarak sınavları yalnızca yetkili öğrenciler blokzincir'den alır. Öğrenciler tamamladıkları sınavları önceden belirlenen zamanlarda teslim ederler. Daha sonra öğretmenler öğrencilerin sınavlarını değerlendirir ve sonuçları blokzincir'e koyar. Sınav puanları her türlü yetkisiz kişiden şifreleme yoluyla korunur. Öğrenciler puanlarını istedikleri zaman özgürce görebilir ve görüntüleyebilirler. Daha sonra öğrenciler, dersleri başarıyla tamamladıklarını (staj veya işe başvurduklarında) sonuçlarını diğer üçüncü taraflara gösterebilirler. Sistem ayrıca ölçeklenebilirlik sorunlarını ortadan kaldırmak için merkezi olmayan bir depolama (zincir dışı) sistemi kullanıyor. Zincir dışı depolama (InterPlanetary Dosya Sistemi), öğrencilerin sınavlarını, cevaplarını ve sınav sonuçlarını saklarken, dosyaların karşılık gelen içerik tanımlayıcıları da blokzincirinde depolanır. Önerilen sistem, sınav sonuçlarını manipüle edebilecek kötü niyetli öğretmenlere karşı dayanıklıdır. Ayrıca önerilen sistem, sınav sonuçları hakkında şikâyette bulunabilecek dürüst olmayan öğrencilere de bir yöntem sunmaktadır. Başka bir deyişle, önerilen sistem varlıklar arasındaki her türlü çatışmayı çözmektedir.

Anahtar Kelimeler: Blokzincir, şifreleme, çevrimiçi test, gizlilik, akıllı sözleşmeler

INTRODUCTION

At the end of 2019, people faced a global pandemic (COVID-19) that has been transmitted between people by breathing contaminated air. To prevent the spread of the disease, people keep their distance from others and avoid crowds. Many sectors like healthcare and finance have been affected. Education is one of these sectors. Schools (universities, middle schools, high schools) should have redesigned their education systems since COVID-19. The schools have started using the online education system. The students have had their education at home to prevent the spread of the disease. They have taken courses and had their exams online.

However, online education brings some disadvantages. The main disadvantages are protecting the privacy of the students' data, securing the system, making the online examination system available, and providing non-repudiation of the exam results. The schools need a computerized infrastructure for issuing exams and storing the exam results. Moreover, the system should allow entities to view and verify their exam results anytime and anywhere. The students may show their results to third parties once they apply for a job.

Furthermore, the students' data should not be leaked to unauthorized entities since it contains sensitive information about the students (name, date of birth, phone number, address, social security number, government identification number, exam files, exam results, etc). In addition, the system should be available for the students to see and verify their test results whenever they want. The data on the test system needs to be available, reliable, immutable, and transparent. In the system, some dishonest parties (teachers or students) might tamper with the students' data and take advantage of it. Thus, the test results should be verifiable to eliminate any fraudulent activity. Classical examination systems are fully centralized and governed by a single entity. So, the system is available for single-point-of-failure attacks. Once a trusted entity is compromised, the students' sensitive data will be leaked to untrusted parties.

Since the exam questions (classic and multiple choice) can include pictures, tables, and figures and can have a large number of questions, the exam file should not be stored directly in the blockchain. This results in scalability problems in the network since the users (students and teachers) have limited storage and computation sources. It should be a mechanism to solve the scalability problem in the online examination system.

This paper addresses the problems above by proposing a smart contract and a blockchain-based online examination system using a decentralized file storage protocol (*IPFS*). The proposed system uses blockchain technology as a building block to store every exam and the student's results in the blockchain. Moreover, the system uses smart contracts for the users to access their exams and exam results (authorized access). The use of the blockchain allows the data not to be changed by anyone and is transparent. Moreover, the system will be resilient to single-point-of-failure attacks. Furthermore, the data will be available anytime and anywhere. The Hyperledger blockchain (Androulaki et al., 2018) can be used to deploy smart contracts and to allow users to access the exams and results by connecting the network using their credentials (usernames and passwords). The proposed system encrypts the sensitive information to preserve data privacy. The system provides a control mechanism to track the transactions and eliminates conflicts between the entities.

In addition, the proposed system uses the InterPlanetary File System (*IPFS*) to store the original exam files (large files). The reason why the original files are stored in the *IPFS*, not on the blockchain, is to eliminate the scalability problem. Since the original data is stored outside of the blockchain, the *IPFS* is known as an off-chain storage. The hashes of the original files (they are called content identifiers of these files) are stored on the blockchain (on-chain). It is called on-chain since the data is stored directly on the blockchain. The transactions (data) stored in both databases (on-chain and off-chain) are verifiable. The contribution of the proposed system has the following properties:

- The system uses blockchain technology as a building block to eliminate single-point-of-failure attacks that the classic online education system has. The data on the blockchain is immutable, transparent, and available anytime and anywhere.
- The smart contracts allow the students to access the exams and the results. Moreover, they are stored in the blockchain.
- The students' sensitive data is protected by encryption so that any unauthorized entities cannot see the results.
- Using the blockchain provides non-repudiation for the entities. Students cannot deny or complain about their exam scores. The system solves the conflict between entities (teachers and students) about the students' exam results when they are dishonest. All data (test and test results) on the blockchain is verifiable.
- The proposed system uses the *IPFS* protocol to provide scalability.

The outline of the paper is as follows: Section 2 provides the recent studies about online examination systems. Section 3 gives some definitions that the proposed system uses. Section 4 presents the architecture and the workflow of the system. In section 5, the proposed system is explained in detail. In section 6, the complexity analysis of the system is given. Section 7 gives the security analysis of the proposed system. Section 8 discusses some limitations of the proposed system. The conclusion and future work are given in section 9.

RELATED WORK

Several studies proposed an online examination system. The study (Pee et al., 2019) proposed a smart contract-based online test system. They used private blockchain and attribute-based encryption to provide privacy for the students. However, it does not explain how the entities interact with the smart contract for a reliable, secure, and transparent system. Moreover, it does not examine the conflict between entities. Another work (Tentea & Ionescu, 2019) proposed an online testing system that provides a solution for non-repudiation, storing test results, and result tempering. However, the authors do not focus on the privacy of the students. In study (Kim & Huh, 2020) proposed an online cheating test system to catch irregularities using artificial intelligence. Another work (Jain et al., 2021) proposed a smart contract-based examination system in which students first pay their examination fee to authenticate themselves. The work compares cloud-based solutions to blockchain-based solutions for online examination systems. However, the work does not give details of the smart contract and interactions between entities and the smart contracts. The study (Jain et al., 2021) proposed an online examination system using a private blockchain and *IPFS*. However, (Kapse et al., 2022) does not have a proper adversarial model to prevent any fraudulent behaviour of the entities.

In addition, the study does not give details of the smart contract. A recent work (Sattar, 2023) proposed a blockchain-based secure online examination system. The authors (Sattar, 2023) focused on secure login to the examination system. The system uses IP address and face detection and voice recognition-based login. The authors also focused on removing any potential cheating using artificial intelligence. However, their work does not have a proper adversarial model and is not based on smart contracts. Study (N et al., 2022) focused on preventing cheating in an online exam. They used a face detection mechanism to proctor the exam.

The work (Abdelsalam et al., 2024) proposed a model for improving online exam results based on blockchain. The authors focused on developing a blockchain-based system to provide a secure evaluation of the exams with integrity of the results. To allow the students to answer the questions directly on the blockchain, the authors developed a module that integrated with the Moodle learning management system. However, storing the questions and answers directly on the blockchain results in a scalability problem since the questions take up large space since they can have pictures, files, and tables. However, in their paper, there is no threat/trust model to capture all attacks.

(Li et al., 2019) proposed a blockchain-based e-learning system that uses two different blockchains (public and private). The public blockchain was used for storing e-learning data and managing credits. The private blockchain was used for managing grades. However, their system did not have any information about the threat or trust model.

Another work (Zhu & Cao, 2021) focused on a blockchain-based online examination system that uses a biometric authentication method for users. In this work, the data privacy of the entities was preserved using an attribute-based encryption scheme, and the examination data was stored in the distributed storage system. Since the examination of the data was encrypted in the distributed storage system, the entities accessed the data only if the entity had corresponding attributes. However, in their trust model, teachers were trusted. The authors did not focus on when the teachers were malicious and gave lower scores to the students. Moreover, attribute-based encryption uses bilinear pairing that results in intensive computation.

(Tsai et al., 2022) presented a blockchain-based secure scoring mechanism for online learning that uses Ethereum (public) blockchain (Buterin, 2014). The system used a trusted administrator to address the conflict between students and teachers. Since the system uses a public blockchain, the administrator communicates with the teachers to give their student lists. Therefore, it eliminates non-registered students from taking the exams. To protect the privacy of the students, the system used *RSA* (Rivest et al., 1978) encryption. The students encrypted their answers before putting them into the blockchain. The system did not use a distributed storage system. This results in a scalability problem in the network since the questions can contain pictures, tables, and figures that take up large space. In addition, the system does not examine cases in which the teacher gives lower scores to the students than they are supposed to have.

Another study (Manawar, 2023) proposed a blockchain-based online examination system focused on some flaws in the exams such as cheating, fake identities, common questions, secure publication, and multiple devices. To address these problems the study proposed an AI and blockchain systems. However, the study does not focus on malicious teachers to tamper with the students' exam results. The paper does not have a formal trust model.

(HAM et al., 2021) proposed a blockchain and smart contract based examination, transcript, and certificate system. The system is provided with a light blockchain system composed of several modules. However, the study does not have a proper threat model. The study does not focus on malicious teachers to tamper with the examination results of the students. Another disadvantage is that the examination system only supports multiple-choice questions.

The proposed system in this paper differs from the above studies. The proposed system is based on providing data privacy for students so that any unauthorized entity cannot get students' scores and answer files. Moreover, the proposed protocol solves the conflicts between the students and the teachers once entities are dishonest. Furthermore, the proposed study uses a distributed, peer-to-peer storage service to store students' large files. The large files are not stored in the blockchain to provide scalability. The proposed system does not focus on preventing any cheating in online tests.

DEFINITIONS

Blockchain

The blockchain is a peer-to-peer and decentralized network that consists of blocks. Each block contains a bunch of transactions that are infeasible to tamper. In other words, the data in any block is infeasible to change. Once a transaction is issued, it is sent to other nodes for verification. After verification, the transactions are formed into a block, and the block is added to the blockchain. This process is called a consensus. The blocks are attached by cryptographic algorithms (hash and signature). If any transaction is changed in a block, the honest nodes will catch and discard it. There are three types of blockchain: Public, Permissioned, and Private. In a public blockchain, anyone can join the network without any restrictions. In addition, the decentralization level is higher than private and permissioned blockchains. Examples of public blockchains are *Bitcoin* (Nakamoto, 2008) and *Ethereum* (Buterin, 2014). Private blockchain is less decentralized (Viriyasitavat & Hoonsopon, 2019) and is used in business, industrial, and government use cases (Swan et al., 2018). Permissioned blockchains are between public and private blockchains (Viriyasitavat & Hoonsopon, 2019). In a permissioned blockchain, only permitted nodes can join the network, validate transactions, and create blocks. Fig. 1 demonstrates a blockchain and its structure. The block consists of two parts: Header and Body. The header consists of a block number, a previous block hash, a Merkle tree root, and a timestamp. The body consists of transactions, a current block hash, and a signature of the current block hash. The transactions are formed as the leaf nodes on the tree. A *Merkle* root is the hash of the hashes of all transactions in the block.

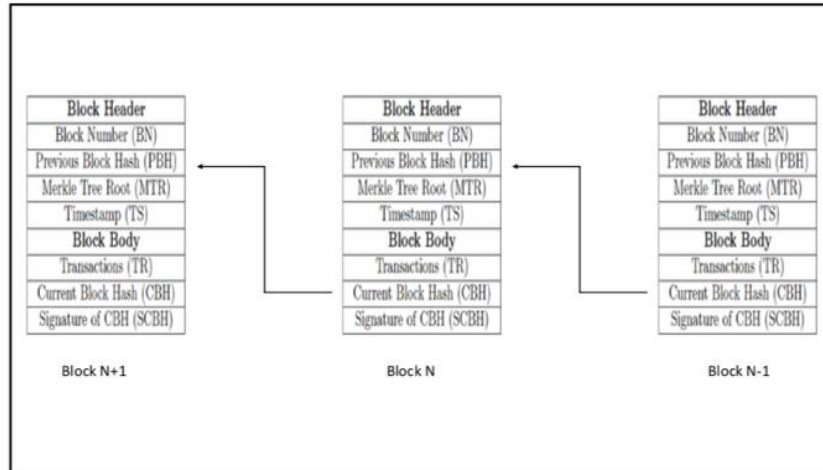


Figure 1. Blockchain Structure

Smart Contracts

Smart contracts are programs that consist of codes. These programs are automatically executed if pre-conditions are met. Once smart contracts are created, they are deployed. The codes are deterministic and consist of functions and attributes. Users interact with smart contracts using functions. To use the smart contract's function, the users pass some parameters to it and get the output of it. Each function has some requirements to be executed. This is called the predetermined conditions of the smart contracts. Once a user satisfies the preconditions, the function gives the output. The smart contracts are stored on the blockchain and nobody controls them. Each smart contract provides the following information: how users can interact with it, at what times, and what inputs result in what outputs. There is a cost for executing a smart contract and it is measured by gas. The cost of the execution gets higher once the smart contract gets complicated. In other words, the cost of the execution depends on the complexity of the smart contract's functions and its inputs. There are several platforms where smart contracts are deployed. The most used ones are Ethereum (Buterin, 2014) and Hyperledger (Androulaki et al., 2018).

Encryption

Encryption is simply an algorithm. An encryption algorithm has three phases: *KeyGeneration*, *Encryption*, and *Decryption*. In the key generation phase, a trusted party generates the public parameters, and each user chooses their secret and public keys. In the encryption phase, the user encrypts a message with the recipient's public key and sends it to the recipient. The recipient then uses their secret key to decrypt the received ciphertext which happens in the last phase.

In this work, teachers and students use *ElGamal* encryption (ElGamal, 1985) scheme to protect their data privacy since it is a *CPA* (*chosen plaintext attack*)-secure encryption scheme.

ElGamal encryption algorithm is defined as follows:

Let G be an elliptic curve group of prime order q with a generator P . For secret key, each user chooses a random $k_t \in \mathbb{Z}_q$ (k_s) and sets its secret key as $sk_t = k_t$ ($sk_s = k_s$). The index represents the owner of the key which is teacher (student). Then, it sets their public key as $pk_t = k_t P \in G$ ($pk_s = k_s P \in G$). In the encryption phase, to encrypt a message $m \in G$, the user chooses a random r_t and computes $(C_1, C_2) = (r_t P, m + r_t pk_s)$. The ciphertext consists of two elements in the group. In the decryption phase, to decrypt the message, the receiver computes $(C_2 - k_s C_1)$ which leads to message m .

The security of *ElGamal* (ElGamal, 1985) encryption is based on the hardness of *Decisional Diffie Hellman (DDH)* assumption.

Signatures

A signature algorithm consists of three phases: *KeyGeneration*, *Sign*, and *Verify*. In the key generation phase, a trusted party generates the system's public parameters. In addition, each user chooses their signature secret and public (verification) keys. The *Sign* algorithm takes a message, and the signer's secret key outputs a signature. The *Verify*

algorithm takes the signer's public key, the message, and the signature. Then, it outputs 1 if the signature is formed by the signer's secret key and the message. Otherwise, it outputs 0.

In this work, the proposed system uses *Elliptic Curve Digital Signature Algorithm (ECDSA)* (Johnson, 2001). *ECDSA* provides the same level of security as other signature algorithms using shorter key lengths.

ECDSA algorithm is defined as follows:

Let G be an elliptic curve group of prime order q with a generator P (base point). Each user chooses a random $l_t \in Z_q$ (l_s) and sets its secret key as $ssk_t = l_t$ ($ssk_s = l_s$). The index represents the owner of the key which is teacher (student). Then, it sets their public (verification) key as

$$spk_t = l_t P \in G \quad (spk_s = l_s P). \quad (1)$$

In the *Sign* phase, to sign a message m , a signer chooses a random r_t and computes

$$(x_R, y_R) = R = r_t P. \quad (2)$$

The signer computes

$$s = h(m) + l_t x_R. \quad (3)$$

The signature is $S = (x_R, s)$. In the verification step (*Verify*), the recipient computes

$$(x'_R, y'_R) = (h(m)s^{-1})P + x_R s^{-1} spk_t \quad (4)$$

If $x_R = x'_R$, the signature is valid. Otherwise, the signature is not valid.

The security of *ECDSA* is based the hardness of *Elliptic Curve Discrete Logarithm Problem (ECDLP)*.

Consensus

A consensus mechanism needs to be provided in a blockchain system to form verified transactions in a block. Once a transaction is issued, this transaction is sent to the other entities for verification. Once the majority of entities check the validity of the transactions, then they are added to the blockchain as a block. Several studies proposed different consensus algorithms like *Proof of Work (PoW)*, *Proof of Stake (PoS)*, *Delegatable Proof of Stake (DPoS)*, *Byzantine Fault Tolerance (BFT)*, and *Practical Byzantine Fault Tolerance (PBFT)*.

In this work, we use *PBFT* consensus protocol for the nodes to agree on the transactions. In *PBFT* consensus, the entities are a leader (master/primary), a client, and replica nodes. There are $3f+1$ nodes and at most f of them are malicious (Byzantine). The protocol is initiated by a client by sending a request to the leader node. Then, the nodes continue with the phases of it until there is an agreement among them. Then the new record is added to the blockchain. The protocol consists of 3 phases: pre-prepare, prepare, and commit. In the pre-prepare phase, once the leader (master) node receives the request, it sends pre-prepared message to all other nodes (replicas). In the prepare phase, all other nodes check the messages and share their agreements or disagreements with each other and the leader. If a node gets at least $2f+1$ prepare messages from others, then it verifies them and sends commit message to all other nodes. Then, if a node receives $2f+1$ commit messages, it verifies the correctness of the messages. If so, the node sends a reply message to the client that it has $2f+1$ verified committed messages. If the client receives $f+1$ identical replay messages from others, it will know that the agreement has been made.

InterPlanetary File System (IPFS)

IPFS (Benet, 2014) is a distributed and (Peer-to-Peer) *P2P* system used to share and store large files. Once a user sends its file to the *IPFS* for storing, the system generates a unique hash for the content. Then, this content identifier is given to the user. The content identifier is for retrieving the original file from the *IPFS*. Moreover, it is also used for the integrity of the file in the *IPFS*. This addressing mechanism is known as content-based addressing.

THE ARCHITECTURE AND THE WORKFLOW OF THE PROPOSED SYSTEM

The architecture of the proposed system is illustrated in Fig. 2. In the figure, the students take exams, teachers prepare exams for students, and a certificate authority (CA) sets system public parameters for a hash function, encryption, signature algorithms, and assigns two secret/public key pairs (for encryption and signature algorithms) to the users. Moreover, it registers entities to the system. The registration can be done by giving the certificates to their public keys. Then, the certificate authority sends these public keys to everyone. The workflow of the system (Fig. 2) is as follows:

1. Students and teachers get secret/public keys from the certificate authority.
2. The teacher writes the exam questions and encrypts the exam with the student's public keys. Then, it sends the encrypted documents to the *IPFS* network. The network returns the hash of the file (content identifier) to the teacher.
3. The teacher issues a smart contract. It then sends it to the other peers for validation (consensus).
4. Once the transaction is valid, the teacher puts the smart contract into the blockchain.
5. The student sees the smart contract and retrieves the hash of the encrypted file by executing the function in the smart contract.
6. The student retrieves the encrypted exam from the *IPFS* by using the content identifier.
7. Once the student finishes the exam, it sends the encrypted answers to the *IPFS* and gets the hash of its encrypted answers (content identifier).
8. The student then issues a transaction by executing the function in the smart contract.
9. The teacher verifies the transaction and sends the transaction to its peers to form a block.
10. After consensus, the teacher puts the transaction into the blockchain.
11. Once the teacher gets the ciphertext of the student's exam from the *IPFS*, the teacher decrypts it and grades the exam.
12. The teacher puts the encrypted exam result into the *IPFS*. It then returns the hash of the encrypted exam result.
13. The teacher issues a transaction by executing a function in the smart contract. Then, it sends it to its peers.
14. After consensus, the teacher puts it into the blockchain.
15. The student retrieves the hash of the file (content identifier) from the blockchain.
16. The student retrieves the encrypted exam result from the database and decrypts it. In the end, the student learns its exam result.

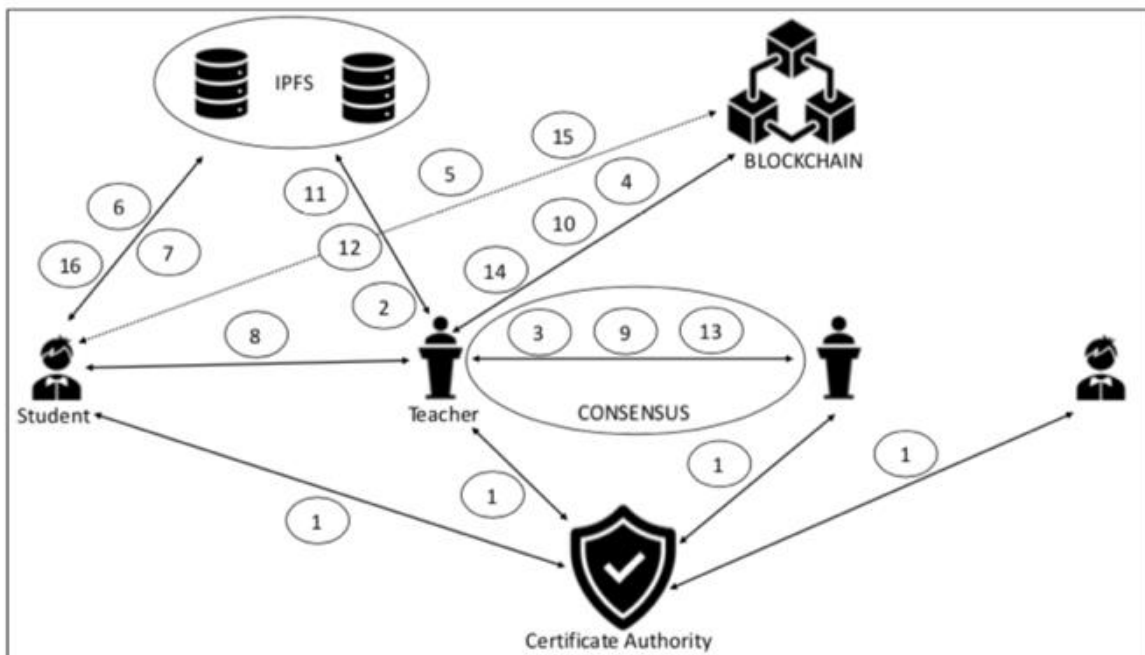


Figure 1. The Architecture and the Workflow of the Proposed System

In the proposed system, the consensus phase is as follows: each node is a teacher. Once the teacher creates its exam (the smart contract) for the students, it acts as the client. The teacher starts the consensus, issues transactions for its exam, and sends them to the leader (master/primary) node. The primary node checks if the transactions are valid, forms a block, and sends it to the other teachers for validation. After the *PBFT* consensus as in the *Consensus* section, the leader node adds the block to the blockchain.

Once the students issue transactions for submitting their answers as the transactions by calling corresponding functions, the corresponding teacher acts as a client. It collects and sends the transactions to the leader node to start the consensus. The leader node forms a block (after validation) with them and sends it to other nodes for validation. After the consensus, the block is added to the blockchain by the leader node (teacher).

Threat Model

In this paper, Certificate Authority (CA) is fully trusted and can be the president of the school/college/university that everyone relies on. Students can be dishonest and can argue with teachers for their grades. They can deny their answers to gain higher scores. Teachers can be malicious and can manipulate or change the exam results. An online examination system should satisfy the following properties:

1. Students' data privacy should be preserved. The system should protect students' data (name, date of birth, government identification number, address, exam results (grades), and answer sheets) from dishonest entities. This entity could be an insider (student, teacher) or any outsider of the system.
2. Students can not deny their exam results and answer sheets to get higher scores.
3. Teachers can be malicious and give students lower scores. The system should prevent dishonest teachers from giving lower scores to students.
4. Students should be able to verify their scores based on the answers.

THE PROPOSED SYSTEM

Since the entities should be known in advance, we use permissioned blockchain in the proposed system. We use Hyperledger fabric (Androulaki et al., 2018) platform to deploy smart contracts since it is permissioned blockchain. The certificate authority chooses system public parameters such as a hash function (SHA256),

$$h: \{0,1\}^* \rightarrow \{0,1\}^\lambda \quad (5)$$

($\lambda = 256$ bits), a signature scheme *ECDSA* and an encryption scheme *ElGamal* for the system. For secure encryption, the key size of *ElGamal* should be 1024 bits (at least). Each user (teacher and student) gets a secret/public key pair for signature and a secret/public key pair for encryption from the *CA* via a secure channel. The use of the *CA* is to bind each user's public key to a user identity to authenticate its public key. The keys are chosen by the *CA* because the *CA* (president) needs to execute some functions on behalf of the teachers and the students to solve any conflicts between them.

Once a transaction happens, Teachers are the validating peers in the consensus. *PBFT* consensus is used to validate transactions. In this case, at least $\frac{2}{3}$ of the total teachers should be honest in the system.

The teacher writes test questions, encrypts them, and puts them into the *IPFS*. Then, it gets the hash of the encrypted exam. It starts writing smart contract's functions and sets its parameters. The smart contract's functions are *CreateContract*, *DeployTest*, *GetTest*, *SubmitAnswer*, *SendAnswerKey*, *EvaluateTest*, *SendScore*, and *RetrieveScore*.

CreateContract, *DeployTest*, *SendAnswerKey*, *EvaluateTest*, and *SendScore* functions are done by the teacher while *GetTest*, *SubmitAnswer*, and *RetrieveScore* functions are executed by the students.

CreateContract function is used to initialize the contract parameters by the teacher. It takes the identity of the exam, public key of a teacher, the student set that contains all students' addresses, the duration of the exam, a timestamp, and a signature of these values. The function outputs the address of the contract. The users use the address of the contract to interact with it. In this phase, the teacher also initializes some parameters. There are 4 lists used in the contract to keep track of the student's data. These lists are data structures stored in the blockchain (contract). Table 1 shows the *CreateContract* function.

Table 1. CreateContract Function

<p>Initialize $L1 = [], L2 = [], L3 = [], L4 = [], TestDuration = 0, StSet = []$. CreateContract($Test_{id}, pk_{t_j}, StSet, TestDuration, ts_c, Sig_{t_j}(h(Test_{id}, StSet, TestDuration, ts_c))$)).</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. check if $add_{t_j} = HA(pk_{t_j}) \in TeSet$. 2. check signature if it is valid. 3. if all is valid returns address of the contract.
--

CreateContract function does some checks before outputting the contract address. First of all, it checks if the creator is authorized to create the smart contract by computing the address of the creator using the hash the public key. Then it verifies if it is in the teachers' set in step 1. It checks if the creator's signature is valid in step-2. Then, it returns the address of the contract in step-3.

DeployTest function takes the identity of the exam, public key of a teacher, address of a student, the hash of the exam that consists of questions, the content identifier of the exam, a time stamp, and a signature of these values. The identity of the exam consists of the course subject, number, year, and term of the test. For example, *MATH-101-2023-1* shows the subject, number, year, and term in order. The teacher executes this function multiple times since it encrypts the same exam with different public keys. The hash of the encrypted test (exam) is represented by the content identifier (*cid*). Moreover, the content identifiers and hash of the plain exams of the students are stored in a list.

Table 2. DeployTest Function

<p>DeployTest($Test_{id}, pk_{t_j}, add_{s_i}, h(test_{s_i}), cid_{s_i}, ts_d, Sig_{t_j}(h(Test_{id}, add_{s_i}, h(test_{s_i}), cid_{s_i}, ts_d))$)).</p> <ol style="list-style-type: none"> 4. check if $add_{t_j} \in TeSet$. 5. check if $add_{s_i} \in StSet$. 6. check if the signature is valid. 7. if all checks are valid, it outputs $L1[add_{s_i}] = (cid_{s_i}, h(test_{s_i}))$

DeployTest function does some checks before giving any output. First, it checks if the computed address is in the teachers' set by the given public key as a parameter in step-4. Moreover, it checks if the address of the student is in the student's address set in step-5. Furthermore, it checks if the caller's signature is valid in step-6. As output, it maintains a list to store each student's data as a key-value pair in step-7. Tab. 2 shows the *DeployTest* function's properties.

GetTest function takes the identity of the exam, public key of a student, a timestamp, and a signature of these values, and outputs hash of the exam and the content identifier of the encrypted exam. Then, the student retrieves the encrypted exam from the *IPFS* using the hash of the encrypted exam. The student decrypts the ciphertext and receives the exam as the plaintext. Once the student finishes the test on time, it sends the encrypted answer to the *IPFS*. Then, it gets the content identifier of the encrypted file. The student also computes the hash of the completed exam (answers).

Table 3. GetTest Function

<p>GetTest($Test_{id}, pk_{s_i}, ts_g, Sig_{s_i}(h(Test_{id}, ts_g))$)).</p> <ol style="list-style-type: none"> 8. check if $HA(pk_{s_i}) = add_{s_i} \in StSet$. 9. check if the signature is valid. 10. if all checks are valid, it returns $(cid_{s_i}, h(test_{s_i}))$.
--

GetTest function does some checks before giving any output. First, it checks if the computed address is in the students' set by the given public key as a parameter in step-8. Then, it checks if the caller's signature is valid in step-9. It outputs the content identifier of the encrypted exam and the hash of the plain exam in step-10. Tab. 3 shows the *GetTest* function's properties.

SubmitAnswer function takes the identity of the exam, public key of a student, the hash of the student answer file, the content identifier of the file, a timestamp, and a signature of these values. It then outputs a list that stores hash of student's answers for integrity and the content identifier to the file (for each student) in the *IPFS*. This function is called by multiple times (the number of students). Tab. 4 shows the *SubmitAnswer* function's properties.

Table 4. SubmitAnswer Function

SubmitAnswer($Test_{id}, pk_{s_i}, h(answer_{s_i}), cid'_{s_i}, ts_a, Sig_{t_{s_i}}(h(Test_{id}, h(answer_{s_i}), cid_{s_i}, ts_a)))$).

11. check if $add_{s_i} \in StSet$.
12. check if $(ts_a \leq ts_g + ExamDuration)$.
13. check if the signature is valid.
14. if all checks are valid, it outputs $L2[add_{t_j}][i] = (cid'_{s_i}, h(answer_{s_i}))$.

SubmitAnswer function does some checks before giving any output. In step-11, it checks if the address of the student is in the student's set. In step-12, it checks if the transaction time is less than or equal to the exam duration plus the time when the student gets the exam (*GetTest*). In step-13, it checks if the student's signature is valid. Then, it maintains another list to store students' data as a key-value pair (step-14).

SendAnswerKey function takes the identity of the exam, public key of a teacher, address of a student, the hash of the answer key file, the hash of the encrypted answer key file (*cid*), a timestamp, and a signature of these values. This function is executed for every student. Tab. 5 shows the *SendAnswerKey* function's properties.

Table 5. SendAnswerKey Function

SendAnswerKey($Test_{id}, pk_{t_j}, add_{s_i}, h(AnswerKey), cid''_{s_i}, ts_{sak}, Sig_{t_{t_j}}(h(Test_{id}, add_{s_i}, h(AnswerKey), cid''_{s_i}, ts_{sak})))$).

15. check if $add_{s_i} \in StSet$.
16. check if $add_{t_j} \in TeSet$.
17. check if the signature is valid.
18. if all checks are valid, it outputs $L3[add_{s_i}][i] = (cid''_{s_i}, h(AnswerKey))$.

SendAnswerKey function checks if the addresses of the students and the teachers are in the corresponding sets (step-15 and step-16). In step-17, it checks the signature of the teacher if it is valid. Then, it maintains a list to store the content identifier of the encrypted answer key file and the hash of the answer key for each student as a key-value pair in step-18.

GetStudentResult function takes the identity of the exam, public key of a teacher, a timestamp, and a signature of these values and outputs the content identifier and the hash of the student answer. The teacher then retrieves the encrypted answers of the students from the *IPFS* using the content identifiers. The teacher grades the exams, encrypts the exam scores, and puts them into the *IPFS*. The *IPFS* returns the content identifiers for the encrypted exam scores of the students. Tab. 6 shows *GetStudentResult* function's properties.

Table 6. GetStudentResult Function

GetStudentResult($Test_{id}, pk_{t_j}, ts_r, Sig_{t_{t_j}}(h(Test_{id}, ts_r)))$).

19. check if $add_{t_j} \in TeSet$.
20. check if the signature is valid.
21. if all checks are valid, it outputs $(cid'_{s_i}, h(answer_{s_i}))$.

GetStudentResult function checks if the address of the teacher is in the teachers' set in step-19. It checks if the signature is valid in step-20. It outputs the content identifier of the student's completed encrypted exam and the hash of the student's completed plain exam in step-21.

SendScore function takes the identity of the exam, public key of a teacher, a student address, the hash of the encrypted exam result of the student, the hash of the student's score, a timestamp, and a signature of these values. Tab. 7 shows the *SendScore* function's properties.

Table 7. SendScore Function

SendScore($Test_{id}, pk_{t_j}, add_{s_i}, cid''', h(score_{s_i}), ts_{ss}, Sigl_{t_j}(h(Test_{id}, cid''', add_{s_i}, h(score_{s_i}), ts_{ss}))$)).
 22. check if $add_{t_j} \in TeSet$.
 23. check if the signature is valid.
 24. if all checks are valid, it outputs $LA[add_{s_i}] = (cid''', h(score_{s_i}))$.

In Tab.7, *SendScore* function checks if the address of the teacher is in the teachers' set in step-22. In step-23, it checks if the teacher's signature is valid. Then, it maintains a list to store each student's plain exam score and the content identifier of the encrypted score as a key-value pair in step-24.

RetrieveScore takes the identity of the exam, public key of a student, a timestamp, and a signature of these values, and outputs a content identifier to retrieve the encrypted score and a content identifier to retrieve the encrypted answer key file from the *IPFS*. Moreover, it also outputs the hash of the answer key file and the hash of the score for integrity. Tab. 8 shows the *RetrieveScore* algorithm.

Table 8. RetrieveScore Function

RetrieveScore($Test_{id}, pk_{s_i}, ts_{rs}, Sigl_{s_i}(h(Test_{id}, ts_{rs}))$)).
 25. check if $add_{s_i} \in StSet$.
 26. check if the signature is valid.
 27. if all checks are valid, it outputs $(cid''', cid''', h(score_{s_i}), h(AnswerKey))$.

RetrieveScore function checks if the student's address is in the student's address list in step-25. Then, it checks if the student's signature is valid. It outputs the content identifier of the encrypted score of the student and the content identifier of the encrypted answer key of the exam, the hash of the plain score of the student, and the hash of the plain answer key in step-27.

COMPLEXITY ANALYSIS

In this section, we analyze the proposed protocol's complexity. Our analysis is based on m number of exams (smart contracts) that a teacher creates and a student takes.

Each teacher executes each smart contract five times: *CreateContract*, *DeployTest*, *SendAnswerKey*, *GetStudentResult*, *SendScore*. Each student executes each smart contract three times: *GetTest*, *SubmitAnswer*, and *RetrieveScore*.

Tables 9, 10, and 11 show the required storage, communication, and computational complexities for each user. Each teacher and student passes some parameters based on the function. We assume the *ECDSA* secret key (sk) is 256 bits, the public key (pk) is 512 bits, and the signature is 512 bits. Moreover, the identity of a test ($Test_{id}$) is 128 bits, the timestamp (ts) is 128 bits, the address (add) is 160 bits which is the output of *HA* (hash function).

$$HA: G \rightarrow \{0,1\}^{160}$$

(6)

$TestDuration$ is 128 bits, and each content identifiers (cid) is 128 bits.

In Tab. 9, CC stands for *CreateContract*, DT stands for *DeployTest*, GT stands for *GetTest*, SA stands for *SubmitAnswer*, SAK stands for *SendAnswerKey*, GSR stands for *GetStudentResult*, SS stands for *SendScore*, RS stands for *RetrieveScore* functions. Moreover, n is the number of students that they take each test, $x = 1696$, $y = 1280$, $z = 1536$ bits. In Tab. 10, X_Y represents function Y is used X times, where

$$h: \{0,1\}^* \rightarrow \{0,1\}^{256} \quad (7)$$

Sig is signature, Enc is encryption, Dec is decryption, and SMC is smart contract creation algorithms. In Tab. 11, $X \leftrightarrow Y$ stands for the communication complexity between entity X and Y , $y' = 1024$ bits, CA is the certificate authority, T is teacher, and S is student.

Table 9. Communication Complexity Between Users and Smart Contract

	CC	DT	GT	SA	SAK	GSR	SS	RS
<i>Student</i>	-	-	$yO(m)$	$zO(m)$	-	-	-	$yO(m)$
<i>Teacher</i>	$ CC O(m)$	$xO(nm)$	-	-	$xO(nm)$	$yO(nm)$	$xO(nm)$	-

Table 10. Computational and Storage Complexity of the System

	Storage	Computation
<i>Student</i>	$O(1)$	$O(m)_{Enc} + O(m)_{Dec} + O(m)_h + O(m)_{Sig}$
<i>Teacher</i>	$O(n)$	$O(m)_{SMC} + O(mn)_{Enc} + O(mn)_{Dec} + O(mn)_h + O(mn)_{Sig}$

Table 11. Communication Complexity Between Entities

	CA ↔ S	CA ↔ T	S ↔ IPFS	T ↔ IPFS
<i>Student</i>	y'	-	$4y'm$	-
<i>Teacher</i>	-	$y'n$	-	$4y'mn$

SECURITY ANALYSIS

In this section, we analyze the security properties of the proposed system that satisfy all the requirements mentioned in the *Threat Model* subsection.

1. The students view the contract once it is deployed to the blockchain. For each student, the teacher encrypts the exam and the exam result. The original files (exam and exam results) are stored in the *IPFS*, while the content identifiers of them are stored in the blockchain. The student retrieves the content identifiers by executing *GetTest* and *RetrieveScore* functions. Then, it gets the encrypted exam and the result from the *IPFS*. The student decrypts them and gets the plaintexts. Since the data is encrypted using the student's public key, only the owner of the secret key decrypts the ciphertexts. Thus, any unauthorized entity cannot get the plaintexts of the results and the answer sheets. Thus, the data privacy of the students is preserved and this step is satisfied.
2. Each student submits their encrypted answers with the hash of their plain answers by executing *SubmitAnswer* function. The outputs of this function are a content identifier of the encrypted document and a hash of the student's unencrypted answer ($cid'_{s_i}, h(answer_{s_i})$). The teacher decrypts the encrypted exam, gets the plaintext $answer'_{s_i}$ of the student, and computes the hash of it. Then, it checks if the result $h(answer'_{s_i})$ equals $h(answer_{s_i})$. If the equality does not hold, it can be
 - A. The *IPFS* network changes the corresponding student's encrypted answer.

- B. The student lies about his answers. The student uploads different files to the blockchain and the *IPFS* that do not match. The student uploads a different encrypted document to the *IPFS* and a different hash of its answer to the blockchain.
- C. The teacher lies.

To decide which problem occurs above, the president executes *GetStudentResult* function on behalf of the teacher to retrieve $(cid'_{s_i}, h(answer_{s_i}))$. The president checks if cid'_{s_i} equals the hash of the encrypted answer stored in the *IPFS*. If not, the *IPFS* network changed the value. It applies to A. If these checks are valid, the president decrypts the encrypted student's answers using the teacher's decryption key and obtains $answer'_{s_i}$. Then, the president checks if $h(answer'_{s_i}) = h(answer_{s_i})$. If the equality does not hold, the student lies about his exam. It applies B. Otherwise, the teacher lies. It applies C.

3. Once student executes *RetrieveScore* function and retrieves $(cid''_{s_i}, cid'''_{s_i}, h(score_{s_i}), h(AnswerKey))$. Then, the student gets its score $score'_{s_i}$ using cid'''_{s_i} , and gets $AnswerKey'$ using cid''_{s_i} . Then, it checks if $h(AnswerKey) = h(AnswerKey')$ and $h(score_{s_i}) = h(score'_{s_i})$. If not the student can complain about its grade. This is due to
 - A. The *IPFS* network can change the encryption of the designated teacher's encrypted answer key file and the student's encrypted score.
 - B. The student can lie about his answers. The student uploads a different encrypted document to the *IPFS* and a hash of its answer to the blockchain.
 - C. The teacher lies about the values. The untrusted teacher gives a lower score to the student.

To decide which problem occurs above, the president first retrieves all the values from the smart contract by calling corresponding functions in behalf of the student and the teacher. It uses *GetStudentResult* and *RetrieveScore* functions. From *GetStudentResult* function, it retrieves $(cid'_{s_i}, h(answer_{s_i}))$ and from *RetrieveScore* function, it gets $(cid''_{s_i}, cid'''_{s_i}, h(score_{s_i}), h(AnswerKey))$.

The president checks if cid'_{s_i} equals the hash of the student's encrypted answer like in step-2. If not, the *IPFS* network changed the value. It applies to A. Otherwise, the president checks if cid''_{s_i} equals the hash of the encrypted answer key. If not, the *IPFS* network changed the value. It applies A. Otherwise, the president checks if cid'''_{s_i} equals the hash of the encrypted score. If not, the *IPFS* network changed the value. It applies A. If these checks are valid which means that the *IPFS* did not tamper any data, the president decrypts the encrypted student's answers using the teacher's decryption key and obtains $answer'_{s_i}$. The president checks if $h(answer'_{s_i}) = h(answer_{s_i})$. If the equality does not hold, the student lies about his exam. It applies B. If the equality holds, the president decrypts the student's encrypted score and the teacher's encrypted answer key using their decryption keys. Then, it obtains $AnswerKey'$ and $score'_{s_i}$. It then checks if $h(AnswerKey) = h(AnswerKey')$. If not, the teacher lies (C). Otherwise, it grades the student's exam using $answer'_{s_i}$ and the answer key $AnswerKey'$. It gets the result of the student's exam $score''_{s_i}$. It checks if $h(score''_{s_i}) = h(score'_{s_i}) = h(score_{s_i})$. If not, the teacher is dishonest. It applies to C. Otherwise, the student lies (B). Thus, the step is satisfied.

4. The students can check their answers and the answer key prepared by the teacher to verify their scores. The students execute *RetrieveScore* function to do this. This step is also satisfied.

A note that if a server (node) in the *IPFS* does temper any data (encrypted exam of the student, encrypted score of the student, encrypted answer of the student, encrypted answer key), then the corrupted *IPFS* node will not be used for the future queries by the teacher. In other words, the corrupted node will be blacklisted. The teacher should ask any other nodes in the *IPFS* to have the original file. To eliminate having corrupted files, each entity can run its own node in the *IPFS*. Another note is that we assume that the students and teachers do not change the *cid* values received from the *IPFS* once they issue transactions with them.

DISCUSSIONS

In this section, we give some limitations of the proposed scheme. In the proposed system, there is a method for checking the integrity of students' scores when a malicious teacher gives lower scores than the students should get. However, there is no verification method when a teacher gives a higher score than a student should have. If the student does not complain about it, this problem will not be detected. Usually, students complain about their grades when they get lower scores. One solution to prevent teachers from giving higher scores to the students, the scores,

the answer keys, and the students' answers should be stored as plaintexts in the blockchain. Thus, anyone can check other students' scores based on their answers. In this case, the student's data privacy will not be protected.

Another limitation occurs when the teacher sends an encrypted exam to the *IPFS* network. Once the hash of the encrypted exam *cid* is received, the teacher puts it into the blockchain using *DeployTest* function. When students execute the *GetTest* function, retrieve *cids*, and then get the encrypted exams from the *IPFS*. If the data in the *IPFS* is changed, this can be noticed by the students and the teacher. However, they cannot have the exam. Then, this can be fixed immediately by the teacher. The teacher should prepare the same or a different exam.

Another limitation is if there is a conflict between a student and a teacher regarding the student's grade. The president should be online to solve the situation. Once a student complains about his grade, the president comes into play to provide the correctness. Thus, the president should work on this to solve the conflict among them (the teacher, the student, and the *IPFS*).

A note that integrating blockchain into the education system provides very useful properties such as the transparency of the grades, availability of the system, immutability of the records, and decentralized system. However, there are some obstacles to this integration. The recent studies (Mohammad & Vargas, 2022), (Koshiry et al., 2023), and (Dwivedi & Vig, 2023) showed that there are some challenges to the integration. One of the main challenges is that blockchain technology is a new tool and the students and the teachers are not aware/familiar with it. They may lack knowledge about the blockchain. Thus, it will take some time to learn the blockchain technology for them before they use it. They need to get comprehensive training. This results in the integration brings with it some costs. Moreover, there should be enough equipment (software and hardware) and expertise (for secure deployment) to adopt this technology.

CONCLUSION AND FUTURE WORK

In this paper, we proposed an online examination (test) system based on smart contracts and a blockchain. In the system, users (students) get their exams in the blockchain by logging into the system using their credentials. Then they read the smart contract and provide information to take the exams. To tackle the scalability problem, the files (student exams) are not stored in the blockchain directly. The proposed system uses decentralized storage protocol (*IPFS*). The students get their tests and freely view their scores anytime and anywhere. In our system, the students' data (exam) privacy is preserved by encryption. Moreover, the system provides a method to disallow dishonest students to complain about their exam results. Furthermore, the teachers cannot manipulate students' grades to give lower scores.

As a future work, we implement our system to see its performance. Moreover, we would like to provide a privacy-preserving method when malicious teachers give students higher scores than they are supposed to have.

REFERENCES

- Abdelsalam, M., Shokry, M., & Idrees, A. M. (2024). A Proposed Model for Improving the Reliability of Online Exam Results Using Blockchain. *IEEE Access*, 12, 7719-7733. DOI: 10.1109/ACCESS.2023.330499
- Androulaki, E., Barger, A., Bortnikov, V., Cachin, C., Christidis, K., De Caro, A., et al. (2018). Hyperledger fabric: A distributed operating system for permissioned blockchains. *Proceedings of the Thirteenth EuroSys Conference on - EuroSys '18* (pp. 1-15). New York, New York, USA: ACM Press. DOI: 10.1145/3190508.3190538
- Benet, J. (2014). *IPFS - Content Addressed, Versioned, P2P File System*. CoRR, vol. abs/1407.3561. Retrieved from <http://arxiv.org/abs/1407.3561>.
- Buterin, V. (2014). Ethereum. Retrieved 8 2023, from <http://bitcoin.org/bitcoin.pdf>
- Dwivedi, S., & Vig, S. (2023). Blockchain adoption in higher-education institutions in India: Identifying the main challenges. *Cogent Education*, 11(1). DOI: <https://doi.org/10.1080/2331186X.2023.2292887>
- ElGamal, T. (1985). A public key cryptosystem and a signature scheme based on discrete logarithms. *IEEE transactions on information theory*, 31(4), 469-472. DOI: 10.1109/TIT.1985.1057074.

- HAM, D., MM, D., & RK, S. (2021). The future of university education: Examination, transcript, and certificate system using blockchain. *Computer Applications in Engineering Education*, 29, 1234-1256. DOI: <https://doi.org/10.1002/cae.22381>
- Jain, A., Tripathi, A. K., Chandra, N., & and Chinnasamy, P. (2021). Smart contract enabled online examination system based in blockchain network. 2021 International Conference on Computer Communication and Informatics (ICCCI). IEEE. DOI: 10.1109/ICCCI50826.2021.9402420
- Johnson, D. M. (2001). The Elliptic Curve Digital Signature Algorithm (ECDSA). *International Journal of Information Security*, 36(63). DOI: <https://doi.org/10.1007/s102070100002>
- Kapse, S., Umalkar, M., Gajbe, A., Vrudhula, K., & Gour, R. a. (2022). Blockchain Based Solution for Secured Transmission of Examination Paper. 2022 IEEE 2nd International Symposium on Sustainable Energy, Signal Processing and Cyber Security (iSSSC). IEEE. DOI: 10.1109/iSSSC56467.2022.10051340
- Kim, S. -K., & Huh, J. -H. (2020). Blockchain Agreement for Self-identification of Online Test Cheating: Improvement of Algorithm Performance. 2020 20th International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS), (pp. 1124-1133.). Busan, Korea (South). DOI: 10.23919/ICCAS50221.2020.9268400.
- Koshiry, A. E., Eliwa, E., El-Hafeez, T. A., & Shams, M. Y. (2023). Unlocking the power of blockchain in education: An overview of innovations and outcomes. *Blockchain: Research and Applications*, 4(4), 100165. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.bcra.2023.100165>
- Li, C., Guo, J., Zhang, G., Wang, Y., Sun, Y., & R. Bie. (2019). A Blockchain System for E-Learning Assessment and Certification. *International Conference on Smart Internet of Things (SmartIoT)* (pp. 212-219). Tianjin, China: IEEE. DOI: 10.1109/SmartIoT.2019.00040
- Manawar, A. (2023). An Innovative and Secure Platform for Leveraging the Blockchain Approach for Online Exams. *Aptisi Transactions on Technopreneurship (ATT)*, 5(1), 99-108. DOI: <https://doi.org/10.34306/att.v5i1.314>
- Mohammad, A., & Vargas, S. (2022). Barriers Affecting Higher Education Institutions' Adoption of Blockchain Technology: A Qualitative Study. *Informatics*, 9(3). DOI: <https://doi.org/10.3390/informatics9030064>
- N, S., Sundaram, B. M., Kumar, V. N., & J, S. a. (2022). Face Recognition based Automated Remote Proctoring Platform. 2022 Second International Conference on Artificial Intelligence and Smart Energy (ICAIS), (pp. 1753-1760). Coimbatore, India. DOI: 10.1109/ICAIS53314.2022.9743134.
- Nakamoto, S. (2008). Bitcoin: A peer-to-peer electronic cash system. Retrieved 8 2023, from <http://bitcoin.org/bitcoin.pdf>
- Pee, S. J., Kang, E. S., Song, J. G., & Jang, J. W. (2019). Online test and management system using blockchain network. 2019 21st International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT). IEEE. DOI: <https://doi.org/10.23919/ICACT.2019.8701891>
- Rivest, R., Shamir, A., & Adleman, L. (1978, February). A Method for Obtaining Digital Signatures and Public-Key Cryptosystems. *Communications of the ACM.*, 21(2), 120–126. DOI: 10.1145/359340.359342
- Sattar, M. R. (2023). An advanced and secure framework for conducting Online examination using blockchain method. *Cyber Security and Applications*, 1. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.csa.2022.100005>
- Swan, M., Raj, P., & Deka, G. C. (2018). Chapter Five - Blockchain for Business: Next-Generation Enterprise Artificial Intelligence Systems. In *Advances in Computers* (pp. 121-162). Elsevier. DOI: <https://doi.org/10.1016/bs.adcom.2018.03.013>
- Tentea, E.-C., & Ionescu, V. M. (2019). Online quiz implementation using blockchain technology for result tampering prevention. 2019 11th International Conference on Electronics, Computers and Artificial Intelligence (ECAI). IEEE. DOI: 10.1109/ECAI46879.2019.9041980

Tsai, C.-T., Wu, J.-L., Lin, Y.-T., & Yeh, M. K.-C. (2022, July). Design and Development of a Blockchain-Based Secure Scoring Mechanism for Online Learning. *Educational Technology & Society*, 25(3), 105-121. DOI: <https://www.jstor.org/stable/48673728>

Viriyasitavat, W., & Hoonsopon, D. (2019). Blockchain characteristics and consensus in modern business processes. *Journal of Industrial Information Integration*, 32-39. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jii.2018.07.004>

Zhu, X., & Cao, C. (2021). Secure Online Examination with Biometric Authentication and Blockchain-Based Framework. *Mathematical Problems in Engineering*. DOI: <https://doi.org/10.1155/2021/5058780>



Kahramanmaraş Sütçü İmam University Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 26.05.2024
Kabul Tarihi : 05.10.2024

Received Date : 26.05.2024
Accepted Date : 05.10.2024

FARKLI ÇAPRAZLAMA TEKNİKLERİ KULLANAN DAĞINIK ARAMA ALGORİTMASI İLE EVRİŞİMLİ SİNİR AĞLARINDA HİPER PARAMETRE OPTİMİZASYONU

HYPERPARAMETER OPTIMIZATION IN CONVOLUTIONAL NEURAL NETWORKS WITH SCATTER SEARCH ALGORITHM USING DIFFERENT CROSSOVER TECHNIQUES

Hediye ORHAN^{1*} (ORCID: 0000-0001-8760-914X)
Dilara Sevim POLAT¹ (ORCID: 0009-0006-6985-1761)
Hüseyin Haklı¹ (ORCID: 0000-0001-5019-071X)

¹ Necmettin Erbakan Üniversitesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Konya, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Hediye ORHAN, hediyeorhan2015@gmail.com

ÖZET

Günümüzde yapay zekâ uygulamaları hayatın her alanında kullanılmaktadır ve gün geçtikçe daha uygulanabilir öneriler ve sonuçlar sunar hale gelmiştir. Evrişimli Sinir Ağları (ESA), birçok gerçek dünya probleminde başarılı sonuçlar veren, son yıllarda etkili ve yoğun bir şekilde uygulanan yapay zekâ algoritmalarından biridir. ESA'lar genellikle görsel bilginin analiz edilmesinde kullanılmaktadır. Görsel bilgi, ESA'larda bulunan evrişim, aktivasyon, havuzlama ve tam bağlantılı katmanlardan geçirilerek analiz edilmektedir. ESA eğitiminde kullanılan veri setine ve karşılaşılan probleme göre çeşitli parametreler kullanılmaktadır. Bu çalışmada en yüksek doğruluk değerini veren hiper parametrelerin seçilebilmesi için ESA eğitiminde kullanılan parametreler ve ağ yapısının oluşturulmasında kullanılan katmanlar optimize edilmiştir. Hiper parametrelerden kanal sayısı, evrişimsel katman, minimum parti boyutu ve aktivasyon fonksiyonu için ayrı değerler, öğrenme oranı için sürekli değerler belirlenmiştir. Bu çalışmada hiper parametre optimizasyonunu gerçekleştirmek için Dağınık Arama (DA) ve Genetik Algoritmalar (GA) yöntemleri tercih edilmiştir. DA yöntemi, GA ile kıyaslandığında ESA'lar için uygun hiper parametre değerlerinin kolaylıkla belirlenmesini sağlamıştır ve daha yüksek doğruluk değeri elde edilmiştir. Çalışmada elde edilen en yüksek doğruluk değerleri GA yöntemi ile %88.76 iken DA yöntemi ile % 93.24'tür. Bu değer 16 kanal sayısı, 5 x 5 evrişimsel katman, 64 minimum parti boyutu, 0.0052 öğrenme oranı ve reluLayer aktivasyon fonksiyonu parametreleri ile elde edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Optimizasyon, dağınık arama, derin öğrenme, hiper parametre

ABSTRACT

Nowadays, artificial intelligence applications are used in all areas of life and have become more and more applicable to provide recommendations and results. Convolutional Neural Networks (CNN) is one of the most effective and intensively applied artificial intelligence algorithms in recent years, providing successful results in many real-world problems. CNNs are generally used to analyze visual information. Visual information is analyzed by passing it through convolution, activation, pooling and fully connected layers in CNNs. In CNN training, various parameters are used according to the data set used and the problem encountered. However, finding the best hyperparameter values for a CNN is still a challenging task. In this study, the parameters used in CNN training and the layers used in the network structure are optimized in order to easily select the hyperparameters that give the highest accuracy. Discrete values for the number of channels, convolutional layer, minimum batch size and activation function and continuous values for the learning rate were chosen as hyper-parameters. In this study, Scatter Search (SS) algorithm is preferred to perform hyper parameter optimization. With the SS method, appropriate hyperparameter values for

ToCite: ORHAN, H., & POLAT, D.S., & HAKLI, H., (2024). FARKLI ÇAPRAZLAMA TEKNİKLERİ KULLANAN DAĞINIK ARAMA ALGORİTMASI İLE EVRİŞİMLİ SİNİR AĞLARINDA HİPER PARAMETRE OPTİMİZASYONU. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 27(4), 1437-1450.

CNNs were easily determined and a higher accuracy was achieved. The highest accuracy value obtained in the study is 93.24%. This value was obtained with 16 number of channels, 5 x 5 convolutional layers, 64 minimum batch size, 0.0052 learning rate and reluLayer activation function parameters.

Keywords: Optimization, scatter search, deep learning, hyperparameter

GİRİŞ

Evrişimli Sinir Ağları (ESA), görüntü işleme, ses tanıma, doğal dil işleme ve diğer birçok yapay zekâ uygulamasında başarıyla kullanılan derin öğrenme modelidir. ESA'lar, özellikle görsel verilerin analizinde oldukça başarılıdır. ESA'lar kullandığı katmanlar aracılığı ile veriler arasındaki ilişkileri öğrenmektedir ve özelliklerin hiyerarşik temsillerini oluşturmaktadır. ESA'larda bulunan katmanlar, bu katmanların parametre değerleri, katman sayısı, katmanlarda bulunan filtre sayısı ve filtre boyutu gibi birçok kriter elde edilen doğruluğu etkilemektedir. Böylece doğru hiper parametre seçimi ile daha iyi doğruluk oranları elde edilebilmektedir (Bozkurt & Yağanoğlu, 2021). ESA, yapay zekâ alanında önemli bir yere sahiptir ve günümüzde birçok uygulamada etkili bir şekilde kullanılmaktadır. Hiper parametrelerin optimizasyon algoritmaları ile belirlenmesi, birçok ihtimalin bir arada bulunmasını sağlamaktadır (Zhang vd., 2021). Bu sonuçları gözlemleyen kullanıcı en yüksek doğruluk değerini veren parametreleri kolaylıkla seçebilmektedir.

Xiao vd. (2020) CIFAR-10 adlı veri seti üzerinde hiper parametre optimizasyonu gerçekleştirmiştir. Çalışmada, değişken uzunluklu GA kullanılarak yapılan hiper parametre optimizasyonunda elde edilen en iyi doğruluk değeri %88.92'dir. En iyi sonuç toplamda yaklaşık 25 saat süren bir optimizasyon süreci sonucunda elde edilmiştir. Buna ek olarak çalışmada rastgele arama (RA), klasik GA ve büyük ölçekli evrim algoritması ile karşılaştırmalar yapılmış ve sınırlı GPU kaynaklarına sahip durumlarda değişken uzunluklu GA'nın daha iyi sonuçlar verdiği belirtilmiştir. Çalışmada optimize edilen parametrelerin dikkate alınmasıyla, ele alınacak parametreler hakkında daha iyi bir anlayış elde edilmiştir.

Tanyıldızı vd. (2019) çalışmasında hiper parametre optimizasyonu için ızgara arama yöntemi kullanmıştır. Fakat bu yöntemin çok fazla işlem gücü ve zaman gerektirmesi nedeniyle hızını arttırmak amacıyla parçacık sürü optimizasyonu (PSO) algoritması eklenmiştir.

Özbay vd. (2023) çalışmasında ISIC-2019 veri seti ile cilt kanseri sınıflandırılması yapılmıştır. Sınıflandırma için oluşturulan ESA hiper parametreleri PSO algoritması ile optimize edilmiştir. 50 devir ile bir optimizasyon gerçekleştirilmiştir. Kullanılan PSO algoritması ile %99.33 doğruluk değeri elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlardan PSO algoritmasının GA, diferansiyel evrim (DE) algoritması ve gri kurt optimizasyonu (GKO) algoritmasından daha iyi sonuç verdiği gözlemlenmiştir.

Fujino vd. (2017) el çizimleri ile ilgili bir veri setinin sınıflandırılması çalışmasında AlexNet mimarisi için hiper parametre optimizasyonu GA ile gerçekleştirilmiştir. MNIST veri seti için GA ve PSO algoritmasında hiper parametre optimizasyonları gerçekleştirilmiştir.

GA ile Bochinski vd. (2017) çalışmasında MNIST veri seti kullanılarak evrimsel algoritma ile %99.76 doğruluk değeri elde edilmiştir. Çalışmada aktivasyon fonksiyonu olarak Relu, öğrenme oranı olarak 0.0001 değeri ve optimizer olarak Adam algoritması tercih edilmiştir. %50 seyreltme oranı uygulanmıştır. Eğitim 30 devirde ve 100 minimum parti boyutunda gerçekleştirilmiştir. Optimize edilen hiper parametrelerden evrişimsel katmanlar, çekirdek boyutu ve tam bağlantılı katmanlar ise belirli aralıklarda değerler almıştır.

Lorenzo vd. (2017) çalışmasında, PSO algoritması ile %99.45 doğruluk değeri elde etmiştir. Çalışmada çoklu sınıflandırma üzerine odaklanılmıştır. Bu nedenle MNIST ve CIFAR-10 veri setleri üzerinde çalışılmıştır.

İnik (2023) ESC-10, ESC-50 (Piczak, 2015) ve Urbansound8k (Salamon, Jacoby, & Bello, 2014) veri setleri üzerinde PSO algoritması ile bir ESA hiper parametre optimizasyonu gerçekleştirmiştir. ESC-10 veri setinde %98.64, ESC-50 veri setinde %93.71 ve Urbansound8k veri setinde %98.45 başarı oranı elde edilmiştir.

Andonie ve Florea (2020) CIFAR-10 veri seti üzerinde hiper parametre optimizasyonu için RA, nelder-mead, PSO, sobol dizileri, bayes optimizasyonu, ağaç yapılı parzen tahmini ve ağırlıklı RA algoritmalarını test etmiştir. Çalışmada en yüksek doğruluk değeri %85 ile ARA algoritmasından elde edilmiştir.

Raziani ve Azimbagirad (2022) insan aktiviteleri ile ilgili HAR veri seti (Anguita, Ghio, Oneto, Parra, & Reyes-Ortiz, 2013) üzerinde yedi farklı algoritma ile hiper parametre optimizasyonunu test etmiştir. Bu algoritmalar; Güve Alev Optimizasyonu (GAO), GKO, Çok Evren Optimizasyonu (ÇEO), Sinüs Kosinüs Algoritması (SKA), Salp Sürü Algoritması (SSA), Balina Optimizasyon Algoritması (BOA) ve PSO algoritmasıdır. Çalışmada havuzlama katmanı boyutu, parti boyutu, çekirdek boyutu, devir ve filtre sayıları optimize edilmiştir. Algoritmaların 50 devir çalışması sonucunda elde edilen kayıp fonksiyonu grafiğine bakıldığında en başarılı sonucun GKO algoritması ile elde edildiği görülmektedir.

Gülcü ve Kuş (2019) PSO, BO, GA ve DE algoritmaları ile ESA hiper parametre optimizasyonu gerçekleştirmiştir. Çalışmada filtre sayısı, filtre boyutu, katman sayısı, seyreltme oranı, öğrenme oranı ve parti boyutu parametreleri optimize edilmiştir. En başarılı sonuç GA ve PSO algoritmalarından elde edilmiştir.

Kıymaç'ın (2022) çalışmasında, EKG sinyallerinin sınıflandırılması için açık erişimli veri tabanından bir veri seti kullanılmıştır. Veritabanı, 47 konudan elde edilen, örnekleme hızı 360 Hz olan 48 yarım saatlik EKG kaydı içermektedir. Çalışmada aktivasyon fonksiyonu olarak gizli katmanlarda Relu, çıkış katmanında softmax kullanılmıştır. Optimizer olarak Adam algoritması tercih edilmiştir. Oluşturulan yapay sinir ağı 10 devir ile eğitilmiştir. Optimize edilecek parti boyutu, öğrenme oranı, evrimsel katman ve seyreltme oranı gibi hiper parametreler için farklı ayırık değerler belirlenmiştir. Çalışmada en iyi doğruluk değeri PSO ile elde %98.87 olarak elde edilmiştir.

Yurdakul'un (2022) çalışmasında, filtre sayısı ve boyutu, aktivasyon fonksiyonu, havuzlama algoritması, tam bağlantılı katman sayısı, nöron sayısı ve öğrenme oranı farklı meta-sezgisel algoritmalar ile belirlenmiştir. Çalışmada CIFAR-10 veri seti üzerinde en yüksek doğruluk oranı yapay arı kolonisi algoritması ile %87.74 olarak elde edilmiştir. Çalışma sonucunda hiper parametreler için optimum değer aralıkları; filtre boyutu için 5 ile 9 arası, filtre sayısı için 64 ve 256 arası, nöron sayısı için 32 ve 256 arası, seyreltme oranı için 0.5 ve 0.7 arasındadır. Aktivasyon fonksiyonu için optimum fonksiyonun Relu olduğu belirtilmiştir.

Atteia vd. (2022) çalışmasında diyabetik makulopati tanısında kullanılan ESA hiper parametreleri optimize edilmiştir. Çalışmada, kamuya açık retina görüntü veri seti kullanılmıştır. Bu veri setleri, fundus fotoğrafçılığı ve optik koherens tomografi olmak üzere iki tarama tekniği ile yakalanan retina görüntülerini içermektedir. Fundus retinografi görüntü seti, Indian Diabetic Retinopathy Image Dataset (IDRiD) (Porwal vd., 2018) olarak adlandırılmaktadır. Bu çalışmada kullanılan optik koherans tomografi retina görüntüleri veri seti ise Kaggle Dataset'dir (Mooney, 2018). Çalışmada, ESA hiper parametrelerinin optimizasyonu için Bayesian optimizasyon yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntem, modelin performansını artırmak amacıyla hiper parametrelerin en uygun değerlerini bulmak için bir akış fonksiyonu kullanarak arama alanını örnekler. Sonuçlar, Bayesian optimizasyonu ile elde edilen ESA modelinin, optimize edilmemiş bir ağa göre daha iyi performans gösterdiğini ortaya koymaktadır. Öğrenme oranı, katmanlardaki nöron sayısı, aktivasyon fonksiyonu ve mini-batch boyutu gibi hiper parametreler optimize edilmiştir. Çalışmada, optimize edilmiş model test setinde %94.2 doğruluk oranı elde etmiştir. Bu oran, optimize edilmemiş modelin %93.2 doğruluk oranına göre belirgin bir iyileşme göstermektedir. Modelin performansı doğruluk, hassasiyet ve kesinlik metrikleri ile değerlendirilmiştir.

Amou vd. (2022) çalışmasında beyin tümörünün ESA ile sınıflandırılması gerçekleştirilmiştir. Bayesian optimizasyonu ile hiper parametreler optimize edilmiştir. Çalışmada optimize edilen hiper parametreler şu şekildedir; aktivasyon fonksiyonları olarak ReLU, ELU, Sigmoid, SELU ve Tanh belirlenmiştir. Minimum parti boyutu 1 ile 128 arasında uygun değerler almaktadır. Seyreltme oranı %0.1 ile %0.5 arasında değerler almaktadır. Yoğun katman düğüm sayısı 32 ile 1024 arasında değerler almaktadır. Gradyan iniş optimizasyonu için Adam, Nadam, AdaMax, RMSProp ve SGD algoritmaları belirlenmiştir. Bayesian optimizasyonu ile bu parametrelerden en başarılı sonucu veren hiper parametre kombinasyonu elde edilmiştir. Optimize edilen ESA modelinin %98.70 doğruluk oranına ulaştığı belirtilmiştir. Buna karşın, VGG16, VGG19, ResNet50, InceptionV3 ve DenseNet201 modellerinden sırasıyla %97.08, %96.43, %89.29, %92.86 ve %94.81 doğruluk oranı elde edildiği belirtilmiştir. Doğruluk ve zaman bakımından en başarılı sonuç Tanh aktivasyon fonksiyonu, 1 minimum parti

boyutu, 0.25 seyreltme oranı, 32 yoğun katman ve SGD optimizasyon algoritması ile elde edilmiştir. Toplamda 30 devirlik bir çalışma süresinin 11'inci devrinde sonuca ulaşılmıştır.

ZainEldin vd. (2022) çalışmasında beyin tümörü sınıflandırılması gerçekleştirilmiştir. Çalışmada Uyarlanabilir Dinamik Sinüs Cosine Uygunluk Gri Kurt algoritması kullanılmıştır. Bu algoritma hem sine cosine hem de gri kurt algoritmalarının güçlü yönlerini bir araya getirerek esnek bir çerçeve sunmaktadır. Çalışmada; öğrenme oranı, momentum oranı, minimum parti boyutu, L2 düzenleme oranı ve devir sayısı gibi birçok parametre optimize edilmiştir. Hiper parametre optimizasyonu sonucunda %99.98 doğruluk değeri elde edilmiştir. Model değerlendirilmesinde doğruluk, kesinlik, hassasiyet ve F1-skor performans metrikleri kullanılmıştır.

Aslan vd. (2022) çalışmasında COVID-19 teşhisi için bilgisayarlı tomografi göğüs görüntülerinin sınıflandırılması üzerine odaklanılmıştır. Çalışmada, sekiz farklı popüler ESA modeli (AlexNet, ResNet18, ResNet50, InceptionV3, DenseNet201, InceptionResNetV2, GoogleNet, MobileNetV2) kullanılarak özellikler çıkarılmıştır. Elde edilen özellikler, dört farklı makine öğrenimi yöntemi ile sınıflandırılmıştır. Bunlar: Destek Vektör Makineleri, k-En Yakın Komşu, Naive Bayes ve Karar Ağaçlarıdır. Her makine öğrenimi algoritması için hiper parametrelerin optimize edilmesi amacıyla Bayesian optimizasyon yöntemi kullanılmıştır. Çalışmada, optimizasyon sayesinde elde edilen en yüksek sınıflandırma doğruluğu %96.29 olarak rapor edilmiştir. DenseNet201 modeli ile SVM algoritmasının birlikte kullanılması ile bu başarıya ulaşılmıştır. Çalışmada optimize edilen hiper parametreler kullanılan makine öğrenimi algoritmasına göre farklılık göstermektedir. K-En Yakın Komşu algoritmasında mesafe ölçütü ve komşu sayısı, Destek Vektör Makineleri algoritmasında kutup kısıtları, kodlama yöntemi ve çekirdek ölçeği, Karar Ağacı algoritmasında minimum yaprak boyutu ve Naive Bayes algoritmasında çekirdek genişliği ve dağılım türü optimize edilmiştir.

Sethi vd. (2021) çalışmasında Alzheimer hastalığının erken teşhisi için çalışılmıştır. Çalışmada veri artırma yöntemleri uygulanmıştır. Derin öğrenme algoritması olarak ESA ve Uzun Kısa Süreli Bellek (LSTM) kullanılmıştır. Çalışmada Bayesian optimizasyon yöntemi kullanılmıştır. Bayesian optimizasyon, önceki deneyimlerden elde edilen sonuçları kullanarak yeni hiper parametre kombinasyonlarının seçimini yönlendirmektedir, böylece daha az deneme ile daha iyi sonuçlar elde edilmesine yardımcı olmaktadır. Öğrenme oranı, optimizasyon algoritmaları, parti boyutu, aktivasyon fonksiyonları ve düzenleme parametreleri (L1, L2) gibi hiper parametreler optimize edilmiştir. Elde edilen doğruluk değeri 0.0020 öğrenme oranı ve Adamax optimizasyon algoritması ile %86.28'dir. Çalışmada verilere artırma yöntemi uygulanarak LSTM ve ESA modelinin hibrit kullanımından %92.56 doğruluk değeri elde edilmiştir.

Zhang vd. (2021) çalışmasında ESA tabanlı akciğer nodülü sınıflandırmasını araştırmaktadır. Çalışmada hiper parametre optimizasyonu için bir Gaussian surrogat modeli kullanılmıştır. Bu model, hiper parametre konfigürasyonlarının hata fonksiyonunu yaklaşık olarak tahmin etmek için tasarlanmıştır. Ayrıca, hiper parametre optimizasyonu sürecinde, bir evrimsel strateji ile birlikte hiper parametrelerin önemine dayalı bir arama yöntemi uygulanmıştır. Çalışmada öğrenme oranı, parti boyutu ve devir sayısı gibi parametreler optimize edilmiştir. Çoklu görünüm ESA kullanılarak yapılan çalışmalarda, ikili sınıflandırma için %94.59 ve üçlü sınıflandırma için %86.09 doğruluk değerleri elde edilmiştir. Çok ölçekli ESA yapısı, ikili sınıflandırmada %92.21 ve üçlü sınıflandırmada %84.81 doğruluk sağlamıştır. Çoklu görünüm ESA'da amaç, çoklu görüntü kaynaklarından gelen bilgiyi birleştirerek daha iyi sınıflandırma sonuçları elde etmektir. Bu, özellikle nodülün farklı açılardan görünümünü değerlendirmek için faydalıdır. Çok ölçekli ESA'da amaç, farklı ölçeklerdeki özellikleri yakalayarak nodülün boyutuna ve şekline göre daha iyi bir sınıflandırma yapmaktır. Bu, nodüllerin değişken boyutları ve morfolojileri için daha esnek bir yaklaşım sunar.

Shankar vd. (2020) çalışmasında diyabetik retinopati tespiti gerçekleştirilmiştir. Diyabetik retinopati, dünya genelinde artan görme kaybının başlıca nedenlerinden biridir. Hiper parametre optimizasyonu için bu çalışmada Bayesian optimizasyon algoritması kullanılmıştır. Bu yöntem, hedef fonksiyonun optimizasyonunu kolaylaştırmak için bir "surrogate" model kullanmaktadır. Optimize edilen parametreler arasında devir sayısı 500 olarak belirlenmiştir. Öğrenme oranı 0.001 olarak ayarlanmış ve momentum değeri ise 0.9 olarak optimize edilmiştir. Bu parametreler, modelin performansını en üst düzeye çıkarmak için en uygun değerler olarak belirlenmiştir. Çalışmada, etkili bir DR hastalığı teşhis modeli olan HPTI-v4 modeli sunulmuştur. Sunulan HPTI-v4 modeli, histogram ve Inception v4 tabanlı özellik çıkarım süreçlerini içeren segmentasyon sürecini kapsamaktadır. Son olarak, sınıflandırma işlemleri çok katmanlı algılayıcı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Çalışmada sunulan HPTI-v4 modelinden %99.49 maksimum doğruluk, %98.83 hassasiyet ve %99.68 özgüllük değeri elde edilmiştir.

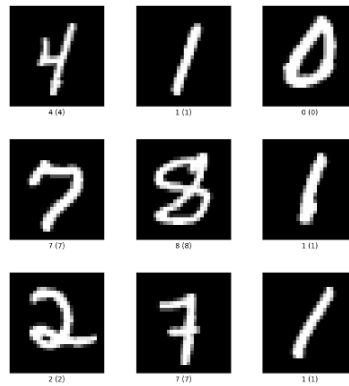
Literatürde hiper parametre optimizasyonunda daha çok PSO, GA ve Bayesian algoritmalarının tercih edildiği görülmüştür. Bu çalışmada etkili ve sistematik bir arama stratejisine sahip olan DA yöntemi hiper parametre optimizasyonu için uygulanmıştır. Çalışmada üç farklı çaprazlama tekniği kullanılarak birçok farklı aday çözüm elde edilmiştir.

Çalışmanın Materyal ve Metod bölümünde, projenin geliştirme aşamaları, kullanılan veri seti hakkında bilgiler verilmiştir. Oluşturulan evrişimsel sinir ağı, optimizasyon için kullanılan DA algoritması ve çaprazlama tekniklerinin çalışma mantığı detaylı olarak açıklanmıştır. Bulgular ve Deneysel Sonuçlar bölümünde, önerilen yöntem açıklanmıştır, elde edilen deneysel sonuçlar grafikler ve görseller ile sunulmuştur. Sonuç bölümünde, kullanılmasına karar verilen algoritma ile ilgili bilgiler ve çalışmanın sonuçlandırılması hakkında özetleyici bilgiler yer almaktadır.

MATERYAL VE METOD

Veri Seti

Çalışmada ESA yapısının hiper parametrelerinin test edilmesi için bir veri seti gereklidir. Veri seti üzerinde hiper parametreler ile oluşturulan ESA yapısı eğitilerek bir doğruluk değeri elde edilmektedir. Çalışmada MNIST veri seti kullanılarak bir ESA yapısının hiper parametreleri optimize edilmiştir (MNIST). MNIST veri seti, 28 x 28 piksel boyutunda siyah-beyaz 70.000 el yazısı rakam görüntüsünden oluşmaktadır. Bu görüntüler, 0 ile 9 arasındaki rakamları temsil etmektedir. MNIST veri kümesi, her bir rakam sınıfında farklı el yazısı stillerini içermektedir. Yani aynı rakamın farklı kişiler tarafından farklı şekillerde yazılmış örnekleri bulunmaktadır. Bu, el yazısı tanıma algoritmalarının farklı yazım stillerini tanımayı öğrenmelerine yardımcı olmaktadır. Kullanılan MNIST veri setinden örnek bir kısım Şekil 1'de görülmektedir.



Şekil 1. MNIST Veri Setinden Bir Örnek (MNIST)

Evrişimli Sinir Ağları Genel Yapısı

ESA yapısı girdi olarak veri setinden bir görüntü almaktadır. Görüntü, belirli değerler taşıyan piksellerden oluşan matrislerdir. Görüntü; evrişim, havuzlama ve tam bağlantılı katmanlardan geçerek eğitilmektedir. Burada evrişim katmanı; görüntüyü ele alan ilk katmandır (Sakib, Ahmed, Kabir, & Ahmed, 2019). Bu katmanda orijinal görsel boyutundan daha küçük bir filtre görsel üzerinde gezmektedir ve bu görsellerden belirli özellikleri yakalamaya çalışmaktadır. Bir görselin matris haline getirilmesi ve evrişim işlemi uygulanması Şekil 2'de görülmektedir. 3x3'lük bir filtre uygulanarak bir çıktı matrisi elde edilmektedir.

Görüntü		Filtre		Özellik Haritası																																											
<table border="1"><tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>0</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>0</td></tr><tr><td>0</td><td>0</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr><tr><td>0</td><td>0</td><td>1</td><td>1</td><td>0</td></tr><tr><td>0</td><td>1</td><td>1</td><td>0</td><td>0</td></tr></table>	1	1	1	0	0	0	1	1	1	0	0	0	1	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	*	<table border="1"><tr><td>1</td><td>0</td><td>1</td></tr><tr><td>0</td><td>1</td><td>0</td></tr><tr><td>1</td><td>0</td><td>1</td></tr></table>	1	0	1	0	1	0	1	0	1	=	<table border="1"><tr><td>4</td><td>3</td><td>4</td></tr><tr><td>2</td><td>4</td><td>3</td></tr><tr><td>2</td><td>3</td><td>4</td></tr></table>	4	3	4	2	4	3	2	3	4
1	1	1	0	0																																											
0	1	1	1	0																																											
0	0	1	1	1																																											
0	0	1	1	0																																											
0	1	1	0	0																																											
1	0	1																																													
0	1	0																																													
1	0	1																																													
4	3	4																																													
2	4	3																																													
2	3	4																																													

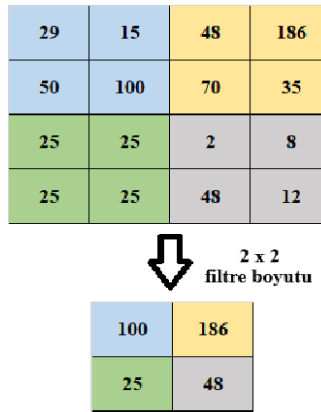
Şekil 2. 3x3'lük Filtre ile Evrişim İşleminin Gerçekleştirilmesi

Filtre uygulanması sonucunda oluşturulan matrise özellik haritası denilmektedir. ESA'da öğrenilen parametreler bu matrislerdeki değerlerdir. Model sürekli bu değerleri güncellemektedir ve özellikleri daha iyi öğrenmeye başlamaktadır. Bu filtreler; köşe bulma, kenar bulma ve bulanıklaştırma gibi özellik filtreleridir. Kenar bulma, giriş bilgisinin yüksek frekanslı bölgelerini temsil etmektedir. Sobel, prewitt, gabor gibi kenar bulma filtreleri mevcuttur. Elde edilen çıkış, görüntülerin kenar bilgisini vermektedir. Kenarlar genelde ESA katmanının en başında hesaplanmaktadır. Filtrelerin girdi üzerinde kaç piksel boyunca kayacağı adım (stride) sayısı ile belirlemektedir. Buna göre özellik haritası boyutu artabilmektedir veya azalabilmektedir.

Kenar bulma, bulanıklaştırma gibi filtreler kullanılırken girdi verisinin boyutu korunmak istenirse dolgulama (padding) işlemi uygulanmaktadır. Dolgulama işlemi çıktı boyutunu korur. Dolgulama işlemi girdi verisinin etrafını 0 ile doldurabilmektedir ya da girdi verisini kopyalayarak çoğaltabilmektedir. Burada temel amaç, bilgi kaybını minimuma indirmektedir.

Aktivasyon fonksiyonu olarak ara katmanlarda genel olarak Relu, Elu, Tanh kullanılmaktadır (Hao, Wang, Liu, & Sun, 2020). Çıktı katmanında sigmoid veya softmax tercih edilmektedir. Sigmoid, [0,1] arasında değerler almaktadır. Türevlenebilir, doğrusal olmayan bir fonksiyondur ve genelde ikili sınıflandırma problemlerinde kullanılmaktadır. Softmax, çoklu sigmoid olarak bilinmektedir ve ikiden fazla sınıf barındıran problemlerde kullanılmaktadır.

Havuzlama katmanında amaç, boyutsallığı azaltmaktır; hem işlem gücü azalır hem de gereksiz özellikler yok sayılarak önemli özelliklere odaklanılmaktadır. Ağın bu katmanında öğrenilen parametre yoktur. Havuzlama katmanında iki tür havuzlama işlemi vardır bunlar; ortalama havuzlama ve maksimum havuzlamadır. Projede kullanılan havuzlama katmanı maksimum havuzlamadır bu işlemde filtre uygulanan kısımdaki en büyük değerler seçilmektedir. Şekil 3'te maksimum havuzlama işlemi görülmektedir.



Şekil 3. Havuzlama Katmanında İşlemlerin Gerçekleştirilmesi

Tam bağlantılı (fully connected) katman genelde ESA mimarisinin sonunda bulunmaktadır. Sınıf skorları gibi hedefleri optimize etmek için kullanılmaktadır. Bu katmanda evrişim işlemleri ve havuzlama işlemleri sonucunda oluşan matris düz vektör haline getirilmektedir. Bu katman, her girişin tüm nöronlara bağlı olduğu bir giriş üzerinde çalışmaktadır.

Tablo 1'de ESA için optimize edilen hiper parametreler görülmektedir. Burada görülmekte olan kanal sayısı parametresi, bir evrişimli katmanda kullanılan filtre sayısını temsil etmektedir. Bu filtreler, giriş verilerindeki farklı özelliklerin çıkarılmasından sorumludur, böylece her bir kanal farklı bir özelliği temsil etmektedir. Kanal sayısı parametresinin artması durumun daha fazla özellik çıkarılabilmektedir, modelin öğrenme kapasitesi artmaktadır. Ancak, bu durum hesaplama maliyetini ve bellek kullanımını artırmaktadır. Azaldığı durumlarda ise çıkarılabilecek özelliklerin sayısı azalmaktadır, bu da modelin performansını olumsuz etkileyebilmektedir. Ancak, hesaplama maliyeti ve bellek kullanımı azalmaktadır. Kanal sayısı parametresine probleme, kullanılan veri setine ve donanıma göre karar verilmektedir.

Evrişimsel katman giriş verisindeki özelliklerin çıkarılmasından sorumludur. Evrişimsel katmanlar filtre boyutunu belirlemektedir. Bu filtreler, giriş verisi üzerinde kayan pencereler gibi çalışarak, belirli boyutlarda yerel bölgelerde özellikler çıkarmaktadır. Filtre boyutunun artması ile daha büyük yerel bölgeler işlenmektedir, bu da daha geniş ölçekli özelliklerin çıkarılmasını sağlamaktadır. Ancak, büyük filtre boyutları hesaplama maliyetini artırmaktadır ve daha fazla bellek gerektirebilmektedir. Filtre boyutunun azalması ile daha küçük yerel bölgeler işlenmektedir, bu da

daha ince detayların çıkarılmasını sağlamaktadır. Küçük filtre boyutları daha az hesaplama maliyeti gerektirmektedir ve daha az bellek kullanmaktadır, ancak çok küçük filtreler yeterince geniş ölçekli özellikleri çıkarmayabilmektedir. Minimum parti boyutu parametresi ise modelin her eğitim veya tahmin aşamasında işlediği en az veri sayısını temsil etmektedir. Eğitim verimliliğini ve bellek kullanımını etkilemektedir. Büyük parti boyutları, modelin genelleme yeteneğini artırmaktadır ve böylece parametre güncellemelerini daha kararlı hale getirilmektedir. Ayrıca, GPU/TPU gibi donanımın verimli kullanımını sağlayarak eğitim süresini kısaltmaktadır. Daha büyük parti boyutları, iterasyon başına daha fazla veri kullandığından, kayıp fonksiyonu hesaplamalarında ve gradyan tahminlerinde daha az varyans olmaktadır, bu da daha doğru güncellemeler yapılmasını sağlamaktadır. Bunlara ek olarak; daha büyük parti boyutları, daha fazla bellek gerektirmektedir ve bu, özellikle sınırlı belleğe sahip GPU'larda sorun olabilmektedir. Her iterasyonda daha fazla veri işlendiği için, her iterasyonun tamamlanması daha uzun sürebilmektedir ve bu durum eğitim süresini uzatmaktadır. Küçük parti boyutları ise daha az bellek kullanmaktadır, bu da özellikle sınırlı belleğe sahip cihazlarda avantaj sağlamaktadır. Minimum parti boyutun kullanılan donanıma ve veri setine göre karar verilmektedir.

Öğrenme oranı, modelin ağırlıklarının güncellenme hızını belirlemektedir. Öğrenme oranının artması ile model daha hızlı öğrenmektedir, ancak aşırı büyük öğrenme oranları, öğrenme sürecinde kararsızlıklara ve salınımlara yol açabilmektedir. Yüksek öğrenme oranı, modelin optimum çözüme yakınsamasını engelleyebilmektedir ve bu da genellikle modelin genel performansını düşürmektedir. Daha küçük öğrenme oranında ise öğrenme daha yavaş olur, bu da eğitim sürecini uzatabilmektedir. Çok düşük bir öğrenme oranı, modelin eğitim verisine aşırı uyum sağlamasına ve bu nedenle test verisi üzerinde kötü performans göstermesine neden olabilmektedir. Öğrenme oranı parametresine probleme, veri setinin dağılımına ve veri sayısına bakılarak karar verilebilmektedir.

Aktivasyon fonksiyonu, bir nöronun çıktısını belirlemektedir ve modelin doğrusal olmayan ilişkileri öğrenmesini sağlamaktadır. Relu (Rectified Linear Unit) aktivasyon fonksiyonu negatif değerler için 0 değerini, pozitif değerlerin ise kendi değerlerini çıktı olarak vermektedir. Tanh fonksiyonu türevlenebilir ve (-1,1) aralığında değerler alabilen bir fonksiyondur. Elu (Exponential Linear Unit) fonksiyonu ise Relu aktivasyon fonksiyonunun eksikliklerini gidermek için geliştirilmiştir. Negatif değere sahip nöronlara Relu ile 0 değeri atanması bu nöronlarda öğrenme olmayacağı anlamına gelmektedir. Buna alternatif olarak Elu fonksiyonu ile negatif değerlere 0 atamak yerine üstel bir hesaplama yapılmaktadır. Negatif girdilerde Elu fonksiyonunun hesaplama formülü Denklem 1'de görülmektedir. Burada belirtilen α değeri genellikle 1 olarak kullanılmaktadır. Farklı değerler ile de kullanılabilir.

$$f(x) = \alpha(e^x - 1) \text{ eğer } x \leq 0 \quad (1)$$

Bu parametrelere ek olarak oluşturulan ESA'da 2x2 boyutunda maksimum havuzlama katmanı bulunmaktadır.

Tablo 1. Optimize Edilecek Hiper Parametreler ve Değerleri

Hiper parametreler	Seçenekler
Kanal Sayısı	8, 16, 32
Evrışimsel Katman	1x1, 3x3, 5x5, 7x7, 9x9
Minimum Parti Boyutu	32, 64, 128
Öğrenme Oranı	$0 < x \leq 0.5$
Aktivasyon Fonksiyonu	Relu, Tanh, Elu

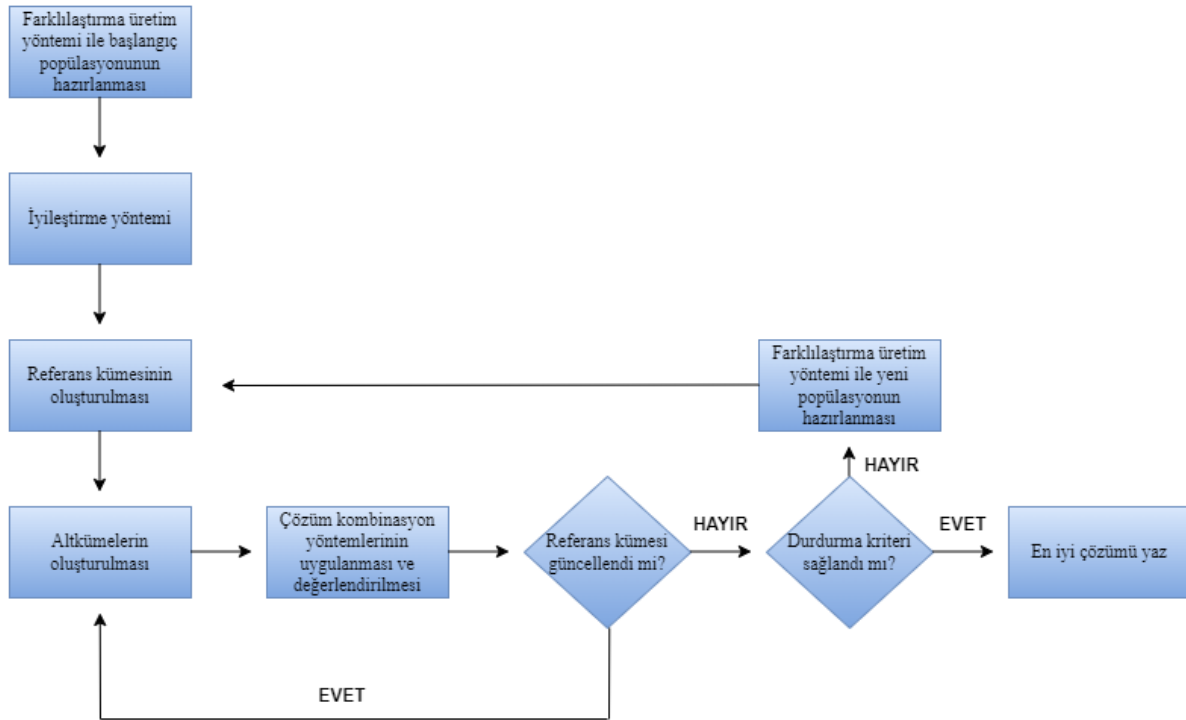
Dağılık Arama Algoritması

DA algoritması ilk olarak 1977'de Glover'ın "Yedek Kısıtlamalar Kullanarak Tamsayı Programlama İçin Meta-sezgisel Yaklaşımlar" başlıklı çalışması ile (Glover, 1977) ortaya atılmıştır. DA, karmaşık optimizasyon problemlerini çözmek için geliştirilmiş bir meta-sezgisel yöntemdir. Geleneksel yöntemlerin aksine DA, çözüm uzayını rastgele aramak yerine, çeşitlilik ve iyileştirme stratejilerini kullanarak daha odaklı bir arama gerçekleştirmektedir. DA algoritmasının diğer evrimsel algoritmalarından farkı ve üstünlüğü, çözüm seçiminde ve yeni çözümler üretme yöntemindedir. DA algoritması, referans seti (RefSet) olarak adlandırılan en iyi çözümlerden oluşan bir set oluşturmaktadır. Bu set, yalnızca uygunluk değeri en yüksek çözümleri değil, aynı zamanda çeşitliliği artıracak çözümleri de içermektedir. DA algoritması, referans setindeki çözümleri sistematik olarak seçerek

kombinasyon işlemleriyle yeni çözümler üretmektedir. Yeni çözümler, çözüm havuzuna eklenmektedir ve referans seti güncellenmektedir. Eğer referans setinde değişiklik olmazsa, yeni bir popülasyon oluşturularak bu popülasyondan seçilen bireyler referans setine eklenmektedir. DA algoritması, küresel arama için etkili olup, popülasyonun tamamını işlemeye odaklanmak yerine en başarılı bireyleri ve en farklı bireyleri referans setine ekleyerek çeşitliliği sağlamaya çalışmaktadır (Huang, Wunsch, Levine, & Jo, 2008). Bu yaklaşım, çözümlerin çeşitliliğini koruyarak daha geniş bir çözüm alanında arama yapmayı mümkün kılmaktadır. DA algoritmasının bu özellikleri, GA ve diğer rakip algoritmalara kıyasla daha çeşitli ve potansiyel olarak daha yüksek kaliteli çözümler üretmesini sağlamaktadır. Hazırlanan referans kümesinden alt kümeler oluşturulmaktadır. Alt küme elemanları farklı sayıda belirlenebilmektedir ve bu çalışmada iki elemanlı alt kümeler seçilmiştir. Oluşturulan alt küme sayısının hesaplanma formülü Denklem 2’de görülmektedir. **RFC** terimi, oluşturulan referans kümelerinin sayısını ifade etmektedir.

$$\frac{(RFC * (RFC + 1))}{2} \quad (2)$$

Oluşturulan alt kümelerde yer alan bireylerden çözüm kombinasyon yöntemleri ile çocuk bireyler elde edilmektedir. Elde edilen çocuk bireyler ve referans kümesinde yer alan bireyler arasında RFC adet en iyi çözüm seçilerek yeni referans kümesi hazırlanmaktadır. Eğer seçilen yeni referans kümesi ve eski referans kümesinden farklı ise, tekrar alt küme oluşturulma aşamasına geçilmektedir. Yeni oluşturulan referans kümesi ile eski referans kümesi eşit ise durdurma şartına bağlı olarak referans kümesinin RFC/2 adedi arama uzayında rastgele belirlenen yeni çözümler ile değiştirilmektedir. DA algoritmasının akış şeması Şekil 4’te görülmektedir.



Şekil 4. Dağınık Arama Algoritması Akış Şeması

Dağınık Arama Algoritmasının Hiper Parametre Optimizasyonu için Uygulanması

Optimize edilecek hiper parametre değerlerine karar verildikten sonra aday çözümler oluşturulmaktadır. Oluşturulan aday çözümlerde rastgele değerler üretilmektedir. Örneğin; kanal sayısı parametresi Tablo 1’de görüldüğü gibi 3 farklı değer alabilmektedir. Bunun için 1 ile 3 arasında rastgele değerler üretilmektedir. Oluşturulan rastgele değerler dönüşüm fonksiyonu ile hiper parametrelerin temsil ettiği değerlere dönüştürülmektedir. Kanal sayısı parametresi için rastgele oluşturulan değer 3 ise dönüşüm fonksiyonunda kanal sayısı parametresine 32 değeri atanmaktadır. Hiper parametrelerden oluşan aday çözümler ve karşılık geldikleri değerlerden bir örnek Tablo 2’de görülmektedir.

Tablo 2. Örnek Bir Aday Çözüm ve Karşılık Geldiği Hiper Parametre Değerleri

	Kanal Sayısı	Evrişimsel Katman	Minimum Parti Boyutu	Öğrenme Oranı	Aktivasyon Fonksiyonu
Aday Çözüm	3	1	2	0 – 0.5 arası	3
Karşılık Geldiği Değer	32	1x1	64	0.013	Elu

Aday çözümlerde bulunan değerlerin uygunluklarını hesaplamak için bir ESA yapısı oluşturulmuştur. Oluşturulan ESA'nın eğitimi sonucunda elde edilen doğruluk değeri uygunluk fonksiyonu olarak kullanılmaktadır. Hesaplanan doğruluk değeri uygunluk fonksiyonundan dönen kalite değerini temsil etmektedir.

Bunlara ek olarak çalışmada kullanılacak çaprazlama teknikleri belirlenmiştir. Çalışmada tek nokta çaprazlama, çift nokta çaprazlama ve tekdüze çaprazlama tekniklerinin kullanılmıştır. Her bir çaprazlama tekniğinden 2 çocuk birey olmak üzere toplamda 6 adet çocuk birey oluşturulmuştur. Kullanılan çaprazlama teknikleri şu şekildedir:

Tek Nokta Çaprazlama: Rastgele bir çaprazlama noktası belirlenmektedir. Belirlenen çaprazlama noktası P1'den alınmaktadır. Bu nokta dışında kalan kısımlar ise P2'den tamamlanmaktadır. Şekil 5'te örnek bir uygulama görülmektedir.

P1	4	3	2	2	7	2	1	3
P2	3	2	1	2	5	1	2	3

C1	3	2	1	2	7	1	2	3
-----------	---	---	---	---	---	---	---	---

Şekil 5. Tek Nokta Çaprazlama Tekniğinden Bir Örnek

Çift Nokta Çaprazlama: Rastgele iki tane çaprazlama noktası belirlenmektedir. Belirlenen iki nokta arasındaki değerler P1'den alınmaktadır. Bu iki nokta dışında kalan değerler ise P2'den tamamlanmaktadır. Şekil 6'da örnek bir uygulama görülmektedir.

P1	4	3	2	2	7	2	1	3
P2	3	2	1	2	5	1	2	3

C1	3	3	2	2	7	2	2	3
-----------	---	---	---	---	---	---	---	---

Şekil 6. Çift Nokta Çaprazlama Tekniğinden Bir Örnek

Tekdüze Çaprazlama: Maskeleye işlemi ile bir çaprazlama yapılmaktadır. 0 ve 1'lerden oluşan bir dizi ile maskeleye yapılmaktadır. 0 değerinde P2'den 1 değerinde P1'den eleman alınmaktadır. Bu şekilde bir çocuk oluşturulmaktadır. Şekil 7'de örnek bir uygulama görülmektedir.

P1	4	3	2	2	7	2	1	3
P2	3	2	1	2	5	1	2	3

Mask	0	1	1	0	0	1	0	1
-------------	---	---	---	---	---	---	---	---

C1	3	3	2	2	5	2	2	3
-----------	---	---	---	---	---	---	---	---

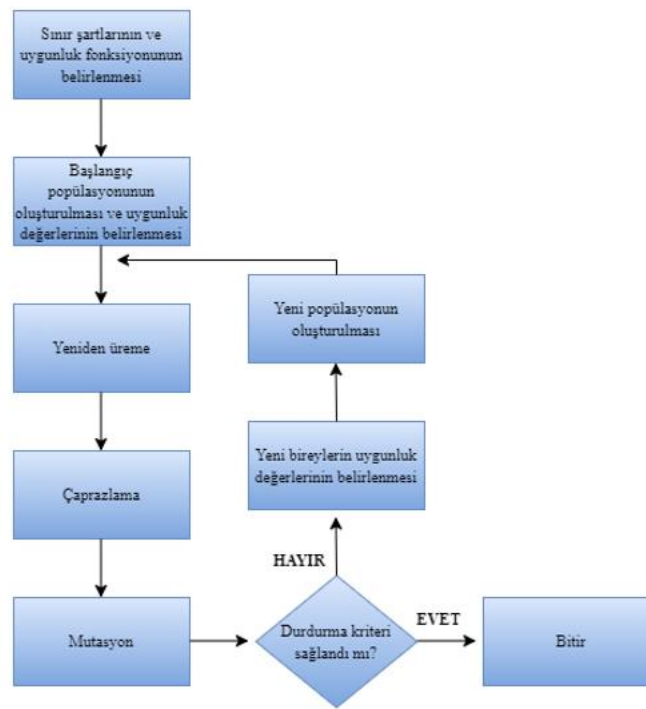
Şekil 7. Tekdüze Çaprazlama Tekniğinden Bir Örnek

Belirtilen problem boyutuna göre rastgele tam sayılar ile oluşturulan popülasyonda yinelenen değerler çıkarılarak eşsiz bireyler ile çalışılmıştır. Rastgele olarak oluşturulan bireyler uygunluk fonksiyonuna gönderilerek ESA'dan bir doğruluk değeri elde edilmiştir. Elde edilen en iyi ve en farklı sonuçlar kaydedilmiştir. Farklı değerler ile sonuçlar elde etmek için belirtilen çaprazlama teknikleri kullanılmıştır. Çaprazlama tekniklerinin farklı çalışma prensipleri ile popülasyonda farklı bireyler oluşturulmuştur. Çalışmanın isterleri tamamlandıktan sonra test edilme aşamasına geçilmiştir. Test aşamasında aynı hiper parametre değerlerine karşılık gelen farklı doğruluk değerleri elde edilmiştir. Bu tutarsızlık sorununu çözmek için ESA'nın ağırlık değerlerinin sabitlenmesi düşünülmüştür. ESA ağırlıkları

rng(123) komutu ile sabitlenmiştir. Bu şekilde aynı parametreler her eğitildiğinde aynı doğruluk değerini vermektedir. Fakat bu komutu ekledikten sonra popülasyon oluşumunda rassallık bozulduğu için rng('shuffle') komutu projeye eklenerek rassallık korunmuştur.

Genetik Algoritma

GA ilk olarak 1976 yılında John Holland tarafından ortaya atılmıştır. Holland, GA'nın teorik temellerini "Adaptation in Natural and Artificial Systems" adlı kitabında tanıtmıştır (Sampson, 1976). Bu kitap, evrimsel süreçlerin bilgisayar sistemlerinde nasıl uygulanabileceğini açıklayan ilk kapsamlı çalışmadır. John Holland, Michigan Üniversitesi'nde biyolojik evrim sürecinden esinlenerek doğal seleksiyon ilkesine dayalı bir hesaplama yöntemi geliştirmiştir. GA, özellikle karmaşık problemlerin çözümünde kullanılan, doğal seleksiyon, mutasyon ve çaprazlama gibi biyolojik süreçleri simüle eden bir optimizasyon yöntemidir. GA'nın başarısı, popülasyon büyüklüğü, jenerasyon sayısı, mutasyon ve çaprazlama oranları gibi hiper parametrelerin dikkatlice ayarlanmasına bağlıdır. Hiper parametre optimizasyonu, algoritmanın çözüm kalitesini ve işlem süresini doğrudan etkilemektedir. Şekil 8'de GA'nın akış şeması görülmektedir.



Şekil 8. GA Akış Şeması

Çalışmada, DA algoritması ve GA arasında kapsamlı bir karşılaştırma gerçekleştirilmiştir. Bu karşılaştırmanın sağlıklı ve adil olabilmesi için, her iki algoritma aynı parametreler, veri seti ve çaprazlama teknikleri kullanılarak çalıştırılmıştır. Böylece, her iki yöntemin performansını etkileyen faktörlerin eşitlenmesi sağlanmış ve daha anlamlı sonuçlar elde edilmiştir.

Veri seti, her iki algoritmanın genel performansını değerlendirmek için dikkatlice seçilmiş olup, hem GA hem de DA algoritması için optimize edilmiş sonuçların karşılaştırılmasına olanak tanımaktadır. Kullanılan çaprazlama teknikleri, algoritmaların çözüm uzayını keşfetme yeteneklerini artırmak amacıyla belirlenmiş ve her iki yöntemin farklı stratejilerini test etme fırsatı sunmuştur.

BULGULAR ve DENEYSEL SONUÇLAR

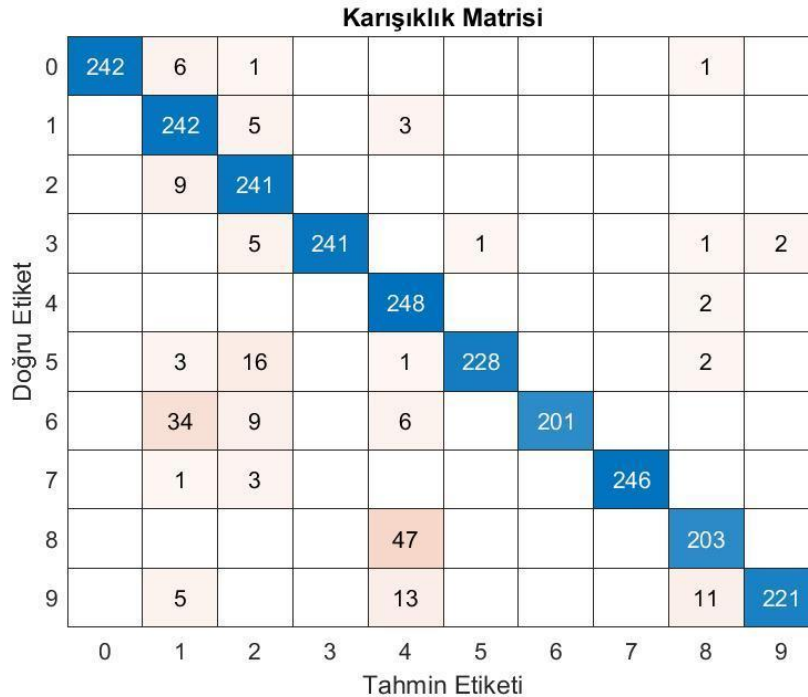
Projenin geliştirilme aşamasında GA ve DA algoritması için popülasyon boyutu (NP) 20, maksimum FEs değeri 1000, çalışma zamanı değeri 5 ve ESA devir değeri 10 olarak belirlenmiştir. Geng vd. (2016) çalışmasında, optimizasyon algoritmalarında popülasyon boyutunun probleme göre belirlendiği ve genellikle 20 - 50 arasında bir değer verildiği belirtilmiştir. Bu doğrultuda, optimize edilecek problem ve kullanılacak donanımın algoritmaların çalışma süresine etkisi göz önünde bulundurularak NP değerinin 20 olarak belirlenmesine karar verilmiştir. FEs değeri, algoritmanın çalışması sırasında değerlendirilen toplam çözüm sayısını ifade etmektedir. Her bir çözüm,

algoritmanın belirli bir problem için uygunluk veya maliyet fonksiyonunu değerlendirerek ne kadar iyi bir çözüm olduğunu belirlemektedir. Maksimum FEs değeri, algoritmanın ne kadar derinlemesine arama yapacağını ve dolayısıyla çözüm uzayını ne kadar kapsamlı bir şekilde keşfedeceğini belirlemektedir. Algoritmaların çalışma süresi ve donanım özellikleri dikkate alınarak, dengeli bir performans ve verimlilik sağlamak amacıyla maksimum FEs değeri 1000 olarak belirlenmiştir. Algoritmaların çalıştırılması ile en başarılı sonuç DA algoritmasından elde edilmiştir. DA algoritmasından elde edilen en yüksek uygunluk değeri yani ESA'dan elde edilen doğruluk değeri % 93.24'tür. GA'dan elde edilen en yüksek doğruluk değeri ise %88.76'dır. DA algoritması ve GA için en yüksek doğruluk değerlerini veren hiper parametre değerleri Tablo 3'te görülmektedir.

Tablo 3. En Yüksek Doğruluk Değerinin Elde Edildiği Hiper Parametre Değerleri

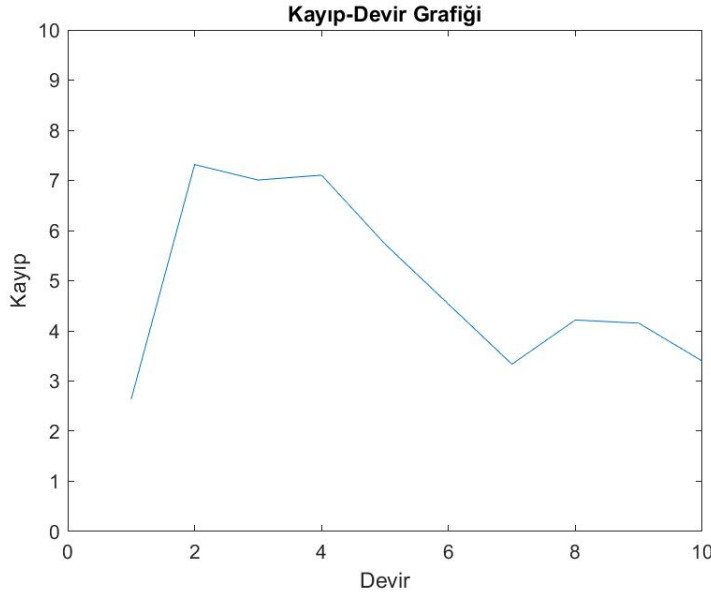
	Kanal Sayısı	Evrimsel Katman	Minimum Parti Boyutu	Öğrenme Oranı	Aktivasyon Fonksiyonu
(DA) Aday Çözüm	2	3	2	0 - 0.5 arası	1
(DA) Karşılık Geldiği Değer	16	5x5	64	0.0052	reluLayer
(GA) Aday Çözüm	3	2	2	0 - 0.5 arası	1
(GA) Karşılık Geldiği Değer	32	3x3	64	0.0185	reluLayer

En başarılı sonucun elde edildiği DA algoritması ile ESA modelinin başarısını değerlendirmek için, MNIST veri setindeki test verileri kullanılarak bir karışıklık matrisi hesaplanmıştır. Elde edilen karışıklık matrisi Şekil 9'da görülmektedir. Karışıklık matrisinde köşegenlerde bulunan değerler doğru tahminlerin sayısını ifade etmektedir. Karışıklık matrisi, sınıflandırma algoritmalarının performansını değerlendirmek için kullanılan bir metriktir. Bu matris, tahmin edilen sınıfların gerçek sınıflarla karşılaştırılmasını sağlamaktadır. Karışıklık matrisi kullanılarak, doğruluk, hassasiyet (precision), duyarlılık (recall) ve F1-skor değerleri hesaplanabilmektedir. Hassasiyet, pozitif olarak tahmin edilen örneklerin gerçekten pozitif olma oranıdır. Duyarlılık, gerçekten pozitif olan örneklerin ne kadarının pozitif olarak tahmin edildiğini göstermektedir. F1-skor, hassasiyet ve duyarlılık arasındaki dengeyi gösteren bir metriktir özellikle dengesiz olarak dağılmış veri setlerinde tercih edilmektedir. Karışıklık matrisine bakıldığında en başarılı sınıflandırma işleminin en fazla doğru tespit ile "4" sınıfına ait olduğu görülmektedir.



Şekil 9. Karışıklık Matrisi

Kayıp değeri, modelin tahminlerinin gerçek değerlerden ne kadar farklı olduğunu ölçen bir metriktir. 10 devir ile gerçekleştirilen eğitim sürecinde kayıp değerinin her devirdeki değişimi Şekil 10'daki grafikte görülmektedir.



Şekil 10. Kayıp Değerinin Değişim Grafiği

SONUÇ

Bilgisayarlı görü çalışmalarında hiper parametrelerin aldığı değerler elde edilen sonucu doğrudan etkilemektedir. Buradan yola çıkarak çalışmada çoklu sınıflandırma problemi için kullanılacak bir ESA tasarlanmıştır. ESA'dan verimli bir sonuç elde edebilmek için belirlenen bazı hiper parametrelerin optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Optimizasyon için literatürde yaygın olan algoritmalarından farklı olarak DA algoritması kullanılarak ESA ağının hiper parametre optimizasyonu gerçekleştirilmiştir. Çalışmanın özgünlüğü, DA algoritmasının ESA gibi derin öğrenme modellerinin hiper parametre optimizasyonunda kullanılmasıdır. Literatürde, GA, PSO ve yapay arı kolonisi gibi çeşitli evrimsel algoritmalar yaygın olarak kullanılırken, DA algoritmasının bu alandaki uygulaması sınırlı kalmaktadır. Buradan yola çıkılarak DA algoritması aynı parametreler, donanım ve veri seti üzerinden GA ile karşılaştırılmıştır. Yapılan testler sonucunda DA algoritmasının GA'dan daha başarılı sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Bu çalışma, DA algoritmasının hiper parametre optimizasyonunda etkili bir şekilde kullanılabileceğini göstererek literatüre önemli bir katkı sağlamaktadır. Ayrıca, çalışmada üç farklı çaprazlama tekniği kullanılmıştır. Bu yaklaşım, özellikle geniş çözüm alanlarında daha çeşitli ve yüksek kaliteli çözümler üretme potansiyeli sunarak, derin öğrenme modellerinin performansını artırma konusunda yeni bir perspektif sunmaktadır. Gerçekleştirilen optimizasyon sonucunda en iyi sonucu veren hiper parametreler belirlenerek ESA eğitiminde kullanılmıştır.

Gelecekteki çalışmalarda daha fazla çaprazlama tekniği ile farklı aday çözümler oluşturulması, kullanılan donanıma bağlı olarak ayrık ve sürekli değerlerin sayısı artırılması ve daha fazla hiper parametrenin optimize edilmesi önerilmektedir.

KAYNAKLAR

- Ait Amou, M., Xia, K., Kamhi, S., & Mouhafid, M. (2022, March). A novel MRI diagnosis method for brain tumor classification based on CNN and Bayesian Optimization. In *Healthcare* (Vol. 10, No. 3, p. 494). MDPI.
- Andonie, R., & Florea, A.-C. (2020). Weighted random search for CNN hyperparameter optimization. arXiv preprint arXiv:2003.13300.
- Anguita, D., Ghio, A., Oneto, L., Parra, X., & Reyes-Ortiz, J. L. (2013). A public domain dataset for human activity recognition using smartphones. Paper presented at the Esann.

- Aslan, M. F., Sabanci, K., Durdu, A., & Unlarsen, M. F. (2022). COVID-19 diagnosis using state-of-the-art CNN architecture features and Bayesian Optimization. *Computers in biology and medicine*, 142, 105244.
- Atteia, G., Abdel Samee, N., El-Kenawy, E. S. M., & Ibrahim, A. (2022). CNN-hyperparameter optimization for diabetic maculopathy diagnosis in optical coherence tomography and fundus retinography. *Mathematics*, 10(18), 3274.
- Bochinski, E., Senst, T., & Sikora, T. (2017). Hyper-parameter optimization for convolutional neural network committees based on evolutionary algorithms. Paper presented at the 2017 IEEE international conference on image processing (ICIP).
- Bozkurt, F., & Yağanoğlu, M. (2021). Derin evrişimli sinir ağları kullanarak akciğer X-Ray görüntülerinden COVID-19 tespiti. *Veri Bilimi*, 4(2), 1-8.
- Fujino, S., Mori, N., & Matsumoto, K. (2017). Deep convolutional networks for human sketches by means of the evolutionary deep learning. Paper presented at the 2017 joint 17th world congress of international fuzzy systems association and 9th international conference on soft computing and intelligent systems (IFSA-SCIS).
- Geng, J. C., Cui, Z., & Gu, X. S. (2016). Scatter search based particle swarm optimization algorithm for earliness/tardiness flowshop scheduling with uncertainty. *International Journal of Automation and Computing*, 13(3), 285-295.
- Glover, F. (1977). Heuristics for integer programming using surrogate constraints. *Decision sciences*, 8(1), 156-166.
- Gülcü, A., & Kuş, Z. (2019). A survey of hyper-parameter optimization methods in convolutional neural networks. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 7(2), 503-522.
- Hao, W., Yizhou, W., Yaqin, L., & Zhili, S. (2020, December). The role of activation function in CNN. In 2020 2nd International Conference on Information Technology and Computer Application (ITCA) (pp. 429-432). IEEE.
- Huang, D. S., Wunsch, D. C., Levine, D. S., & Jo, K. H. (Eds.). (2008). *Advanced Intelligent Computing Theories and Applications. With Aspects of Artificial Intelligence: Fourth International Conference on Intelligent Computing, ICIC 2008 Shanghai, China, September 15-18, 2008, Proceedings (Vol. 5227)*. Springer Science & Business Media.
- İnik, Ö. (2023). CNN hyper-parameter optimization for environmental sound classification. *Applied Acoustics*, 202, 109168.
- Kıymaç, M. E. (2022). Hyper-parameter optimization of deep neural networks with metaheuristic algorithms. *Yüksek Lisans Tezi, Alparslan Türkeş Bilim ve Teknoloji Üniversitesi*.
- Lorenzo, P. R., Nalepa, J., Kawulok, M., Ramos, L. S., & Pastor, J. R. (2017). Particle swarm optimization for hyper-parameter selection in deep neural networks. Paper presented at the Proceedings of the genetic and evolutionary computation conference.
- MNIST Dataset. (2010). <http://yann.lecun.com/exdb/mnist>.
- Mooney, P. T. Retinal OCT images (Optical coherence tomography). Kaggle. (2018). <https://www.kaggle.com/datasets/paultimothymooney/kermany2018>
- Özbay, E., & Özbay, F. A. (2023). Parçacık Sürüşü Optimizasyon Algoritması ile Optimize Edilmiş Evrişimsel Sinir Ağı Kullanılarak Dermoskopik Görüntülerden Cilt Kanserinin Sınıflandırılması. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 35(1), 261-273.
- Piczak, K. J. (2015). ESC: Dataset for environmental sound classification. Paper presented at the Proceedings of the 23rd ACM international conference on Multimedia.
- Porwal, P.; Pachade, S.; Kamble, R.; Kokare, M.; Deshmukh, G.; Sahasrabudhe, V.; Meriaudeau, F. Indian Diabetic Retinopathy Image Dataset (IDRiD): A Database for Diabetic Retinopathy Screening Research. *Data* 2018, 3, 25.
- Raziani, S., & Azimbagirad, M. (2022). Deep CNN hyperparameter optimization algorithms for sensor-based human activity recognition. *Neuroscience Informatics*, 2(3), 100078.
- Sakib, S., Ahmed, N., Kabir, A. J., & Ahmed, H. (2019). An overview of convolutional neural network: Its architecture and applications.

Salamon, J., Jacoby, C., & Bello, J. P. (2014). A dataset and taxonomy for urban sound research. Paper presented at the Proceedings of the 22nd ACM international conference on Multimedia.

Sampson, J. R. (1976). *Adaptation in natural and artificial systems* (John H. Holland).

Sethi, M., Ahuja, S., Rani, S., Bawa, P., & Zaguia, A. (2021). [Retracted] Classification of Alzheimer's Disease Using Gaussian-Based Bayesian Parameter Optimization for Deep Convolutional LSTM Network. *Computational and Mathematical Methods in Medicine*, 2021(1), 4186666.

Shankar, K., Zhang, Y., Liu, Y., Wu, L., & Chen, C. H. (2020). Hyperparameter tuning deep learning for diabetic retinopathy fundus image classification. *IEEE access*, 8, 118164-118173.

Tanyıldızı, E., & Demirtaş, F. (2019). Hiper Parametre Optimizasyonu Hyper Parameter Optimization. Paper presented at the 2019 1st International Informatics and Software Engineering Conference (UBMYK).

Yurdakul, M. (2022). Meta-sezgisel algoritmalar ile konvolüsyonel sinir ağı mimarisinin hiper parametrelerinin optimizasyonu. Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi.

ZainEldin, H., Gamel, S. A., El-Kenawy, E. S. M., Alharbi, A. H., Khafaga, D. S., Ibrahim, A., & Talaat, F. M. (2022). Brain tumor detection and classification using deep learning and sine-cosine fitness grey wolf optimization. *Bioengineering*, 10(1), 18.

Zhang, B., Rajan, R., Pineda, L., Lambert, N., Biedenkapp, A., Chua, K., ... & Calandra, R. (2021, March). On the importance of hyperparameter optimization for model-based reinforcement learning. In *International Conference on Artificial Intelligence and Statistics* (pp. 4015-4023). PMLR.

Zhang, M., Li, H., Pan, S., Lyu, J., Ling, S., & Su, S. (2021). Convolutional neural networks-based lung nodule classification: A surrogate-assisted evolutionary algorithm for hyperparameter optimization. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 25(5), 869-882.

Xiao, X., Yan, M., Basodi, S., Ji, C., & Pan, Y. (2020). Efficient hyperparameter optimization in deep learning using a variable length genetic algorithm. *arXiv preprint arXiv:2006.12703*.



Kahramanmaraş Sütçü İmam University

Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 01.06.2024
Kabul Tarihi : 19.07.2024

Received Date : 01.06.2024
Accepted Date : 19.07.2024

DETECTION OF DUST ON SOLAR PANELS WITH DEEP LEARNING

GÜNEŞ PANELLERİ ÜZERİNDEKİ TOZUN DERİN ÖĞRENME İLE TESPİTİ

*Tuba SEFER*¹ (ORCID: 0009-0002-5650-1683)
*Mahmut KAYA*² (ORCID: 0000-0002-7846-1769)

¹ Siirt University, Department of Computer Engineering, Siirt, Turkey

² Fırat University, Department of Artificial Intelligence and Data Engineering, Elazığ, Turkey

* Corresponding Author: Mahmut KAYA, mahmutkaya@firat.edu.tr

ABSTRACT

Solar energy is an environmentally friendly, clean, and sustainable alternative. The widespread use of this energy source offers excellent environmental and economic benefits. However, some factors affect the efficiency of solar panels. One of these factors is dust. When dust accumulates on the surface of solar panels, it can significantly reduce the efficiency of energy production. Therefore, detecting and quickly removing dust from solar panels is crucial. Managing this process with unmanned artificial intelligence systems, especially in large areas, will provide significant advantages in terms of time and cost. In recent years, convolutional neural networks have achieved significant success in image classification. In particular, transfer learning methods have proven their success in this field. In this study, we aim to solve a new task with limited data using pre-trained deep learning models (EfficientNetB3, ResNet50, MobileNet, VGG19, Xception, InceptionResNetV2, VGG16, ResNet101, DenseNet201, EfficientNetB7) to classify dirty and clean solar panels. These models were chosen because they each have different strengths and have performed well on various tasks. The models with the best performance among these models are combined to improve classification prediction. The proposed ensemble learning approach achieved 99.31% classification accuracy by considering the prediction results of the models with a voting approach. As a result, this approach aims to optimize the maintenance processes of solar energy systems, improve energy efficiency, and support sustainable energy use in the long term.

Keywords: Deep learning, energy efficiency, sustainable energy, transfer learning, ensemble learning

ÖZET

Güneş enerjisi, temiz ve sürdürülebilir bir enerji kaynağı olarak çevre dostu bir alternatiftir. Bu enerji kaynağının yaygınlaşması, hem çevre hem de ekonomik açıdan büyük faydalar sunar. Ancak, güneş panellerinin verimliliğini etkileyen bazı unsurlar vardır. Bu unsurlardan biri de tozdur. Toz, güneş panellerinin yüzeyine biriktiğinde enerji üretim verimliliğini önemli ölçüde düşürebilir. Bu nedenle, güneş panellerindeki tozun tespiti ve hızlı bir şekilde temizlenmesi büyük önem taşır. Özellikle geniş alanlarda bu sürecin insansız yapay zekâ sistemleriyle yönetilmesi, hem zaman hem de maliyet açısından önemli avantajlar sağlayacaktır. Son yıllarda evrimsel sinir ağları görüntü sınıflandırma konusunda önemli başarılar elde etmiştir. Özellikle transfer öğrenme yöntemleri bu alanda başarısını kanıtlamıştır. Bu çalışmada, kirli ve temiz güneş panellerini sınıflandırmak için önceden eğitilmiş derin öğrenme modellerini (EfficientNetB3, ResNet50, MobileNet, VGG19, Xception, InceptionResNetV2, VGG16, ResNet101, DenseNet201, EfficientNetB7) kullanarak sınırlı veri ile yeni bir görevi çözmeye amaçlanmaktadır. Bu modellerin seçilme nedeni, her birinin farklı güçlü yönlere sahip olması ve çeşitli görevlerde başarılı performans sergilemiş olmalarıdır. Bu modeller arasında en iyi performansa sahip modeller, sınıflandırma tahminini iyileştirmek için birleştirilmiştir. Önerilen topluluk öğrenme yaklaşımı, modellerin tahmin sonuçlarını oylama yaklaşımıyla ele alarak %99,31 sınıflandırma doğruluğuna ulaşmıştır. Sonuç olarak, bu yaklaşım güneş enerjisi sistemlerinin bakım süreçlerini optimize etmeyi, enerji verimliliğini artırmayı ve uzun vadede sürdürülebilir enerji kullanımını desteklemeyi amaçlamaktadır.

ToCite: SEFER, T. & KAYA, M., (2024). DETECTION OF DUST ON SOLAR PANELS WITH DEEP LEARNING. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 27(4), 1451-1464.

Anahtar Kelimeler: Derin öğrenme, enerji verimliliği, sürdürülebilir enerji, transfer öğrenme, topluluk öğrenme

INTRODUCTION

Solar energy emerges as an environmentally friendly, sustainable, and economical energy source. Both in Turkey and worldwide, solar energy utilization is steadily increasing. Solar energy contributes significantly to clean energy production and energy security. Countries can reduce their dependence on external energy sources by investing in solar energy, consequently diminishing reliance on fossil fuels. Despite its importance, various factors can affect the efficiency of solar panels, with dust accumulation on panel surfaces being a prominent concern (Çetin et al., 2019).

Dust accumulation can reduce sunlight absorption, consequently lowering energy production. Hence, regular detection and cleaning procedures regarding solar panel dust are crucial to ensure maximum system efficiency. Dust detection on solar panels can be performed through automatic systems or observers. These detections are vital for ensuring regular maintenance of panels, minimizing energy loss, and facilitating long-term sustainable energy production. Thus, emphasizing the general advantages of solar energy and the importance of dust detection and cleaning measures for panels constitutes a comprehensive energy strategy.

In recent years, deep learning-based approaches have successfully classified image data (Kaya et al., 2022; Utku et al., 2024). These methods are used in medical diagnostics, autonomous vehicles, various tasks, and almost every field today to classify objects and categories automatically. (Şenol et al., 2021). Deep learning approaches, which offer successful solutions in many vital areas, offer the potential to accelerate dust detection processes on solar panels, thereby enhancing energy efficiency. Deep learning models, which achieve more effective and accurate results than traditional methods, can effectively determine the degree of panel dusting and assist in optimizing maintenance processes. Consequently, using artificial intelligence systems, solar energy systems can operate more sustainably, durable, and efficiently.

There is considerable research in the literature to detect dirt on solar panels and thus improve efficiency. Davaadorj, et al.'s study, focuses on distinguishing various types of contaminants on solar panels. They utilized a Convolutional Neural Network (CNN) for this classification task, employing the Solar Panel Dust dataset generated by Deep Solar Eye, a pre-trained dataset. This dataset comprises a total of 45,649 images of solar panels and defines six distinct contamination categories, which are thoroughly analyzed. The dataset is divided into 70% for training, 20% for validation, and 10% for testing. The model used in this study is a nine-layer CNN. Although the training was initially set for 50 epochs, it was halted at the 19th epoch due to early stopping. The test results demonstrated a classification accuracy of 98%, highlighting the model's capability to identify different types of contaminants accurately. This success rate indicates the model's efficiency in recognizing various contaminant types on solar panels. The proposed method offers an effective solution for automatically identifying contaminants on solar panels (Davaadorj et al., 2021).

In the study conducted by Dwivedi and colleagues, reference is made to a dataset named "Solar Panel Soiling Image Dataset" for identifying defects in solar panels. This dataset, prepared by Deep Solar Eye, comprises 45,469 images. The images were captured every 5 seconds by an RGB camera, with a resolution set to 192×192 pixels. The dataset includes images captured under various artificial conditions representing potential soiling scenarios on solar panels. Additionally, various defect types representing soiling conditions were downloaded from Google. These defect types include bird droppings or nests, snow covering, cracks, shadows from trees, plants, or buildings, and hardened cement. The images were then resized to a resolution of 72×72 pixels and used for advanced image processing. In total, 4110 images were labeled according to the type of defect. The study utilized five different models, including MobileNet, VGG16, Xception, EfficientNetB7, and ResNet50, as well as the proposed VIT architecture. After 100 epochs, MobileNet achieved an accuracy of 88%, VGG16 92%, Xception 93%, EfficientNetB7 94%, ResNet50 96%, and the VIT architecture demonstrated the highest performance with an accuracy rate of 98.7%. The proposed VIT architecture in this study provides an effective solution for identifying defects in solar panels, achieving the highest accuracy rate (Dwivedi et al., 2024).

Ferrell and Anderson examine the fundamental stages of a machine learning project to determine the cleanliness status of solar panels. The study begins with data inspection and cleaning, aiming to develop a classifier to

differentiate between clean and dusty panels. In this phase, inconsistencies and abnormal data points in the datasets are identified to contribute to developing a robust classifier. In the feature engineering stage, various preprocessing steps are applied to images to distinguish between clean and dusty panels and eliminate misleading images. Different convolutional neural network (CNN) configurations are explored during the model training process, and the training accuracy, test accuracy, and overfitting conditions are evaluated to select the most suitable model. The MobileNet model is highlighted for its high accuracy and low computational complexity. Additionally, the performance of pre-trained models on the extensive ImageNet dataset is examined. Comparisons among MobileNet, VGG 16, VGG19, InceptionNet, and Xception architectures demonstrate the impressive overall performance of MobileNet, particularly suitable for real-time applications. Finally, an in-depth analysis of the MobileNetV2 model in the study indicates that it does not meet the performance of the initial MobileNet model. Consequently, it is concluded that the MobileNet model is the most suitable for real-time applications and predictions, achieving a 79% accuracy rate (Ferrell & Anderson, 2023).

In Maity and colleagues' study, the adverse impact of dust accumulation on the electricity generation performance of solar panels is emphasized. The amount and size of dust accumulation obstruct the sunlight reaching the surface of solar panels, leading to power loss. As a solution to this issue, a Convolutional Neural Network (CNN)-based approach for dust detection is proposed. The suggested method involves the LeNet model trained on a labeled dataset consisting of images of dusty solar panels. This dataset, obtained from experimental setups, includes 30,000 solar panel images and voltage and current measurements to determine the effect of dust on panel performance as a power loss percentage. Additionally, data augmentation techniques are applied to this dataset. The dataset containing various types of dust, such as red soil, sand, white cement, and calcium carbonate, is used to understand and detect dust accumulation effects. The proposed CNN model is designed as a deep learning technique inspired by the visual cortex, capable of effectively operating on image data. The model obtained during the training process aims to identify dusty areas and determine the performance loss in solar panels. In their study, the proposed LeNet architecture achieved an accuracy rate of 80% (Maity et al., 2020).

In the study conducted by Onim and colleagues, the performance of SolNet, a specially developed CNN model for detecting dust accumulation on solar panels, is examined. The study introduces a dataset containing images of Bangladesh solar panels with different levels of dust. After collecting 2231 images, the data were sorted to classify 1130 images as clean and 1101 as dirty. Subsequently, all randomly shaped original images were resized to $227 \times 227 \times 3$ dimensions. The SolNet model was tested in experiments compared to SOTA (State-of-the-Art) models. The proposed model achieved high success with 98.2% accuracy and 1.12 loss after 30 epochs with 56 million parameters. Additionally, it was noted that the model outperformed others with its low parameter count and training time. In the future, it is recommended to enhance the universality of SolNet by training it with datasets obtained from various regions worldwide and working with an expanded dataset including various types of pollutants (Onim et al., 2023).

Prabhakaran and his team presented a Real-Time Multi-Variable Deep Learning Model (RMVDM) developed to detect and classify photovoltaic (PV) panel faults. The method's performance was evaluated using real-time PV images at the Science and Technology Institute. Three different datasets were used in the study: one containing 500, another containing 1000, and the third containing 2000 images. RMVDM aims to detect and localize faults such as hotspots, cracks, dust, and micro-cracks. This study uses the Region-Based Histogram Approach (RHA) algorithm for processing datasets. Preprocessed images are processed using the Gray Tone Quantization Algorithm (GSQA), followed by feature extraction. Extracted features are trained with a Multi-Variable Deep Learning model containing neural structures for different classes. During the testing phase, input images undergo various operations, and the extracted features are passed to the trained model. The output layer measures a series of Fault Class Supports (DCS) to determine the fault class in the image. Additionally, RMVDM uses the Higher-Order Texture Localization (HOTL) technique to localize the fault. The proposed RMVDM model achieves high accuracy rates for different image datasets: 87% for 500 images, 88% for 1000 images, and 97.6% for 2000 images. This results in effective outcomes with high accuracy and low time complexity (Prabhakaran et al., 2023).

Selvi and other researchers conducted a study on detecting pollution in solar panel modules using deep learning. In this study, data was collected from a 15 kW solar energy system on an institute campus over six months, and a total of 300 images were used; 200 were clean, and 100 were dirty. Data augmentation techniques were employed to increase the number of images, which were then cleaned and classified. The MobileNetV2 network was pre-trained and achieved a 97% success rate on the dataset. However, the proposed method struggled to detect small areas of

pollution accumulation, and class imbalance affected the model's training, necessitating improvements. To enhance the model's generalization ability and achieve better results, the study suggests using more diverse data and carefully adjusting parameters during the training process (Selvi et al., 2023).

The study by Zyout and Oatawneh leveraged convolutional neural network (CNN) models to characterize the surface of photovoltaic (PV) panels and detect defects. The study utilized a solar panel image dataset from popular online sources such as Google, Bing, and Yahoo. This dataset comprises 599 images, with 326 representing various defects and 273 depicting normal and functional solar panels. The images were resized to dimensions of 227x227x3. The research emphasizes the importance of appropriate inspection approaches in solar panel production. It focuses on the possibility of panels being damaged or soiled due to challenging operating conditions, damage, and dirt. It highlights the potential of deep learning and CNNs for solar panel defect inspection and detection alongside electroluminescence (EL), thermal or infrared (IR), and RGB images. Pre-trained models, including AlexNet, VGG-16, VGG-19, Inception V3, Xception, and ResNet-50, were explored in the study. The results indicate the promising performance of transfer learning applied to AlexNet, achieving a 93.3% accuracy rate in detecting various defects on the surface of solar panels, thus demonstrating the potential of this approach (Zyout and Oatawneh, 2020).

This study aims to classify dusty and clean solar panels using deep transfer learning methods. Its goal is to create a new model by combining pre-trained transfer learning models to determine the cleanliness status of solar panels. The obtained models aim to optimize maintenance processes and improve the energy efficiency of solar energy systems. Additionally, the study is expected to contribute to sustainable energy usage.

The following section summarizes the dataset used in the study, the ten deep transfer learning methods, and their general architecture. The proposed ensemble learning method and performance evaluation metrics are explained in the same chapter. The experimental results section provides the processes applied to the dataset, the accuracy and loss figures obtained in the study, and the real and predicted values to understand better the test success of the ten transfer learning methods used. Additionally, information about the proposed method is given, and confusion matrices, accuracy rates, and classification reports obtained through the proposed method are presented. Comparative accuracy rates for the ten transfer learning methods are provided in tabular form to compare them with the proposed method. Finally, in the last section of the study, a general evaluation is made, and some suggestions are provided based on the findings obtained in this study.

MATERIALS AND METHODS

The Dataset

The dataset used in this study was created by collecting images of dirty and clean solar panels in various locations in Bangladesh (Onim et al., 2023). The fact that this dataset has images taken in different locations will allow us to evaluate different amounts of dusty solar panels. The dataset has 722 clean and 718 dirty images, totaling 1440 solar panel images. The nine images of dusty and clean solar panels in the data set are given in Figure 1.

All images in the dataset used in this study have different dimensions. These images were resized to 224 x 224 x 3 and made suitable for the input data. Since the number of images of dusty and clean solar panels in the dataset is almost equal, no data balancing was performed. After resizing the images, the dataset was divided into three groups: 70% training, 20% test, and the remaining 10% validation data. The data set is divided into groups, as shown in Table 1.

Table 1. Splitting the Dataset into Training-Testing-Validation

Total number of images	Training	Test	Validation
1440	1008	144	288



Figure 1. Image and Label Values Belonging to the Dataset.

Hardware and Software Environment

This study was conducted in the Google Colab environment. Google Colab provides users with a cloud-based service offering free GPU (Graphics Processing Unit) resources. This platform enables the execution of Python-based projects and training deep learning models with free GPU capabilities (Kanani & Padole, 2019). The study was created using Python code written on Jupyter notebooks within Google Colab. The dataset used, and all labels were saved to Google Drive through code, and these resources were utilized. Additionally, deep learning models were created and trained using TensorFlow's Keras API in this study.

Deep Transfer Learning Architectures

Deep transfer learning is a machine learning technique that enables knowledge acquired in one task to be utilized in another task (LeCun et al., 2015). Typically, it involves reusing a model trained on large datasets for similar tasks with smaller datasets, thereby achieving better results with less data. Deep transfer learning is particularly effective in training neural network models. This strategy involves taking the feature extractor part of a pre-trained model and using it to train the model with less data for a new task (Pan & Yang, 2009).

In this study, after preprocessing the dataset, ten different deep transfer learning architectures, including EfficientNetB3, EfficientNetB7 (Tan & Le, 2019), ResNet50, ResNet101 (He et al., 2016), MobileNet (Howard et al., 2017), VGG16, VGG19 (Simonyan & Zisserman, 2014), Xception (Chollet, 2017), InceptionResNetV2 (Szegedy et al., 2017), DenseNet201 (Huang et al., 2017), and were trained and tested on the same training and test datasets over 20 epochs. Various performance metrics were used to evaluate the performance of these architectures, including classification reports showing accuracy, F1 score, precision, and recall values. Additionally, graphs illustrating the changes in accuracy and loss values over the 20 epochs were generated.

Furthermore, to visualize each model's prediction performance on the test dataset, 12 images were printed on the screen in a 4 x 3 matrix format, showing the predicted and actual label values. This comprehensive evaluation using

different performance metrics gave a clearer understanding of which models performed better and which performed worse.

Ensemble Learning

Ensemble learning is a learning paradigm that creates a more robust and balanced model by combining a series of models (Saqlain et al., 2019). This method is used to surpass the performance of a single model and typically aims to achieve better generalization capabilities, categorized into various subtypes. Voting is an essential stage of the ensemble learning used in this study. Ensemble learning enables various models to work together to make more accurate predictions. This method combines predictions from different models using the voting principle, reaching the final result (Sewell, 2008). The dataset is first preprocessed using this approach and then divided into training, test, and validation sets. These steps allow the data to be used more efficiently and the models to make more accurate predictions.

This study's ten transfer learning models were trained on these preprocessed datasets. Transfer learning models are deep learning models usually pre-trained on large and diversified datasets. They have the advantage of being trained more quickly and effectively on new tasks. Once the training process was complete and the models reached a particular learning success, each model made predictions on the test dataset.

At this point, the predictions made by each model independently were recorded for evaluation using the Voting method. The Voting method aims to obtain more reliable and accurate results by combining various model predictions. This method is based on a majority decision of the predictions from different models. That is, when determining which class each data point belongs to, the majority of models recommend choosing whichever class. From the recorded model predictions, combinations of triples were created, and their label values were combined. Since each combination reflects the perspective of different models, this method helps minimize the errors a single model can make.

For each image in the test dataset, a new label value is assigned according to the majority label determined by the Voting method. This process means determining the most reliable result from the predictions from the various models. Finally, to measure the label prediction success of these combinations, the label values of each combination are compared with the actual label values of the test dataset. Thus, the prediction success is measured, and the results are analyzed.

The results obtained using various performance evaluation metrics are presented. Performance evaluation metrics are critical to understanding how well the models work and where improvements are needed. Figure 2 schematically shows the details of the method and process proposed in this study. The diagram visually summarizes how the method is implemented and what is done at each stage.

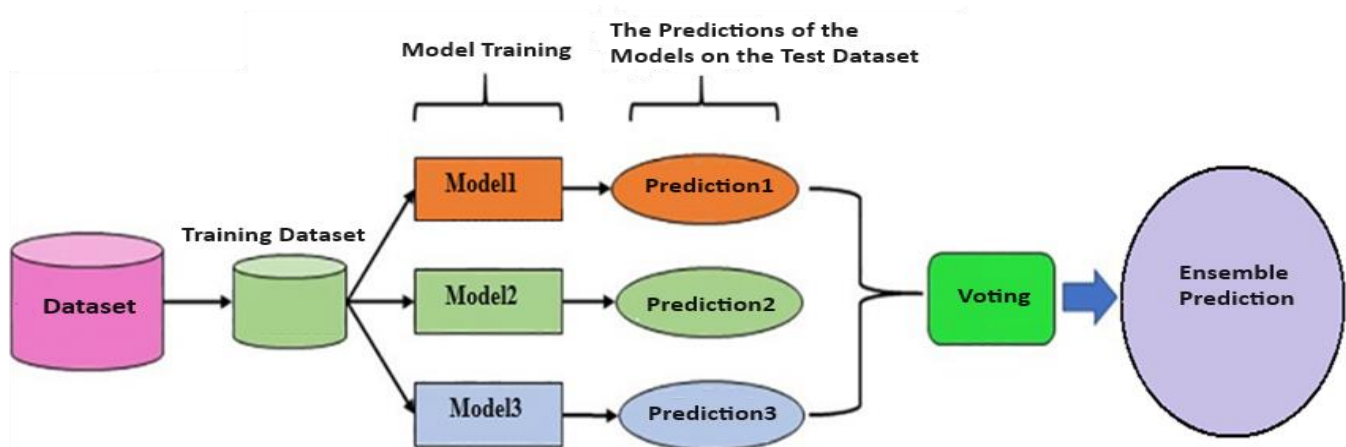


Figure 2. Schematic Description of the Proposed Method

Performance Evaluation

Evaluating the success and effectiveness of a study and understanding the performance of any model is a crucial step. These evaluations are conducted to determine the accuracy of applications, rectify errors, and provide guidance for future improvements. Utilizing performance evaluation metrics is essential to offer valuable insights to researchers and practitioners.

This study employs various performance evaluation metrics, including confusion matrix, precision, recall, F1 score, and accuracy. The confusion matrix is utilized to assess the performance of a classification model by illustrating the relationship between actual and predicted classes (Mete et al., 2020). Precision indicates the proportion of correctly predicted instances among those predicted to belong to a certain class. Recall, on the other hand, demonstrates the proportion of truly belonging instances to a specific class that was correctly predicted (Yarğı & Postalcioglu, 2021). The F1 score, which is the harmonic mean of precision and recall, is commonly used to evaluate a model's performance, especially in imbalanced datasets. Finally, accuracy represents the percentage of correctly classified instances among all predicted instances (Sokolova et al., 2006). These metrics collectively provide a comprehensive understanding of the performance of the models utilized in the study, aiding in comparisons and determining the degree of success of the applied method.

$$Accuracy = \frac{TP + TN}{TP + FP + TN + FN} \quad (1)$$

$$Precision = \frac{TP}{TP + FP} \quad (2)$$

$$Recall = \frac{TP}{TP + FN} \quad (3)$$

$$F1\ Score = 2 \times \frac{TP + TN}{TP + FP + TN + FN} \quad (4)$$

EXPERIMENTAL STUDIES AND RESULTS

This study uses a dataset of solar panels from different regions of Bangladesh. The study aims to classify clean and dirty images in the dataset. The dataset consists of 1440 images in total. 70% of the dataset is allocated for training, 20% for testing, and 10% for validation. The images are of different sizes and resized to 224 x 224 x 3 for standardization. Ten pre-trained convolutional neural network (CNN) models (EfficientNetB3, ResNet50, MobileNet, VGG19, Xception, InceptionResNetV2, VGG16, ResNet101, DenseNet201, and EfficientNetB7) were used to classify the images.

Training and validation processes were carried out for each model in the training phase. The training process was successful, and performance evaluations were performed on the test dataset. The accuracy and loss value changes for each model were tracked for 20 epochs, and graphs were created. In the initialization phase, the images in the dataset were trained and tested separately with each transfer learning method. Accuracy and loss graphs for the ten trained models are given in Figure 3 and Figure 4. As can be seen from the training and test graphs in Figure 3 and Figure 4, the models gain better learning at each step. Among the models, InceptionResNetV2 has difficulty in learning. As a result of this learning, as can be seen in Table 2, InceptionResNetV2 achieved lower classification accuracy than the other models.

After the training phase was completed, the performance of each model on the test data was analyzed. Each model's accuracy, precision, recall, and F1 score performance results were analyzed and presented in Table 2 to evaluate the test results. According to Table 2, the ResNet101 model has the highest accuracy (97.92%) and F1 score (97.86%) value. EfficientNetB7 and DenseNet201 achieved the highest recall results (97.87%), while ResNet50 achieved the best precision value (99.26%).

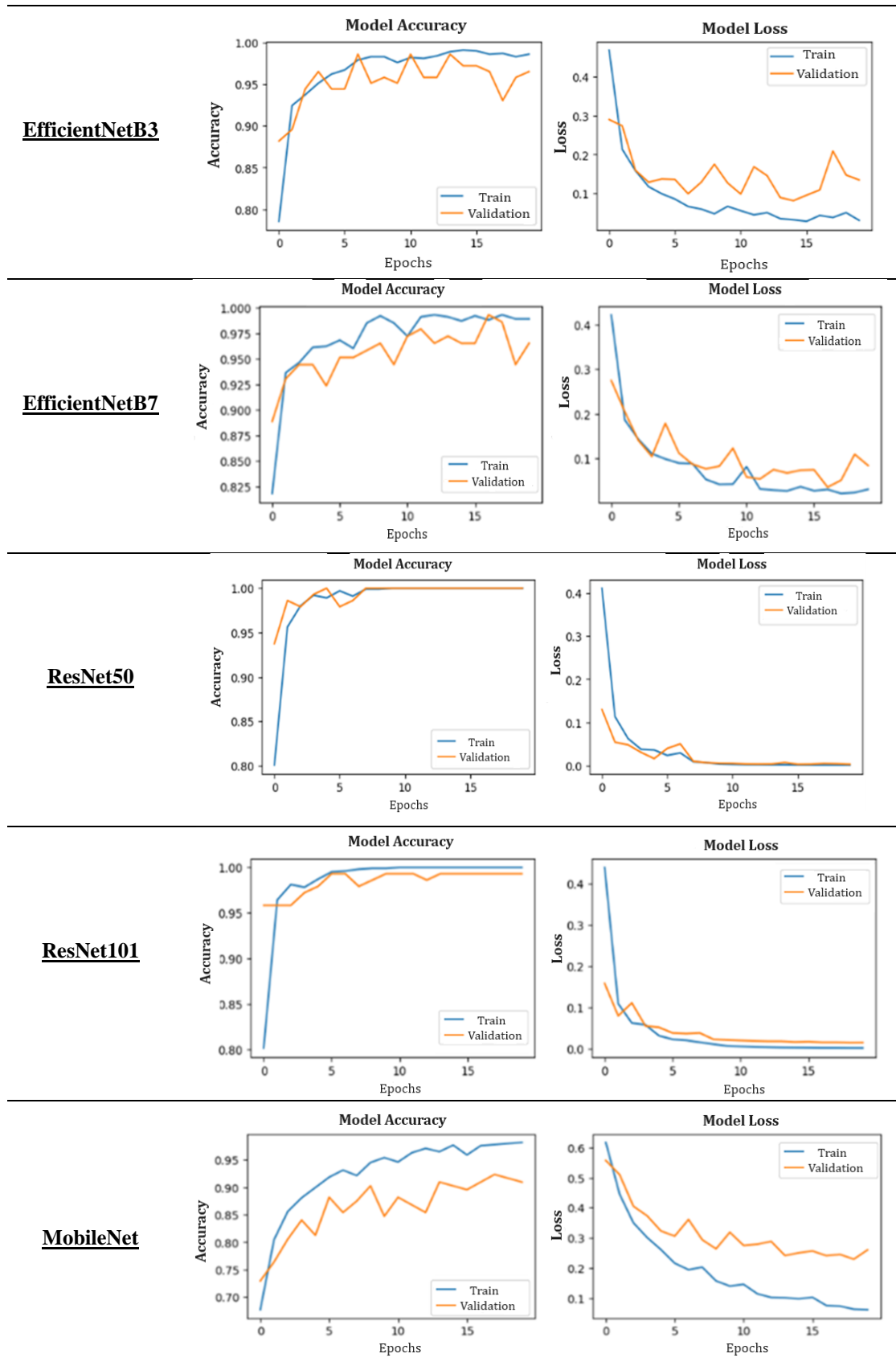


Figure 3. Accuracy and Loss Graphs for EfficientNetB3, EfficientNetB7, ResNet50, ResNet101, and MobileNet

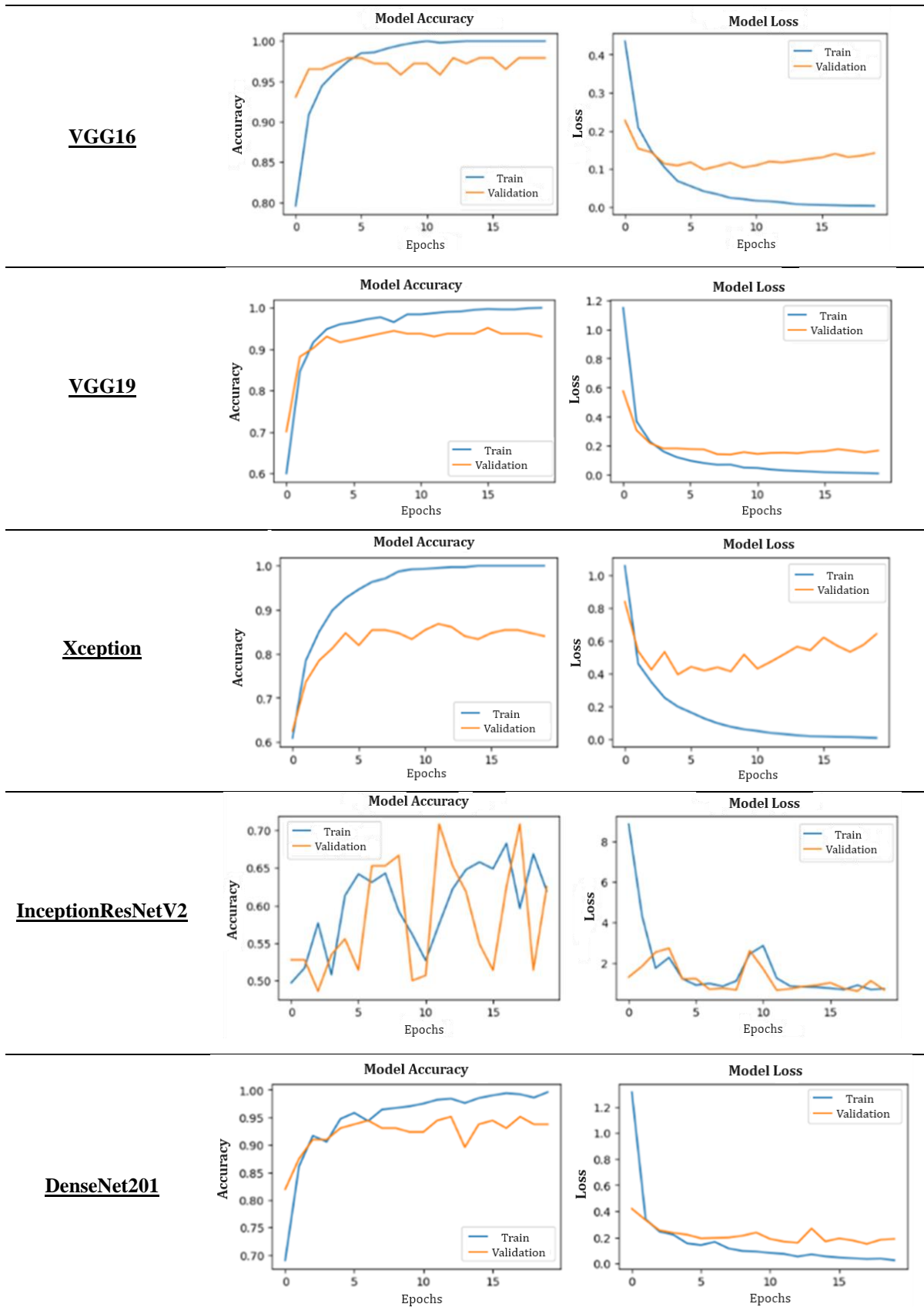


Figure 4. Accuracy and Loss Graphs for VGG16, VGG19, Xception, InceptionResNetV2, and DenseNet201

Table 2. Presents the Success Rates of Performance Evaluation Etrics for All Models (%)

Model	Accuracy	Precision	Recall	F1-Score
EfficientNetB3	96.53	97.12	95.74	96.43
EfficientNetB7	96.53	95.17	97.87	96.50
ResNet50	97.57	99.26	95.74	97.47
MobileNet	92.71	94.12	90.78	92.42
VGG19	94.10	96.97	90.78	93.77
Xception	85.76	86.76	83.69	85.20
InceptionResNetV2	65.97	60.49	87.94	71.68
VGG16	96.18	97.79	94.33	96.03
ResNet101	97.92	98.56	97.16	97.86
DenseNet201	96.18	94.52	97.87	96.17

Experimental Results of the Proposed Method

In the first phase of this study, ten different transfer learning models were trained on the same training dataset and tested on the same test dataset. To evaluate the success of the predictions Of each model on the test dataset, classification reports, accuracy and loss graphs on the training and validation datasets, and the final accuracy rate of each model are given. After analyzing the success rates of these models, the study aims to perform a prediction with an ensemble learning approach to increase this success. The proposed method uses a voting method by combining different transfer learning approaches. This approach records the predictions of ten models on the test dataset, and three combinations of these predictions are generated. The most frequently occurring label in these combinations was determined as the new prediction label value. The results were re-evaluated using these triple combinations on the entire test dataset.

The accuracy, precision, recall, and F1-Score results of the top five combinations with the best results are shown in Table 3 to evaluate the performance results of the proposed method. Proposed Method 1 (EfficientNetB3, VGG16, DenseNet201) and Proposed Method 2 (EfficientNetB3, ResNet101, DenseNet201) achieved the best accuracy, recall and F1-Score performance values. Proposed Method 3 (VGG16, ResNet101, ResNet50) and Proposed Method 4 (VGG16, ResNet101, EfficientNetB7) obtained the best precision values. EfficientNetB3, DenseNet201, ResNet101, and VGG16 methods individually achieved over 96% classification accuracy. With the triple voting technique, these methods achieved 99.31% classification accuracy. When we look at the results, we can see that the combination of the models that achieved the best results individually has resulted in a more successful result. The results also show the reliability of the voting method used.

Table 4 shows the studies in the literature on dust detection in solar panels and the classification accuracy results of the proposed method. As seen in Table 4, Dwivedi et al. obtained the highest classification accuracy for dust detection in solar panels in previous studies, 98.7%. This study obtained 99.31% classification accuracy with the ensemble learning approach, which evaluates the predictions of transfer learning approaches together. The proposed method achieves the best result, demonstrating its robustness in detecting dirt on solar panels.

Table 3. The Success Rates of Performance Evaluation Metrics for the Top 5 Combinations

Combinations	Accuracy	Precision	Recall	F1-Score
EfficientNetB3, VGG16, DenseNet201	%99.31	%99.29	%99.29	%99.29
EfficientNetB3, ResNet101, DenseNet201	%99.31	%99.29	%99.29	%99.29
VGG16, ResNet101, ResNet50	%98.96	%100	%97.87	%98.92
VGG16, ResNet101, EfficientNetB7	%98.96	%100	%97.87	%98.92
EfficientNetB3, VGG16, ResNet101	%98.61	%99.28	%97.87	%98.57

Table 4. Studies on Dust Detection in Solar Panels in the Literature

The Method	Year	Accuracy
AlexNet (Zyout ve Oatawneh., 2020)	2020	% 93.3
LeNet (Maity et al., 2020)	2020	% 80.0
CNN (Davaadorj et al., 2021)	2021	% 98.0
MobileNetV2 (Ferrell ve Anderson., 2023)	2023	% 79.0
SolNet (Onim et al., 2023)	2023	% 98.2
RMVDM (Prabhakaran, 2023)	2023	% 97.6
MobileNetV2 (Selvi et al., 2023)	2023	% 97.0
ViT (Dwivedi et al., 2024)	2024	% 98.7
The Proposed Method	2024	%99.31

DISCUSSION

Deep transfer learning architectures can achieve different results depending on the applied dataset. For this purpose, in the proposed work, experiments are conducted on various models and EfficientNetB3, ResNet50, MobileNet, VGG19, Xception, InceptionResNetV2, VGG16, ResNet101, DenseNet201, and EfficientNetB7 models are included for comparison. Many models were tested to determine the most appropriate model among these models, and only the results were included after sufficient results were obtained. The models used in this study are limited to the success of this dataset, and it is possible to obtain different results on other datasets.

While the deep learning models used achieved excellent results overall, the InceptionResNetV2 model achieved the lowest classification accuracy. Unlike the low accuracy result, the InceptionResNetV2 model achieved a better result in the Recall metric, which indicates the classification result for a single class. In addition, the Xception model also achieved relatively low success compared to other methods. ResNet101 deep learning architecture achieved the best classification accuracy and F1-Score result. The ResNet50 model achieved the best result in the Precision metric, while EfficientNetB7 achieved the best result in the Recall metric.

Ensemble learning is a powerful and efficient machine learning technique that combines predictions from multiple models to improve overall performance, accuracy, and robustness in classification tasks. By addressing the strengths and minimizing the weaknesses of individual models, ensemble methods often aim to achieve better results than a single model. One popular ensemble technique is voting, where multiple models are trained independently, and their predictions are aggregated to make a final decision. In classification tasks, this is realized as majority voting, where each model votes for a class label, and the class with the most votes is chosen as the final prediction. In this study, the voting technique combines the prediction results of three different models to improve

classification performance. In future studies, the voting technique can be further improved by assigning weights to the models according to their accuracy and giving more influence to more reliable models. In this way, the voting technique can be improved by emphasizing the contributions of more robust models.

The dataset used in this study comprises images of clean and dirty solar panels collected from various locations in Bangladesh, introducing variability in dust levels. Deep transfer learning methods were employed to address these biases, which are robust to regional and environmental variations. These methods are effective due to their end-to-end learning approach, enabling them to extract relevant features directly from raw data without being significantly influenced by external factors. This ensures that the features derived are well-suited to the nature of the data, thereby mitigating the impact of regional or environmental biases on the model's performance.

The dataset consists of 1440 images in total. 70% of the dataset is allocated for training, 20% for testing, and 10% for validation. The large number of data is an important advantage in increasing the model's success. Although data augmentation techniques were not used due to the success achieved in this study, it may be possible to increase the success with various data augmentation techniques. In addition, proposing a more robust and successful model with data from new countries other than Bangladesh may be possible.

Detection and cleaning of dust accumulated on the surface of solar panels is a critical requirement to improve the efficiency of solar energy systems. The proposed AI-assisted classification and cleaning systems automate the maintenance processes of large solar farms, minimizing the need for human intervention. This results in considerable savings in terms of both time and cost. In addition, increased energy production efficiency encourages more efficient use of renewable energy sources. In particular, using deep learning models supported by transfer learning methods enables high-accuracy results with limited data. In this way, cleaning and maintenance of solar panels can be performed more efficiently, increasing the continuity and reliability of energy production. In the long term, such advanced technology applications play an important role in achieving sustainable energy goals and supporting environmental sustainability efforts.

RESULTS

This study uses ten deep transfer learning models to classify clean and dusty images in solar panels. These models are EfficientNetB3, ResNet50, MobileNet, VGG19, Xception, InceptionResNetV2, VGG16, ResNet101, DenseNet201 and EfficientNetB7. Each model is trained on clean and dusty images, and predictions are made on the test dataset. The prediction results are compared with the actual results, and the performance of each model is evaluated using criteria such as accuracy, precision, recall, and F1-Score. As a result of this evaluation, the highest accuracy rate was obtained with the ResNet101 model, at 97.92%.

After the initial results were obtained, the study aimed to improve the classification performance with the proposed ensemble learning method. For this purpose, different transfer learning methods were combined, and predictions were made using a voting method. The results obtained with this prediction approach, created by combining three combinations of three, were evaluated with accuracy, precision, recall, and F1-Score criteria. After testing all combinations, the best results were obtained with EfficientNetB3, VGG16, DenseNet201 and EfficientNetB3, ResNet101, and DenseNet201 combinations.

Based on the results of this study, a larger dataset could be recommended to improve model performance further. Integrating data from different geographical regions and weather conditions and investigating newer transfer learning models can also improve performance. Furthermore, evaluating the developed models for real-time applications can make significant contributions.

ACKNOWLEDGMENTS

This article is based on Tuba SEFER's Master's thesis entitled "Dust detection on solar panels with deep learning," conducted under the supervision of Dr. Mahmut KAYA at Siirt University, Institute of Science and Technology, Department of Computer Engineering.

REFERENCES

Chollet, F. (2017). Xception: Deep learning with depthwise separable convolutions. *IEEE conference on computer vision and pattern recognition* (pp. 1251-1258).

- Çetin, S., Turan, E., & Bayrakdar, E. (2019). Türkiye'nin güneş enerjisi politikaları. *Third Sector Social Economic Review*, Ankara, 54(2), 949-968. <http://dx.doi.org/10.15659/3.sektor-sosyal-ekonomi.19.04.1118>
- Canbay, Y., İsmetoğlu A., Canbay, P., (2021). Covid-19 Hastalığının Teşhisinde Derin Öğrenme ve Veri Mahremiyeti, *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 9(2), 701-715. <https://doi.org/10.21923/jesd.870263>
- Davaadorj, U., Yoo, K. H., Choi, S. H., & Nasridinov, A. (2021). The Soiling Classification of Solar Panel using Deep Learning. *International Conference on Convergence Content*, (pp. 59-60).
- Dwivedi, D., Babu, K. V. S. M., Yemula, P. K., Chakraborty, P., & Pal, M. (2024). Identifying surface defects on solar PV panels and wind turbine blades using an attention-based deep learning model. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 1-28, <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2023.107836>.
- Ferrell, D. & Anderson, E. (2023). Adapting and Generalizing Convolutional Neural Networks in Detecting Dust on Solar Panels, *preprint researchgate*, 1-6.
- 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* (pp. 770-778).
- 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*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1704.04861>
- 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* (pp. 4700-4708).
- Kanani, P., & Padole, M. (2019). Deep learning to detect skin cancer using google colab. *International Journal of Engineering and Advanced Technology Regular Issue*, 8(6), 2176-2183. <https://doi.org/10.35940/ijeat.F8587.088619>
- Kaya, Y., Yiner, Z., Kaya, M., & Kuncan, F. (2022). A new approach to COVID-19 detection from X-ray images using angle transformation with GoogleNet and LSTM. *Measurement Science and Technology*, 33(12), 124011. <https://doi.org/10.1088/1361-6501/ac8ca4>
- LeCun, Y., Bengio, Y., & Hinton, G. (2015). Deep learning. *nature*, 521(7553), 436-444. <https://doi.org/10.1038/nature14539>
- Maity, R., Shamaun Alam, M., & Pati, A. (2020). An Approach for Detection of Dust on Solar Panels Using CNN from RGB Dust Image to Predict Power Loss. *Cognitive Computing in Human Cognition: Perspectives and Applications*, 41-48. https://doi.org/10.1007/978-3-030-48118-6_4
- Mete, S., Çakır, O., Bayat, O., Duru, D. G., & Duru, A. D. (2020). Gözbebeği hareketleri temelli duygu durumu sınıflandırılması. *Bilişim Teknolojileri Dergisi*, 13(2), 137-144. <https://doi.org/10.17671/gazibtd.563830>
- Onim, M. S. H., Sakif, Z. M. M., Ahnaf, A., Kabir, A., Azad, A. K., Oo, A. M. T., & Ali, M. S. (2023). Solnet: A convolutional neural network for detecting dust on solar panels. *Energies*, 16(1), 155. <https://doi.org/10.3390/en16010155>
- Pan, S. J., & Yang, Q. (2009). A survey on transfer learning. *IEEE Transactions on knowledge and data engineering*, 22(10), 1345-1359. <https://doi.org/10.1109/TKDE.2009.191>
- Prabhakaran, S., Uthra, R. A., & Preetharoselyn, J. (2023). Deep Learning-Based Model for Defect Detection and Localization on Photovoltaic Panels. *Computer Systems Science and Engineering*, 44(3), 2683-2700. <http://dx.doi.org/10.32604/csse.2023.028898>
- Saqlain, M., Jargalsaikhan, B., & Lee, J. Y. (2019). A voting ensemble classifier for wafer map defect patterns identification in semiconductor manufacturing. *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, 32(2), 171-182. <https://doi.org/10.1109/TSM.2019.2904306>
- Selvi, S., Devaraj, V., Prabha, R. P. S., & Subramani, K. (2023). Detection of Soiling on PV Module using Deep Learning. *SSRG International Journal of Electrical and Electronics Engineering*, 10(7), 93-101. <https://doi.org/10.14445/23488379/IJEEE-V10I7P108>
- Sewell, M. (2008). Ensemble learning. *RN*, 11(02), 1-34.

- Simonyan, K., & Zisserman, A. (2014). Very deep convolutional networks for large-scale image recognition. *arXiv preprint arXiv:1409.1556*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1409.1556>
- Sokolova, M., Japkowicz, N., & Szpakowicz, S. (2006, December). Beyond accuracy, F-score and ROC: a family of discriminant measures for performance evaluation. *Australasian joint conference on artificial intelligence* (pp. 1015-1021). https://doi.org/10.1007/11941439_114
- Szegedy, C., Ioffe, S., Vanhoucke, V., & Alemi, A. (2017, February). Inception-v4, inception-resnet and the impact of residual connections on learning. *Thirsty-First AAAI conference on artificial intelligence*, (pp. 4278-4284) <https://doi.org/10.1609/aaai.v31i1.11231>
- Şenol, A., Canbay, Y., & Kaya, M. (2021). Trends in Outbreak Detection in Early Stage by Using Machine Learning Approaches. *Bilişim Teknolojileri Dergisi*, 14(4), 355-366. <https://doi.org/10.17671/gazibtd.878089>
- Tan, M., & Le, Q. (2019). Efficientnet: Rethinking model scaling for convolutional neural networks. *International conference on machine learning* (pp. 6105-6114).
- Utku, A., & Akcayol, M. A. (2024). Spread patterns of COVID-19 in European countries: hybrid deep learning model for prediction and transmission analysis. *Neural Computing and Applications*, 36, 10201–10217. <https://doi.org/10.1007/s00521-024-09597-y>
- Yarğı, V., & Postalcıoğlu, S. (2021). EEG işareti kullanılarak bağımlılığa yatkınlığın makine öğrenmesi teknikleri ile analizi. *El-Cezeri*, 8(1), 142-154. <https://doi.org/10.31202/ecjse.787726>
- Zyout, I. & Oatawneh, A. (2020), February. Detection of PV solar panel surface defects using transfer learning of the deep convolutional neural networks. *Advances in Science and Engineering Technology International Conferences (ASET)*, (pp. 1-4). <https://doi.org/10.1109/ASET48392.2020.9118384>



Kahramanmaraş Sütçü İmam University

Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 27.06.2024
Kabul Tarihi : 20.11.2024

Received Date : 27.06.2024
Accepted Date : 20.11.2024

KAN HÜCRELERİNİN OPTİMUM ODAKLI GÖRÜNTÜLENMESİ İÇİN DERİN ÖĞRENME TABANLI YAKLAŞIMIN GELİŞTİRİLMESİ

DEVELOPMENT OF A DEEP LEARNING-BASED APPROACH FOR OPTIMAL FOCUSED IMAGING OF BLOOD CELLS

Fatma Tuana DOĞU^{1*} (ORCID: 0009-0008-0916-9394)
Zeinab DANAEİ² (ORCID: 0000-0002-5881-1960)
Hülya DOĞAN^{3,4} (ORCID: 0000-0003-3695-8539)
Ramazan Özgür DOĞAN⁵ (ORCID: 0000-0001-6415-5755)
Sena F. SEZEN^{4,6} (ORCID: 0000-0002-7379-2518)

¹ Karadeniz Teknik Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Trabzon, Türkiye

² Karadeniz Teknik Üniversitesi, Tıp Fakültesi, Trabzon, Türkiye

³ Karadeniz Teknik Üniversitesi, Yazılım Mühendisliği Bölümü, Trabzon, Türkiye

⁴ Karadeniz Teknik Üniversitesi, İlaç ve Farmasötik Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi, Trabzon, Türkiye

⁵ Trabzon Üniversitesi, Yapay Zeka Mühendisliği Bölümü, Trabzon, Türkiye

⁶ Karadeniz Teknik Üniversitesi, Eczacılık Meslek Bilimleri Bölümü, Trabzon, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Fatma Tuana DOĞU, fatmatuanadogu@gmail.com

ÖZET

Mikroskopik sistemlerde var olan odaklama derinliği sebebiyle kan hücreleri bulunan numuneler tamamıyla odaklı görüntülenmemektedir. Bu durum yapay zeka ve görüntü işleme algoritmalarının performans kaybına sebep olabilmektedir. Bunu çözmek için odaklama derinliğinin artırılması yaklaşımları kullanılmakta ve numunenin optimum odaklı görüntüsü elde edilmektedir. Literatürde birçok odaklama derinliğinin artırılması yaklaşımı bulunmasına rağmen bu alanda hala yüksek çalışma süresi, kullanılan numuneye ve mikroskop çeşidine göre farklı performans gösterme gibi çeşitli eksiklikler mevcuttur. Bu çalışmada, literatürdeki bu eksiklikleri gidermek amacıyla mikroskopik sistemlerde kan hücrelerinin optimum odaklı görüntülenmesi için hem yeni veri seti oluşturulmakta hem de derin öğrenme tabanlı yeni bir odaklama derinliği artırılması yaklaşımı önerilmektedir. Çalışmanın performansını değerlendirmek için Algı Tabanlı Görüntü Kalitesi, Referanssız Görüntü Uzamsal Kalite, Bulanıklık ve Doğallık Görüntü Kalitesi olmak üzere dört farklı kriter kullanılmaktadır. Geliştirilen çalışmada 13 farklı odaklama derinliğinin artırılması yaklaşımı test edilmektedir. Bu çalışmada performans değerlendirme kriterleri sonuçları ile kan hücrelerinin optimum odaklı görüntülenmesi için önerilen derin öğrenme tabanlı odaklama derinliğinin artırılması yaklaşımının diğer yaklaşımlara göre daha performanslı olduğu ispatlanmaktadır.

Anahtar Kelimeler: Derin öğrenme, odaklama derinliğinin artırılması, ışıklı mikroskop, odaklama ölçüm operatörleri

ABSTRACT

Due to the depth of focus in microscopic systems, samples containing blood cells cannot be imaged completely in focus. This may cause performance loss of artificial intelligence and image processing algorithms. To solve this, extended depth of field approaches are used and an optimally focused image of the sample is obtained. Although many extended depth of field approaches were developed in the literature, there are still various shortcomings in this field, such as high running time and different performance depending on the sample used and the type of microscope. To eliminate these shortcomings in the literature, a new dataset is created for optimally focused imaging of blood cells in microscopic systems and a new deep learning-based approach to depth of field is proposed. Four different criteria are used to evaluate the performance of the study: Perception-based Image Quality Evaluator, Blind Image Spatial Quality Evaluator, Blurring and Naturalness Image Quality. In the developed study, 13 different extended depth of field approaches are tested. In this study, the results of the performance evaluation criteria prove that the deep learning-based extended depth of field approach proposed for optimally focused imaging of blood cells is more performant than other approaches.

Keywords: Deep learning, extended depth of field, light microscope, focusing measurement operators

ToCite: DOĞU, F. T., DANAEİ, Z., DOĞAN, H., DOĞAN, R. Ö., & SEZEN, F. S., (2024). KAN HÜCRELERİNİN OPTİMUM ODAKLI GÖRÜNTÜLENMESİ İÇİN DERİN ÖĞRENME TABANLI YAKLAŞIMIN GELİŞTİRİLMESİ. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 27(4), 1465-1476.

GİRİŞ

Mikroskop, çeşitli patojenlerin (virüsler, bakteriler, mantarlar vb.) neden olduğu hastalıkların ön teşhisinde en çok tercih edilen görüntüleme araçlarından biridir. Uzmanlar mikroskopik inceleme süreciyle hastalığın enfeksiyon derecesini ve ciddiyetini belirlemektedir ve geliştirilen uygulamalarla bu süreç otomatikleştirilmektedir. Bu sayede hem uzmanların iş yükü azaltılmakta hem de daha doğru ve hızlı sonuçlar elde edilebilmektedir. Mikroskopik sistemlerde kan hücrelerinin otomatik sayımı, tespiti, sınıflandırılması ve segmentasyonu için yapay zekâ ve görüntü işleme uygulamaları geliştiren birçok çalışma vardır (Alam ve Islam, 2019; Mohamed vd., 2020; Cengil vd., 2022; Lu vd., 2021; Patil vd., 2021; Lu vd., 2023; Gu vd., 2024; Guo vd., 2024; Khan vd., 2024). Bu çalışmalarda genellikle 2B görüntüler kullanılarak yapay zekâ ve görüntü işleme teknikleri uygulanmaktadır. Mikroskopik sistemlerde var olan odaklama derinliğinden dolayı kan hücreleri bulunan numunelerin 2B görüntülerinin tüm alanı odaklanmış (optimum odaklı) olamamaktadır. Bu yüzden kan hücrelerinin gerçek yapıları 2B görüntülerde tam olarak görüntülenememektedir. Kan hücrelerinin optimum odaklı görüntülenememesi, mikroskopik sistemlerde gerçekleştirilen yapay zekâ ve görüntü işleme uygulamalarının performans kaybına sebep olabilmektedir. Uzmanlar çalışmalarında bu uygulamalarının performansını artırmak için optimum odaklı 2B görüntü kullanmayı tercih etmektedirler. Literatürde odaklama derinliğinin artırılması yaklaşımları kullanılarak mikroskopik sistemlerde optimum odaklı (tüm alanı odaklı) 2B görüntü üretilmektedir. Araştırmacılar bu yaklaşımları iki sınıfa ayırmaktadırlar: wavefront kodlama ve imge füzyonu tabanlı (Ambikumar vd., 2016). Wavefront kodlama tabanlı yaklaşımlarda mikroskop objektifinin arka düzlemine elemanlar yerleştirilerek odaklama derinliği artırılmaktadır (Dowski ve Cathey, 1995; Akpınar vd., 2021; Mo vd., 2019). İmge füzyonu tabanlı yaklaşımlarda ise farklı odaklamalara sahip görüntü dizisi kullanılarak odaklama derinliği artırılmaktadır. Mikroskopik sistemlerde optimum odaklı 2B görüntü üretmek için literatürde en çok tercih edilen yaklaşımlar imge füzyonu tabanlı olanlardır (Hermessi vd., 2021). Literatürdeki imge füzyonu tabanlı klasik yaklaşımlar üç fazda gerçekleştirilmektedir:

1. Farklı odaklamalara sahip görüntü dizisinin elde edilmesi: Bu fazda numune Z eksenini boyunca (odaklama derinliği boyunca) taranarak farklı odaklama bilgilerine sahip birden çok sayıda görüntü bilgisayar ortamına aktarılmaktadır.
2. Piksellerin odak değerlerinin hesaplanması: Bu fazda, farklı odaklamalara sahip görüntülere odaklama ölçüm operatörleri uygulanarak piksellerin odak değerleri hesaplanmaktadır. Araştırmacılar literatürdeki odaklama ölçüm operatörleri şu şekilde sınıflandırmaktadırlar:
 - Gradyan tabanlı odaklama ölçüm operatörleri: Bu operatörler birinci dereceden türev bilgilerini kullanarak piksellerin odaklama bilgilerini çıkarmaktadırlar. Gradyan tabanlı odaklama ölçüm operatörlerine Gauss Türevi (Geusebroek vd., 2000), Tenengrad (Pertuz vd., 2013), 3B Gradyan (Ahmad ve Choi, 2007) ve Gradyan Enerjisi (Malik ve Choi, 2008) örnek olarak verilebilmektedir.
 - Laplacian tabanlı odaklama ölçüm operatörleri: Bu operatörler ikinci dereceden türev bilgilerini kullanarak piksellerin odaklama bilgilerini çıkarmaktadırlar. Laplacian tabanlı odaklama ölçüm operatörlerine 3B Laplacian (An vd., 2008), Laplacian Varyansı (Pech vd., 2000) ve Laplacian Enerjisi (Ahmad ve Choi, 2007) örnek olarak verilebilmektedir.
 - Ayrık Dalgacık Dönüşümü (ADD) tabanlı odaklama ölçüm operatörleri: ADD tabanlı operatörler ayrık dalgacık dönüşümü katsayılarını kullanarak piksellerin odaklama bilgilerini çıkarmaktadırlar. Bu odaklama ölçüm operatörlerine ADD Katsayıları Toplamı (Xie vd., 2007), ADD Katsayıları Oranı (Xie vd., 2007) ve ADD Katsayıları Varyansı (Xie vd., 2007) örnek olarak verilebilmektedir.
 - İstatistik tabanlı odaklama ölçüm operatörleri: Bu operatörler görüntünün kontrast ve parlaklık gibi özelliklerini kullanarak piksellerin odaklama bilgilerini çıkarmaktadırlar. İstatistik tabanlı odaklama ölçüm operatörlerine Histogram Entropisi (Pertuz vd., 2013), Chebyshev Momentleri (Yap vd., 2004), Varyans (Pertuz vd., 2013), Normalize Varyans (Pertuz vd., 2013) ve Öz Değerler (Wee ve Paramesran, 2007) örnek olarak verilebilmektedir.
 - Ayrık Kosinüs Dönüşümü (AKD) tabanlı odaklama ölçüm operatörleri: Bu operatörler AKD katsayılarını kullanarak piksellerin odaklama bilgilerini çıkarmaktadırlar. Bu odaklama ölçüm operatörlerine AKD

Azaltılmış Enerji Oranı (Lee vd., 2009), Değiştirilmiş AKD (Lee vd., 2008) ve AKD Enerji Oranı (Shen ve Chen, 2006) örnek olarak verilebilmektedir.

- Diğer odaklama ölçüm operatörleri: Bu operatörler piksellerin belirli özelliklerini kullanarak odaklama bilgilerini çıkarmaktadırlar. Bu odaklama ölçüm operatörlerine Uzamsal Frekans (Pertuz vd., 2013), Yerel İkili Model (Lorenzo vd., 2008), Helmlı (Helmlı ve Scherer, 2001), Brenner (Pertuz vd., 2013), Ayrık Curvelet Dönüşümü (Minhas vd., 2011) ve Gabor Özellikleri (Mahmood vd., 2018) örnek olarak verilebilmektedir.
3. Optimum odak değerlerine sahip piksellerin seçilmesi: Bu fazda, tüm alanı odaklanmış (optimum odaklı) tek bir görüntü oluşturmak için görüntü dizisindeki maksimum odaklama bilgilerine sahip pikseller belirlenmektedir. Bu fazda imge füzyon seçim kuralları ile maksimum odaklama değerine sahip pikseller seçilmektedir. Ortalama ve Maksimum Seçme, klasik imge füzyon seçim kurallarına örnek olarak verilebilmektedir.

Önceki kısımlarda bahsedildiği gibi literatürde wavefront kodlama tabanlı odaklama derinliğinin artırılması yaklaşımı öneren pek çok çalışma bulunmaktadır (Dowski ve Cathey, 1995; Pan vd., 2008; Zhao vd., 2013; Cao vd., 2017; Elmalem vd., 2018; Wei vd., 2019; Du vd., 2019; Akpınar vd., 2021; Li vd., 2022). Bu çalışmalara ek olarak, piksellerin odak değerlerinin hesaplanması için imge füzyonu algoritmaları ve ölçüm operatörleri literatürde sıklıkla geliştirilmektedir. Ancak, mikroskobik sistemlerde odaklama derinliğinin artırılması için sınırlı sayıda görüntü işleme (imge füzyonu) tabanlı çalışma bulunmaktadır. Tenengrad ve Laplacian gibi klasik odaklama ölçüm operatörlerinin başarılarının oldukça düşük olduğu görülmektedir. Klasik odaklama ölçüm operatörlerine göre, karmaşık değerli ADD (Forster vd., 2004), Ayrık Eğricik (Curvelet) Dönüşümü (Tessens vd., 2007) tabanlı popüler odaklama ölçüm operatörleri daha belirgin odak değerleri çıkarmaktadır. Ancak, bu odaklama operatörlerinin diğer operatörlere göre çalışma süresi ve karmaşıklığı daha fazladır. Ek olarak, performansları taranan numuneye ve kullanılan büyütme objektifine göre değişiklik göstermektedir.

Derin öğrenme algoritmaları diğer araştırma alanlarında (özellikle sınıflandırma, segmentasyon, imge füzyonu) sıklıkla kullanılmakta ve oldukça yüksek performans göstermektedirler. Ancak, özellikle mikroskobik sistemlerde kan hücrelerinin optimum odaklı görüntülenmesi için geliştirilmemişlerdir. Araştırmacılar derin öğrenme tabanlı yaklaşımları eğitmek için kapsamlı veri setlerinin olmamasını bunun sebebi olduğunu düşünmektedirler. Bu çalışmada mikroskobik sistemlerde kan hücrelerinin optimum odaklı görüntülenmesi için hem yeni veri seti oluşturulmakta hem de derin öğrenme tabanlı yeni bir yaklaşım önerilmektedir.

Bu çalışmanın literatüre temel katkıları şu şekilde özetlenebilmektedir:

1. Bu çalışmada mikroskobik sistemlerde kan hücrelerinin optimum odaklı görüntülenmesi için derin öğrenme tabanlı yeni yaklaşım önerilmektedir. Yapılan literatür araştırmalarına göre odaklama derinliği artırılmasında derin öğrenme tabanlı yaklaşım geliştiren ilk çalışmalardandır.
2. Odaklama derinliği artırılması yaklaşımlarının kapsamlı performans analizini gerçekleştirmek amacıyla, bu çalışmada farklı sayılarda görüntülerden oluşan yeni bir veri seti oluşturulmaktadır.
3. Önerilen odaklama derinliği artırılması yaklaşımı farklı odaklamalara sahip görüntülerin yalnızca gri seviyelerini kullanan literatür çalışmalarının aksine, daha anlamlı bilgiler üretebilen derin özellikleri kullanarak piksellerin odak derecelerini elde etmektedir. Optimum odaklı görüntüleme derin özelliklerin elde edilmesinin etkinliği çeşitli metrikler - Algı Tabanlı Görüntü Kalitesi, Kör/Referansız Görüntü Uzamsal Kalitesi, Bulanıklık, Doğallık Görüntü Kalitesi - kullanılarak ispatlanmaktadır.
4. Önerilen odaklama derinliği artırılması yaklaşımı herhangi ön işlem gerektirmediğinden literatürdeki yaklaşımlara göre sürecin işlem yükünü oldukça azaltmaktadır.

Çalışmanın sonraki kısımları şu şekilde yapılandırılmıştır: Bölüm 2, yeni veri setinin detaylarını ve odaklama derinliğinin artırılması için geliştirilen yaklaşımın genel açıklamasını içeren iki alt kısımdan oluşmaktadır. Bölüm 3 sayısal bulguları ve analizleri içermektedir. Bölüm 4 ise genel sonuçlar hakkında bilgiler sunmaktadır.

METODOLOJİ

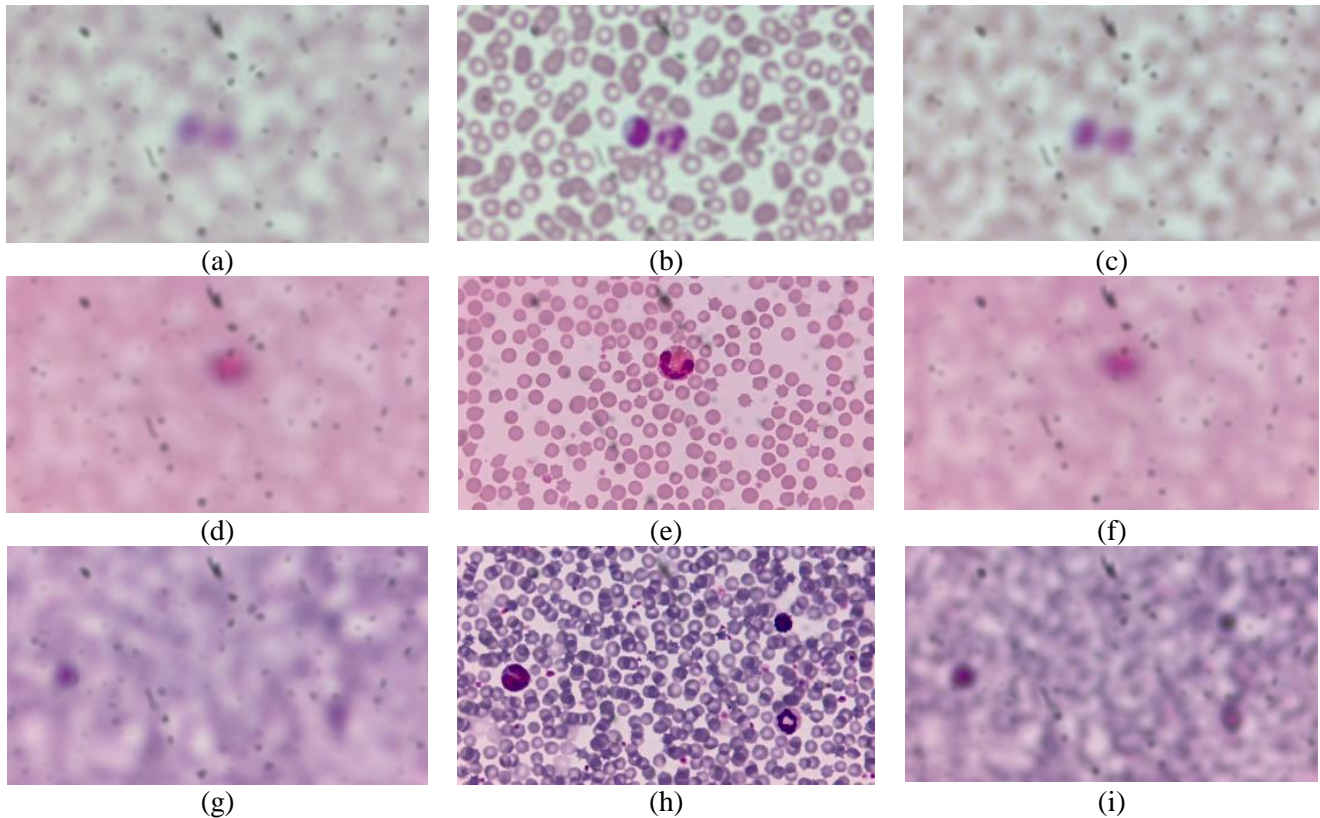
Sunulan çalışma, farklı odaklamalara sahip görüntü dizileri içeren yeni veri setinin oluşturulması ve odaklama derinliğinin artırılması için derin öğrenme tabanlı yaklaşımın önerilmesi olmak üzere iki kısımdan oluşmaktadır.

Farklı Odaklamalara Sahip Görüntü Dizileri İçeren Veri Setinin Oluşturulması

Bu çalışmada odaklama derinliğinin artırılmasına yönelik yaklaşımların performanslarını değerlendirmek için farklı odaklamalara sahip görüntü dizilerini içeren yeni bir veri seti oluşturulmaktadır. Bu farklı odaklamalara sahip görüntü dizileri kan örneklerinin hazırlanmasıyla elde edilmektedir. Kan numunelerinin hazırlanma sürecinde öncelikle 1 damla kan lama damlatılmış ve sürme kan frotisi çekilmiştir. Kan havada kurutulmuştur. Wright boyası ile lam boyanmış ve kurutulmuştur. Sonrasında hazırlanan numuneler mikroskop tablası üzerine yerleştirilmekte ve ardından mikroskop tablası odaklama derinliği boyunca taranarak farklı odaklamalara sahip görüntüler elde edilmektedir. Tablo 1'de detayları listelenen farklı odaklamalara sahip görüntü dizileri - 1, 2 ve 3'ün örnek görüntüleri Şekil 1'de gösterilmektedir. Görüntü dizilerinin oluşturulması için Zeiss Primo mikroskopunda 100x büyütme objektifi kullanılmaktadır. Tüm dizilerin farklı odaklamalara sahip görüntüleri, Zeiss Axiocam mikroskop kamerası kullanılarak elde edilmektedir. Görüntüler 1920 x 1080 piksel çözünürlüğe sahiptir ve PNG dosya formatında kaydedilmektedir. Dizilerdeki görüntü sayıları sırasıyla 18, 19 ve 21'dir.

Tablo 1. Farklı Odaklamalara Sahip Görüntü Dizilerinin Detayları

Görüntü Dizileri	Numune	Büyütme Objektifi	Görüntü Boyutu	Görüntü Sayısı
Görüntü Dizisi - 1	Kan	100x	1920 x 1080	18
Görüntü Dizisi - 2	Kan	100x	1920 x 1080	19
Görüntü Dizisi - 3	Kan	100x	1920 x 1080	21



Şekil 1. Farklı Odaklamalara Sahip Görüntü Dizileri Örnekleri - 1 (a - b - c), 2 (d - e - f), 3 (g - h - i)

Odaklama Derinliğinin Artırılması İçin Derin Öğrenme Tabanlı Yeni Yaklaşımın Önerilmesi

Bu çalışmada mikroskopik sistemlerde kan hücrelerinin tüm alanı odaklanmış görüntüsünün elde edilmesi için derin öğrenme tabanlı yeni yaklaşım önerilmektedir. Odaklama derinliğinin artırılması için geliştirilen yaklaşım iki temel adım içermektedir; (1) derin özelliklerin çıkarımı için ağ tasarımı ve (2) optimum odaklı görüntü üretimi. İlk adımda farklı odaklamalara sahip görüntülerin derin özelliklerinin çıkarılması için model eğitilmektedir. İkinci

adımında eğitilmiş derin öğrenme modeli kullanılarak piksellerin odak bilgileri çıkarılmakta ve kan hücrelerinin optimum odaklı görüntülenmesi sağlanmaktadır. Bu adımların detayları şu şekildedir:

Derin özelliklerin çıkarımı için ağ tasarımı. Bu adımda farklı odaklamalara sahip görüntülerin derin özelliklerinin çıkarılması için otomatik kodlayıcı modeli geliştirilmektedir. Geliştirilen otomatik kodlayıcı modeli bu adımda eğitilmektedir. Eğitilen modelin parametreleri sabitlenmektedir. Oluşturulan otomatik kodlayıcı modeli iki ana modülden oluşmaktadır; kodlayıcı ve kod çözücü. Bu modüllerdeki optimum parametreler (konvolüsyon katman sayısı, filtre boyutları, filtre sayıları gibi) aynı amaç için gerçekleştirilen önceki çalışmalar (Danışmaz vd., 2023; Dogan vd., 2024) referans alınarak belirlenmektedir. Bu modüllerin detayları Tablo 2’de verilmektedir:

Tablo 2. Geliştirilen Otomatik Kodlayıcı Modüllerinin Detayları

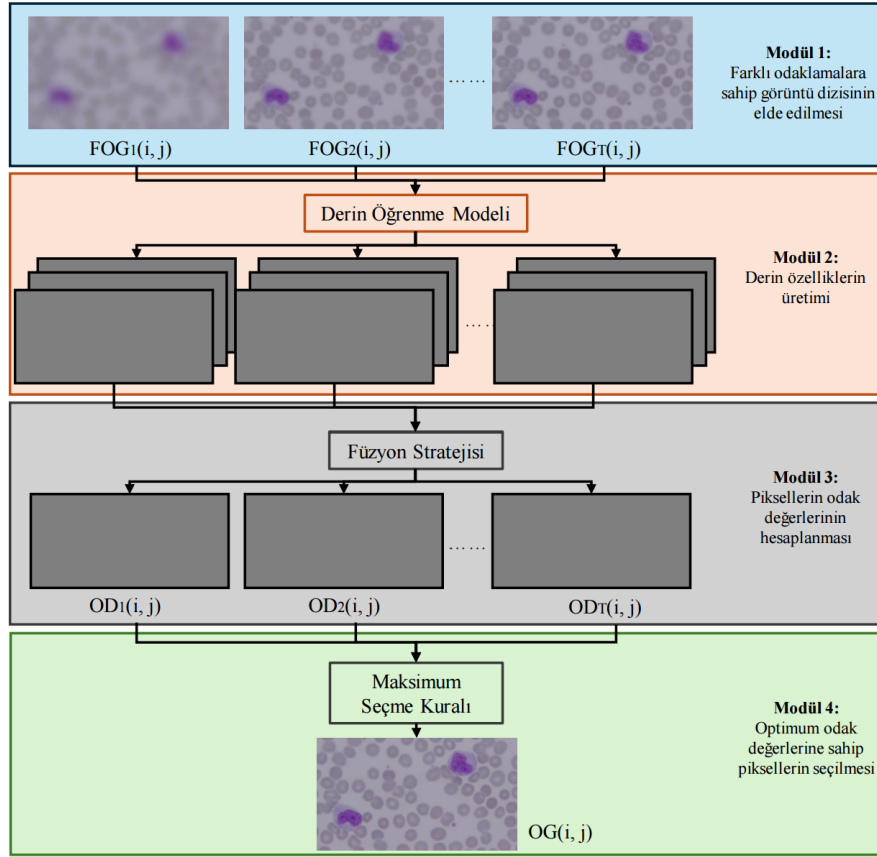
Modül	Blok	Giriş Boyutu	Filtre Boyutu	Filtre Sayısı
Kodlayıcı	Konvolüsyonel Blok - 1	256 x 256 x 1	3 x 3	16
	Konvolüsyonel Blok - 2	256 x 256 x 16	3 x 3	32
	Konvolüsyonel Blok - 3	256 x 256 x 32	3 x 3	48
	Konvolüsyonel Blok - 4	256 x 256 x 48	3 x 3	64
Kod Çözücü	Konvolüsyonel Blok - 1	256 x 256 x 64	3 x 3	48
	Konvolüsyonel Blok - 2	256 x 256 x 48	3 x 3	32
	Konvolüsyonel Blok - 3	256 x 256 x 32	3 x 3	16
	Konvolüsyonel Blok - 4	256 x 256 x 16	3 x 3	1

Kodlayıcı modülü: Bu modül kan hücreleri içeren farklı odaklamalara sahip görüntüleri giriş olarak almakta ve özelliklerini çıkarmaktadır. Bu modülde birbirine çıkışları bağlı 4 adet konvolüsyonel blok bulunmaktadır. Bu bloklar konvolüsyon, yığın (batch) normalizasyon ve ReLu katmanlarından oluşmaktadır. Konvolüsyon katmanlarının filtre boyutları 3 x 3, filtre sayıları ise sırasıyla 16, 32, 48 ve 64 olarak atanmaktadır. Bu modül farklı odaklamalara sahip görüntüler ile aynı çözünürlüğe sahip derin özellik matrisleri oluşturmaktadır.

Kod Çözücü modülü: Bu modül, kodlayıcı modülde çıkarılan özellikleri kullanarak farklı odaklamalara sahip görüntüleri tekrar üretmektedir. Bu modülde birbirine çıkışları bağlı 4 adet blok bulunmaktadır. Bu bloklar konvolüsyon, yığın normalizasyon ve ReLu katmanlarından oluşmaktadır.

Optimum odaklı görüntü üretimi. Bu adımda, eğitilmiş derin öğrenme modeli kullanılarak piksellerin odak bilgileri çıkarılmakta ve kan hücrelerinin optimum odaklı görüntülenmesi sağlanmaktadır. Şekil 2’de optimum odaklı görüntü üretimi adımının görsel temsili verilmektedir. Şekil 2’de dört modülden oluşan optimum odaklı görüntü üretimi adımı verilmektedir.

1. Farklı odaklamalara sahip görüntü dizisinin elde edilmesi:
Bu modülde kan numunesi Z eksenini (odaklama derinliği) boyunca taranarak farklı odaklama bilgilerine sahip birden çok sayıda görüntü ($FOG_1(i, j)$, $FOG_2(i, j)$, ..., $FOG_T(i, j)$) bilgisayar ortamına aktarılmaktadır. Burada i ve j farklı odaklamalara sahip görüntü çözünürlüğünü, T ise görüntü sayısını temsil etmektedir.
2. Derin özelliklerinin üretimi:
Bu modülde, önceki adımda (derin özelliklerin çıkarımı için ağ tasarımı) eğitilen derin öğrenme modeli giriş olarak farklı odaklamalara sahip görüntüleri almakta ve her görüntü için derin özellikleri çıkış olarak üretmektedir.
3. Piksellerin odak değerlerinin hesaplanması:
Bu modülde, her farklı odaklamalara sahip görüntü için oluşturulan derin özelliklere füzyon stratejisi uygulanmaktadır. Füzyon stratejisi, derin özelliklerden maksimum değerleri belirleyerek her piksel için odak değeri ($OD_1(i, j)$, $OD_2(i, j)$, ..., $OD_T(i, j)$) hesaplanmaktadır.
4. Optimum odak değerlerine sahip piksellerin seçilmesi:
Bu modülde kan hücrelerinin optimum odaklı görüntülenmesi için maksimum odaklama bilgilerine sahip pikseller belirlenmektedir. Bu pikselleri seçmek için Maksimum Seçme kuralı kullanılmaktadır.



Şekil 2. Optimum Odaklı Görüntü Üretimi Adımının Görsel Temsili; (1) Farklı Odaklamalara Sahip Görüntü Dizisinin Oluşturulması, (2) Derin Özelliklerin Üretimi, (3) Piksellerin Odak Değerlerinin Hesaplanması Ve (4) Optimum Odak Değerlerine Sahip Piksellerin Seçilmesi

DENEYSEL ÇALIŞMALAR VE DEĞERLENDİRMELER

Çalışmada odaklama derinliğinin artırılması için önerilen yaklaşım, Intel Core i7-9750 ve 2.60 GHz işlemci, 16 GB RAM ve NVIDIA GeForce RTX 3060 GPU'ya sahip bir PC üzerinde çalışan Python 3.6 yazılımından oluşan bir cihaz konfigürasyonu kurularak gerçekleştirilmektedir.

Bu çalışmada mikroskopik sistemlerde kan hücrelerinin optimum odaklı görüntülenmesi için yeni veri seti oluşturulmaktadır. Bu veri seti 3 farklı mikroskop görüntü dizisi içermektedir. Mikroskopik sistemlerde optimum odaklı herhangi bir görüntü (referans görüntü) olmadığından, odaklama derinliğinin artırılması yaklaşımlarının performans analizlerini gerçekleştirmek için referans görüntü gerektirmeyen kriterler kullanılmaktadır. Çalışmada kullanılan performans değerlendirme kriterlerinin detayları şu şekildedir:

1. Algı Tabanlı Görüntü Kalitesi (Perception based Image Quality Evaluator - PIQE):
PIQE, referans görüntüye ihtiyaç duymadan bir görüntünün kalitesini blok tabanlı olarak değerlendiren bir objektif ölçüm yöntemidir (Venkatanath vd., 2015). İnsan gözünün algıladığı kaliteye dayalı olarak görüntüdeki düşük kaliteli bölgeleri tespit ederek değerlendirme yapmaktadır. İdeal yaklaşımla oluşturulan optimum odaklı görüntünün PIQE değerinin diğer yaklaşımlara göre daha düşük olması beklenmektedir.
2. Kör/Referanssız Görüntü Uzamsal Kalitesi (Blind/Referenceless Image Spatial Quality Evaluator - BRISQUE):
BRISQUE, referans görüntüye ihtiyaç duymadan, doğal sahne istatistiklerini kullanarak bir görüntünün kalitesini değerlendirmektedir (Mittal vd., 2012). İnsan algısına dayalı özellikler üzerinden görüntüdeki distorsiyonları tespit etmekte ve bir kalite skoru üretmektedir. İdeal yaklaşımla oluşturulan optimum odaklı görüntünün BRISQUE değerinin diğer yaklaşımlara göre daha düşük olması beklenmektedir.
3. Bulanıklık (Blur Metric - BM):
BM, bir görüntüdeki bulanıklık seviyesini ölçmek için kullanılan bir objektif kalite değerlendirme yöntemidir (Crete vd., 2007). Genellikle görüntünün keskin kenarlarını ve detaylarını analiz ederek bulanıklık miktarını

numerik bir değerle ifade etmektedir. İdeal yaklaşımla oluşturulan optimum odaklı görüntünün BM değerinin diğer yaklaşımlara göre daha düşük olması beklenmektedir.

4. Doğallık Görüntü Kalitesi (Naturalness Image Quality Evaluator - NIQE):

NIQE, bir görüntünün doğallığını değerlendirerek kalitesini ölçen bir metrik olarak kullanılmaktadır (Mittal vd., 2012). Görüntüdeki doğal sahne istatistiklerini temel almakta ve referans görüntüye ihtiyaç duymadan kalite skoru üretmektedir. İdeal yaklaşımla oluşturulan optimum odaklı görüntünün NIQE değerinin diğer yaklaşımlara göre daha düşük olması beklenmektedir.

Bu çalışmada, kan hücrelerinin optimum odaklı görüntülenmesi için Bölüm 2'de detaylı şekilde anlatılan otomatik kodlayıcı modeli tasarlanmaktadır. Otomatik kodlayıcı modelinin eğitim süreci giriş görüntülerinin derin özelliklerinin çıkarılması için gerçekleştirilmektedir. Çalışmanın optimum odaklı görüntü üretimi süreci danışmansız öğrenmeye dayandığından otomatik kodlayıcı modeli ilk olarak MS-COCO veri kümesi- 2017 (Lin vd., 2014) ile eğitilmektedir. Eğitim sürecinde 5000 görüntü kullanılmaktadır. Daha sonra 150 mikroskop görüntüsü kullanılarak modelin ince ayarlı (fine-tuned) öğrenmesi gerçekleştirilmektedir. Modelin eğitim süreci tamamlandıktan sonra, parametreleri sabitlenmekte ve farklı odaklamalara sahip giriş görüntülerinin derin özellikleri çıkarılmaktadır. Derin öğrenme modelinin batch size ve epoch sayıları sırasıyla 48 ve 40 olarak atanmaktadır. Kayıp fonksiyonu olarak L_1 kayıp fonksiyonu kullanılmaktadır.

Çalışmada görüntü dizilerine 6 farklı gruptan seçilmiş toplam 12 odaklama ölçüm operatörü uygulanarak önerilen yaklaşımın performans değerlendirmesi gerçekleştirilmektedir. Tüm görüntü dizileri için farklı odaklama ölçüm operatörleriyle elde edilen optimum odaklı görüntülerin performans değerlendirme kriterlerinin sonuçları Tablo 3 – 5'te gösterilmektedir.

Tablo 3. Görüntü Dizisi – 1 için Farklı Odaklama Ölçüm Operatörleriyle Elde Edilen Optimum Odaklı Görüntülerin Performans Değerlendirme Kriterlerinin Sonuçları

Grup	Odaklama Operatörü	PIQE	BRISQUE	NIQE	BM
Gradyan	Gradyan Enerjisi	77,8097	43,4586	8,5254	0,2113
	3B Gradyan	78,6112	43,4682	9,1588	0,2469
Laplacian	Laplacian Enerjisi	74,5815	43,4472	8,4506	0,1596
	3B Laplacian	74,4615	43,4367	8,3497	0,1608
Dalgacık	ADD Kat. Oranı	77,3080	43,4582	8,4807	0,1808
	ADD Kat. Varyansı	76,5553	43,4582	8,8322	0,1705
İstatistik	Normalize Varyans	77,2567	43,4584	8,1567	0,2210
	Cheb. Momentleri	72,6137	43,3279	7,1759	0,1532
AKD	Değiştirilmiş AKD	80,4789	45,9854	10,3321	0,2968
Diğer	Brenner	78,5349	43,7569	9,6173	0,2467
	Helmi	77,6432	43,4349	9,4466	0,2432
	Gabor Özellikleri	75,6901	42,8460	7,9328	0,1432
Önerilen	Derin Öğrenme	71,8456	42,2333	6,9043	0,1221

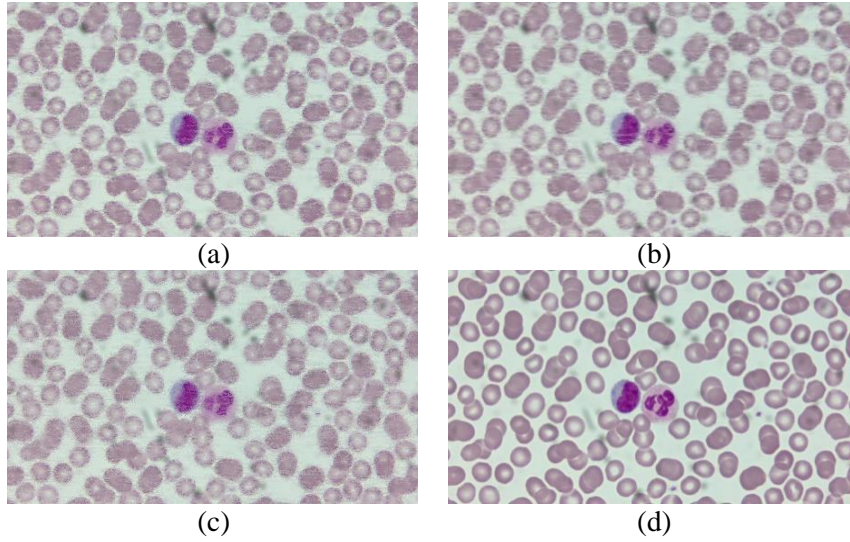
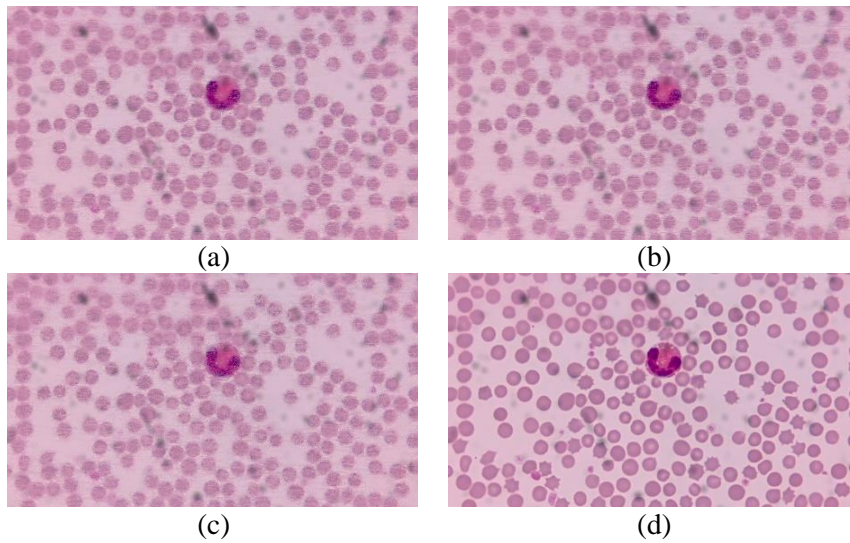
Tablo 4. Görüntü Dizisi – 2 için Farklı Odaklama Ölçüm Operatörleriyle Elde Edilen Optimum Odaklı Görüntülerin Performans Değerlendirme Kriterlerinin Sonuçları

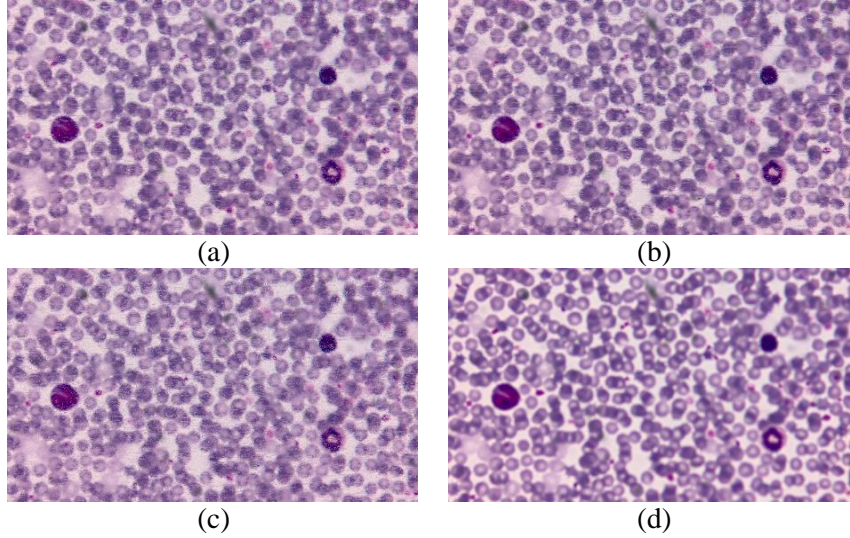
Grup	Odaklama Operatörü	PIQE	BRISQUE	NIQE	BM
Gradyan	Gradyan Enerjisi	70,0240	32,6582	7,6478	0,1788
	3B Gradyan	68,7236	32,1661	7,2711	0,1642
Laplacian	Laplacian Enerjisi	68,0596	31,9590	7,4060	0,1579
	3B Laplacian	66,7490	31,9448	7,1095	0,1568
Dalgacık	ADD Kat. Oranı	70,2155	33,5648	8,1795	0,1725
	ADD Kat. Varyansı	69,6333	33,0123	8,0916	0,1654
İstatistik	Normalize Varyans	67,3799	32,8951	7,3830	0,1686
	Cheb. Momentleri	60,8015	30,3283	6,3963	0,1430
AKD	Değiştirilmiş AKD	74,0789	34,8369	9,4432	0,1902
Diğer	Brenner	69,2856	33,4561	7,9012	0,1731
	Helmi	71,7549	33,9589	8,5678	0,1780
	Gabor Özellikleri	68,1123	32,0878	7,5509	0,1590
Önerilen	Derin Öğrenme	65,7643	30,0865	6,9540	0,1321

Tablo 5. Görüntü Dizisi – 3 için Farklı Odaklama Ölçüm Operatörleriyle Elde Edilen Optimum Odaklı Görüntülerin Performans Değerlendirme Kriterlerinin Sonuçları

Grup	Odaklama Operatörü	PIQE	BRISQUE	NIQE	BM
Gradyan	Gradyan Enerjisi	74,3291	39,1548	12,0798	0,2465
	3B Gradyan	74,8140	39,6599	12,0842	0,2501
Laplacian	Laplacian Enerjisi	76,9822	40,1198	13,8623	0,2820
	3B Laplacian	76,0781	40,0563	13,8418	0,2863
Dalgacık	ADD Kat. Oranı	75,7186	39,7113	12,7998	0,2411
	ADD Kat. Varyansı	78,1407	41,8996	14,9742	0,2948
İstatistik	Normalize Varyans	72,5686	38,1552	11,0586	0,2581
	Cheb. Momentleri	69,0456	36,3063	9,9712	0,1980
AKD	Değiştirilmiş AKD	80,6458	42,9072	14,0954	0,2903
Diğer	Brenner	76,3869	40,5673	13,2241	0,2845
	Helmi	76,7109	40,4441	13,1064	0,2896
	Gabor Özellikleri	75,4578	38,9903	12,6790	0,2311
Önerilen	Derin Öğrenme	68,7741	33,0901	8,0460	0,1886

Çalışmada oluşturulan görüntü dizileri için Brenner, Normalize Varyans, 3B Laplacian ve önerilen derin öğrenme tabanlı yaklaşımlar ile oluşturulan optimum odaklı görüntüler Şekil 3 – 5'te gösterilmektedir.

**Şekil 3.** Görüntü Dizisi – 1 için Brenner (a), Normalize Varyans (b), 3B Laplacian (c) ve Önerilen Derin Öğrenme (d) Tabanlı Yaklaşımlarla ile Oluşturulan Optimum Odaklı Görüntüler**Şekil 4.** Görüntü Dizisi – 2 için Brenner (a), Normalize Varyans (b), 3B Laplacian (c) ve Önerilen Derin Öğrenme (d) Tabanlı Yaklaşımlarla ile Oluşturulan Optimum Odaklı Görüntüler



Şekil 5. Görüntü Dizisi – 3 için Brenner (a), Normalize Varyans (b), 3B Laplacian (c) ve Önerilen Derin Öğrenme (d) Tabanlı Yaklaşımlarla ile Oluşturulan Optimum Odaklı Görüntüler

Daha önce de belirtildiği gibi odaklama derinliğinin artırılması için geliştirilen ideal bir yaklaşımın daha düşük PIQE, BRISQUE, NIQE ve BM değerlerine sahip optimum odaklı görüntü oluşturması beklenmektedir. Tablo 3 – 5'teki farklı ölçüm operatörleriyle oluşturulmuş görüntülerin performans değerlendirme kriterlerinin sonuçları, önerilen derin öğrenme tabanlı yaklaşımın literatürde en yaygın kullanılan yaklaşımlardan daha yüksek performanslı olduğunu ispatlamaktadır. En yüksek PIQE, BRISQUE, BM ve NIQE değerleri ile AKD ve istatistik tabanlı yaklaşımların en kötü performansa sahip oldukları gözükmemektedir. Ek olarak, bu çalışmada farklı odaklamalara sahip giriş görüntülerinden elde edilen derin özelliklerin odak değerlerinin hesaplanmasında daha etkin olduğu görülmektedir.

Şekil 3 – 5'teki öznel görsellere göre odaklama derinliğinin artırılması için önerilen yaklaşım ile oluşturulan optimum odaklı görüntüler daha az bulanıklığa sahiptir. Derin öğrenmenin tüm farklı odaklamalara sahip görüntü dizileri için optimum performans sağladığını gösteren Tablo 3 ve 5'teki sayısal sonuçlar, Şekil 3 – 5'teki görsel sonuçlarla uyumludur.

DEĞERLENDİRME

Işıklı mikroskopik sistemlerde genellikle 2B görüntüler kullanılarak kan hücrelerinin otomatik sayımını, tespitini, sınıflandırılmasını ve segmentasyonunu gerçekleştiren çalışmalar gerçekleştirilmektedir. Bu sistemlerde var olan odaklama derinliğinden dolayı kan hücreleri bulunan numuneler optimum odaklı görüntülenememektedir. Bu durum, kan hücrelerinin otomatik sayımını, tespitini, sınıflandırılmasını ve segmentasyonunu gerçekleştiren çalışmalarda performans kaybına sebep olabilmektedir. Literatürde odaklama derinliği artırılarak numunenin optimum odaklı (tüm alanı odaklanmış) görüntüsü oluşturulmaktadır. Odaklama derinliğinin artırılması sürecinde hala yüksek çalışma süresi, kullanılan numuneye ve mikroskop çeşidine göre farklı performans gösterme gibi çeşitli eksiklikler mevcuttur. Bu çalışmada, literatürdeki bu eksiklikleri gidermek amacıyla mikroskopik sistemlerde kan hücrelerinin optimum odaklı görüntülenmesi için hem yeni veri seti oluşturulmakta hem de derin öğrenme tabanlı yeni bir odaklama derinliği artırılması yaklaşımı önerilmektedir.

Bu çalışmanın literatüre temel katkıları şu şekilde sıralanabilmektedir: (1) Mikroskopik sistemlerde kan hücrelerinin optimum odaklı görüntülenmesi için hem yeni veri seti oluşturulmakta hem de odaklama derinliği artırılmasında derin öğrenme tabanlı yeni yaklaşım önerilmektedir. (2) Optimum odaklı görüntü üretme sürecinde odak bilgileri hesaplanırken derin özelliklerin ne kadar etkili olduğu incelenmektedir. (3) Bu çalışma görüntü dizisindeki piksellerin odak değerlerinin hesaplanmasında derin özellikleri kullanmaktadır.

Odaklama derinliğinin artırılması için geliştirilen yaklaşım iki temel adım içermektedir; (1) derin özelliklerin çıkarımı için ağ tasarımı ve (2) optimum odaklı görüntü üretimi. İlk adımda (derin özelliklerin çıkarımı için ağ tasarımı), farklı odaklamalara sahip görüntülerin derin özelliklerinin çıkarılması için model eğitilmektedir. İkinci

adımda (optimum odaklı görüntü üretimi), eğitilmiş derin öğrenme modeli kullanılarak piksellerin odak bilgileri çıkarılmakta ve kan hücrelerinin optimum odaklı görüntülenmesi sağlanmaktadır.

Çalışmanın performansını değerlendirmek için Algı Tabanlı Görüntü Kalitesi (Perception based Image Quality Evaluator - PIQE), Referanssız Görüntü Uzamsal Kalite (Blind Image Spatial Quality Evaluator), Bulanıklık (Blurring) ve Doğallık Görüntü Kalitesi (Naturalness Image Quality) olmak üzere dört farklı kriter kullanılmaktadır. En iyi performansa sahip odaklama derinliğinin artırılması yaklaşımının bu değerlerinin minimum olması beklenmektedir. Geliştirilen çalışmada 13 farklı odaklama derinliğinin artırılması yaklaşımı test edilmektedir. Bu çalışmada hem performans değerlendirme kriterlerinin sonuçları hem de görsel temsillerle kan hücrelerinin optimum odaklı görüntülenmesi için önerilen derin öğrenme tabanlı odaklama derinliğinin artırılması yaklaşımının diğer yaklaşımlara göre daha performanslı olduğu ispatlanmaktadır.

TEŞEKKÜR

Desteklerinden dolayı Karadeniz Teknik Üniversitesi İlaç ve Farmasötik Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi'ne teşekkür ederiz. Bu çalışma Karadeniz Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi (Proje no. TSA-2019-8561 ve FBB-2023-10975) ve Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) (Proje no. 1919B012224345) tarafından desteklenmiştir. Ayrıca bu çalışma, TÜBİTAK 2219 Uluslararası Doktora Sonrası Araştırma Burs Programı tarafından sağlanan fonla desteklenmiştir (Proje no. 1059B192300257).

KAYNAKLAR

- Ahmad, M. B., & Choi, T. S. (2007). Application of three dimensional shape from image focus in LCD/TFT displays manufacturing. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, 53(1), 1-4. <https://doi.org/10.1109/TCE.2007.339492>
- Akpinar, U., Sahin, E., Meem, M., Menon, R., & Gotchev, A. (2021). Learning wavefront coding for extended depth of field imaging. *IEEE Transactions on Image Processing*, 30, 3307-3320. <https://doi.org/10.1109/TIP.2021.3060166>
- Alam, M. M., & Islam, M. T. (2019). Machine learning approach of automatic identification and counting of blood cells. *Healthcare Technology Letters*, 6(4), 103-108. <https://doi.org/10.1049/htl.2018.5098>
- Ambikumar, A. S., Bailey, D. G., & Gupta, G. S. (2016, November). Extending the depth of field in microscopy: A review. In 2016 International Conference on Image and Vision Computing New Zealand (IVCNZ) (pp. 1-6). IEEE.
- An, Y., Kang, G., Kim, I. J., Chung, H. S., & Park, J. (2008, December). Shape from focus through Laplacian using 3D window. In 2008 Second International Conference on Future Generation Communication and Networking (Vol. 2, pp. 46-50). IEEE.
- Cao, Z., Zhai, C., Li, J., Xian, F., & Pei, S. (2017). Combination of color coding and wavefront coding for extended depth of field. *Optics Communications*, 392, 252-257. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2017.02.016>
- Cengil, E., Çımar, A., & Yıldırım, M. (2022). A hybrid approach for efficient multi-classification of white blood cells based on transfer learning techniques and traditional machine learning methods. *Concurrency and Computation: Practice and Experience*, 34(6), e6756. <https://doi.org/10.1002/cpe.6756>
- Crete, F., Dolmiere, T., Ladret, P., & Nicolas, M. (2007, February). The blur effect: perception and estimation with a new no-reference perceptual blur metric. In Human Vision and Electronic Imaging XII (Vol. 6492, pp. 196-206). SPIE.
- Danışmaz, S., Emir, S. N., Doğan, H., & Doğan, R. Ö. (2023). Odaklama derinliğinin artırılmasında derin özelliklerin odaklama değerlerinin çıkarılmasındaki etkilerinin incelenmesi. *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 31(3), 917-930. <https://doi.org/10.31796/ogummf.1299670>
- Dogan, H., Dogan, R. O., Ay, I., & Sezen, S. F. (2024). DL-EDOF: Novel Multi-Focus Image Data Set and Deep Learning-Based Approach for More Accurate and Specimen-Free Extended Depth of Focus. *Journal of Imaging Informatics in Medicine*, 1-23. <https://doi.org/10.1007/s10278-024-01076-z>
- Dowski, E. R., & Cathey, W. T. (1995). Extended depth of field through wave-front coding. *Applied Optics*, 34(11), 1859-1866. <https://doi.org/10.1364/AO.34.001859>

- Du, H., Dong, L., Liu, M., Zhao, Y., Wu, Y., Li, X., ... & Kong, L. (2019). Increasing aperture and depth of field simultaneously with wavefront coding technology. *Applied Optics*, 58(17), 4746-4752. <https://doi.org/10.1364/AO.58.004746>
- Elmalem, S., Giryas, R., & Marom, E. (2018). Learned phase coded aperture for the benefit of depth of field extension. *Optics Express*, 26(12), 15316-15331. <https://doi.org/10.1364/OE.26.015316>
- Forster, B., Van De Ville, D., Berent, J., Sage, D., & Unser, M. (2004). Complex wavelets for extended depth-of-field: A new method for the fusion of multichannel microscopy images. *Microscopy Research and Technique*, 65(1-2), 33-42. <https://doi.org/10.1002/jemt.20092>
- Geusebroek, J. M., Cornelissen, F., Smeulders, A. W., & Geerts, H. (2000). Robust autofocusing in microscopy. *Cytometry: The Journal of the International Society for Analytical Cytology*, 39(1), 1-9. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0320\(20000101\)39:1<1::AID-CYTO2>3.0.CO;2-J](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0320(20000101)39:1<1::AID-CYTO2>3.0.CO;2-J)
- Gu, W., & Sun, K. (2024). AYOLOv5: Improved YOLOv5 based on attention mechanism for blood cell detection. *Biomedical Signal Processing and Control*, 88, 105034. <https://doi.org/10.1016/j.bspc.2023.105034>
- Guo, Y., Shahin, A. I., & Garg, H. (2024). An indeterminacy fusion of encoder-decoder network based on neutrosophic set for white blood cells segmentation. *Expert Systems with Applications*, 246, 123156. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2024.123156>
- H Mohamed, E., H El-Behaidy, W., Khoriba, G., & Li, J. (2020). Improved white blood cells classification based on pre-trained deep learning models. *Journal of Communications Software and Systems*, 16(1), 37-45. <https://doi.org/10.24138/jcomss.v16i1.818>
- Helmlı, F. S., & Scherer, S. (2001, June). Adaptive shape from focus with an error estimation in light microscopy. In ISPA 2001. Proceedings of the 2nd International Symposium on Image and Signal Processing and Analysis. In conjunction with 23rd International Conference on Information Technology Interfaces (IEEE Cat. (pp. 188-193). IEEE.
- Hermessi, H., Mourali, O., & Zagrouba, E. (2021). Multimodal medical image fusion review: Theoretical background and recent advances. *Signal Processing*, 183, 108036. <https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2021.108036>
- Khan, Z., hamad Shirazi, S., Shahzad, M., Munir, A., Rasheed, A., Xie, Y., & Gul, S. (2024). A Framework for Segmentation and Classification of Blood Cells Using Generative Adversarial Networks. *IEEE Access*, 12, 51995-52015. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3378575>
- Lee, S. Y., Kumar, Y., Cho, J. M., Lee, S. W., & Kim, S. W. (2008). Enhanced autofocus algorithm using robust focus measure and fuzzy reasoning. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 18(9), 1237-1246. <https://doi.org/10.1109/TCSVT.2008.924105>
- Lee, S. Y., Yoo, J. T., Kumar, Y., & Kim, S. W. (2009). Reduced energy-ratio measure for robust autofocusing in digital camera. *IEEE Signal Processing Letters*, 16(2), 133-136. <https://doi.org/10.1109/LSP.2008.2008938>
- Li, Y., Wang, J., Zhang, X., Hu, K., Ye, L., Gao, M., ... & Xu, M. (2022). Extended depth-of-field infrared imaging with deeply learned wavefront coding. *Optics Express*, 30(22), 40018-40031. <https://doi.org/10.1364/OE.471443>
- Lin, T. Y., Maire, M., Belongie, S., Hays, J., Perona, P., Ramanan, D., ... & Zitnick, C. L. (2014). Microsoft coco: Common objects in context. In Computer Vision—ECCV 2014: 13th European Conference, Zurich, Switzerland, September 6-12, 2014, Proceedings, Part V 13 (pp. 740-755). Springer International Publishing.
- Lorenzo, J., Castrillon, M., Méndez, J., & Deniz, O. (2008, December). Exploring the use of local binary patterns as focus measure. In 2008 International Conference on Computational Intelligence for Modelling Control & Automation (pp. 855-860). IEEE.
- Lu, Y., Qin, X., Fan, H., Lai, T., & Li, Z. (2021). WBC-Net: A white blood cell segmentation network based on UNet++ and ResNet. *Applied Soft Computing*, 101, 107006. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2020.107006>
- Lu, N., Tay, H. M., Petchakup, C., He, L., Gong, L., Maw, K. K., ... & Hou, H. W. (2023). Label-free microfluidic cell sorting and detection for rapid blood analysis. *Lab on a Chip*, 23(5), 1226-1257. <https://doi.org/10.1039/D2LC00904H>
- Mahmood, F., Mahmood, J., Zeb, A., & Iqbal, J. (2018, April). 3D shape recovery from image focus using Gabor features. In Tenth international conference on machine vision (ICMV 2017) (Vol. 10696, pp. 368-375). SPIE.

- Malik, A. S., & Choi, T. S. (2008). A novel algorithm for estimation of depth map using image focus for 3D shape recovery in the presence of noise. *Pattern Recognition*, 41(7), 2200-2225. <https://doi.org/10.1016/j.patcog.2007.12.014>
- Minhas, R., Mohammed, A. A., & Wu, Q. J. (2011). Shape from focus using fast discrete curvelet transform. *Pattern Recognition*, 44(4), 839-853. <https://doi.org/10.1016/j.patcog.2010.10.015>
- Mittal, A., Moorthy, A. K., & Bovik, A. C. (2012). No-reference image quality assessment in the spatial domain. *IEEE Transactions on Image Processing*, 21(12), 4695-4708. <https://doi.org/10.1109/TIP.2012.2214050>
- Mittal, A., Soundararajan, R., & Bovik, A. C. (2012). Making a “completely blind” image quality analyzer. *IEEE Signal Processing Letters*, 20(3), 209-212. <https://doi.org/10.1109/LSP.2012.2227726>
- Mo, X., Zhang, T., Wang, B., Huang, X., Kuang, C., & Liu, X. (2019). Alleviating image artifacts in wavefront coding extended depth of field imaging system. *Optics Communications*, 436, 232-238. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2018.12.006>
- Pan, C., Chen, J., Zhang, R., & Zhuang, S. (2008). Extension ratio of depth of field by wavefront coding method. *Optics Express*, 16(17), 13364-13371. <https://doi.org/10.1364/OE.16.013364>
- Patil, A. M., Patil, M. D., & Birajdar, G. K. (2021). White blood cells image classification using deep learning with canonical correlation analysis. *Irbm*, 42(5), 378-389. <https://doi.org/10.1016/j.irbm.2020.08.005>
- Pech-Pacheco, J. L., Cristóbal, G., Chamorro-Martinez, J., & Fernández-Valdivia, J. (2000, September). Diatom autofocusing in brightfield microscopy: a comparative study. In Proceedings 15th International Conference on Pattern Recognition. ICPR-2000 (Vol. 3, pp. 314-317). IEEE.
- Pertuz, S., Puig, D., & Garcia, M. A. (2013). Analysis of focus measure operators for shape-from-focus. *Pattern Recognition*, 46(5), 1415-1432. <https://doi.org/10.1016/j.patcog.2012.11.011>
- Shen, C. H., & Chen, H. H. (2006, January). Robust focus measure for low-contrast images. In 2006 Digest of technical papers international conference on consumer electronics (pp. 69-70). IEEE.
- Tessens, L., Ledda, A., Pizurica, A., & Philips, W. (2007, April). Extending the depth of field in microscopy through curvelet-based frequency-adaptive image fusion. In 2007 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing-ICASSP'07 (Vol. 1, pp. I-861). IEEE.
- Venkatanath, N., Praneeth, D., Bh, M. C., Channappayya, S. S., & Medasani, S. S. (2015, February). Blind image quality evaluation using perception based features. In 2015 twenty first national conference on communications (NCC) (pp. 1-6). IEEE.
- Wee, C. Y., & Paramesran, R. (2007). Measure of image sharpness using eigenvalues. *Information Sciences*, 177(12), 2533-2552. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2006.12.023>
- Wei, X., Han, J., Xie, S., Yang, B., Wan, X., & Zhang, W. (2019). Experimental analysis of a wavefront coding system with a phase plate in different surfaces. *Applied Optics*, 58(33), 9195-9200. <https://doi.org/10.1364/AO.58.009195>
- Xie, H., Rong, W., & Sun, L. (2007). Construction and evaluation of a wavelet-based focus measure for microscopy imaging. *Microscopy Research and Technique*, 70(11), 987-995. <https://doi.org/10.1002/jemt.20506>
- Yap, P. T., & Raveendran, P. (2004). Image focus measure based on Chebyshev moments. *IEE Proceedings-Vision, Image and Signal Processing*, 151(2), 128-136.
- Zhao, T., Mauger, T., & Li, G. (2013). Optimization of wavefront-coded infinity-corrected microscope systems with extended depth of field. *Biomedical Optics Express*, 4(8), 1464-1471. <https://doi.org/10.1364/BOE.4.001464>



Kahramanmaraş Sütçü İmam University

Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 01.07.2024
Kabul Tarihi : 28.08.2024

Received Date : 01.07.2024
Accepted Date : 28.08.2024

KOKLEAGRAM ÖZELLİKLERİ İLE DERİN ÖĞRENME TABANLI SES BİRLEŞTİRME SAHTECİLİĞİ TESPİTİ

DETECTION OF AUDIO SPLICING ON THE BASIS OF DEEP LEARNING WITH COCHLEOGRAM FEATURES

Arda ÜSTÜBİOĞLU¹ (ORCID: 0000-0002-8656-8697)

¹Trabzon Üniversitesi, Yönetim Bilişim Sistemleri, Trabzon, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Arda ÜSTÜBİOĞLU, ardaustubioglu@trabzon.edu.tr

ÖZET

Günümüzde ses kayıtları üzerinde yapılan oynamalardan Ses birleştirme (Audio Splicing) sahteciliği veri bütünlüğünü ihlal eden, etkili, gerçekleştirmesi kolay ve oldukça yaygın olarak gerçekleştirilen bir sahteciliktir. İki farklı ses kaydının birleştirilmesiyle gerçekleştirilen bu sahteciliğin, saldırganlar tarafından sahtecilik izlerini gizlemek için uygulanan son işlem operasyonları ile tespitini oldukça zordur. Bu amaçla ses birleştirme sahteciliğini tespit etmek için kokleagram görüntülerini kullanan CNN tabanlı yeni bir yöntem önerilmiştir. Önerilen CNN mimarisine giriş olarak sesin kokleagram görüntüsü verilmektedir. Kokleagram görüntüleriyle eğitilen mimari, şüpheli bir test dosyası verildiğinde, ses dosyasını sahte/orijinal olarak etiketlemektedir. Ayrıca, literatürde genel bir veri tabanı bulunmadığından, bu çalışmada önerilen yöntemin performansını test etmek için TIMIT veri tabanı kullanılarak 2 sn ve 3 sn'lik iki ayrı ses birleştirme sahteciliği veri tabanı SET2 ve SET3 oluşturulmuştur. Önerilen yöntemle SET2 veri seti üzerinde 0.95 Doğruluk, 0.97 Kesinlik, 0.93 Duyarlılık ve 0.95 F1-skor, SET3 veri setinde 0.98 Doğruluk, 0.98 Kesinlik, 0.97 Duyarlılık ve 0.97 F1-skor değerleri alınmıştır. Ayrıca önerilen yöntem, NOIZEUS-4 veri seti üzerinde de test edilmiş ve oldukça yüksek sonuçlar elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar önerilen yöntemin gürültüye karşı dayanıklı ve ses birleştirme sahteciliği tespitini literatürdeki diğer çalışmalara göre oldukça etkin bir şekilde gerçekleştirdiğini göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Kokleagram, ses birleştirme sahteciliği, siber güvenlik

ABSTRACT

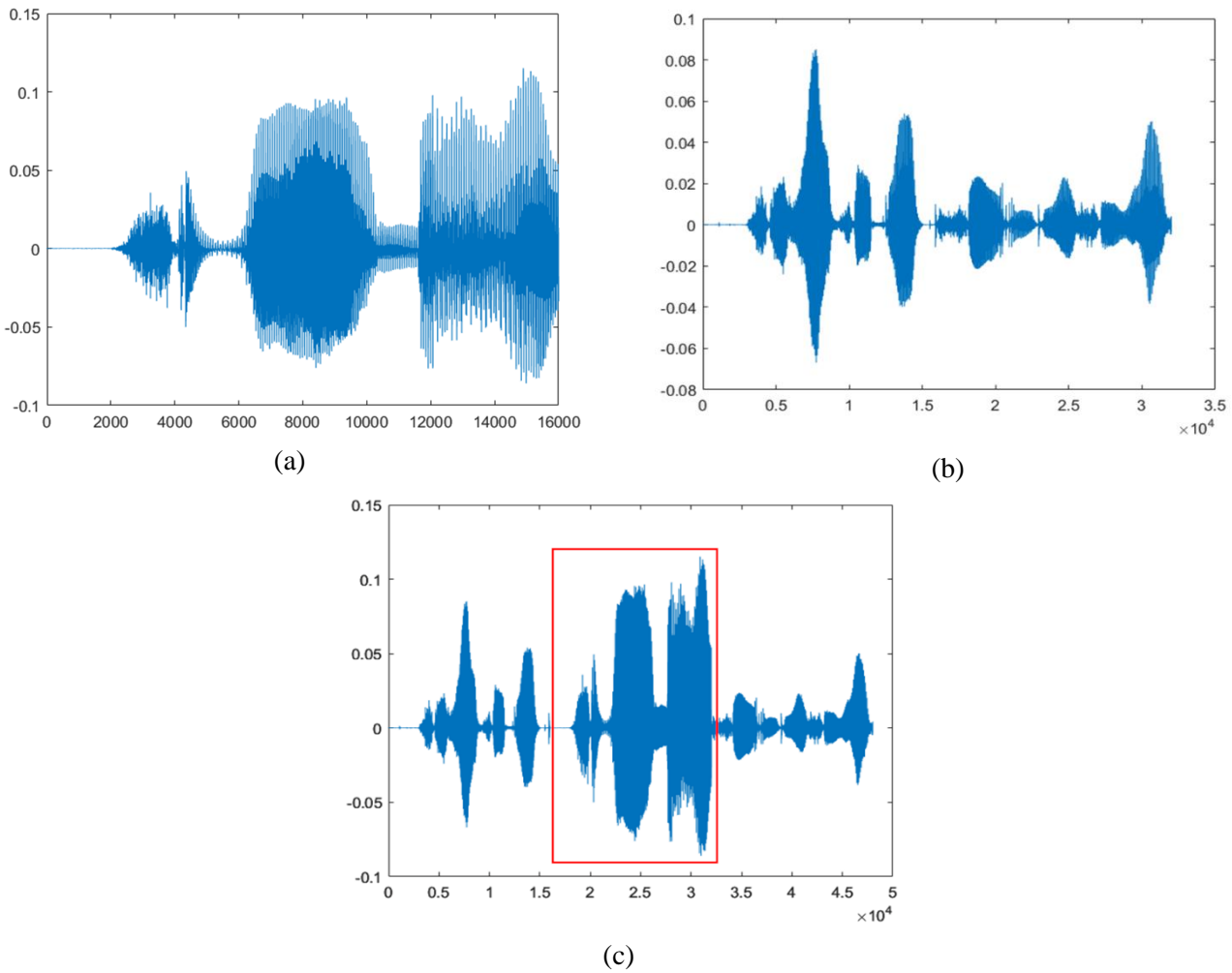
Audio splicing is an effective, easy-to-perform and widespread forgery that violates data integrity. This forgery, which is performed by combining two different audio recordings, is very difficult to detect with the post-processing operations applied by the attackers to hide the forgery traces. For this purpose, a new CNN-based method using cochleagram images is proposed to detect audio fusion forgery. The cochleagram image of the audio is given as input to the proposed CNN architecture. The architecture trained with the cochleagram images, given a suspicious test file, labels the audio file as forged/original. In addition, since there is no general database in the literature, two separate 2 s and 3 s audio merging forgery databases SET2 and SET3 are created using the TIMIT database to test the performance of the proposed method in this study. With the proposed method, 0.95 Accuracy, 0.97 Precision, 0.93 Sensitivity and 0.95 F1-score were obtained on SET2 dataset, while 0.98 Accuracy, 0.98 Precision, 0.97 Sensitivity and 0.97 F1-score were obtained on SET3 dataset. In addition, the proposed method was also tested on the NOIZEUS-4 dataset and very high results were obtained. The results obtained show that the proposed method is robust to noise and performs audio splicing forgery detection in a very effective way compared to other studies in the literature.

Keywords: Cochleagram, audio splicing forgery, cybersecurity

ToCite: ÜSTÜBİOĞLU, A., (2024). KOKLEAGRAM ÖZELLİKLERİ İLE DERİN ÖĞRENME TABANLI SES BİRLEŞTİRME SAHTECİLİĞİ TESPİTİ, *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 27(4), 1477-1489.

GİRİŞ

Günümüzde, sesli mesajlar, kaydedilmiş telefon görüşmeleri veya videolardan alınan ses kayıtlarıyla giderek daha fazla ses kaydı üretilmektedir. Ses kayıtlarının üzerinde ise Audacity (Yang vd.,2008) gibi ticari ya da ücretsiz gelişmiş ses düzenleme yazılımları sayesinde oynama yapılmakta ve bu oynanmış kayıtlar internet üzerinden paylaşılmaktadır. Son zamanlarda ses kayıtları üzerinde yapılan oynamalardan Ses birleştirme (Audio Splicing) sahteciliği bütünlüğü ihlal eden, etkili, gerçekleştirmesi kolay ve oldukça yaygın olarak gerçekleştirilen bir sahteciliktir. Örneğin, “Olay gecesi Ali’yi gördüm” cümlesini içeren ses kaydı ile aynı konuşmacının bir başka zaman aralığındaki ses kaydı “Hasan’ı ve Mehmet’i görmedim” cümlesi birleştirilebilir. Birleştirme esnasında ikinci kayıttaki “ve Mehmet’ i” segmentleri alınıp birinci kayıta yapıştırılarak, “Olay gecesi Ali’ yi ve Mehmet’i gördüm” sahte ses kaydı oluşturulabilmektedir. Bu sahte ses kaydı ile orijinal ses kayıtlarının anlamsal içeriği tamamen bozulabildiği görülmektedir. Şekil 1’ de ses birleştirme sahteciliği için bir örnek verilmiştir. Şekil 1(b)’ deki 2 saniyelik orijinal sesin ortasına Şekil 1(a)’ da ki 1 saniyelik orijinal ses eklenerek Şekil 1(c)’ deki 3 saniyelik sahte ses oluşturulmuştur. Şekil 1 (c)’ de kırmızı ile gösterilen çerçeve eklenen Şekil 1(a)’ da ki 1 saniyelik orijinal sesi göstermektedir.



Şekil 1. a. Orijinal Ses (1 sn) b. Orijinal Ses (2 sn) c. Ses Birleştirme Sahteciliği ile Oluşturulmuş Sahte Ses

Birleştirme sahteciliği ile oluşturulmuş sahte ses kayıtlarına, işlem sonrası oluşan art efektleri engellemek amacıyla sıkıştırma, gürültü ekleme, filtreleme gibi son işlem operasyonları uygulanmaktadır. Bu yapılan son işlem operasyonları sahtecilik ipuçlarını gizlediği için, adli olaylarla ilgili materyallerin bütünlüğünü doğrulamakla görevli ses analistlerinin işini zorlaştırmaktadır. Ses kayıtlarının genellikle cezai soruşturmalar için de önemli ipuçları içerdiği düşünülürse, bu ses kayıtların etkin bir şekilde doğrulanması büyük önem arz etmektedir.

Literatürde ses kayıtlarının doğrulanması amacıyla yapılan çalışmalar aktif ve pasif yöntemler olmak üzere iki başlık altında toplanabilir. Aktif doğrulama yöntemleri, dijital filigranlar ve dijital imzalıdır. Bu yöntemlerde

sesten üretilen filigran ve imza bilgisi ile alınan bilgi karşılaştırılarak ses doğrulaması gerçekleştirilmektedir. Pasif doğrulama yöntemlerinde ise bir filigran veya imzaya ihtiyaç duyulmaksızın, ses kayıtlarından çıkarılan özellikler kullanılmaktadır. Literatürde pasif doğrulama yöntemleri, herhangi bir ek bilgi gerektirmediği için aktif yöntemlere göre daha yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu nedenle önerilen çalışmada ses birleştirme sahteciliğinin tespitine yönelik ilgili pasif yöntemlere odaklanılacaktır.

Ses Birleştirme sahteciliğinin tespitine yönelik pasif yöntemlerde Elle Çıkarılmış Özelliklere ve Derin Öğrenme Yöntemlerine dayalı yöntemler olarak ikiye ayrılmaktadır.

Elle Çıkarılmış Özelliklere Dayalı Yöntemler

Ses ekleme tespiti alanında yapılan çalışmaların büyük bir çoğunluğu sestene elle çıkarılmış özelliklere dayanmaktadır. Yang vd. MP3 kodlu ses dosyalarında ses çerçevelerinin ofsetlerindeki tutarsızlıkları belirleyerek, ses kaydındaki birleştirme yerlerini tespit etmektedirler (Yang vd., 2008). Pan vd. ses sinyallerinin gürültü seviyelerine göre tespit yapmışlardır. Bunun için ses dosyalarındaki gürültü seviyesindeki anormal değişiklikleri belirlemişlerdir (Pan vd., 2012). Meng vd. benzer bir yaklaşımla sesin tamamı yerine her bir hece için yerel gürültü seviyelerini hesaplamışlardır (Meng vd., 2018). Cooper vd. sıkıştırılmamış sesler için ses dalga biçiminin yüksek frekanslarındaki süreksizliklerine dayalı olarak ses birleştirme sahteciliğini tespit etmektedir (Cooper, 2010). Cuccovillo vd farklı cihazlardan gelen kaynak dosyalarının sinyaldeki karakteristik izlerinden yararlanarak mikrofon sınıflandırmasına dayalı ses birleştirme sahteciliği tespiti gerçekleştirmiştir (Cuccovillo vd., 2013). Literatürde ses birleştirme sahteciliği tespitinde elektrik ağı frekansı (Electrical Network Frequency-ENF) analizine dayalı (Lin ve Kang, 2017a; Lin ve Kang, 2017b; Esquef vd., 2015) ve akustik çevresel imzaları modelleyen çalışmalarda mevcuttur (Rouniyar vd., 2018; Zhao ., 20vd17; Zhao vd., 2014).

Elle özellik çıkarım yapan bu yöntemler her biri sahtecilik tespitinde bir kısıta sahip olduğundan (belirli ses sıkıştırma formatlarında çalışma, farklı kayıt cihazlarından yararlanma, değişen gürültü vb.) tüm seslerde sonuç verememektedir.

Derin Öğrenme Yöntemlerine Dayalı Yöntemler

Derin öğrenme yöntemleri günümüzde her alanda oldukça yaygın kullanılmasına rağmen ses sahteciliği tespiti alanında özellikle de ses birleştirme sahteciliği alanında oldukça az çalışmada kullanılmıştır. Mao ve diğerleri (Mao vd., 2020) ses birleştirme sahteciliği tespiti için bir evrimsel sinir ağı (Convolutional Neural Network-CNN) sınıflandırıcısı önermiştir. Önerilen CNN mimarisi sesi sadece sahte/orijinal olarak etiketleyebilmekte ancak lokalizasyon gerçekleştirememektedir. Zhang ve diğerleri ise (Zhang vd., 2022) VGG-16 tabanlı bir mimari kullanarak ses birleştirme sahteciliğini tespit etmektedir. Önerilen yöntemde oldukça kısıtlayıcı varsayımlar yapılmaktadır. Örneğin, önerilen mimari yalnızca 1 saniye süreli segmentlerle yapılan ses birleştirme sahteciliğini tespit edebilmektedir. Bununla birlikte ses birleştirme sahteciliğiyle oluşturulmuş sahte seste, eklenen sesler farklı bir konuşmacıdan rastgele alınmıştır. Jadhav ve diğerleri (Jadhav vd., 2019) önermiş oldukları çalışmada ses sinyallerine kısa vadeli Fourier dönüşümü uygulamışlar ve elde edilen vektörleri, önerdikleri CNN mimarisini girdi olarak beslemede kullanmışlardır. Önerilen çalışmada aynı konuşmacının segmentleri ile oluşturan sahte seslerin tespiti değerlendirilmemiştir. Zeng vd. (Zeng ve Wu, 2022) spektrogram çerçevelerinin parçaları için bir ResNet-18 yöntemini kullanarak çeşitli ses birleştirme sahteciliklerini tespit edebilmektedir. Bununla birlikte, önerdikleri yöntem yalnızca 32 ila 64 büyüklüğündeki pencerelerde lokalizasyon için uygundur. Chuchra ve diğerleri (Chuchra vd., 2022) 12 katmanlı küçük ama daha derin bir model ile Resnet-18 ve CNN yöntemlerini kullanarak ses birleştirme sahteciliği tespitini gerçekleştirmiştir. Üstübioğlu vd. 2024' te önerdikleri çalışmada giriş olarak verilen ses dosyası kokleagram görüntüsüne dönüştürülür. İkinci aşamada EfficientNet ile kokleagram görüntülerinden özellikler çıkarılır ve ArCapsNet bu özellikler ile eğitilir. Eğitim sonucunda test olarak verilen ses dosyaları sahte/orijinal olarak etiketlenir.

Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde birçok çalışma, ses birleştirme sahteciliği tespiti için elle özellik çıkarmaktadır. Elle çıkarıma dayalı yöntemlerin en büyük eksikliği, yalnızca probleme özel uygulanabilir olmalarıdır. Örneğin, kayıt cihazlarındaki farklılıkları bulmaya yönelik yöntemler, aynı cihazın kullanılması durumunda sahtecilik tespiti yapamamaktadır. Bir başka örnek, kayıt ortamlarına göre sahtecilik tespiti yapan yöntem aynı kayıt ortamında oluşturulmuş sahte seslerin tespitini gerçekleştiremeyecektir. Bununla birlikte, derin öğrenme teknikleri daha karmaşık veri dağılımlarına uyan özelliklerin öğrenilmesini sağlayarak elle özellik seçiminin kısıtlamalarının üstesinden gelmesini mümkün kılmaktadır. Bu sebeple sunulan çalışmada ses birleştirme sahteciliğini tespit etmek için CNN tabanlı bir yöntem önerilmiştir. Literatürde ses birleştirme

sahteciliği tespiti dışında, solunum seslerinin sınıflandırılmasında (Mang, L vd., 2023, 2024) ve müzik dosyalarındaki duygu sınıflandırılmasında (Russo, M vd., 2020) sesin kokleagram görüntüleri kullanan derin öğrenme tabanlı çalışmalar da mevcuttur. Mang, L vd., 2023 çalışmasında solunum seslerinden sınıflandırılmasında önerdikleri CNN mimarileri girişi için en uygun dönüşümü belirlemek üzere farklı zaman-frekans temsillerini (Spektogram, Mel Spektogram ve Kokleagram) analiz etmişlerdir. Aynı yazarların 2024' te yaptıkları çalışmada ise Vision transformerlar kullanılmıştır. Transformerlara giriş olarak sesin kokleagram görüntüleri verilmiştir. Russo, M vd., tarafından gerçekleştirilen müzik dosyaların duygu sınıflandırma çalışmasında ise önerdikleri farklı CNN mimarilerine giriş görüntüsü olarak kokleagram görüntüleri verilmiştir. Tüm bu çalışmalarda kullanılan kokleagram parametreleri ve CNN mimarileri farklıdır. Önerilen yöntemde ise solunum sesleri ve müzik dosyalarından farklı olarak birleştirme sahteciliği ile oluşturulan sahte seslere uygun olarak ayarlanan parametrelerle (pencere boyutu, gammatone kanal sayısı ve frekans aralığı) ses dosyaları kokleagram görüntülerine dönüştürülmüştür. Elde edilen sahte seslere özel kokleagram görüntüleri tarafımızdan önerilen CNN mimarisine giriş olarak verilmiştir. Kokleagram görüntüleriyle eğitilen mimari, şüpheli bir test dosyası verildiğinde, ses dosyasını sahte/orijinal olarak etiketlemektedir. Ayrıca, literatürde genel bir veri tabanı bulunmadığından, bu çalışmada önerilen yöntemin performansını test etmek için TIMIT veri tabanı kullanılarak 2 sn ve 3 sn'lik iki ayrı ses birleştirme sahteciliği veri tabanı oluşturulmuştur. Bu makalenin literatüre başlıca katkıları şunlardır:

- Önerilen yöntem sahte sesler için kokleagram özelliklerini kullanmaktadır. Literatürde bildiğimiz kadarıyla, ses birleştirme sahteciliği tespiti üzerine mevcut çalışmaların hiçbiri sahte seslere uygun olarak kokleagram özelliklerini kullanmamıştır. Bu çalışma, ses birleştirme sahteciliğinin tespiti için kokleagram ile derin öğrenmeyi kullanan ilk çalışmadır.

- Literatürde ortak bir veri tabanı olmaması sebebiyle önerilen yöntemin performansını değerlendirmek için bu çalışmada TIMIT konuşma veri tabanından iki ayrı ses birleştirme sahteciliği veri tabanı oluşturulmuştur.

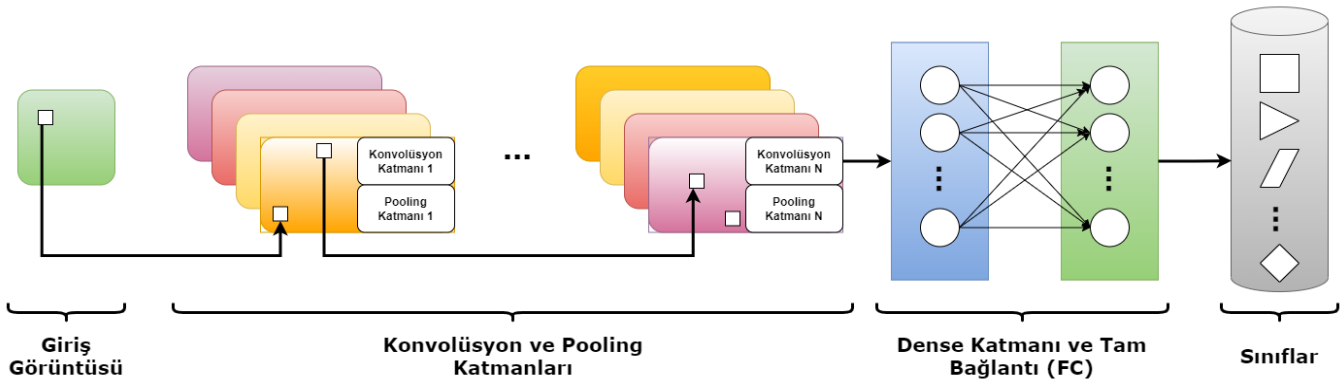
- Deneysel sonuçlardan, önerilen yöntemin orijinal ve hem sondan hem de ortadan eklemeli sahte sesler için yüksek doğruluk oranlarına sahip olduğu görülmüştür.

-Elde edilen sonuçlar önerilen yöntemin, literatürdeki diğer yöntemlerden SET2 ve SET3 veri seti üzerinde daha üstün performans sergilediğini ve gürültüye karşı oldukça dayanıklı olduğunu göstermektedir.

Makalenin geri kalanı aşağıdaki gibi düzenlenmiştir: Bölüm 2'de Materyal ve Yöntem verilmiştir. Deneysel ve sonuçlar Bölüm 3'te raporlanmıştır. Son olarak, Bölüm 4'te çalışma sonuçlandırılmıştır.

ÖNERİLEN YÖNTEM

Bu çalışmanın amacı, ses birleştirme sahteciliğini tespit etmek için oldukça düşük maliyetle yüksek performans elde edebilen etkili bir derin ASFD (Audio Splice Forgery Detection) yöntemi oluşturmaktır. Önerilen ASFD yöntemi, ses birleştirme sahteciliğini tespiti için CNN mimarisinden faydalanmaktadır. Çok katmanlı perceptron ağ yapısına dayalı olarak geliştirilen CNN, literatürde birçok alanda etkin bir şekilde kullanılmış ve oldukça popüler hale gelmiştir. Bir CNN modeli çeşitli katmanlar içermektedir. Bu katmanlar konvolüsyon, havuzlama, normalizasyon ve tam bağlı katmanlardır. CNN modelinin yapısı Şekil 2' de verilmiştir.



Şekil 2. CNN Modelinin Yapısı

CNN modeli, 2D görüntüleri girdi olarak alan girdi katmanı ile başlamaktadır. Giriş katmanını belirli sayıda Konvolüsyon (CNV) katmanı takip etmektedir. Konvolüsyon katmanı, giriş görüntüsündeki yerel bölgelerden giriş özellik haritalarını alır ve bu bölgeleri konvolüsyon filtresi uygulayarak çıkış özellik haritalarını oluşturur. Görüntü sınıflandırmada farklı katmanlarda özellikler üretmek için görüntülere 2D filtre uygulanmaktadır. CNV katmanından sonra çıktılarını oluşturmak için bir havuzlama katmanı gelir.

Havuzlama katmanı, görüntüdeki her bir yerel bölgenin maksimum veya ortalama değerini hesaplayarak aşağı örnekleme uygular. Bu havuzlama işleminin bir sonucu olarak, özellik haritasının boyutu küçültülerek verimli bir hesaplama performansı sağlanmaktadır.

Son aşamada, Tam Bağlantılı (FC) katman, konvolüsyon katmanının çıktılarını farklı ağırlıklarla birleştirir. Böylece, giriş özellik vektörü üzerinde doğrusal bir dönüşüm uygulanmış olur. FC katmanının çıktısını sınıflandırmak için her olası sınıf için olasılığı hesaplayan Softmax aktivasyon fonksiyonu kullanılmaktadır.

Önerilen yöntem iki aşamadan oluşmaktadır. İlk aşamada ses dosyası görüntüye dönüştürülmektedir. Ses dosyası görüntüye çevrilirken sesin kokleagramından faydalanılmaktadır. İkinci aşamada ise özel olarak tasarlanan CNN mimarisi sesin kokleagram görüntüsünü girdi olarak alır ve ses dosyasını sahte/orijinal olarak etiketler. Bu aşamaların detayları aşağıda verilmiştir.

Ses Dosyasının Kokleagram Görüntüsüne Çevrilmesi

Ses dosyası bir kokleagram görüntüsü ile temsil edilecektir. Bir ses dosyasının kokleagram gösterimi, sesin zaman-frekans görüntüsündeki frekans bileşenlerine karşılık gelir. Bu frekans bileşenleri insan kokleasının frekans seçiciliğine dayanır ve denklem (1)'de verildiği gibi bir gammaton filtresi ile modellenir (Patterson vd., 1992).

$$h(t) = At^{j-1}e^{-2\pi Bt} \cos(2\pi f_c t + \theta) \quad (1)$$

Burada A genlik, j filtrenin sırasını, B filtrenin bant genişliği, f_c filtrenin merkez frekansı, θ fazı ve t zamanı göstermektedir.

Koklea boyunca her noktada işitsel filtre genişliğinin psikoakustik bir ölçüsü olan eşdeğer dikdörtgen bant genişliği (ERB), (Patterson vd., 1992) 'da her koklea filtresinin bant genişliğini belirlemek için kullanılmıştır. Önerilen yöntem, (Greenwood, 1990) 'de verilen ve (Sharan ve Moir, 2015) 'de en iyi sonuçları ürettiği gösterilen ERB filtre modelini kullanmaktadır. Uygulaması (Sharan ve Moir, 2015; Slaney, 1998) 'da verilebilen gammatonu filtresi ile sinyal filtreledikten sonra, her frekans kanalı için pencerelenmiş sinyaldeki enerji toplanarak spektrograma benzer bir gösterim elde edilir:

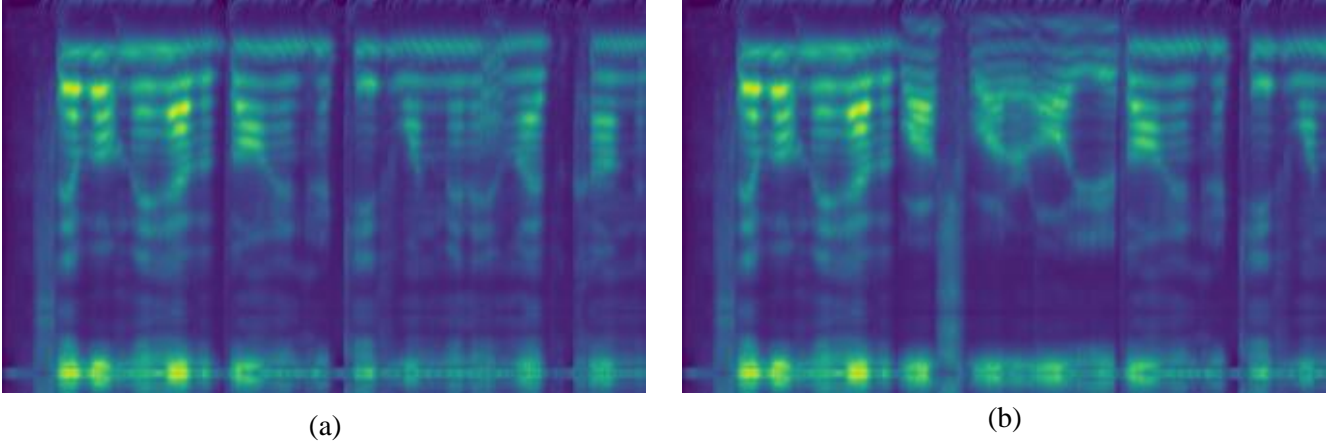
$$C(g, r) = \sum_{n=0}^{N-1} |\hat{x}(g, n)|w(n), \quad g = 1, 2, \dots, G \quad (2)$$

Burada $\hat{x}(g, n)$ gammaton filtrelenmiş sinyali, $C(r)$, g^{th} , for the r^{th} çerçeve için f_{cg} merkez frekansına karşılık gelen harmonik ve G gammaton filtre sayısıdır.

Kokleagram gösterimi ile önerilen algoritma, merkez frekansları 50 ila 8000 Hz arasında dağıtılmış 64 kanallı bir gammatonu filtre bankası kullanır. Bu filtre bankası standart bir koklear filtreleme modelidir ve işitsel periferinin psikofiziksel çalışmalarından elde edilmiştir. Her ses dosyası 64 kanallı bir gammaton filtre bankasından geçirilir. Daha sonra kokleagramı elde etmek için her bir ses dosyasının kısa vadeli enerjisi hesaplanır.

Sesin görsel temsili olan kokleagram görüntüsü, dikey ve yatay eksenlerde sırasıyla frekans ve zamanı temsil eden iki boyuta sahiptir. Belirli bir zamanda belirli bir frekanstaki sinyalin genliği, spektrogramdaki renk yoğunluğu ile temsil edilir. Örneğin, spektrogramdaki açık mavi en düşük genliği gösterirken, en yüksek genlik koyu kırmızı ile gösterilir.

Şekil 3' te orijinal ve sahte ses dosyalarının kokleagram görüntüleri sunulmaktadır.

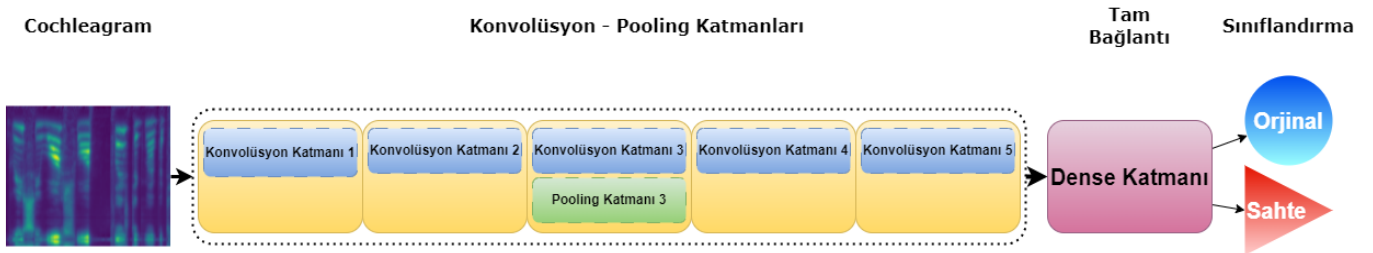


Şekil 3. a. Orijinal Sesin Kokleagram Görüntüsü b. Sahte Sesin Kokleagram Görüntüsü

Kokleagram Görüntüsünün Sınıflandırılması

Önerilen algoritma, ses birleştirme sahteciliğini tespit etmek için Şekil 4'te verilen CNN modelini kullanmaktadır. Şüpheli ses dosyasının sahte olup olmadığını tespit etmek için elle çıkarılmış özellik çıkarım yöntemleri yerine derin öğrenme tabanlı bir yöntem önerilmektedir.

Elle hazırlanmış özellik çıkarma yöntemleri kullanılırsa, sahte sesteki sahtecilik izlerini gizlemek için yapılan tüm son işlem operasyonlarına dayanıklı bir yöntem bulunması gerekmektedir. Aynı zamanda, seçilen özellik çıkarma yöntemi, ses dosyası örtüşen çerçevelere bölündükten sonra her çerçeveye uygulanacağından, önerilen algoritmanın koşum süresi ve işlem yükü artacaktır. Bu nedenle, önerilen yöntemin hem son işlem operasyonlarına karşı dayanıklı hem de hızlı ve düşük işlem yüküne sahip olmasını sağlamak için derin öğrenme tabanlı bir yöntem geliştirilmiştir.



Şekil 4. Kokleagram Görüntüsünün Sınıflandırılması

Derin öğrenme tabanlı yöntem kokleagram görüntüsünü girdi olarak almaktadır. Kısa ses klipleri üzerinden özellik çıkarmak ve çeşitli konuşma kayıtlarını sınıflandırmak oldukça zordur. Çünkü birçok konuşma kaydında arka plan gürültüleri, çok kısa aralıklar ve kayıtlarda hızlı değişiklikler var olabilmektedir. Bu gürültüler ve değişiklikler CNN modelinin sınıflandırma performansını oldukça düşürmektedir. Bu sebeple önerilen CNN mimarisi girdi olarak ses yerine kokleagram görüntüsünü almaktadır. Kokleagram görüntüleri sahte ve orijinal olmak üzere iki sınıfa ayrılarak bir eğitim seti oluşturulmuştur. CNN eğitimi sonucunda şüpheli test ses dosyasının etiketi tahmin edilmektedir. Önerilen CNN mimarisi Şekil 5'te verilmektedir.

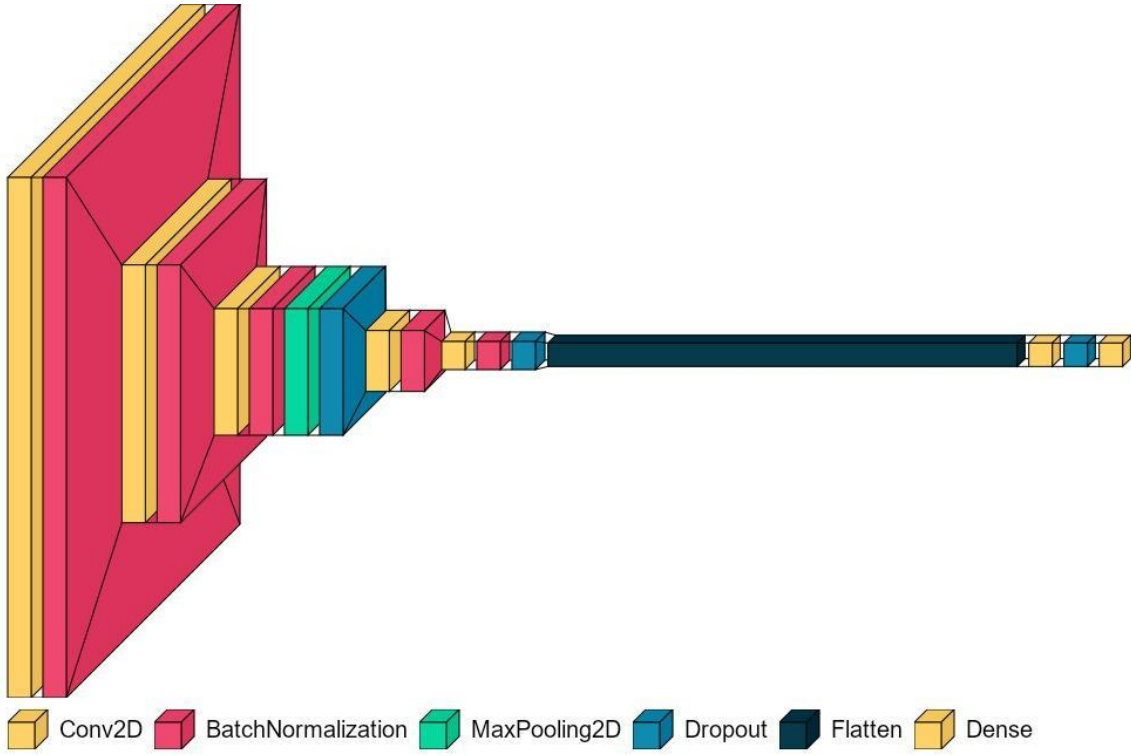
Önerilen CNN mimarisi 7 katmandan oluşmaktadır:

Katman 1: Birinci katman 3x3 'lük bölgeye sahip 32 adet çekirdekten oluşmaktadır. Bu katmanda adım değeri (stride) 2x2 olarak belirlenmiştir. Aktivasyon fonksiyonu olarak ReLU (Rectified Linear Unit) kullanılmıştır. Ardından toplu normalleştirme (Batch Normalization) uygulanmıştır.

Katman 2: İkinci katman 3x3 'lük bölgeye ve 2x2 adım değerine sahip 32 çekirdek içerir. Aktivasyon fonksiyonu yine ReLU olarak ayarlanmıştır. Toplu normalleştirme uygulanmıştır.

Katman 3: Üçüncü katman yine 3x3 'lük bölgeye ve 2x2 adım değerine sahip 64 çekirdekten oluşmaktadır. Kullanılan aktivasyon fonksiyonu ReLU olarak ayarlanmıştır. Toplu normalleştirme uygulanmıştır. Bunu 1x1

adımlı bir maksimum pooling (havuzlama) süreci takip etmiştir. Aşırı uyumu (Overfit) engellemek için 0.5 değerli Dropout kullanılmıştır.



Şekil 5. Önerilen CNN Mimarisi

Katman 4: Dördüncü katman 3x3 'lük bölgeye ve 2x2 adım değerine sahip 64 çekirdekten oluşmaktadır. Kullanılan aktivasyon fonksiyonu ReLU olarak ayarlanmıştır. Ardından toplu normalleştirme uygulanmıştır.

Katman 5: Beşinci katman 3x3 'lük bölgeye ve 2x2 adım değerine sahip 128 çekirdekten oluşmaktadır. Kullanılan aktivasyon fonksiyonu ReLU olarak ayarlanmıştır. Ardından toplu normalleştirme uygulanmıştır. Yine aşırı uyumu engellemek adına 0.5 değerli Dropout kullanılmıştır.

Katman 6: Konvolüsyon katmanlarının çıktısını Tam Bağlantı (Fully Connected) katmanına bağlayabilmek için çok boyutludan tek boyutlu vektöre dönüşüm gerçekleştirilir.

Katman 7: Yedinci katman 64 gizli birim içeren dense katmanıdır. Aktivasyon fonksiyonu olarak ReLU kullanılmıştır. Aşırı uyumu engellemek adına 0.5 değerli Dropout kullanılmıştır.

Katman 8: Son katman sınıflandırma katmanıdır. Veri setinde yer alan toplam sınıf sayısı kadar (sahte ve orijinal olmak üzere toplam iki) çıktı birimi içermektedir. Aktivasyon fonksiyonu olarak Softmax kullanılmıştır.

DENEYSEL SONUÇLAR

Bu bölümde, veri setleri ve kullanılan metrikler, önerilen yöntem ile elde edilen sonuçların kapsamlı bir analizi ve önerilen yöntemin literatürdeki diğer çalışmalarla karşılaştırma sonuçları sunulmaktadır. Deneyler, Windows 10 ile çalışan Intel Core i5, 64 bit işlemcili, 8 GB RAM'li bir makinede Python 3.5 ve Keras with TensorFlow arka uç araç setleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Kullanılan Veri Tabanı ve Metrikler

Veri seti oluşturulmasında TIMIT veri tabanından (Garofolo vd., 1993) yararlanılmıştır. TIMIT veri tabanı 438 erkek ve 192 kadın konuşmacıdan olmak üzere 6300 İngilizce ses kaydından oluşmaktadır. Her ses kaydı yaklaşık 2-6 saniye arasındadır. Bu veri tabanı kullanılarak 2 ve 3 saniyelik sahte seslerden oluşan iki ayrı veri tabanı oluşturulmuştur. Bunun için TIMIT de verilen orijinal ses dosyaları 1' er ve 2' şer saniyelik seslere bölünmüştür. Birer saniyelik orijinal sesler birleştirilerek iki saniyelik sahte sesler oluşturulurken, 3 saniyelik sahte sesler, iki

saniyelik seslerin ortasına 1 er saniyelik seslerin eklenmesi ile elde edilmiştir. Böylece eklenen sesin, diğer sesin orta, baş ve son kısmına eklenme durumu analiz edilebilecektir. Önerilen yöntemin gürültüye dayanıklılığı test etmek için oluşturulan sahte seslere 20dB ve 30dB' lik gürültü eklenmiştir. Ayrıca NOIZEUS veri tabanından (Hu vd. 2007) oluşturulan gürültü sahte ses veri tabanında (Su vd. 2024) önerilen yöntem test edilmiştir. NOIZEUS veri tabanı, 0 dB, 5 dB, 10 dB ve 15 dB SNR 'lerde sekiz farklı gerçek dünya gürültüsü (örneğin tren, araba, sergi salonu, restoran, sokak, havaalanı ve tren istasyonu gürültüleri) içeren gürültülü bir konuşma derlemidir ve konuşma geliştirme algoritmalarının değerlendirilmesi için kullanılır. Verilerin formatı WAV, konuşmanın örnekleme hızı 16 kHz ve konuşma uzunluğu 4 s'dir. Bu gürültü veri tabanından oluşturulan NOIZEUS-4 sahte ses veri tabanı ise 500 sahte ve 500 orijinal görüntüden oluşmaktadır. Bu görüntüler 0dB ve 15dB' lik ses dosyalarının birleştirilmesi sonucunda oluşturulmuştur.

Tablo 1 'de verildiği gibi 2 saniyelik orijinal ve sahte seslerden oluşan SET2 veri tabanı 6852 orijinal, 8000 sahte olmak üzere toplamda 14852 sestem, 3 saniyelik orijinal ve sahte seslerden oluşan SET3 veri tabanı ise 4257 orijinal, 7000 sahte olmak üzere toplamda 11257 sestem oluşmaktadır.

Tablo 1. Oluşturulan Veri Setleri

	Süre	Orijinal	Sahte	Toplam
SET2	2 Saniye	6852	8000	14852
SET3	3 Saniye	4257	7000	11257

Değerlendirmede Kullanılan Metrikler

Önerilen yöntemin üstünlüğünü göstermek ve diğer çalışmalarla performans karşılaştırması yapabilmek için Doğruluk (Accuracy), Kesinlik (Precision), Duyarlılık (TPR, Recall) ve F skor metrikleri kullanılmıştır. Doğruluk, önerilen yöntemce doğru olarak tespit edilen sahte ses ile orijinal ses sayısının, toplam ses sayısına oranıdır. Kesinlik, sahte olarak tespit edilen seslerin gerçekte ne kadarının sahte olduğunu, Duyarlılık ise sahte olarak tespit edilmesi gereken sahte ses dosyalarının ne kadarının sahte olarak tespit edildiğini gösteren metriklerdir.

F-skor, Kesinlik ve Duyarlılık değerlerinin ağırlıklı ortalamasıdır. Böylece F-skor değeri ile hem yanlış pozitifler hem de yanlış negatifler analiz edilebilir. Eşitlik 3' de verilen Doğruluk, Kesinlik, Duyarlılık ve F1 skor değerleri ne kadar yüksekse, sahte ses tespitindeki doğruluk da o kadar yüksek olmaktadır.

$$\text{Doğruluk} = \frac{TP+TN}{TP+TN+FP+FN} \times 100$$

$$\text{Kesinlik} = \frac{TP}{TP+FP} \times 100$$

$$\text{Duyarlılık} = \frac{TP}{TP+FN} \times 100$$

$$\text{F1 Skor} = \frac{2 \times \text{Kesinlik} \times \text{Duyarlılık}}{\text{Kesinlik} + \text{Duyarlılık}} \times 100$$

(3)

Burada TP, önerilen yöntemce sahte olarak etiketlenen ve gerçekte de sahte olan ses sayısıdır; TN, önerilen yöntemce orijinal olarak etiketlenen gerçekte de orijinal olan seslerin sayısıdır; FP önerilen yöntemce sahte ses olarak etiketlenen, gerçekte de orijinal olan seslerin sayısıdır; FN, orijinal olarak etiketlenen gerçekte sahte olan seslerin sayısıdır.

Önerilen Yöntemin Performans Analizi

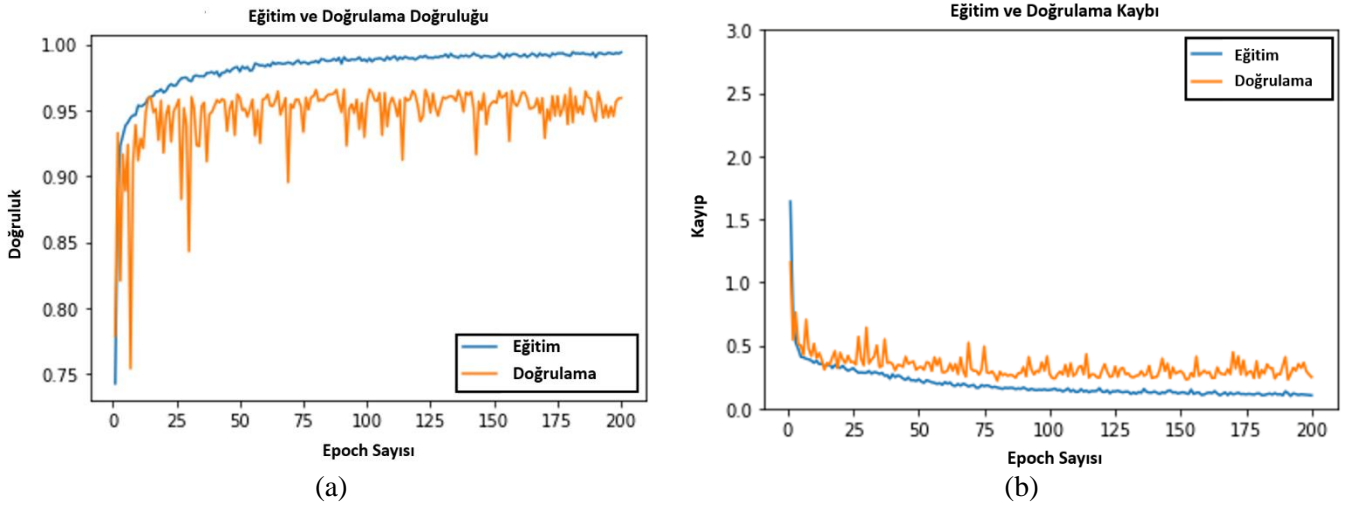
Önerilen CNN mimarisi hem SET2 veri seti üzerinde hem de SET3 veri seti üzerinde eğitilmiştir. Tablo 2' de verildiği üzere SET2 mimarisi ile yapılan eğitimde 6000 orijinal, 7000 sahte korelogram görüntüsü kullanılırken, SET3 ile yapılan eğitimde 3112 orijinal, 6000 sahte ses görüntüsü kullanılmıştır. Test aşamasında ise SET2' de 852 orijinal, 1000 sahte test görüntüsü olmak üzere toplamda 1852, SET3' de ise 1145 orijinal, 1000 sahte olmak üzere toplam 2145 ses görüntüsü test edilmiştir. Veri setlerinde elde edilen eğitim ve test sonuçları aşağıdaki bölümlerde verilmiştir.

Tablo 2. Eğitim ve Testte Kullanılan Orijinal ve Sahte Ses Sayıları

	Süre	Eğitim			Test		
		Orijinal	Sahte	Toplam	Orijinal	Sahte	Toplam
SET2	2 Saniye	6000	7000	13000	852	1000	1852
SET3	3 Saniye	3112	6000	9112	1145	1000	2145

Önerilen Mimari ile SET2 Veri Setinde Elde Edilen Sonuçlar

Önerilen yöntemde, SET2 eğitim setine k-kat çapraz doğrulama yöntemi uygulanmıştır. Bu teknik, veri kümesini tam olarak test etmek ve etkili bir değerlendirme yapmak için kullanılmıştır. Veri kümesine k-kat çapraz doğrulama uygulanırken, veri kümesi rastgele olarak yaklaşık eşit büyüklükte k gruba ayrılır. Daha sonra, önerilen model her seferinde (k-1) grup ile eğitilir ve kalan grup ile test edilir. Bu işlem k kez tekrarlanır. Önerilen algoritma 10 kat çapraz doğrulama için eğitilmiştir. SET2 veri seti ile eğitim sonucunda elde edilen eğitim ve validasyon doğruluk ve hata eğrileri Şekil 6' da verilmiştir.

**Şekil 6. a.** 2 Saniyelik Seslerle Yapılan Eğitim ve Validasyon Doğruluk Eğrisi **b.** 2 Saniyelik Seslerle Yapılan Eğitim ve Validasyon Kayıp Eğrisi

Grafiklerden de görüldüğü gibi, eğriler hem eğitim doğruluğu hem de eğitim hatası açısından karardır. Doğruluk eğrileri 1'e yaklaşırken, kayıp eğrileri 0'a yaklaşmaktadır. Eğitim sonucunda SET2 test verilerinden elde edilen Doğruluk, Kesinlik, Duyarlılık ve F1 skoru bu sonucu desteklemektedir. Elde edilen test sonuçları Tablo 3'te gösterilmiştir.

Tablo 3. SET2 Setinden Önerilen Yöntem Sonucunda Elde Edilen Doğruluk, Kesinlik, Duyarlılık ve F1 Skor Değerleri

	Doğruluk	Kesinlik	Duyarlılık	F1 skor
SET2	%95,1	%97,5	%93,3	%95,38

Tablodan da görüldüğü üzere Kokleagram tabanlı ses görüntü sınıflandırması yöntemi sonucunda elde edilen doğruluk, kesinlik, duyarlılık ve F1 skor değerleri oldukça yüksektir.

Önerilen yöntemin gürültüye dayanıklılığını test etmek için ise SET2 veri setindeki test dosyalarına 20dB ve 30dB değerinde gürültü eklenmiştir. Aynı zamanda SET2 üzerinde eğitilen sisteme NOIZEUS-4 veri setindeki gürültülü sahte ve orijinal sesler test olarak verilmiştir. Elde edilen sonuçlar Tablo 4' te verilmektedir.

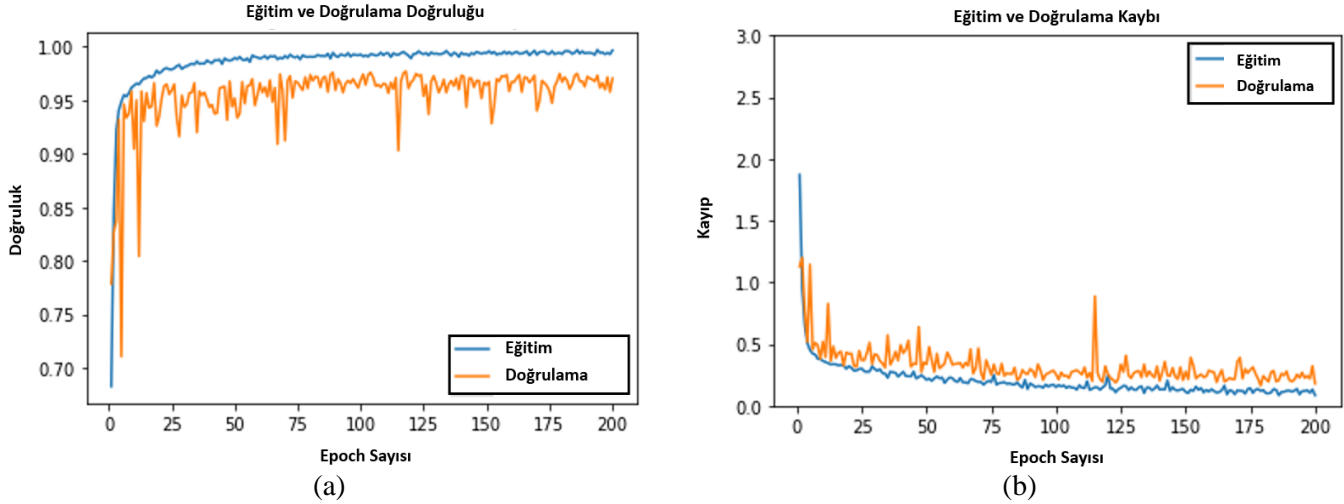
Tablo 4. SET2 ve NOIZEUS-4 Gürültülü Veri Setlerinden Önerilen Yöntem Sonucunda Elde Edilen Doğruluk, Kesinlik, Duyarlılık ve F1 Skor Değerleri

	Doğruluk	Kesinlik	Duyarlılık	F1-skor
SET2 20 dB	%81,1	%97,24	%78	%87
SET2 30 dB	%83,20	%98,24	%80	%89
NOIZEUS-4	%80,14	%95,54	%75	%83,82

Tablo 4' ten görüldüğü üzere önerilen yöntem SET2 setindeki 20 dB' lik seslerde %87, 30 dB'lik seslerde %89 F1-skor değeri vermektedir. Ayrıca eğitime hiç katılmayan farklı gürültülü sahte ve orijinal seslerde test edildiğinde de %83 F1-skor değeri vermektedir. Bu da önerilen yöntemin gürültüye karşı oldukça dayanıklı olduğunu göstermektedir.

Önerilen Mimari ile SET3 Veri Setinde Elde Edilen Sonuçlar

Önerilen algoritma 5 kat çapraz doğrulama için eğitilmiştir. SET3 veri seti ile eğitim sonucunda elde edilen eğitim ve validasyon doğruluk ve hata eğrileri Şekil 7' de verilmiştir.



Şekil 7. a. 3 Saniyelik Seslerle Yapılan Eğitim ve Validasyon Doğruluk Eğrisi **b.** 3 Saniyelik Seslerle Yapılan Eğitim ve Validasyon Kayıp Eğrisi

Grafiklerden de görüldüğü gibi, SET2 eğitim sonucunda elde edilen eğriler gibi, SET3 veri seti sonucunda elde edilen eğitim doğruluğu ve eğitim hatası grafikleri kararlıdır. Yaklaşık 200 epoch sonucunda doğruluk eğrileri 1'e yaklaşırken, kayıp eğrileri 0'a yaklaşmaktadır. Eğitim sonucunda SET3 test verilerinden elde edilen Doğruluk, Kesinlik, Duyarlılık Tablo 5'te verilmiştir.

Tablo 5. SET3 Setinden Önerilen Yöntem Sonucunda Elde Edilen Doğruluk, Kesinlik, Duyarlılık ve F1 Skor Değerleri

	Doğruluk	Kesinlik	Duyarlılık	F1 skor
SET3	%98,1	%98,2	%97,7	%97,9

Tablodan da görüldüğü üzere önerilen yöntem sonucunda elde edilen test sonuçları 0.97 üzerindedir. SET 3 test seti üzerinde elde edilen doğruluk değeri 0.98 iken, F1-skor değeri 0.97 dir. SET2 ile elde edilen test sonuçları ile kıyaslandığında SET3 veri setinde elde edilen doğruluk, kesinlik, duyarlılık ve F1 skor değerlerinin daha yüksek olduğu görülmektedir. Bunun sebebi veri setlerindeki sahte seslerin oluşturuluş şekli görülmektedir.

SET2 veri setindeki sesler sondan eklemeli olarak üretilirken, SET3 veri setindeki sesler ortaya ekleme yapılarak üretilmiştir. Yani sondan ekleme yapılarak oluşturulmuş sahte seslerin tespiti, ortadan ekleme yapılmış seslere göre daha zordur. Bunun nedeni de ortadaki eklemenin sinir ağlarına daha fazla bağlamsal bilgi sağlayacak olduğu düşünülmektedir. Buna rağmen iki set için de elde edilen test sonuçları oldukça yüksek olması önerilen yöntemin üstünlüğünü göstermektedir.

Önerilen yöntemin gürültüye dayanıklılığı SET3 veri setinde de test edilmiştir. Bunun için SET3 test dosyalarına 20dB ve 30dB değerinde gürültü eklenmiştir. Aynı zamanda SET3 üzerinde eğitilen sisteme, SET2' de olduğu gibi NOIZEUS-4 veri setindeki gürültülü sahte ve orijinal sesler test olarak verilmiştir. Elde edilen sonuçlar Tablo 6' da verilmektedir.

Tablo 6 değerlendirildiğinde SET3 veri setinde F1-skor değeri 20dB'de %89 elde edilirken, 30dB de %91 olarak elde edilmiştir. NOIZEUS-4 veri setinde ise gürültü değeri 15dB' ye inmesine rağmen %87 F1-skor değeri elde

edilmiştir. Bu durumda önerilen yöntemin hem SET2 ve SET3, hem de NOIZEUS-4 veri setinde oldukça başarılı sonuç vererek gürültüye karşı oldukça dayanıklı olduğunu göstermektedir.

Tablo 6. SET3 ve NOIZEUS-4 Gürültülü Veri Setlerinden Önerilen Yöntem Sonucunda Elde Edilen Doğruluk, Kesinlik, Duyarlılık ve F1 Skor Değerleri

	Doğruluk	Kesinlik	Duyarlılık	F1-skor
SET3 20 dB	%90,2	%94,28	%84,10	%89
SET3 30 dB	%92,10	%95,10	%87,10	%91
NOIZEUS-4	%88,14	%91,54	%82,20	%87

Önerilen Yöntemlerle Literatürdeki İlgili Çalışmaların Kıyaslanması

Önerilen yöntem, literatürdeki ses birleştirme sahteciliği tespiti alanındaki diğer çalışmalarla hem SET2 hem de SET3 veri setinde kıyaslanmıştır. Karşılaştırılan çalışmalar; Jadhav vd., 2019, Zeng ve Wu, 2022, Chuchra vd., 2022 ve Ustubioglu vd. 2024' dür. SET2 veri seti üzerinde, önerilen yöntem ve literatürdeki çalışmaların Doğruluk, Kesinlik, Duyarlılık ve F1-skor değerleri Tablo 7' de verilmektedir.

Tablo 7. SET2 Setinde Önerilen Yöntem ve Literatürdeki Çalışmaların Doğruluk, Kesinlik, Duyarlılık ve F1 Skor Değerleri

	Doğruluk	Kesinlik	Duyarlılık	F1-skor
Jadhav vd., 2019	%90.70	%93.48	%89.35	%91.34
Chuchra vd., 2022	%84.85	%88.96	%82.10	%85.32
Zeng ve Wu, 2022	%53.06	%54.02	%99.09	%70.67
Önerilen Yöntem	%95.10	%97.50	%93.30	%95.38

Tablo 7' den görüldüğü üzere SET2 veri setinde elde edilen sonuçlarda en yüksek Doğruluk, Kesinlik ve F1-skor değerleri önerilen yöntem sonucunda elde edilmiştir. Diğer çalışmalarda elde edilen en yüksek F1-skor değeri %91 iken, önerilen yöntem sonucunda elde edilen F1-skor değeri %95 gibi oldukça yüksek bir değerdir.

SET3 veri seti üzerinde de önerilen yöntem ve literatürdeki çalışmaların Doğruluk, Kesinlik, Duyarlılık ve F1-skor değerleri elde edilmiştir. Elde edilen sonuçlar Tablo 8' de verilmektedir.

Tablo 8. SET3 Setinde Önerilen Yöntem ve Literatürdeki Çalışmaların Doğruluk, Kesinlik, Duyarlılık ve F1 Skor Değerleri

	Doğruluk	Kesinlik	Duyarlılık	F1-skor
Jadhav vd., 2019	%92,50	%89,80	%93,96	%91,95
Chuchra vd., 2022	%76,78	%69,85	%88,48	%77,95
Zeng ve Wu, 2022	%46,79	%46,80	%100	%64,60
Ustubioglu vd. 2024	%97,9	%98,19	%97,69	%97,29
Önerilen Yöntem	%98,1	%98,2	%97,7	%97,9

Tablo 8' den görüldüğü üzere önerilen yöntem sonucunda elde edilen doğruluk değeri %98.1, kesinlik değeri %98.2, Duyarlılık değeri %97.7 ve F1-skor değeri %97.9' dur. Elden edilen bu sonuçlar duyarlılık değeri dışında literatürdeki tüm değerlerden oldukça yüksektir. SET2 ve SET3 veri setinde elde edilen sonuçlar önerilen yöntemin, literatürdeki diğer çalışmalardan üstünlüğünü göstermektedir.

SONUÇLAR

Bu makalede, bir CNN mimarisine dayanan yeni bir ses birleştirme sahteciliği tespit yöntemi önerilmiştir. Önerilen yöntemde ses dosyası kokleagram görüntüsüne dönüştürüldükten sonra tasarlanan CNN mimarisine girdi olarak verilmiştir. Önerilen ses birleştirme sahteciliği tespit yönteminin performansını değerlendirmek için konuşma veri tabanlarından üretilen iki ses birleştirme sahte ses veri kümesi SET2 ve SET3 kullanılmıştır. Deneysel sonuçlar, önerilen yöntemin ses birleştirme sahteciliği tespitinde etkinliğini ve gürültüye karşı dayanıklılığını kanıtlamaktadır. Önerilen çalışma lokalizasyon işlemi gerçekleştirilmemektedir. İlerleyen çalışmalarda, ses ekleme tespiti yanında lokalizasyonda yapabilecek daha etkili derin sinir ağı tabanlı yöntemler araştırılacaktır.

KAYNAKLAR

- Chuchra, A., Kaur, M., & Gupta, S. (2022, July). A deep learning approach for splicing detection in digital audios. In Congress on Intelligent Systems: Proceedings of CIS 2021, Volume 1 (pp. 543-558). Singapore: Springer Nature Singapore.
- Cooper, A. J. (2010, June). Detecting butt-spliced edits in forensic digital audio recordings. In Audio Engineering Society Conference: 39th International Conference: Audio Forensics: Practices and Challenges. Audio Engineering Society.
- Cuccovillo, L., Mann, S., Tagliasacchi, M., & Aichroth, P. (2013, September). Audio tampering detection via microphone classification. In 2013 IEEE 15th International Workshop on Multimedia Signal Processing (MMSp) (pp. 177-182). IEEE.
- Esquef, P. A., Apolinário, J. A., & Biscainho, L. W. (2015, November). Improved edit detection in speech via ENF patterns. In 2015 IEEE International Workshop on Information Forensics and Security (WIFS) (pp. 1-6). IEEE.
- Garofolo, J., S. (1993). TIMIT Acoustic-Phonetic Continuous Speech Corpus LDC93S1, [online] Available: <https://catalog.ldc.upenn.edu/LDC93S1>.
- Greenwood, D. D. (1990). A cochlear frequency-position function for several species—29 years later. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 87(6), 2592-2605.
- Hu, Y., & Loizou, P. C. (2007). Subjective comparison and evaluation of speech enhancement algorithms. *Speech communication*, 49(7-8), 588-601.
- Jadhav, S., Patole, R., & Rege, P. (2019, July). Audio splicing detection using convolutional neural network. In 2019 10th International Conference on Computing, Communication and Networking Technologies (ICCCNT) (pp. 1-5). IEEE.
- Lin, X., & Kang, X. (2017a). Exposing speech tampering via spectral phase analysis. *Digital Signal Processing*, 60, 63-74.
- Lin, X., & Kang, X. (2017b). Supervised audio tampering detection using an autoregressive model. In 2017 IEEE international conference on acoustics, speech and signal processing (ICASSP) (pp. 2142-2146). IEEE.
- Mang, L. D., Cañadas-Quesada, F. J., Carabias-Orti, J. J., Combarro, E. F., & Ranilla, J. (2023). Cochleogram-based adventitious sounds classification using convolutional neural networks. *Biomedical Signal Processing and Control*, 82, 104555.
- Mang, L. D., González Martínez, F. D., Martínez Muñoz, D., García Galán, S., & Cortina, R. (2024). Classification of Adventitious Sounds Combining Cochleogram and Vision Transformers. *Sensors*, 24(2), 682.
- Mao, M., Xiao, Z., Kang, X., Li, X., & Xiao, L. (2020). Electric network frequency based audio forensics using convolutional neural networks. In *Advances in Digital Forensics XVI: 16th IFIP WG 11.9 International Conference, New Delhi, India, January 6–8, 2020, Revised Selected Papers 16* (pp. 253-270). Springer International Publishing.
- Meng, X., Li, C., & Tian, L. (2018, November). Detecting audio splicing forgery algorithm based on local noise level estimation. In 2018 5th international conference on systems and informatics (ICSAI) (pp. 861-865). IEEE.
- Pan, X., Zhang, X., & Lyu, S. (2012, March). Detecting splicing in digital audios using local noise level estimation. In 2012 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP) (pp. 1841-1844). IEEE.
- Patterson, R. D., Robinson, K. E. N., Holdsworth, J., McKeown, D., Zhang, C., & Allerhand, M. (1992). Complex sounds and auditory images. In *Auditory physiology and perception* (pp. 429-446). Pergamon.
- Russo, M., Kraljević, L., Stella, M., & Sikora, M. (2020). Cochleogram-based approach for detecting perceived emotions in music. *Information Processing & Management*, 57(5), 102270
- Rouniyar, S. K., Yingjuan, Y., & Hu, Y. (2018, April). Channel response based multi-feature audio splicing forgery detection and localization. In *Proceedings of the 2018 International Conference on E-Business, Information Management and Computer Science* (pp. 46-53).

- Sharan, R. V., & Moir, T. J. (2015, July). Cochleagram image feature for improved robustness in sound recognition. In 2015 IEEE international conference on digital signal processing (DSP) (pp. 441-444). IEEE.
- Slaney, M. (1998). Auditory toolbox. Interval Research Corporation, Tech. Rep, 10(1998), 1194.
- Su, Z., Fang, Z., Lian, C., Zhang, G., & Li, M. (2024). Audio splicing detection and localization using multistage filterbank spectral sketches and decision fusion. *Multimedia Systems*, 30(2), 92.
- Ustubioglu, B., Dincer, S., Ustubioglu, A., & Ulutas, G. (2024, July). ArCapsNet for Audio Splicing Forgery Detection. In *2024 47th International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP)* (pp. 298-301). IEEE.
- Yang, R., Qu, Z., & Huang, J. (2008, September). Detecting digital audio forgeries by checking frame offsets. In *Proceedings of the 10th ACM Workshop on Multimedia and Security* (pp. 21-26).
- Zeng, Z., & Wu, Z. (2022, December). Audio Splicing Localization: Can We Accurately Locate the Splicing Tampering?. In *2022 13th International Symposium on Chinese Spoken Language Processing (ISCSLP)* (pp. 120-124). IEEE.
- Zhang, Z., Zhao, X., & Yi, X. (2022). Aslnet: An encoder-decoder architecture for audio splicing detection and localization. *Security and Communication Networks*, 2022.
- Zhao, H., Chen, Y., Wang, R., & Malik, H. (2017). Audio splicing detection and localization using environmental signature. *Multimedia Tools and Applications*, 76, 13897-13927.
- Zhao, H., Chen, Y., Wang, R., & Malik, H. (2014, June). Audio source authentication and splicing detection using acoustic environmental signature. In *Proceedings of the 2nd ACM workshop on Information hiding and multimedia security* (pp. 159-164).



Kahramanmaraş Sütçü İmam University

Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 27.05.2024
Kabul Tarihi : 17.09.2024

Received Date : 27.05.2024
Accepted Date : 17.09.2024

BİNA ENERJİ PERFORMANSI ARTIRMA UYGULAMALARININ ISIL GEÇİRGENLİK KATSAYISINA ETKİSİ

EFFECT OF BUILDING ENERGY PERFORMANCE INCREASING APPLICATIONS ON THERMAL TRANSMITTANCE VALUE

Rukiye KOÇKAR TUĞLA¹ (ORCID: 0000-0001-9731-4206)

¹ Kastamonu Üniversitesi, İnşaat Bölümü, Kastamonu, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Rukiye KOÇKAR TUĞLA, rkockar@kastamonu.edu.tr

ÖZET

Enerji korunumunun önemli olduğu günümüzde, yapıların enerji tüketim sınıfını belirlemek, enerji performansını artırmak, minimum enerji tüketimiyle yapılarda maksimum enerji verimliliği sağlamak amacıyla yalıtım uygulamaları yapılmaktadır. Bu çalışmada; bir kamu binasına uygulanan yalıtım incelenmiş, yalıtımın binanın ısı performansına etkisi deneysel ve analitik metotlarla kıyaslanarak analiz edilmiştir. Çalışmada, termal kameraların kullanıldığı kızılötesi ısı görüntüleme yöntemi kullanılmış ve bu yöntemle binanın farklı yalıtım özelliğine sahip üç cephesi incelenmiştir. İncelenen cephelerden termal kameralar vasıtasıyla ısı görüntüleri alınmış; bu ısı görüntülerinin analizi sonucu duvarların mevcut ısı geçirgenlik katsayısı ($U_{KIZILÖTESİ}$, W/m^2K) belirlenmiştir. Ayrıca bina cephesini oluşturan malzemelerin kalınlıkları ve TS 825'deki ısı iletkenlik hesap değerleri (λ_{TS825}) kullanılarak duvarların ısı geçirgenlik katsayısı (U_{TS825}) analitik olarak hesaplanmıştır. Sonuç olarak; deneysel verilerle belirlenen $U_{KIZILÖTESİ}$ değeri, analitik yöntemle belirlenen U_{TS825} değerine göre daha yüksek bulunmuştur. Bu sonuca göre duvarların mevcut ısı performansı, analitik olarak belirlenen (bina enerji kimlik belgesinde de yazılan) ısı performansından daha düşüktür. Yalıtım uygulaması yapıldıktan sonra duvarların hem $U_{KIZILÖTESİ}$ hem de U_{TS825} değerinin azaldığı görülmüştür. Deneysel ve analitik verilere göre yalıtımın binanın ısı performansına etkisi olumlu olmuştur.

Anahtar Kelimeler: Enerji performansı, ısı geçirgenlik katsayısı, kızılötesi ısı görüntüleme, bina duvarları, yalıtım

ABSTRACT

Today, when energy conservation is important, insulation applications are made to determine the energy consumption class of buildings, to increase energy performance, and to provide maximum energy efficiency in buildings with minimum energy consumption. In this study, the insulation applied to a public building is investigated, and the effect of insulation on the thermal performance of the building is analysed by comparing experimental and analytical methods. The study used the infrared thermal imaging method using thermal cameras, and three facades of the building with different insulation properties were examined with this method. Thermal images were taken from the examined facades using thermal cameras; as a result of the analysis of these thermal images, the current thermal transmittance value of the walls ($U_{INFRARED}$, W/m^2K) was determined. In addition, the thermal transmittance value of the walls (U_{TS825}) was analytically calculated using the thicknesses of the building wall materials and the thermal conductivity in TS 825 (λ_{TS825}). As a result, the $U_{INFRARED}$ value determined by experimental data was higher than the U_{TS825} value determined by the analytical method. According to this result, the current thermal performance of the walls is lower than the analytically determined thermal performance (also written in the building energy identity certificate). After the insulation application, it was observed that both the $U_{INFRARED}$ and U_{TS825} values of the walls decreased. According to the experimental and analytical data, the effect of insulation on the thermal performance of the building was positive.

Keywords: Energy efficiency, thermal transmittance value, infrared thermography, building walls, insulation

GİRİŞ

Enerji birçok alanda olduğu gibi yapılarda da oldukça fazla kullanılmaktadır. Yapılarda enerji en fazla ısıtma/soğut sistemlerinde tüketilmektedir (DOE, 2012). Yapıların enerji tüketimini azaltmak ve enerji performansını artırmak amacıyla birçok uygulama yapılmaktadır. Bu uygulamalardan en yaygın olanı ise yapı cephesinin tamamını ısı yalıtım malzemesi ile kaplamaktır. Yapının yalıtımsız ve yalıtımlı haldeki enerji performansının belirlenmesinde kullanılan temel ısı parametresi ısı geçirgenlik katsayısı (U değeri, W/m^2K)'dır (Park, vd. 2023; Ficco vd. 2015). Bir binanın gerçek ısı performansının belirlenmesi U değerinin doğruluğu ile yakından ilişkilidir (Park, vd. 2023). Bir yapı elemanının U değerini belirlemek için yapı elemanını oluşturan malzemelerin kalınlığının ve ısı iletkenlik hesap değerinin (λ , W/mK) bilinmesi gerekmektedir (TS 825, 2013).

Günümüzde mevcut yapı duvarlarının ısı geçirgenlik katsayısını (U-değeri) belirlemek için duvarlarda kullanılan malzeme bilgilerine ihtiyaç duyulmaktadır. Malzemelere ait bilgiler yapı projesinden alınmakta ve bu bilgiler doğrultusunda malzemeyi tanımladığı düşünülen ısı iletkenlik hesap değerleri (λ) standartlardan seçilmektedir. Seçilen λ değeri standartlarda verilen temel teorik denklemde kullanılarak analitik yöntemle yapıların U değeri hesaplanmaktadır (TS 825, 2013; TS EN ISO 6946, 2009; TS EN 1745, 2004). Projesine ulaşamayan mevcut yapıların malzeme özellikleri bilinmediği için U değerleri ise tamamen varsayım dayalı olarak belirlenmektedir (Park vd. 2023). Yapıyı oluşturan her bir malzemenin ısı iletkenlik hesap değerinin laboratuvar ortamında yapılacak testlerle belirlenmesi pahalı ve zaman alıcı bir uygulamadır. Ayrıca mevcut yapılar üzerinden alınacak numune örnekleri yapıya zarar veren tahripkar bir uygulamadır. Deneysel verilerin ekonomik olmayışı ve her zaman uygulanamayışı sebebiyle analitik yöntemle yapılan hesaplamalar yaygındır. Fakat bu analitik hesaplamalar sonucu elde edilen veriler ile yapıların gerçek U değeri verileri arasında bir uyumsuzluk/farklılık vardır (Desogus vd.2011; Mandilaras vd. 2014; Sayın & Tavukçuoğlu 2016; Park vd. 2023). Bu da analitik hesap sonucu elde edilen verilerin, yapı bünyesinde mevcut olan/olabilecek kusurlardan, imalat hatalarından, malzeme farkından kaynaklı ve ısı performansı olumsuz etkileyen ısı köprüsü, hava kaçağı, yoğunlaşma gibi ısı problemleri kapsamadığını, böylece yapının mevcut durumdaki gerçek enerji performansını tam anlamıyla yansıtmadığını göstermektedir. Kısaca, analitik yöntem ile yapılan hesaplamalar ile yapıya ait ısı geçirgenlik katsayısı (U değeri) sadece tahmin edilmektedir (Ficco vd. 2015). Özellikle duvarda kullanılan malzemeye ait yoğunluk ve ısı iletkenlik hesap değeri verileri kesin olarak bilinmediği durumlarda analitik hesaplamalar yanıltıcı sonuçlar verebilmektedir. Bu durum analitik hesaplama yönteminin yapı duvarlarının mevcut ısı performansını belirlemedeki yetersizliği olarak görülmektedir. Bütün bu sebepler göz önüne alındığında yapı ısı performansının yerinde (sahada) belirlenmesini sağlayan, yapının mevcut durumunu üzerinden değerlendirme yapan ve daha gerçekçi sonuç veren yöntemlerin kullanılması gerekmektedir.

Deneysel olarak yapıların ısı geçirgenlik katsayısını (U değerini, W/m^2K) belirlemek için farklı yöntemler kullanılmaktadır. Yaygın olarak kullanılan yöntemler ısı akış ölçer (Heat Flow Meter, HFM), mahfazalı sıcak kutu yöntemi (the Guard Hot Box method, GHB) ve kalibreli sıcak kutu (the Calibrated Hot Box method, CHB) yöntemidir. Bu yöntemlerden mahfazalı ve kalibreli sıcak kutu yöntemleri laboratuvar koşullarında yapılan çalışmalarda kullanılmaktadır ve bu yöntemler ağır ekipmanlara sahip oldukları için yapı duvarlarının yerinde incelemeleri için uygun değildirler (Meng vd. 2015).

HFM yöntemi düzeneğinin basitliği sebebiyle yapılarda yerinde U değeri ölçümü için uygun olduğu bilinen tek yöntemdir (ISO 9869-1, 2014; Meng vd. 2015; O'Grady vd. 2017; Park vd. 2023). HFM yöntemi Fourier Isı İletim Kanunu prensibine göre çalışır. Yani kısaca çalışma prensibi, duvar kalınlığı üzerinde sabit bir sıcaklık gradyanı oluşturulup, duvarın bir tarafından diğer tarafına geçen ısı akışının kontrol edildiği, tek boyutlu ısı transferine dayanmaktadır (ISO 9869-1, 2014). HFM yöntemi kullanılarak yerinde ölçüm yapabilmek için ısı akış ölçer gereklidir (Park vd. 2023). Fakat ısı akış ölçer pahalıdır ve ortam koşullarından etkilenmektedir. Güvenilir veri elde etmek için zaman alıcı bir yöntem olduğu da bilinmektedir (Park vd. 2023). Standartta göre en az 72 saatlik bir deney sürecine ihtiyaç vardır (ISO 9869-1, 2014). Ayrıca HFM yöntemi için sıcak soğuk ortam arasında optimal sıcaklık farkının sağlanması gerekir ve bu sıcaklık farkı $10^{\circ}C$ az olmamalıdır (ISO9869-1, 2014). Yerinde yapılan HFM tekniği çalışmalarından doğru sonuç alabilmek için bu koşullara dikkat etmek gerekir. Dış ortam koşullarının her zaman kararlı olamayacağı gerçeği HFM tekniği ile yapılacak ölçümler için bir dezavantaj oluşturmaktadır. Ayrıca HFM tekniğinin bilinen önemli bir diğer dezavantajı ise duvar yüzeyinin sadece bir noktasından alınan ölçüm sonucuna göre değer vermesidir. Yani bu yöntemle elde edilen veriler duvarın ısı performansını etkileyen ısı köprüleri gibi sorunlu alanları kapsamaz (Kim vd. 2022). HFM cihazıyla yapılan incelemelerde aynı yapıda, çalışmanın yapıldığı yöne ve ölçüm problemlerinin yapılaşma konumuna bağlı olarak farklı sonuçlar elde edildiği de bilinmektedir (Meng vd. 2015). Bu yöntemle homojen olmayan yapı duvarlarının gerçek değerini belirlemek her zaman mümkün

olmayabilir (Danielski & Fröling, 2015). Bu sebeple her ne kadar HFM tekniği yerinde çalışmalarda kullanılsa da bu yöntem alternatif, daha pratik, daha kısa sürede sonuç alınabilen ve daha doğru sonuç verebilen farklı yöntemlerin araştırıldığı çalışmalar yapılmaktadır (Meng vd. 2015; Atsonios vd. 2017; Park vd. 2023).

Yapıların yerinde enerji performansını belirlemek için kullanılan en uygun yöntemlerden bir tanesi Kızılötesi Isıl Görüntüleme (KÖİG) (infrared termografi) yöntemidir (Nardi vd. 2016; Sayın & Tavukçuoğlu, 2016; Balaras & Argiriou, 2002; Fokaidis & Kalogirou, 2011). Kızılötesi ısı görüntüleme yöntemi, savunma başta olmak üzere sanayi, tıp vb. birçok alanda yaygın olan; ısı görüntüleme karşı duyarlı termal kameraların kullanıldığı nitel ve nicel analize olanak veren tahribatsız bir muayene yöntemidir (Titman, 2001). Bu yöntem yapıların mevcut durumlarını incelemek, varsa ısı problemlere sebep olan bozulmaları, sıkıntılı bölgeleri tespit etmek ve enerji performanslarını belirlemek için son zamanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır (Tuğla vd 2013; Sayın & Tavukçuoğlu, 2016; François vd, 2021; Koçkar-Tuğla, 2022). Kızılötesi ısı görüntüleme yöntemi malzemenin ısı yayıcılık değeri (termal emisivite değeri) (Çengel, 2011), rüzgar hızı, güneş etkisi, hava koşulları, ölçüm yapılan ortamın sıcaklığı, bağlı nemi, termal kamera ile ölçüm yapılacak yüzey arasındaki mesafe ve kameranın açısı gibi faktörlerden etkilenmektedir (Balaras & Argiriou, 2002; Titman 2001) ve çalışmalardan doğru sonucu elde etmek için bu faktörlere dikkat edilmelidir (Lehmann vd. 2013; Tanner vd. 2011). Kızılötesi ısı görüntüleme yönteminin en önemli ve diğer ölçüm yöntemlerinden ayıran özelliği ise hem bütün bir bölgenin hem de belli bir bölgenin incelenmesine olanak vermesidir. Bu yöntemde termal kameralar aracılığıyla çalışılan yüzeyden ısı görüntüleri alınmakta; alınan ısı görüntüleri analiz programı yardımıyla incelenerek istenilen alanların sıcaklık verileri elde edilmektedir. Elde edilen bu sıcaklık verileri kullanılarak yapı duvarlarının araştırılan ısı özelliği nicel olarak belirlenmektedir. KÖİG yöntemi; yerinde yapılan ölçümlerle yapının mevcut ısı performansını değerlendirmeye yarayan yani yerinde yapılacak çalışmalara uygun, pratik, kolay, zaman tasarrufu sağlayan, en önemlisi yapıya/malzemeye zarar vermeyen tahribatsız bir muayene ve analiz yöntemidir.

Bu çalışmanın ana hedefi yapıların enerji performansını iyileştirme çalışmalarını uygulamalı bir örnek üzerinden takip edip; bina duvarlarının mevcut ve yeni durumdaki ısı performansını gösteren U değerini analitik yöntem ve KÖİG yöntem ile belirleyip, elde edilen sonuçlara göre uygulanan yalıtım değerlendirmektir. Ana hedefle varılmak istenilen yer, günümüzde bina enerji performansını belirlemek ve bina enerji sınıfını tayin etmek için yaygın kullanılan analitik yöntem sonuçlarının doğruluğunu Türkiye’de de tartışmaya açmaktır. Bunun yanı sıra yapıların mevcut durumunu yansıtan gerçek enerji performansını belirlemek için yerinde/sahalarda kullanıma uygun, pratik ve kolay uygulanabilir bir yöntem olan kızılötesi ısı görüntüleme yöntemine (KÖİG) dikkat çekmek; yapı ısı özelliklerinin belirlenmesinde malzeme bilgilerine ihtiyaç duyulmayan sadece yüzey sıcaklık verileri kullanılan KÖİG yönteminin gelişimi, doğru kullanımı ve bu yöntemin standart bir denetleme yöntemi olması yönündeki çalışmalara katkı sağlamak hedeflenmektedir. Türkiye’de KÖİG yöntemi özellikle yapılarda genellikle nitel analizler için kullanılan ve sonuçların yorumlamaya dayalı olduğu bir kullanım alanına sahiptir. Bu nedenle KÖİG yönteminin, özellikle enerji performansını belirleme ve enerji tüketimini denetleme çalışmalarında nicel analiz yöntemi olarak da kullanılabilmesini göstermek gereklidir. Çünkü analitik işlemler sonucu elde edilen tahmini değerler ile yapıların enerji tüketim sınıfı doğru belirlenemediğinde, enerji tüketimi devam etmekte ve enerji verimliliği yeterince sağlanamamaktadır. Bu durum ülke ekonomisine ciddi zarar vermekte ve enerji korunumunu sağlamak için yapılan çalışmaların ilerlemesini de engellemektedir. Bu sebeple yapıların gerçekte harcadığı enerjinin belirlenmesi ve gerçek enerji performansının tespit edilmesi önemlidir. Yapı enerji performansını artırma/iyileştirme çalışmalarının yerinde kontrol edilmesi ve denetlenmesi için kolay uygulanabilir doğru sonuç veren yöntemlerin sahaya kazandırılması, herhangi bir olumsuz durumda müdahale edip işin düzeltilmesini sağlamak bakımından gereklidir. Bu hedefler ve tespit edilen gereklilikler neticesinde çalışmada bir kamu binasına uygulanan yalıtım yerinde incelenmiş, yalıtımın binanın ısı performansına etkisi KÖİG yöntemi ve analitik yöntem sonucu belirlenen U-değerleri ile kıyaslanarak analiz edilmesi amaçlanmıştır. Bu çalışmada önemli olan mevcut bir binaya yalıtım uygulaması yapılırken farklı yalıtım özelliğine sahip cephelerinin ısı performansının analitik yöntem ve KÖİG yöntem ile incelenmesidir. Literatürde analitik yöntem sonuçlarının birer tahmin olduğu ve gerçek sonucu yansıtmadığı görüşü vardır (Desogus vd.2011; Ficco vd. 2015; Park vd 2023). Bu çalışmada yalıtım uygulamasında kullanılan malzemelerin ısı özelliklerinin bilinmesi ve bu malzemeleri tanımlayan doğru ısı iletkenlik hesap değerlerinin (λ , W/mK) hesaplamada kullanılması analitik hesap sonucu elde edilen U değerinin güvenilirliğini artırmaktadır. Ayrıca bu çalışma, yalıtım uygulaması yapılırken yerinde KÖİG yönteminin, yapıların mevcut ısı performansını belirleme ve denetleme çalışmalarında kullanılabilmesinin; bu yöntem kullanılırken iş ve işleyişin hiçbir şekilde etkilenmeyeceğinin göstergesi niteliğindedir. Bu yönleriyle özgün olan bu çalışmanın yapı enerji denetimi sahalarında yapılacak çalışmalara fikir vereceği ve özellikle Türkçe literatüre önemli katkıları olacağı düşünülmektedir.

MALZEME VE YÖNTEM

Bu çalışmada, mevcut bir kamu binası ele alınmış, bu binanın yalıtımsız ve yalıtımlı haldeki duvarlarının ısı performansındaki değişim incelenmiştir. Çalışma kapsamında incelenen binanın duvarları 13,5 cm delikli tuğla ile çift katlı sandviç duvar şeklinde örülmüştür. İki tuğla duvar arasında yaklaşık 3 cm kalınlığında olduğu tahmin edilen XPS (ekstrüde polistiren levha) yalıtım levhası olduğu bilinmektedir. Binanın kış aylarındaki ısı performansının yeterli olmadığı kanaatiyle binaya dıştan 3 cm EPS (genleştirilmiş polistiren levha) malzemeye yalıtım yapılmasına karar verilmiştir. Çalışmada binanın ön, arka ve sağ yan olmak üzere üç farklı cephesi incelenmiştir. Bu çalışmada binanın yalıtım yapılmadan önceki mevcut hali “yalıtımsız cephe (ön)”; yalıtım yapıldıktan sonraki hali ise sıvalı olma durumuna göre “yalıtımlı + sıvasız (arka)” ve yalıtımlı+sıvalı (sağ yan)” cephe olarak ifade edilmiştir. Bu cephelerde yer alan örnek duvarlar ise sırasıyla “ÖD1, ÖD2 ve ÖD3” olarak kodlanmıştır (Tablo 1). Bu bina, yalıtımsız ve yalıtımlı cephelerdeki duvarların aynı ortam koşullarında ve aynı hava şartlarında kızılötesi ısı görüntüleme yöntemiyle aynı anda incelenmesine imkan verdiği için tercih edilmiştir. Ayrıca yalıtım uygulama aşamalarının takip edilebilir ve yalıtımda kullanılan malzeme bilgilerine ulaşılabilir olması da bu binanın tercih edilme sebeplerindedir. Çalışma kapsamında incelenen binaya ait fotoğraflar Şekil 1’de, incelenen örnek duvarlara ait malzeme özellikleri ve kesitleri Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. Çalışmada İncelenen Binaya Ait Örnek Duvarların Bileşenleri, Kalınlıkları ve Duvar Kesitleri

Duvar Kodu	Örnek Duvarların Bileşenleri			Kalınlık (cm)	Duvar Kesitleri
	Duvar Türü	Duvar Katmanı	Malzeme		
ÖD1	Yalıtımsız (ön) cephedeki dış duvar	İç boya	Beyaz renkli plastik boya	-	
		İç sıva	Kireç- çimento katkılı sıva	1,5	
		Sandviç duvar	13,5 cm delikli tuğla +3 cm XPS+13,5 cm delikli tuğla	30	
		Dış sıva	Kireç- çimento katkılı sıva	1,5	
		Dış boya	Dış cephe plastik boya	-	
ÖD2	Yalıtımlı+Sıvasız (arka) cephedeki dış duvar	İç boya	Beyaz renkli plastik boya	-	
		İç sıva	Kireç- çimento katkılı sıva	1,5	
		Sandviç duvar	13,5 cm delikli tuğla+3 cm XPS+13,5 cm delikli tuğla	30	
		Dış sıva	Kireç- çimento katkılı sıva	1,5	
		Dış boya	Dış cephe plastik boya	-	
ÖD3	Yalıtımlı + Sıvalı (sağ yan) cephedeki dış duvar	İç boya	Beyaz renkli plastik boya	-	
		İç sıva	Kireç- çimento katkılı sıva	1,5	
		Sandviç duvar	13,5 cm delikli tuğla+3 cm XPS+13,5 cm delikli tuğla	30	
		Dış sıva	Kireç- çimento katkılı sıva	1,5	
		Dış boya	Dış cephe plastik boya	-	
		Yalıtım levhası	EPS	3	
Mineral sıva	Isı yalıtım sıvası	0,5			



Şekil 1. İncelenen Kamu Binasının a. Yalıtımsız Ön Cephesi, b. Yalıtım Uygulaması Yapılan Sağ Yan Cephesi

Bu çalışma Kastamonu ili, TS 825'e göre 2. derece gün bölgesinde yer alan Abana ilçesinde, Ekim ayında, güneşin etkisinin olmadığı akşam saat diliminde ve hava koşullarının kararlı olduğu bir günde yapılmıştır. Uygun ortam koşullarının olduğu günde termal kamera hem binanın yalıtımsız cephesini hem de yalıtımlı cephesini görebilecek açı ve mesafede konumlandırılmıştır. İncelenen bina içeriden merkezi sistem kalorifer marifetiyle ısıtılmış ve binanın dış tarafından yapıya müdahale etmeden, tahribatsız bir şekilde, termal kamera yardımıyla aynı anda binanın her iki cephesini de içeren tekil ısıl görüntüler alınmıştır. Çalışma yapılırken binanın kullanımı engellenmemiş, bina içerisindeki iş ve işleyişler rutin şekilde devam etmiştir.

Çalışmada dış ortam sıcaklık, bağıl nem ve rüzgar hızı bilgileri Kestrel 4500 NW anemometre kullanılarak kayıt edilmiştir. Isıl görüntüler Flir marka E45 model termal kamera ile toplanmıştır. Isıl görüntülerin analizde ThermaCam Researcher Pro 2.10 paket programı kullanılmıştır. Isıl görüntüler bu program aracılığıyla analiz edilmiş, uygun bölgelerden sıcaklık verileri alınmış ve bu sıcaklık verileri Eş.1'de verilen denklemde (Albatici vd. 2015) kullanılarak bina cephelerinde bulunan ÖD1, ÖD2 ve ÖD3 diye kodlanan duvarlara ait ısıl geçirgenlik katsayısı belirlenmiştir. KÖİG yöntemiyle belirlenen U değeri bu makalede “ $U_{KIZILÖTESİ}$ ” olarak ifade edilmiştir.

$$U_{KIZILÖTESİ} = [5,67\varepsilon[(T_i/100)^4 - (T_{out}/100)^4] + 3,8054 v (T_i - T_{out})] / [T_{int} - T_{out}] \quad (1)$$

Burada; ε , yüzeyin ısıl yayıcılık katsayısını (birimsiz); T_i , dış duvar yüzey sıcaklığını (°C); T_{out} , dış ortam sıcaklığını (°C); T_{int} , iç ortam sıcaklığını (°C); v , cepheye yakın havanın hızını (m/s) göstermektedir.

Bina cephelerinin duvarlarında kullanılan malzemeler ve bu malzemelerin kalınlık bilgileri bina projesinden elde edilmiştir. Aynı malzemeye ait ısıl iletkenlik hesap değeri (λ) ise TS 825 (2013) standardında verilen Ek-E'den alınmıştır (Tablo 1). Kullanılan malzemelerin yoğunluk bilgileri projede yer alamadığı için malzemelere ait ısıl iletkenlik hesap değeri olarak minimum ve maksimum değerler aralığı seçilmiştir (Tablo 1). Duvarları oluşturan malzemelerin kalınlıkları ve ısıl iletkenlik hesap değerleri, TS 825 standardında anlatılan ve Eş. 2'de verilen teorik denklemde kullanılarak duvarlara ait ısıl geçirgenlik katsayısı analitik olarak hesaplanmıştır. TS 825 standardı referans alınarak analitik yöntemle hesaplanan U değeri bu makalede “ U_{TS825} ” olarak ifade edilmiştir.

$$U_{TS825} = 1/(R_{si} + (d_1/\lambda_1 + \dots + d_n/\lambda_n) + R_{so}) \quad (2)$$

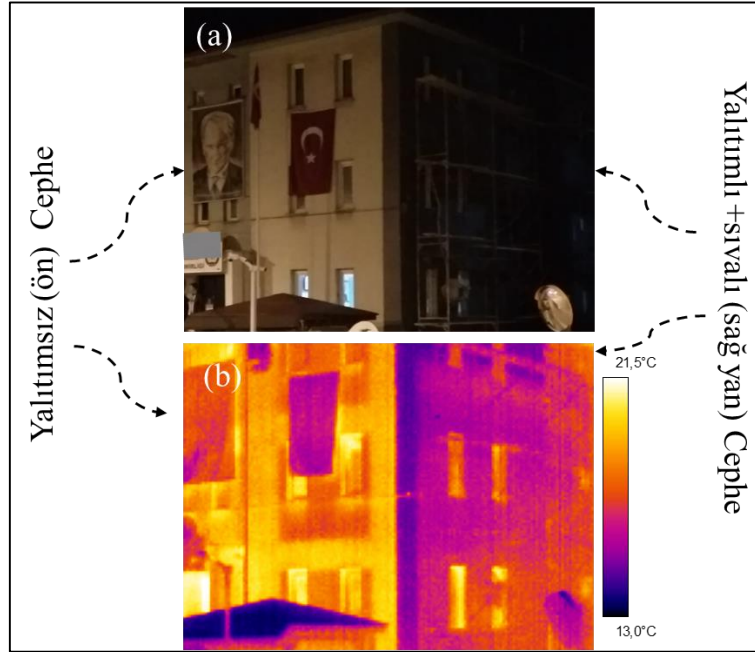
Burada; R_{si} , iç yüzeyin yüzeysel ısıl direnç değerini (m^2K/W); d , duvarı oluşturan her bir katmanın kalınlığını (m); λ , her katmanın ısıl iletkenlik hesap değerini (W/mK); R_{so} , dış yüzeyin yüzeysel ısıl direnç değerini (m^2K/W) göstermektedir.

İncelenen kamu binasında bulunan farklı yalıtım özelliğine sahip ön, arka ve sağ yan cephesinin U değeri hem KÖİG yöntemle hem de analitik yöntemle ayrı ayrı belirlenmiştir. Elde edilen $U_{KIZILÖTESİ}$ ve U_{TS825} verilerine göre farklı cephelerde bulunan duvarların ısıl performansı değerlendirilmiştir.

BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada kapsamında incelenen kamu binasının “yalıtımsız” (ön), “yalıtımlı+sıvasız” (arka) ve “yalıtımlı+sıvalı” (sağ yan) cepheleri kızılötesi ısıl görüntüleme yöntemiyle incelenmiştir. İncelenen bu cephelerden termal kamera ile

tekil ısı görüntüleri alınmıştır. Alınan bu ısı görüntüleri analiz edilerek cephelerde yer alan farklı ısı karakteristiğine sahip elemanların (kiriş/kolon-duvar gibi) sıcaklık verileri alınmıştır. Sıcaklık farkı verilerine göre hangi yüzeylerin daha fazla sıcak olduğu belirlenmiş ve bu bölgelerin ısı köprüsü olarak çalıştığı tespit edilmiştir. Çalışmada ÖD1, ÖD2 ve ÖD3 diye kodlanan örnek duvarlara ait yüzey sıcaklık verileri kullanılarak duvarların $U_{KIZILÖTESİ}$ değeri belirlenmiştir. Ayrıca aynı duvarların analitik olarak U_{TS825} değeri belirlenmiştir. Çalışma kapsamında elde edilen veriler aşağıda detaylıca açıklanmış ve çalışma bulguları kıyaslanarak tartışılmıştır.



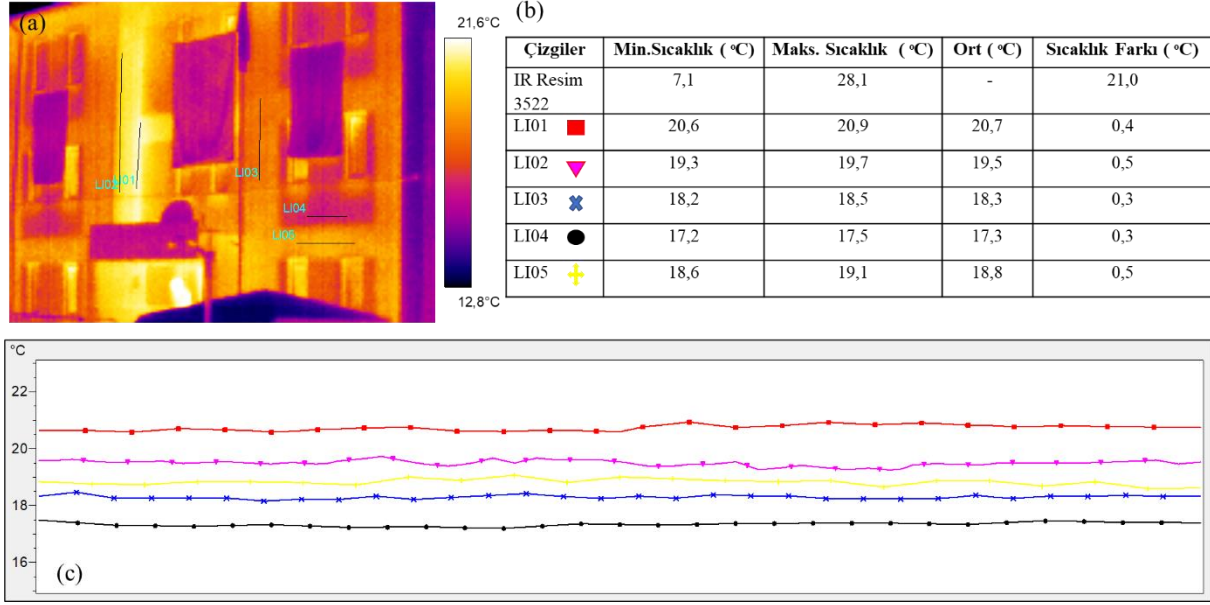
Şekil 2. İncelenen Binanın Yalıtımsız (Ön) ve Yalıtımlı+Sıvalı (Sağ Yan) Cephelerine Ait **a.** Fotoğraflar, **b.** Isıl Görüntüler

Binanın dıştan yalıtımsız (ön) cephesine ait ısı görüntü Şekil 3a'da verilmiştir. Bu ısı görüntüde sıcaklık farkının olduğu bölgeler incelenmiş, cephe yüzeyinden beş farklı bölge seçilmiş, bu bölgelerin sıcaklık verileri alınmıştır. Cephe yüzeyindeki toplam sıcaklık farkı 21°C olarak görülmüştür. Bu farkın yüksek olması ısı görüntüde bina cephesine ait olmayan farklı elemanların yer almasından kaynaklanmaktadır. Ön cepheden alınan ısı görüntülerde bayrak, resim, gibi yabancı malzemelerin olduğu görülmektedir. Bu yabancı cisimler dahil edilerek yapılacak analizlerin sonuçları etkileyeceği ve duvarın ısı performansını doğru yansıtmayacağı bilinmektedir. Bu sebeple yapılan analizlerde yabancı cisimler hariç tutularak sadece duvarı ve taşıyıcı elemanları kapsayan örnek çalışma alanlarının sıcaklık verisi alınmıştır. Her bir cephe yüzeyinde beş farklı çalışma alanı belirlenmiş; bu alanlar her bir cephe için sırasıyla Şekil 3a, Şekil 4a ve Şekil 5a'da LI01-LI05 olarak gösterilmiştir.

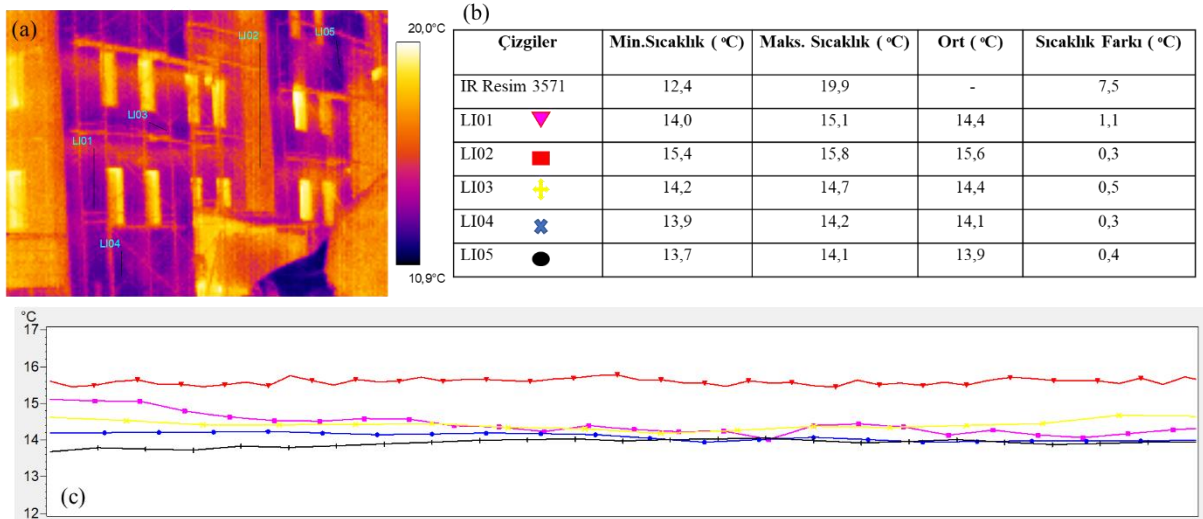
Yalıtımsız cephede bulunan ve ÖD1 diye kodlanan duvar yüzeyindeki sıcaklık ortalaması $17,3^{\circ}\text{C}$ – $18,8^{\circ}\text{C}$ arasındadır (Şekil 3b). Yalıtımsız cephe yüzeyinin farklı alanlarından seçilen çalışma alanlarına ait sıcaklık verileri Şekil 3c'de yer alan grafikte verilmiştir. Sandviç duvar içindeki yalıtımın betonarme kolon ve giriş elemanları kapsamadığı bilinmekte; bu durum ısı görüntülere de yansımakta ve cephenin tamamının aynı ısı özelliklerde olmadığı ısı haritada görülmektedir (Şekil 3a). Cephe yüzeyindeki yalıtımsız kolon ve girişler ısı köprüsü olarak kolaylıkla tespit edilmektedir. Isı köprüsü olarak belirlenen yüzeylerin analizlerinde Li01 ve Li02 diye verilen çizgilere ait ortalama sıcaklık değerleri sırasıyla $20,7^{\circ}\text{C}$ ve $19,5^{\circ}\text{C}$ olarak belirlenmiştir (Şekil 3).

Binanın dıştan yalıtımlı iki farklı cephesine (arka ve sağ yan) ait ısı görüntüleri Şekil 4 ve Şekil 5'de verilmiştir. Şekil 4a'da verilen ısı görüntü, binanın arka cephesinde (kuzey tarafta) bulunan ve sadece ısı yalıtımı malzemesi ile kaplanmış yalıtımlı+sıvasız cepheye aittir. Bu cephede yer alan ÖD2 kodlu duvar yüzeyinin ortalama sıcaklık değerleri $13,9^{\circ}\text{C}$ - $14,4^{\circ}\text{C}$ aralığında bulunmuştur (Şekil 4b ve Şekil 4c). Şekil 5a'da verilen ısı görüntü, binanın sağ yan cephesinde (doğu tarafta) bulunan, cephe yüzeyi ısı yalıtımı levhası ve mineral ısı yalıtım sıvası ile kaplanmış yalıtımlı+sıvalı cepheye aittir. Bu cephede yer alan ÖD3

kodlu duvar yüzeyinin ortalama sıcaklık değerleri $16,7^{\circ}\text{C}$ - $18,5^{\circ}\text{C}$ aralığında bulunmuştur (Şekil 5b ve Şekil 5c).



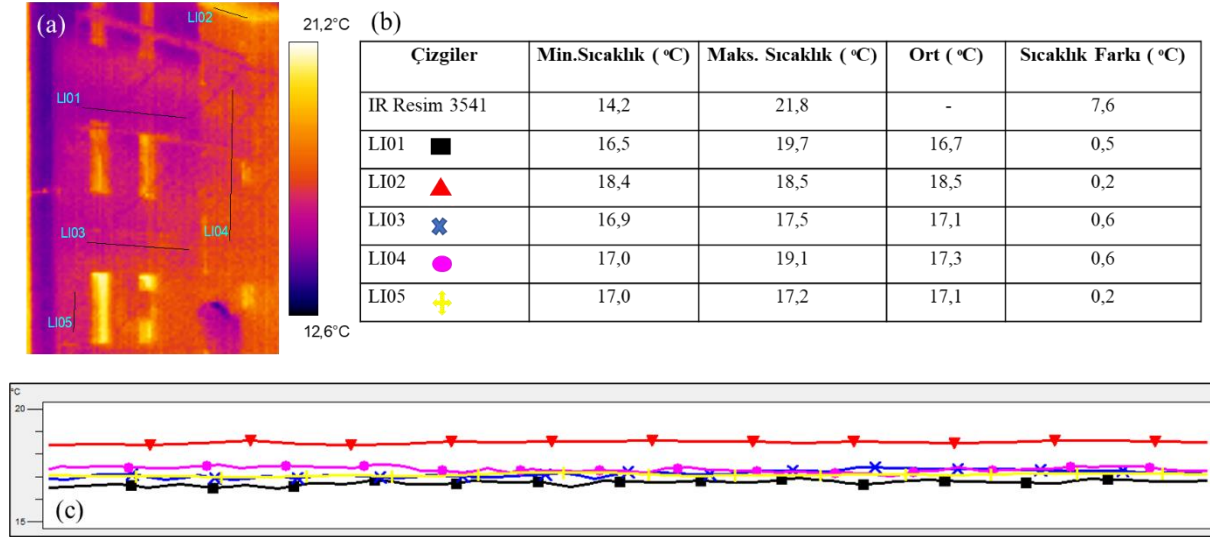
Şekil 3. Yalıtımsız (Ön) Cephenin a. Isıl Haritası, b. Analiz Sonucu Elde Edilen Sıcaklık Verileri ve c. Sıcaklık Ortalamalarının Grafiği



Şekil 4. Yalıtımlı+Sıvasız Cephenin a. Isıl Haritası, b. Analiz Sonucu Elde Edilen Sıcaklık Verileri ve c. Sıcaklık Ortalamalarının Grafiği

Çalışmada incelenen kamu binasının farklı cephelerinde bulunan; ÖD1, ÖD2 ve ÖD3 diye kodlanan duvar örneklerinin ısı geçirenlik değerleri (U_{TS825} ve $U_{KIZILÖTESİ}$) iki farklı yöntemle belirlenmiştir. $U_{KIZILÖTESİ}$ değeri belirlenirken; duvar katmanlarında hangi malzemenin kullanıldığı bilgisine ihtiyaç duyulmamıştır. Doğrudan yapı dış cephesinden, yapıya müdahale edilmeden alınan ısı görüntüleri analiz edilmiş; analiz sonucunda elde edilen dış yüzey sıcaklık verileri; çalışma esnasında kayıtları edilen dış ve iç ortam sıcaklık verileri, dış ortam rüzgar hızı verileri Eş.1’de kullanılarak ÖD1, ÖD2 ve ÖD3 diye kodlanan duvarların mevcut ısı geçirenlik katsayısı ($U_{KIZILÖTESİ}$) belirlenmiştir. Hesaplamalarda dış yüzey sıcaklık verisi olarak duvarın genel durumunu temsil eden sıcaklık değerleri kullanılmıştır. ÖD1, ÖD2 ve ÖD3 diye kodlanan duvarların sırasıyla $U_{KIZILÖTESİ}$ ortalama değerleri $0,70 \text{ W/m}^2\text{K}$; $0,22 \text{ W/m}^2\text{K}$ ve $0,40 \text{ W/m}^2\text{K}$ olarak belirlenmiştir (Tablo 2). $U_{KIZILÖTESİ}$ verilerine göre en yüksek ısı geçirenlik katsayısına yani en düşük ısı direnç değerine sahip duvar örneği ÖD1 kodlu dıştan yalıtımı bulunmayan duvar örneğidir. Hem ısı yalıtım levhası hem de mineral sıva kaplı olan ÖD3 kodlu duvar örneğinin

ise ısı geçirgenlik katsayısı, ÖD2 kodlu duvar örneğinin ısı geçirgenlik katsayısına göre yüksek bulunmuştur. Cephelelerin bulunduğu yönlerin (kuzey ve doğu) farklı olması malzeme yüzeylerinin gün boyu güneşe maruz kalma koşullarını değiştirmektedir. Farklı iklim geçmişine ve farklı ısı performansına sahip yapıların ısı performansını doğru şekilde yorumlamak için Lehman ve arkadaşları tarafından 2013 yılında geniş kapsamlı bir çalışma yürütülmüştür. Bu çalışma sonucunda kızılötesi ısı görüntüleme yöntemiyle yapılan çalışma sonuçlarının dış ortam koşullarından, binanın yönünden ve malzeme ısı özelliklerindeki farklılıklardan etkilendiği belirtilmiştir (Lehmann vd. 2013; Tanner vd. 2011). Literatür bilgileri ışığında; bu çalışmada incelenen ÖD2 ve ÖD3 kodlu duvarların farklı yönlerde bulunmasının ve ayrıca dış yüzeylerindeki malzemenin ısınma/soğuma hızının (termal atalet) farklı olmasının sonuçları etkilediği düşünülmektedir.



Şekil 5. Yalıtımlı+Sıvalı Cephenin a. Isıl Haritası, b. Analiz Sonucu Elde Edilen Sıcaklık Verileri ve c. Sıcaklık Ortalamalarının Grafiği

U_{TS825} değeri belirlenirken; yalıtım uygulaması yapılmadan önceki mevcut duvar katmanlarını oluşturan malzemelere ait bilgiler ve bu malzemelerin kalınlık verileri bina projesinden elde edilmiştir. Malzemelere ait ısı iletkenlik hesap değerleri TS 825 standardından alınmıştır. Kalınlık ve ısı iletkenlik hesap değeri verileri Eş.2’de verilen denklemde kullanılarak ÖD1 ÖD2 ve ÖD3 diye kodlanan duvarların ısı geçirgenlik katsayısı (U_{TS825}) analitik olarak hesaplanmıştır. Duvarlarda kullanılan kagir malzemelerin yoğunluk bilgisi projede bulunmadığı için ısı iletkenlik hesap değerleri net olarak seçilememiş, standartta verilen ve aynı malzemeyi temsil eden yoğunluk ve ısı iletkenlik hesap değerlerinin minimum ve maksimum değer aralığı kullanılmıştır. Her iki uç değerler kullanılarak hesaplanan U_{TS825} değeri ÖD1 kodlu duvar için $0,41 \text{ W/m}^2\text{K}$ - $0,53 \text{ W/m}^2\text{K}$; ÖD2 kodlu duvar için $0,31 \text{ W/m}^2\text{K}$ - $0,38 \text{ W/m}^2\text{K}$ ve ÖD3 kodlu duvar için $0,30 \text{ W/m}^2\text{K}$ - $0,37 \text{ W/m}^2\text{K}$ aralığında bulunmuştur (Tablo 2). U_{TS825} verilerine göre en düşük ısı geçirgenlik katsayısına, ÖD3 kodlu hem yalıtım levhası hem de mineral sıva kaplı duvar örneği sahiptir. ÖD1 kodlu dıştan yalıtımsız duvar örneği ise en yüksek ısı geçirgenlik katsayısı yani en düşük ısı direnç değerine sahiptir.

Elde edilen verilere göre ÖD1 kodlu dıştan yalıtımsız duvarın ısı performansı hem U_{TS825} hem de $U_{KIZILÖTESİ}$ değerine göre ÖD2 ve ÖD3 kodlu dıştan yalıtım uygulaması yapılan duvarların ısı performansından düşük bulunmuştur. Bu sonuç kamu binasına ısı performansın iyileştirilmesi için yapılan yalıtım uygulamasının her iki yönüne göre de işe yaradığını göstermektedir. Fakat bu çalışma kapsamında incelenen ÖD1, ÖD2 ve ÖD3 kodlu duvar örnekleri için belirlenen ve Tablo 2’de verilen U_{TS825} değeri ile $U_{KIZILÖTESİ}$ değeri farklı bulunmuştur. Literatür verilerine göre bu farklılık beklenendir (Desogus vd. 2011; Mandilaras vd. 2014; Sayın & Tavukçuoğlu 2016; Park vd. 2023). ÖD1 ve ÖD3 kodlu duvarların mevcut ısı geçirgenlik katsayısı gösteren $U_{KIZILÖTESİ}$ değeri, U_{TS825} değerine göre daha yüksek bulunmuştur. Yani bu verilere göre aslında duvarların hem yalıtımsız hem de yalıtımlı halde iken KÖİG yöntemiyle hesaplanan mevcut ısı performansı, analitik olarak hesaplanan ısı performansına göre daha düşüktür. Elde edilen bu sonuç literatür verileriyle uyumludur. Literatürde farklı malzemelerden oluşan yalıtımlı duvar örnekleri üzerine KÖİG yöntemiyle yapılan araştırma da mevcut U değeri ile projeden alınan veriler göre hesaplanan U değeri arasında az %13, en fazla %95 fark olduğu ve KÖİG yöntemiyle elde edilen U değerlerinin daha yüksek olduğu belirtilmiştir (Sayın & Tavukçuoğlu, 2016).

Tablo 2. Binaın İncelenen Cephelerinde Yer Alan ÖD1, ÖD2 ve ÖD3 Kodlu Duvar Örneklerinin Termofiziksel Özellikleri ve Belirlenen Isıl Geçirimsizlik Değerleri: $U_{TS\ 825}$ ve $U_{KIZILÖTESİ}$

Duvar Türü	Duvar Kodu	Duvar Katmanları	TS 825 Ek-E Sıra No	Kalınlık (d, cm)	Birim Hacim Kütle* (kg/m ³)	Isıl İletkenlik Hesap Değeri* (λ, w/mK)	$U_{TS\ 825}$ (W/m ² K)	$U_{KIZILÖTESİ}$ (W/m ² K)
Yalıtımsız dış duvar	ÖD1	Beyaz renkli plastik boya	-	-	-	-		
		Kireç- çimento katkılı sıva	4.1	1,5	1800	1,0		
		Sandviç duvar	7.1	27	550-1000	0,22-0,29	0,41-0,53	0,65-0,75
		XPS	10.3.2	3	≥25	0,030-0,040		
		Kireç- çimento katkılı sıva	4.1	1,5	1800	1,0		
Dış cephe plastik boya	-	-	-	-	-			
Yalıtımlı levhalı + sıvasız dış duvar	ÖD2	Beyaz renkli plastik boya	-	-	-	-		
		Kireç- çimento katkılı sıva	4.1	1,5	1800	1,0		
		Sandviç duvar	7.1	27	550-1000	0,22-0,29	0,31-0,38	0,19-0,25
		XPS	10.3.2	3	≥25	0,030-0,040		
		Kireç- çimento katkılı sıva	4.1	1,5	1800	1,0		
Dış cephe plastik boya	-	-	-	-	-			
EPS	10.3.1	3	≥15-30	0,035-0,040				
Yalıtım levhalı + mineral sıvalı dış duvar	ÖD3	Beyaz renkli plastik boya	-	-	-	-		
		Kireç- çimento katkılı sıva	4.1	1,5	1800	1,0		
		Sandviç duvar	7.1	27	550-1000	0,22-0,29	0,30-0,37	0,38-0,42
		XPS	10.3.2	3	≥25	0,030-0,040		
		Kireç- çimento katkılı sıva	4.1	1,5	1800	1,0		
		Dış cephe plastik boya	-	-	-	-	-	
EPS	10.3.1	3	≥15-30	0,035-0,040				
Dekoratif/mineral sıva	4.10	0,5	≥200	0,070-0,100				

* TS 825 (2013) standardından alınmıştır.

KÖİG yöntemi bina cephesini oluşturan yapı elemanlarının mevcut durumu üzerinden alınan ısıl görüntülerin analizi sonucu U değerinin belirlenmesine imkan vermektedir. Yani KÖİG, mevcut koşullarda duvarların yüzeyinde bir ısıl problem var mı, bir nem sorunu var mı ya da hiçbir problem yok mu işte bütün bu olasılıkları ve muhtemel ya da var olan etkenleri içine alan bir analizin yapılmasını sağlamaktadır. Duvar yüzeyinin herhangi bir bölgesinde gözle görülmeyen, örneğin duvar dolgu elemanlarının birleşim yerlerinden kaynaklı ya da malzeme bozulmalarından vb. kaynaklı ısı köprüsü, hava kaçağı gibi bir durum varsa bu KÖİG yöntemle alınan ısıl görüntülere yansımakta ve yapılan çalışma sonuçlarına bu problemler dahil edilmektedir. Ayrıca KÖİG yöntem sonuçlarında analitik yöntemlerde göz ardı edilen yüzeylerin emisyonu ve radyatif sıcaklıkları da KÖİG yönteminde hesaplara dahil edilmektedir (Fokaides ve Kalogirou, 2011). Fakat analitik yöntem sonuçlarında duvarların/yapı elemanlarının tamamen sağlıklı olduğu varsayılır, herhangi bir ısıl problemin varlığı analitik işlem sonuçlarına yansımaz. Bu da analitik işlem sonuçlarının her zaman duvarların/cephelerin ısıl performansının daha yüksek yani U değerlerinin daha düşük görünmesine sebep olur. Sonuç olarak, bu sebeplerle literatürde analitik yöntem sonuçlarına hep bir şüpheli yaklaşım hakimdir (Ficco vd. 2015). KÖİG yöntem sonuçlarının daha doğru sonuç verdiğine inanılmaktadır (Fokaides & Kalogirou, 2011)

SONUÇLAR

Bu çalışmada, mevcut bir kamu binasının enerji performansını artırmak amacıyla uygulanan yalıtım işlemleri incelenmiş, yalıtım uygulamasının bina duvarlarının ısıl geçirgenlik katsayısına (U-değeri) etkisi analitik ve deneysel olmak üzere iki farklı yöntem ile araştırılmıştır. Çalışma sonucunda elde edilen verilere göre incelenen cephelerin $U_{KIZILÖTESİ}$ değeri U_{TS825} değerine göre yüksek bulunmuştur. Bu sonuca göre duvarların gerçek/mevcut halleri ve gerçek ortam koşullarını yansıtan, malzeme özelliklerine ihtiyaç duyulmadan, sadece yüzey sıcaklık verileri kullanılarak hesaplama yapılan KÖİG yöntemiyle belirlenen duvarın mevcut ısıl performansının, analitik verilerle

hesaplanan ısı performansına göre daha düşük olduğu anlaşılmıştır. Yalıtımsız cephede bulunan duvar yüzeyinin hem $U_{KIZILÖTESİ}$ değeri hem de U_{TS825} değeri yalıtım uygulaması yapılan diğer cephelere göre yüksek bulunmuştur. Her iki yöntem sonucu da yalıtım uygulamasının binanın ısı performansını olumlu olarak etkilediğini göstermiştir. Bu sonuç bina enerji performansı iyileştirme çalışmalarında dıştan yalıtım uygulamasının başarılı olduğunu ortaya çıkarmıştır.

Sonuç olarak; KÖİG yönteminin mevcut yapıların ısı performansının belirlenmesinde oldukça kullanışlı, pratik ve doğru sonuç veren bir yöntem olduğu anlaşılmıştır. Özellikle enerji kimlik belgesi düzenleyen kurum ve kuruluşlarca bu yöntemin yaygın ve aktif olarak kullanılması; binaların mevcut enerji performanslarının tespit edilmesi bakımından oldukça önemlidir. Bu sebeple KÖİG yönteminin standart bir yöntem haline dönüşmesi ve kullanım alanlarının genişletilmesi gereklidir. Dünya genelinde oldukça yaygınlaşan KÖİG yönteminin Türkiye’de de yaygınlaşması amacıyla farklı malzemelerle inşa edilmiş yapıların ısı özelliklerinin tespiti ve ısı performanslarının değerlendirilmesi çalışmalarında kullanımı önerilmektedir. Enerji verimliliğinin ve enerji korunumunun önemli olduğu günümüzde, tespit ve denetleme noktasında ihtiyaç duyulan pratik yöntemlerin yaygınlaştırılması ile enerji korunumunun tam anlamıyla sağlanacağı düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

- Albatici, R. Tonelli, A. M. & Chiogna M. (2015). A Comprehensive Experimental Approach for the Validation of Quantitative Infrared Thermography in the Evaluation of Building Thermal Transmittance. *Applied Energy*, 141, 218–228. <https://doi.org/10.2339/politeknik.868410>
- Atsonios, I.A., Mandilaras, I. D. Kontogeorgos, D. A. & Founti, M.A. (2017). A comparative assessment of the standardized methods for the in-situ measurement of the thermal resistance of building walls. *Energy and Buildings* 154, 198–206. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.08.064>
- Balaras, C. A. & Argiriou, A. A. (2002). Infrared Thermography for Building Diagnostics. *Energy and Buildings*, 34(2), 171-183.
- ISO 9869-1 (2014). Thermal Insulation—Building Elements—In-Situ Measurement of Thermal Resistance and Thermal Transmittance—Part 1: Heat Flow Meter Method. International Standard.
- Çengel, Y. (2011). Isı ve Kütle Transferi Pratik Bir Yaklaşım. (3. ed.). İzmir: Güven Kitabevi.
- Department of Energy (DOE), (2012), 2011 Buildings energy databook. 5th edn, Energy Efficiency & Renewable Energy Department. 5th edn. Maryland: D&R International, Ltd. Available : 01.09.2024 chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/https://ieer.org/wp/wp-content/uploads/2012/03/DOE-2011-Buildings-Energy-DataBook-BEDB.pdf
- Ficco, G. Iannetta, F. Ianniello, E. Alfano, F. R. A. & Dell’Isola, M. (2015). U-Value in Situ Measurement for Energy Diagnosis of Existing Buildings. *Energy and Buildings*, 104, 108-121. <dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.06.071>
- Fokaides, P. A. & Kalogirou, S. A. (2011). Application of Infrared Thermography for the Determination of the Overall Heat Transfer Coefficient (U-Value) in Building Envelopes. *Applied Energy*, 88, 4358–4365. doi:10.1016/j.apenergy.2011.05.014
- François, A. Ibos, L. Feuillet, V. & Meulemans, J. (2021). In Situ Measurement Method for the Quantification of the Thermal Transmittance of a Non-Homogeneous Wall or a Thermal Bridge Using an Inverse Technique and Active Infrared Thermography. *Energy & Buildings*, 233, 110633. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.110633>
- Danielski, I. & Froling, M. (2015). Diagnosis of Buildings' Thermal Performance-a Quantitative Method Using Thermography Under Non-Steady State Heat Flow. *Energy Procedia*, 83.
- Desogus, G. Mura, S. & Ricciu, R. (2011). Comparing different approaches to in situ measurement of building components thermal resistance, *Energy Build.* 43 (10), 2613–2620.
- Kim, S. Seo, J. Jeong, H. & Kim, J. (2022). In Situ Measurement of the Heat Loss Coefficient of Thermal Bridges in a Building Envelope. *Energy & Buildings*. 256, 111627. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111627>
- Koçkar Tuğla, R. (2022). Mevcut Yapı Cephelerinin Isıl Özelliklerinin Nicel Kızılötesi Isıl Görüntüleme Yöntemi ile Yerinde İncelenmesi, *Politeknik Dergisi*, 25 (4), 1633–1643. <https://doi.org/10.2339/politeknik.868410>

- Lehmann, B. Ghazi Wakili, K., Frank, T. Vera Collado, B. & Tanner, C. (2013). Effects of Individual Climatic Parameters on the Infrared Thermography of Buildings,” *Applied. Energy*, 110, 29–43. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.03.066>
- Meng, X. Yan, B. Gao, Y. Wang, J. Zhang, W. & Long, E. (2015). Factors Affecting the In-Situ Measurement Accuracy of the Wall Heat Transfer Coefficient Using the Heat Flow Meter Method. *Energy and Buildings*, 86, 754–765. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.11.005>
- Mandilaras, I. Atsonios, I. Zannis, G. & Founti, M. (2014) Thermal Performance of a Building Envelope Incorporating ETICS with Vacuum Insulation Panels and EPS, *Energy Build.* 85 654–665. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.06.053>
- Nardi, I. Paoletti, D. Ambrosini, D. Rubeis, T. & Sfarra, S. (2016). U-Value Assessment by Infrared Thermography: A Comparison of Different Calculation Methods in A Guarded Hot Box. *Energy and Buildings*, 122, 211-221. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.04.017>
- O’Grady, M. Lechowska, A. A. and Harte, A. M. (2017). Infrared Thermography Technique As an in-situ Method of Assessing Heat Loss Through Thermal Bridging. *Energy and Buildings*, 135, 20–32.
- Park, S. Shim, J. & Song, D. (2023) A Comparative Assessment of In-Situ Measurement Methods for Thermal Resistance of Building Walls Under Mild Climate Condition. *Journal of Building Engineering*, 77, 107417. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2023.107417>
- Sayın, M. & Tavukçuoğlu, A. (2016). Cephelerin Isı Yalıtımlılık Durumlarının Isıl Görüntüleme ile Değerlendirilmesi”, *Yalıtım Dergisi*, 152, 46-54.
- Tanner, C. Lehmann, B. Frank, T. & Ghazi Wakili, K. (2011). A Proposal for Standardized Thermal Images (in German). *Bauphysik*, 33, 345–56. Doi: 10.1002/bapi.20111080
- Titman, D. J. (2001). Applications of Thermography in Non-Destructive Testing of Structures. *NDT & E International*, 34, 149-154.
- Tuğla, R. Tavukçuoğlu, A. & Arslan, M. (2013). Examination of Thermal Properties and Failures of Brick Walls by the Use of Infrared Thermography and Hot Box Method. *International conference & exhibition on “Application of efficient & renewable energy technologies in low-cost buildings and construction*, Ankara, Turkey, 180-199.
- TS 825, (2013). Binalarda ısı yalıtım kuralları, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 1745, (2004). Kâgir ve kâgir mamulleri- tasarım ısıl değerlerinin tayini metotları, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN ISO 6946, (2009). Yapı Bileşenleri ve Yapı Elemanları, Isıl Direnç ve Isıl Geçirgenlik Hesaplama Yöntemi. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.



Kahramanmaraş Sütçü İmam University

Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 18.03.2024
Kabul Tarihi : 01.07.2024

Received Date : 18.03.2024
Accepted Date : 01.07.2024

EXAMINING CARBON QUANTUM DOTS RESEARCH IN TURKEY: A SCIENTIFIC MAPPING ANALYSIS

TÜRKİYE'DEKİ KARBON KUANTUM NOKTALARI ARAŞTIRMALARININ İNCELENMESİ: BİLİMSEL BİR HARİTALAMA ANALİZİ

Hasan ESKALEN^{1,4*} (ORCID: 0000-0002-4523-6573)

Mustafa KAVGACI^{2,4} (ORCID: 0000-0001-8747-0635)

Şükrü ÖZĞAN³ (ORCID: 0000-0001-9334-327X)

¹ Kahramanmaraş Sütçü İmam University, Vocational School of Health Services, Department of Opticianry, Kahramanmaraş, Turkey

² Kahramanmaraş İstiklal University, Elbistan Vocational School of Health Services, Department of Opticianry, Kahramanmaraş, Turkey

³ Kahramanmaraş Sütçü İmam University, Department of Physics, Kahramanmaraş, Turkey

⁴ Kahramanmaraş Sütçü İmam University, Department of Material Science and Engineering, Graduate School of Natural and Applied Sciences, Kahramanmaraş, Turkey

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Hasan ESKALEN, heskalen@gmail.com:

ABSTRACT

The bibliometric analysis presented in this work is thorough and comprehensive, carefully examining the wide range of contributions related to "carbon dots" and "carbon quantum dots" in Turkish research from 2014 to 2023. Using Biblioshiny as the major analytical tool and the Web of Science database, this study methodically breaks down the annual trends, regional spreads, institutional ties, authorship trends, and the complex clusters of keywords in this field. After a comprehensive analysis of international and local citations, the research identifies a noteworthy yearly growth rate of 14.72% for Turkey's carbon dot project. Starting with one manuscript in 2014, the research output increased rapidly, reaching sixty critical documents by the end of May 2024. This thorough study clarifies important publication sources; in particular, it emphasizes ChemistrySelect and the publication of Fluorescence as two of the field's top contributors. This thorough evaluation significantly contributes to our knowledge of the state of carbon studies in Turkey, providing priceless insights and a guide to advise and set the direction for future research projects in this continuously developing field, especially for researchers and academics connected with "carbon dots".

Keywords: Bibliometric, carbon dots, carbon quantum dots, carbon nanodot.

ÖZET

Bu çalışmada sunulan bibliyometrik analiz, 2014'ten 2024'e kadar Türkiyede yapılan araştırmalarda "karbon noktaları" ve "karbon kuantum noktaları" ile ilgili geniş kapsamlı katkıları dikkatle inceleyen ayrıntılı ve kapsamlı bir analizdir. Biblioshiny'yi ana analitik araç olarak ve Web of Science veritabanını kullanan bu çalışma, bu alandaki yıllık eğilimleri, bölgesel dağılımları, kurumsal bağları, yazar eğilimlerini ve karmaşık anahtar kelime kümelerini metodik olarak incelemektedir. Çalışmada uluslararası ve yerel atıfların kapsamlı bir analizinin ardından, Türkiye'nin karbon nokta projesi için yıllık %14.72'lik kayda değer bir büyüme oranı tespit edilmiştir. 2014 yılında bir makaleyle başlayan araştırma çıktıları hızla artarak 2024 Mayıs itibarıyla altmış kritik belgeye ulaşmıştır. Bu kapsamlı çalışma, önemli yayın kaynaklarını açıklığa kavuşturuyor; özellikle ChemistrySelect'i ve Floresan'ın yayınlanmasını alana en çok katkıda bulunan iki kaynak olarak vurgulamaktadır. Bu kapsamlı değerlendirme, Türkiye'deki karbon çalışmalarının durumu hakkındaki bilgimize önemli ölçüde katkıda bulunmakta, paha biçilemez öngörüler sağlamakta ve özellikle "karbon noktaları" ile ilgili araştırmacılar ve akademisyenlere sürekli gelişen bu alanda gelecekteki araştırma projeleri için tavsiyelerde bulunmakta ve yön belirlemek için bir rehberlik sağlamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Bibliyometrik, karbon noktalar, karbon kuantum noktalar, karbon nanonokta.

INTRODUCTION

In the context of growing scientific research, novel materials with remarkable qualities have become more popular. Among these improvements, nanostructured materials stand out as especially interesting. Mainly, carbon-based nanostructures have attracted much interest (Akkurt, 2014). Carbon dots, also known as Carbon Quantum Dots (CQDs), are one of the newest trends in this field. It was accidentally discovered in 2004 while purifying carbon nanotubes (Alas et al., 2020; Dinc & Kara, 2018; Kavgacı et al., 2023). Due to several critical characteristics, carbon dots—distinguished by their quasi-spherical particle morphology—are becoming increasingly important in a wide variety of applications. Their notable qualities, which all contribute to their attraction in the scientific and industrial domains, include water solubility, low toxicity, adjustable photoluminescence characteristics, outstanding chemical and physical stability, and cheap synthesis cost (Sagbas & Sahiner, 2019). Two main approaches are used in the production of CQDs: the top-down technique and the bottom-up approach. The bottom-up approach uses various techniques, including microwave irradiation, pyrolysis, and hydrothermal treatment, to create CQDs from tiny molecules (Eskalen & Çeşme, 2021). On the other hand, the top-down approach uses methods such as arc discharge, electrochemical oxidation, and laser ablation to produce CQDs. Because of its efficiency and adaptability, hydrothermal synthesis is one of these processes that is most frequently used to produce carbon dots (Aslan & Eskalen, 2021; Budak & Ünlü, 2021; Çeşme & Eskalen, 2020; Eskalen, 2020). This flexible nanostructures' potential for varied and sustainable resource consumption is further demonstrated by the fact that they may be produced from a wide range of organic precursors, including plant-based, agricultural-forestry, human and animal-derived, industrial, and algae waste materials (Başkaya et al., 2022; Çeşme et al., 2022; Dinç et al., 2022; Eskalen et al., 2023; Simsek et al., 2019).

CQDs are now being explored from a variety of perspectives to maximize their potential uses in many different kinds of industries. Their adaptability has drawn a lot of interest, particularly in the fields of chemistry, sensing (Burcu & Genç, 2017; Eskalen et al., 2021.b), and biosensor technologies (Akbiyık et al., 2023; Bodur et al., 2021; Dinç & Günhan, 2020). CQDs have shown potential for protecting against security risks associated with counterfeiting. Because of their special qualities, they may be used as luminous markers or tagging agents in security inks or papers, greatly aiding anti-counterfeiting procedures (Eskalen et al., 2021.a). Moreover, CQDs show great potential for bioimaging, utilizing their superior photoluminescence qualities and little cytotoxicity (Eskalen et al., 2020). These nanostructures' large surface area and electron transport characteristics also make them promising for use in supercapacitors and other energy storage devices (Genc et al., 2017; Çolak et al., 2023). While their capacities as drug carriers offer promise in pharmaceuticals, notably in cancer therapy where focused drug delivery systems are critical for effective treatment techniques for biomedical applications (Abraham et al., 2022; Suner et al., 2022; Sutekin et al., 2021). Their photocatalytic qualities make them ideal for efficient photocatalysis applications (Eskalen et al., 2022). Finally, food packing and wound dressing properties of carbon dots are also studied (Alaş et al., 2022; Başkaya et al., 2022; Sahiner et al., 2022). The investigation of CQDs in many fields highlights their adaptability and potential benefits in various scientific and industrial environments (Aslan et al., 2023; Korkmaz et al., 2023; Navidfar et al., 2022).

As originally described, the bibliometric technique is a powerful tool for identifying and understanding research trends within certain topics (Özğan & Aluçla, 2023.a; Özğan & Aluçlu, 2023.b). There are two key components to this analytical approach. First of all, it describes in detail how publications are distributed across several categories, such as subjects, fields of study, sources, authors, organizations, and nations. Second, it serves as an essential tool for examining research output and trend analysis across a range of disciplines, including publication numbers and citation counts. A bibliometric study was carried out to investigate the state of "carbon dots" research in Turkey using the Web of Science database. The principal aim of this work is to conduct a thorough evaluation of Turkish carbon quantum dots researchers from 2014 to 2023 using statistical and mathematical techniques in the context of bibliometric analysis. The purpose of this study is to evaluate the quantitative characteristics and identify common and emerging patterns in the Turkish environment, particularly in the area of "carbon dots." By doing this, it aims to provide a thorough foundation for charting the course of this field's research activity in Turkey. In addition to defining the current state of situations, this assessment seeks to identify and highlight important patterns and areas that require further investigation. This will lay a solid foundation for future research activities in this domain within the Turkish scholarly landscape.

MATERIAL AND METHOD

The scientometric study's dependability depends upon the collection of trustworthy data from well-established databases, including ISI WoS, Scopus, and Google Scholar. Because of its broad coverage and comprehensive content, the ISI WoS Core Collection records (<http://apps.webofknowledge.com>) were chosen as the primary information source for this study. The data collection process began by using the search field "Carbon dots" OR "Carbon quantum dots" OR "Carbon nanodots" OR "CQDs" OR "Carbon dot" OR "Carbon quantum dot" OR "Carbon nanodot" OR "CQD". Initially, 24.043 documents were identified. To refine the results, the focus was narrowed to documents related to Turkey and Türkiye, reducing the count to 281. 28 studies not related to carbon quantum dots were removed, and 2 correlation studies were removed. In total, 251 studies related to carbon quantum dots were taken into consideration. These resources were further analyzed using Biblioshiny, extracting detailed information such as publication years, author names, affiliations, and keywords.

RESULTS AND DISCUSSION

The yearly distribution of papers on CQDs (Carbon Quantum Dots) published in Turkey is shown in Figure 1. The red section represents research articles (214), the blue section represents review articles (28), the orange section represents book chapters (5), and the yellow section represents conference titles and presentations (4). A total of 251 documents were analyzed. The figure depicts the distribution of 251 academic studies on CQDs. The size of the red part indicates that the majority of studies in this field are original research articles. The blue segment indicates that review articles contribute significantly to the literature but not as much as original research. The orange and yellow sections have a smaller proportion, indicating that the contribution of book chapters and conference content in this field is less significant.

This visualization is useful for understanding academic interest in CQDs and the nature of research in this area. For example, the density of original articles indicates that there is still interest in this area and that it is a current area of study. In contrast, the presence of review articles indicates that these findings are being synthesized and that work in this area is maturing. Such bibliometric analyses are beneficial for comprehending the structure of a specific research field and the scope of academic contributions. There was a clear rising trend from 2014 to 2018, even if the number of publications stayed relatively modest. A notable spike in publications occurred in 2019 and throughout the previous five years. There has been a noticeable rise in the number of published documents, and most of them were published in the last two years. The maximum number of published documents was in 2023. This year corresponds to 28% of the total documents. This increase indicates the field's rapid growth and the growing interest in CQDs. The large number of articles in 2023 suggests that researchers are getting more involved with and interested in CQDs. The results indicate a strong previous interest in CQDs and predict even more interest in the future. The increased publications that will result from the growing interest in CQDs in the coming years could considerably improve our scientific understanding of the topic. This situation emphasizes the dynamic and ever-changing nature of CQDs research, underlining the possibility for further scientific findings and advances in this topic.

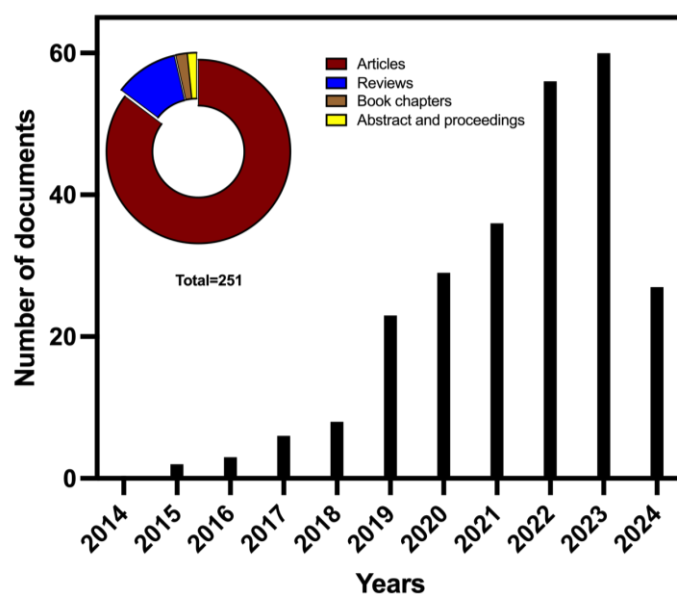


Figure 1. Annual Production of Documents

Figure 2 contains a three-axis Sankey diagram of the authors, keywords, and the universities they are affiliated with, which can provide various insights by relating the flows between various parameters. The graphic has three fields that display the academic works of Turkish writers on CQDs, the universities to which they are related, and the research keywords. The bars on the graph's left side include the names of CQDs researchers. The color intensity and size of these bars signify the number of publications and the researchers' influence. The Authors-institutions column in the center displays the authors' affiliations with the institutions. Universities are represented by different colors in this column, and the size of the bars reflects the number of academic research on CQDs conducted at each university. The DE column on the right side displays the keywords from the studies that were examined. In this column, terms such as 'carbon dots', 'carbon quantum dots', and 'quantum dots' are followed by keywords such as 'green synthesis', 'graphene', and 'antimicrobial'. This suggests that the research is primarily concerned with carbon dots, although it also includes green synthesis, graphene, and antimicrobial uses. The graph is a useful tool for understanding the academic studies on CQDs in Turkey. It is easy to identify research themes and the universities and researchers that are most active in this area. Furthermore, extensive data on the state of affairs, research patterns, joint venture prospects, and research networks in this domain may be acquired.

As can be seen from the graph, the first four researchers working on CQDs and their affiliated universities are as follows: Genç R. is a very active researcher who has done a significant part of the research in this field in Turkey. Eskalen H. is a prominent name in the field of CQDs. It is understood that researchers Ünlü C., Alas M. Ö. And Sahiner N. have an important influence on this issue. Mersin University, Istanbul Technical University, Kahramanmaraş Sütçü İmam University, Selçuk University, and Çanakkale Onsekiz Mart University are major research centers in this field of study, as shown by the colors and breadth of their bars. This demonstrates that these universities play an essential role in CQDs research and that there is considerable interest in the issue at these universities.

The highest score and association with the intensive use of the indicated keywords is important as it demonstrates the expertise of the indicated institutions and authors in this field. These researchers contribute significantly to the generation of scientific knowledge on the production and applications of carbon quantum dots. In this context, the authors and institutions have the potential to increase their scientific impact through international cooperation and to shed light on future research. Pioneering and knowledge in the field of CQDs can not only encourage discoveries and guide future Turkish scientists but also improve existing application areas related to CQDs and encourage finding new application areas. This visual analysis has the potential to guide researchers in understanding the factors involved in the diffusion of scientific knowledge and inspire future research.

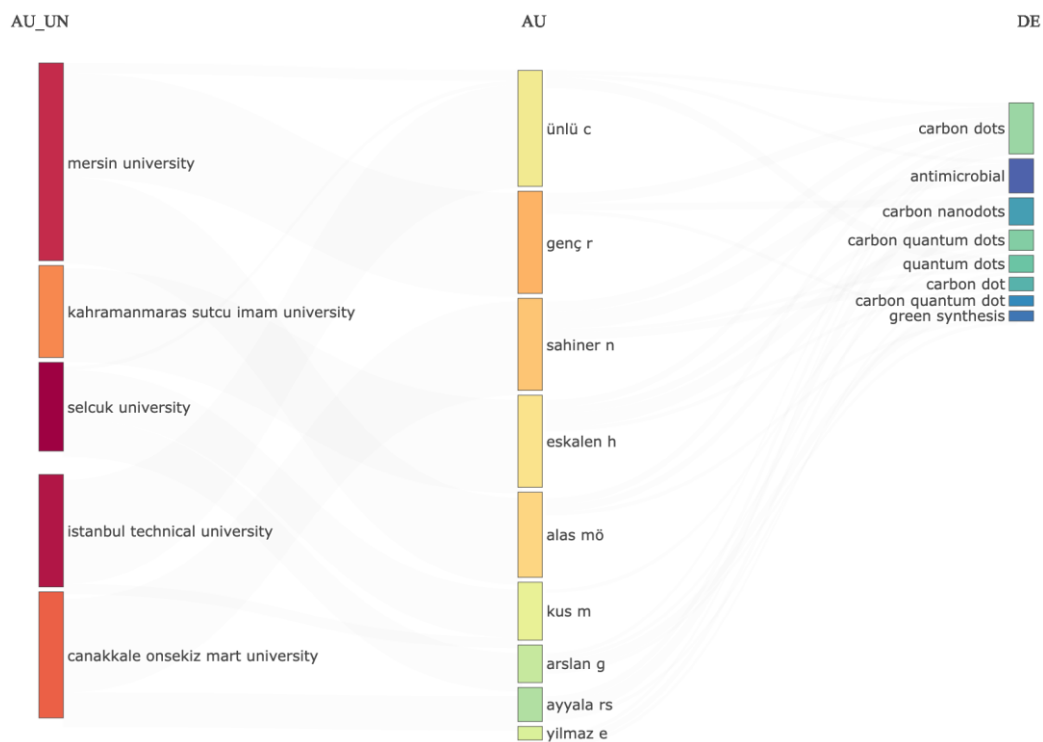


Figure 2. Three Field plot of CQDs Research Conducted in Turkey

The h-index and m-index values of authors producing papers on CQDs are highly relevant for determining their academic contributions, research plans and collaborations, and their impact on other work in this field. h-index is an indicator that measures citations to an author's published papers. A high h-index indicates that the author's work has had a significant impact and is frequently cited. The m-index, on the other hand, is an indicator of how sustainable a researcher's h-index is throughout their career and is calculated by dividing the researcher's active career years by their h-index. It reflects the ability of researchers to create an impact throughout their careers. Figure 3 depicts the h-index and m-index values of Turkey's top ten writers who have published the most scholarly publications on CQDs over the last decade. The graph shows two separate index values as blue and green columns: the blue columns indicate the authors' h-index and the green columns reflect their m-index. The heights of the blue (0-10) and green (0-1.4) columns in the graph represent the magnitudes of each author's h-index and m-index values. Genç R., Alas M.Ö., has the highest h-index values. This demonstrates that their CQDs study has a large citation network and a long-term effect on academic impact. The author Eskalen H., has high m-index values, indicating that his research has a significant influence.

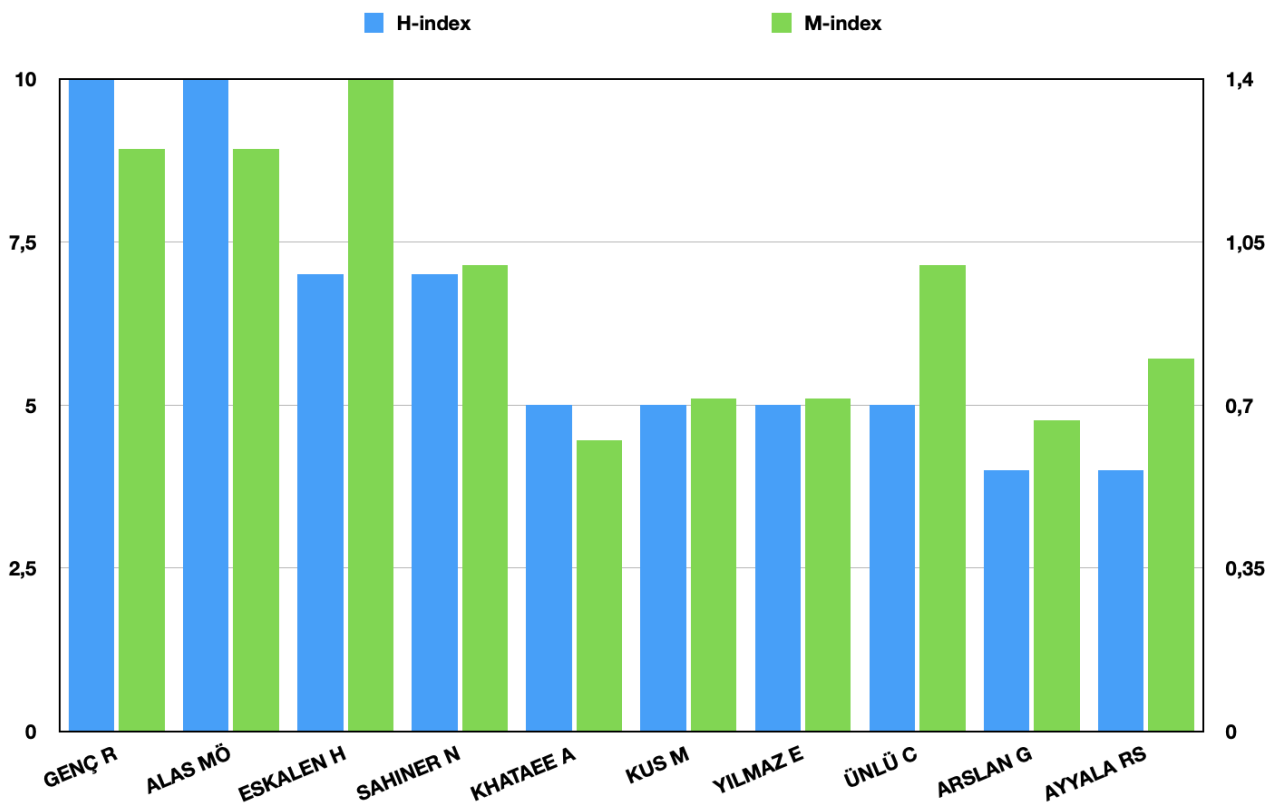


Figure 3. Ten Authors with the Highest h-and m-index

Figure 4 depicts a network map of Turkish academics' collaboration on CQDs during the previous decade. Each node represents a researcher, while the linkages indicate partnerships between researchers. The size of the nodes shows the number of connections the researcher has in the network. The colors indicate various institutions or research groups. This figure shows fifteen research groups actively working in this field. The largest node is labelled Şahiner N. and has a central position indicating their important role in the collaborative network for CQDs research. The nodes labelled as Genç R. and Alas M. Ö. are also quite large and interconnected, indicating their collaboration and important partnerships in this field.

Figure 5 shows a comparison of national and international citation counts for the top ten scholarly publications published in CQDs. The green columns reflect each article's local citations, whereas the dark green columns represent worldwide citations. In general, a high global citation count suggests that the publication has a broad international influence and is cited by scholars throughout the world. A high local citation count, on the other hand, suggests that the publication has had a considerable influence on the author's own geographic or regional academic community. The relationship between national and international citation counts in the graph may be an indicator of the national and international recognition of the research. If an article has more national citations than international citations, it means that the work is interesting or important to the local scientific community. The graph shows that national citation counts for CQDs research in Turkey range from 0 to 10, but international citation counts range from 0 to

218. It can be observed from the graph that the publications of Genç R. took the most globally cited documents related to this topic.

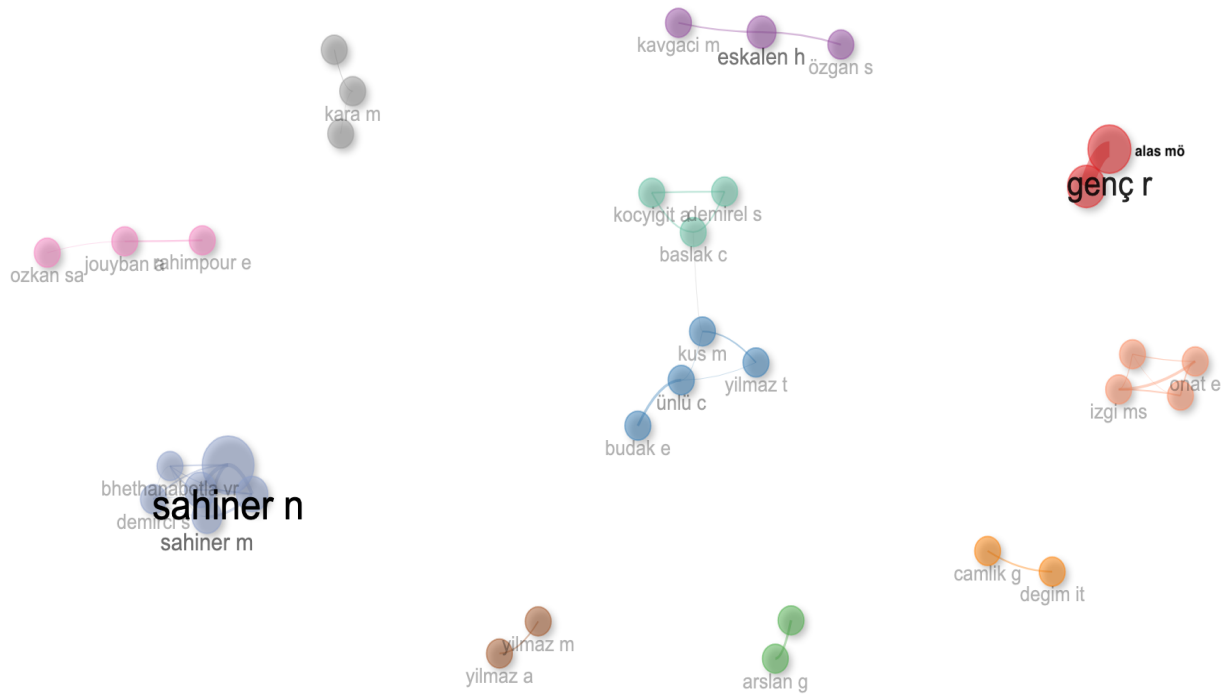


Figure 4. Collaboration Network

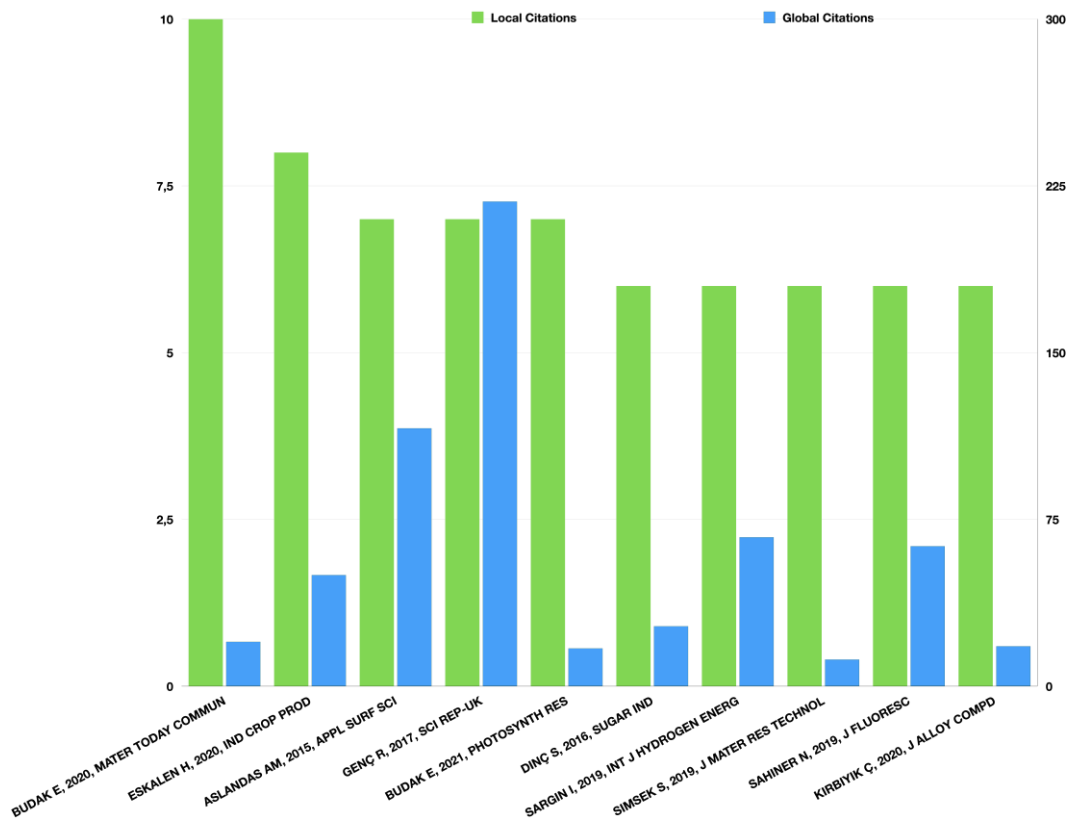


Figure 5. The Local and Global Citations of The Most Published Authors

A comparison of the number of articles and the fractional number of articles of the top ten authors from Turkey publishing on CQDs is presented in Figure 6. The graph is represented by two columns with different colors: one color represents the total number of articles and the other color represents the fractional number of articles. The fractional number of articles is calculated by taking into account the contribution of each author in multi-authored articles. The blue columns represent the total number of articles by each author and the green columns represent the fractional number of articles by each author. The height of the blue columns indicates the total number of articles of the author, while the green columns represent the contribution of the author to the publication. As can be seen from the graph, some authors were involved in more than one co-authored article and this is reflected in the fractional number of articles. In addition, when an author's blue and green columns are of equal height, it suggests that the author either works alone or with a small group of authors. This may indicate the influence of the author's leadership in studies and research.

In general, the graph also shows the collaboration trends, academic impact, and contributions of authors working on CQDs. These data can be used to assess the authors' research areas and their impact in this field. For example, it can be very useful in finding suitable partners for interdisciplinary projects or mentoring, forming new research teams, or planning research strategies. As can be seen from the graph showing the number of articles and a fractional number of articles of researchers publishing in CQDs, the vertical axis represents numerical values between 0 and 5 and shows how many articles each author has published or contributed to. Genç R. has the highest column, indicating that he has the most articles on CQDs. Also, Genç R. and Eskalen H.'s high fractional number of articles indicates that he is probably the main author or significant contributing author in many publications and has made significant contributions to this field. Sahiner N. and Alas M. Ö. also stand out as other researchers with a high number of articles. Eskalen H. and Ünlü C. are also included in the graph as authors with a medium number of articles.

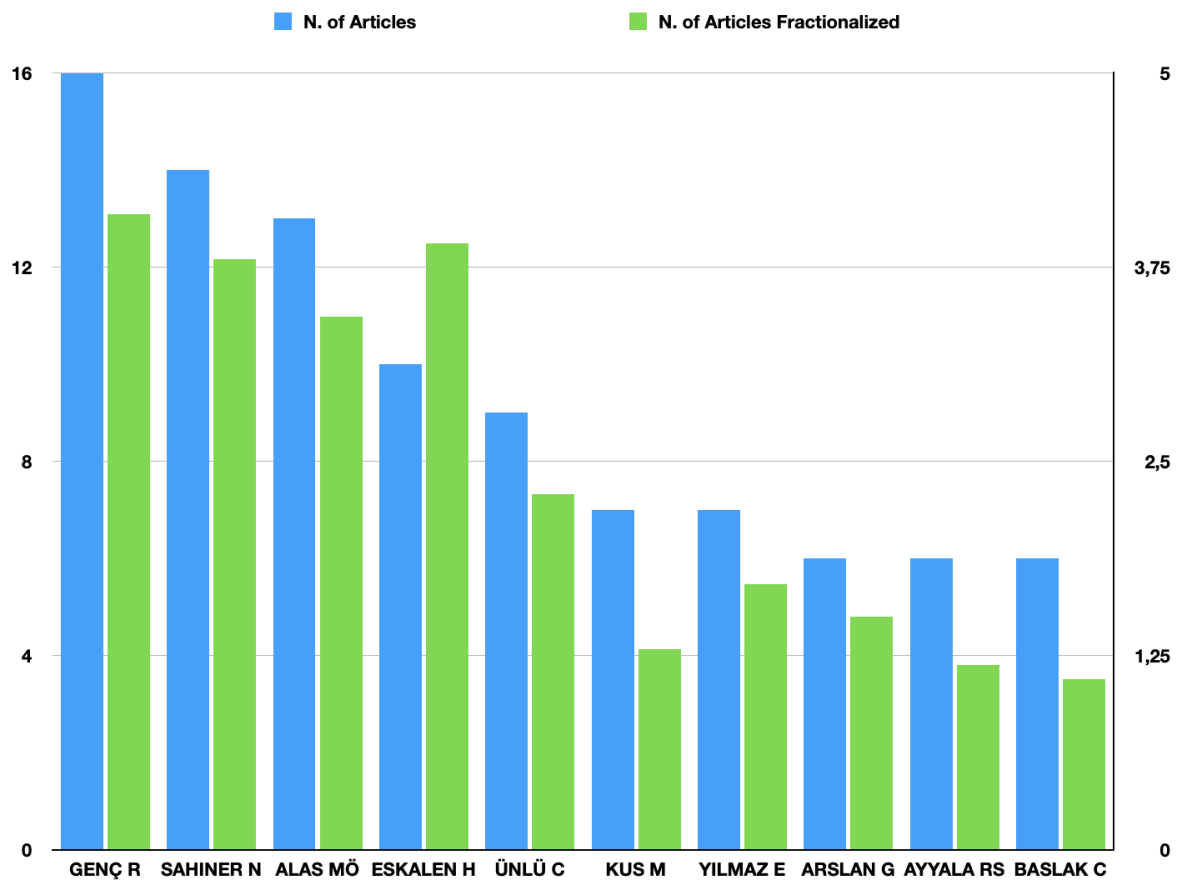


Figure 6. Top Ten Authors with Number of Articles and Fractionalized Articles

A timeline showing the publication data of authors working on CQDs over time is presented in Figure 7. Each horizontal line represents a different author and the dots on the line indicate articles published in specific years. The size of the dots represents the number of citations of the articles or the prestige of the journal in which they were

published, with larger dots representing more highly cited articles or articles published in higher prestige journals, and smaller dots representing less highly cited articles or articles published in lower prestige journals. This graph is very useful for analyzing authors' academic careers and assessing their research trends.

As can be seen from Figure 7, the annual production of authors publishing on 'Carbon Quantum Dots' from 2017 to 2024, Genç R., has the highest productivity. As can be seen from the number of articles and consistency of publications, Alas M.Ö. was very active in this period and carried out influential research in the field. The graph shows that Sahiner N., who stands out with a significant number of publications, has been active in recent years and has continuously contributed to the research on 'Carbon Quantum Dots'. Although Eskalen H. and Ünlü C. have published fewer papers in this period, the continuity of their work demonstrates their consistent research efforts in this field.

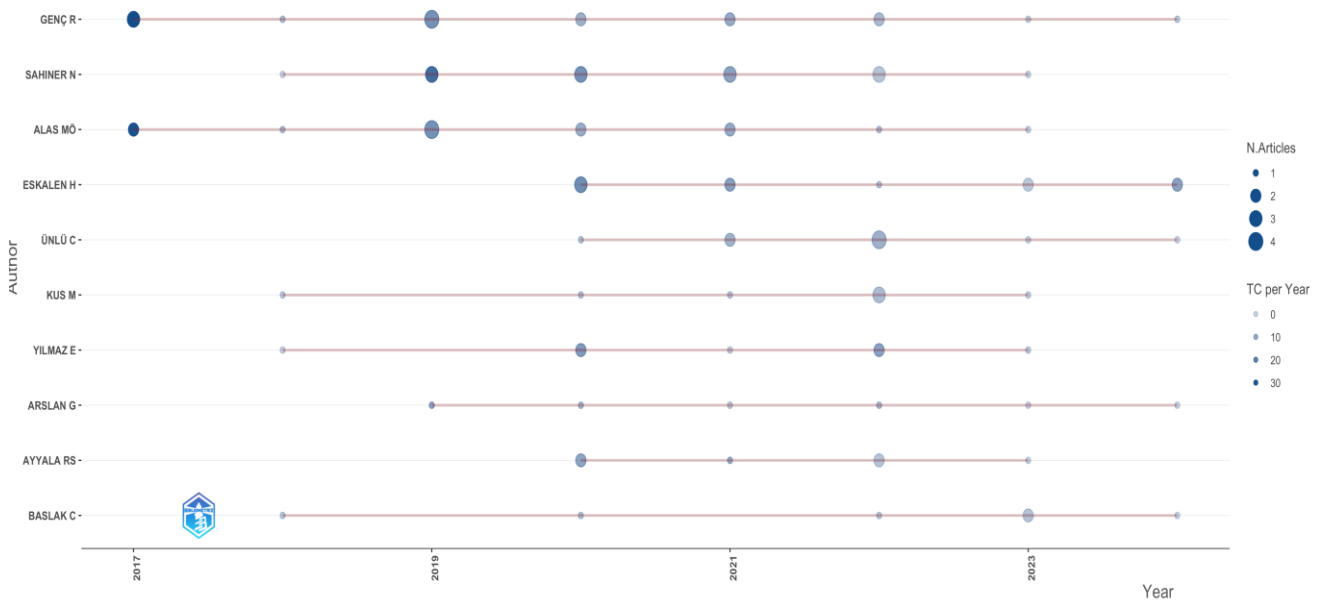


Figure 7. Authors Production Over Time

The keyword networks created to show the relationships between authors' keywords are shown as circular nodes representing the most frequently used ones (Figure 8). The graph shows the relationships between keywords and specific topics and how often these keywords are linked to each other. The relationships between nodes are highlighted by nodes with similar colors, increasing in size as their frequency increases. Two main clusters illustrate the most important aspects of CQDs research of keywords were identified. One group, colored blue (Cluster 1), contains 8 keywords and includes terms such as nanoparticles, sensor, and carbon dots. The other group, colored purple (Cluster 2), consists of 12 keywords and includes terms such as quantum dots, green synthesis, and hydrothermal synthesis.

The largest node in the center belongs to the term nanoparticles, indicating its importance in the research field and its frequent use as a keyword. Following this, the terms nitrogen and photoluminescence also stand out as major nodes, indicating their importance in the field. This word association map also allows us to understand which topics researchers focus on and the relationship between these topics. Terms clustered around keywords such as nanoparticles, quantum dots, and nitrogen show the relationship of these keywords to various subfields and applications.

The keywords chosen by the authors are the cornerstones of research, and these words have an important place in the analyses (Makhija et al., 2023). Among the keywords obtained during the database analysis process, the 40 most frequently occurring words were identified and the frequency and percentages of these words were presented in detail in a tree map (Figure 9). This figure shows the frequency of keywords and their relationships with each other. Each colored box represents a keyword used in the research, and the number and percentage within each box indicate how often that term is used. For example, the term nanoparticles occurs 59 times and accounts for 9% of the total terms used, indicating that it is an important keyword in research in this field. In Figure 9, it is observed that 'nanoparticles'

is the most frequently used word, followed by 'quantum dots'. This emphasizes the importance of nano sizes for carbon quantum dots. Furthermore, the intensive use of the words “sensor”, “carbon dots”, “nanodots” and “green synthesis” draws attention to the importance of the synthesis and application areas of CQDs. In this context, the determination of keywords not only expresses the essence of research but also is an indicator reflecting the importance and interests that scholars attribute to certain topics. At the same time, it can be seen that authors also take into account the prominent aspects of their research and interdisciplinary interactions when choosing keywords. In this way, the analysis of keywords director on the general state of CQDs research in Turkey guides future studies on this subject.

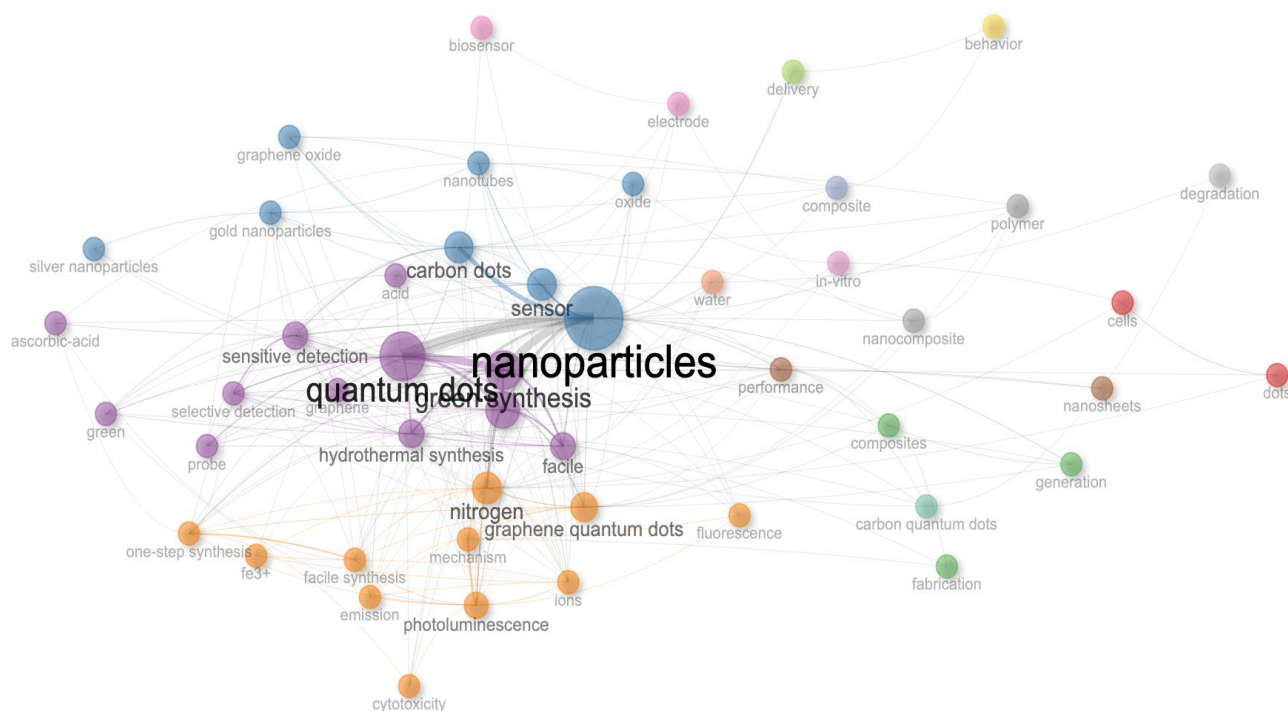


Figure 8. Analysis of The Highest Occurrence of Author Keywords

Carbon quantum dots attract the attention of researchers in terms of various aspects such as synthesis methods, application areas, and sensor properties (Umar et al., 2023). For a better understanding of the research on this topic, it is important to focus on the relationship between keywords and studies. By analyzing the keywords and literature related to carbon quantum dots over about ten years (2014-2024), articles in the Web of Science database were searched to examine the frequency of these keywords and the importance of their links. Word cloud keywords that the authors used related to CQDs are presented in Figure 10. The size of each word reflects how often it occurs in the literature and the importance it is in terms of the subject matter, and reflects the position of the keywords. The word cloud keywords emphasized notable words including " carbon quantum dots ", "carbon dots", "quantum dots", "carbon nanodots", "green synthesis" and "carbon quantum dots". This illustration of the links between keywords, their closeness to each other, and how relevant they are, can contribute to a better understanding of their interactions in the CQDs research field. In this context, analyzing the keywords can help us better understand the areas where scientists focus on this topic and potential research avenues in Turkey.

Among other terms are words expressing specific processes and properties such as 'hydrothermal synthesis, photoluminescence, facile synthesis, and selective detection. These terms reflect the diversity of methodologies examined in research related to CQDs and the potential application areas of these nanoparticles. This word cloud provides a summary of research agendas, industrial and academic interests, as well as potential research and development opportunities. By highlighting the focal points of studies in this field and revealing the interests of the research community, it shows researchers which topics are popular and how concepts are related to each other.

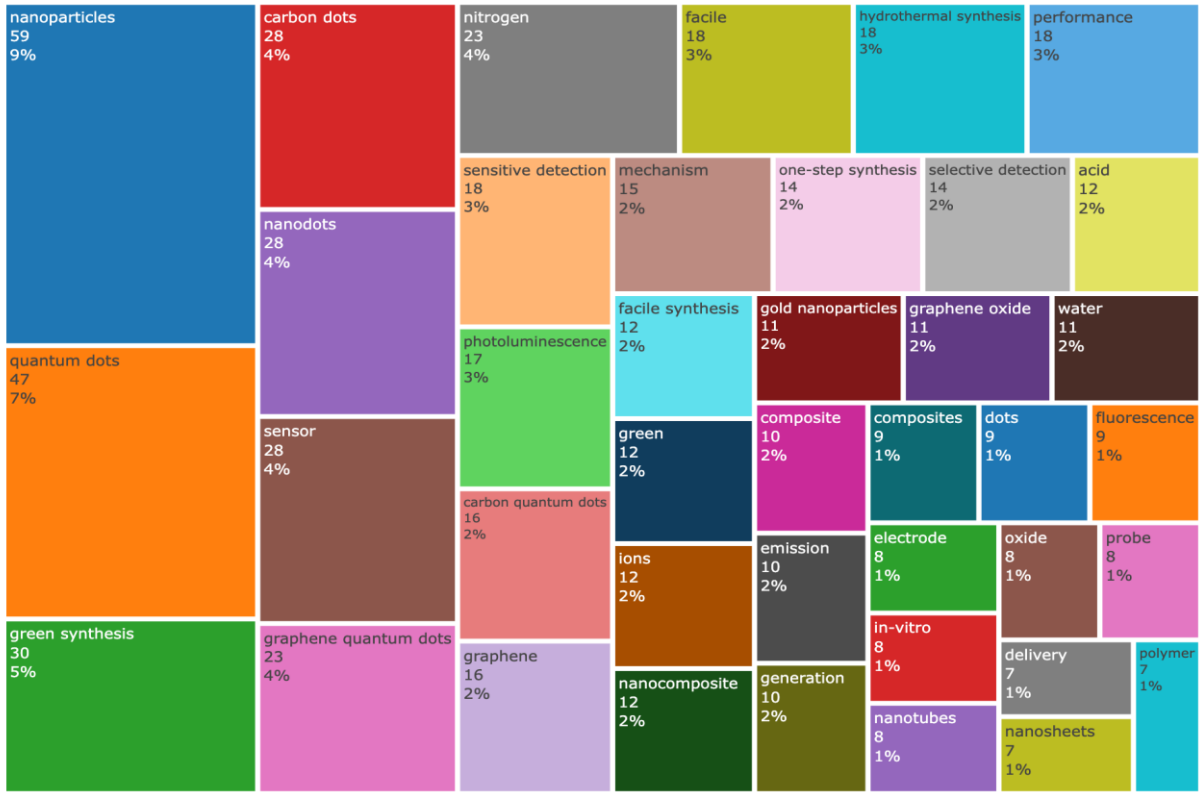


Figure 9. Represents The Conceptual Structure Map Plotted by The Multiple Correspondence Analysis (MCA) Method

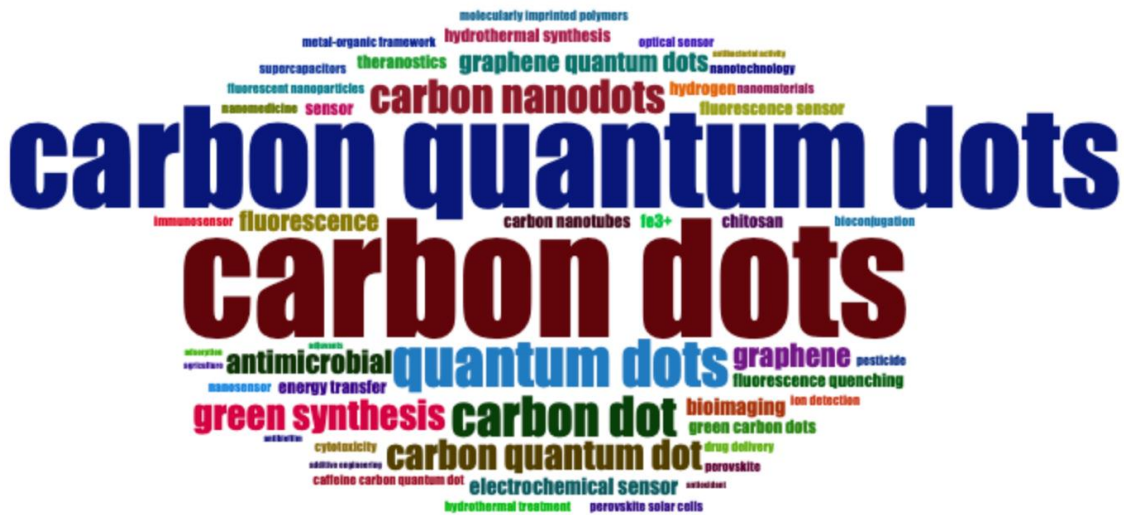


Figure 10. Visualized Word Clouds from Author's Keywords

CONCLUSIONS

The bibliometric analysis of academic studies on CQDs in Turkey clearly demonstrates a noticeable growth and development in this field over the past decade. The increase in publication numbers between 2014 and 2024 indicates the growing interest of Turkish researchers and universities in the field of CQDs and the intensification of research in this area. CQDs have been an important research area in the literature in Turkey in the last 10 years. It is observed that there has been a significant increase in the number of publications, especially in 2023, and the publications in this year constitute 24% of the total publications. The increase in the number of research in the field of CQDs reveals the momentum and interest in this subject. The word clouds highlight the relationships and frequencies of keywords. Frequently used terms such as “carbon quantum dots”, “quantum dots” and “green synthesis” emerge as the main

focal points of CQDs research. h-index and m-index show that Turkish researchers are included and influential in international literature. Turkey is gaining more visibility in international literature with new studies in this field and contributing to international scientific development. This impact can open the doors for national academic institutions to establish international cooperation and partnerships.

REFERENCES

- Abraham, W. L., Demirci, S., Wypyski, M. S., Ayyala, R. S., Bhethanabotla, V. R., Lawson, L. B., & Sahiner, N. (2022). Biofilm inhibition and bacterial eradication by C-dots derived from polyethyleneimine-citric acid. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 217, 112704. <https://doi.org/10.1016/J.COLSURFB.2022.112704>
- Akbıyık, M. A., Bodur, O. C., Keskin, M., Kara, M., Dinç, S., Arslan, H., Özmen, M., & Arslan, F. (2023). A Sensitive Amperometric Biosensor Based on Carbon Dot 3-Chloropropyl-trimethoxysilane Modified Electrode for Detection of Neurotransmitter Dopamine. *Journal of The Electrochemical Society*, 170(3), 037517. <https://doi.org/10.1149/1945-7111/ACC364>
- Akkurt, F. (2014). Characterisation of azo dye and carbon nanoparticle-doped guest–host liquid crystalline matrix. *Liquid Crystals*, 41(9), 1269–1276. <https://doi.org/10.1080/02678292.2014.915590>
- Alas, M. O., Alkas, F. B., Aktas Sukuroglu, A., Genc Alturk, R., & Battal, D. (2020). Fluorescent carbon dots are the new quantum dots: an overview of their potential in emerging technologies and nanosafety. *Journal of Materials Science 2020 55:31*, 55(31), 15074–15105. <https://doi.org/10.1007/S10853-020-05054-Y>
- Alaş, M. Ö., Doğan, G., Yalcin, M. S., Ozdemir, S., & Genç, R. (2022). Multicolor Emitting Carbon Dot-Reinforced PVA Composites as Edible Food Packaging Films and Coatings with Antimicrobial and UV-Blocking Properties. *ACS Omega*, 7(34), 29967–29983. <https://doi.org/10.1021/ACSOMEGA.2C02984>
- Aslan, M., & Eskalen, H. (2021). A study of carbon nanodots (carbon quantum dots) synthesized from tangerine juice using one-step hydrothermal method. *Fullerenes, Nanotubes and Carbon Nanostructures*, 29(12), 1026–1033. <https://doi.org/10.1080/1536383X.2021.1926452>
- Aslan, M., Eskalen, H., & Kavgacı, M. (2023). Carbon Quantum Dot (CQD) Nanoparticles Synthesized by Sucrose and Urea: Application as Reinforcement Effect on Al–Mg–Cu–Zn Composite. *Russian Journal of General Chemistry*, 93(8), 2152–2160. <https://doi.org/10.1134/S1070363223080236>
- Başkaya, S. K., Tahta, B. ·, Uruş, ·Serhan, Eskalen, ·Hasan, Çeşme, · Mustafa, & Özğan, · Şükrü. (2022). Multifunctional B, N, P, and S-doped fluorescent carbon quantum dot synthesis from pigeon manure: highly effective Hg (II) sensor and fluorescent ink properties. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 1, 1–15. <https://doi.org/10.1007/S13399-022-03017-8>
- Bodur, O. C., Dinç, S., Özmen, M., & Arslan, F. (2021). A sensitive amperometric detection of neurotransmitter acetylcholine using carbon dot-modified carbon paste electrode. *Biotechnology and Applied Biochemistry*, 68(1), 20–29. <https://doi.org/10.1002/BAB.1886>
- Budak, E., & Ünlü, C. (2021). Boron regulated dual emission in B, N doped graphene quantum dots. *Optical Materials*, 111, 110577. <https://doi.org/10.1016/J.OPTMAT.2020.110577>
- Burcu, B. A. Ç., & Genç, R. (2017). Naked eye and smartphone applicable detection of toxic mercury ions using fluorescent carbon nanodots. *Turkish Journal of Chemistry*, 41(6), 931–943. <https://doi.org/10.3906/kim-1701-46>
- Çeşme, M., & Eskalen, H. (2020). Cumhuriyet Science Journal Green synthesis of carbon quantum dots from sumac: characterization and investigation with cyclic voltammetry technique. *Cumhuriyet Sci. J*, 41(4), 2587–2680. <https://doi.org/10.17776/csj.714200>

- Çeşme, M., Eskalen, H., & Başkaya, S. K. (2022). Fluorescent Carbon Dots from Vegetable and Fruit Wastes and Their Applications. *Fruits and Vegetable Wastes*, 365–383. https://doi.org/10.1007/978-981-16-9527-8_15
- Çolak, M.Ö.A., Güngör, A., Akturk, M. B., Erdem, E., & Genç, R. (2023). Unlocking the full potential of citric acid-synthesized carbon dots as a supercapacitor electrode material via surface functionalization. *Nanoscale*. <https://doi.org/10.1039/D3NR04893D>
- Dinç, S., & Günhan, R. S. (2020). Carbon dots applications in electrochemical and electrochemiluminescence sensors: Some examples of pathogen sensors. *Turkish Journal of Analytical Chemistry*, 2(1), 47–54.
- Dinc, S., & Kara, M. (2018). Synthesis and Applications of Carbon Dots from Food and Natural Products: A Mini-Review. *Journal of Apitherapy and Nature/Apiterapi ve Doğa Dergisi*, 1(1), 33–37.
- Dinç, S., Kara, M., & Yavuz, E. (2022). Synthesis of carbon dots from biomass resources. *Carbon Dots in Agricultural Systems: Strategies to Enhance Plant Productivity*, 69–116. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90260-1.00001-2>
- Eskalen, H. (2020). Influence of carbon quantum dots on electro-optical performance of nematic liquid crystal. *Applied Physics A: Materials Science and Processing*, 126(9), 1–10. <https://doi.org/10.1007/S00339-020-03906-7>
- Eskalen, H., & Çeşme, M. (2021). Carbon Dots from Turnip Juice: Synthesis, Characterization and Investigation of pH-Dependent Optical Properties. *Bilecik Seyh Edebali University Journal of Science*, 8(2), 924–930. <https://doi.org/10.35193/BSEUFBD.979306>
- Eskalen, H., Kavgacı, M., Kayış, A., & Özğan, Ş. (2021.a). One-Pot Synthesis of Carbon Quantum Dots and Their Application As a Fluorescent Inks. *Eskişehir Technical University Journal of Science and Technology A - Applied Sciences and Engineering*, 22(4), 366–377. <https://doi.org/10.18038/estubtda.991595>
- Eskalen, H., Uruş, S., Cömertpay, S., Kurt, A. H., & Özgan, Ş. (2020). Microwave-assisted ultra-fast synthesis of carbon quantum dots from linter: Fluorescence cancer imaging and human cell growth inhibition properties. *Industrial Crops and Products*, 147, 112209. <https://doi.org/10.1016/J.INDCROP.2020.112209>
- Eskalen, H., Uruş, S., Kavgacı, M., Kalmış, H. V., & Tahta, B. (2023). Carbon quantum dots derived from pomegranate peel: highly effective Fe(III) sensor. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 1, 1–14. <https://doi.org/10.1007/S13399-023-04048-5>
- Eskalen, H., Uruş, S., Ozgan, S., Tahta, B., & Sünbül, A. B. (2021.b). Green and One-Pot Synthesis of Mint Derived Carbon Quantum Dots for Metal Ion Sensing. In *Materials Research Foundations* (Vol. 96, pp. 81–94). Materials Research Forum LLC. <https://doi.org/10.21741/9781644901250-3>
- Eskalen, H., Yaykaşlı, H., Kavgacı, M., & Kayış, A. (2022). Investigating the PVA/TiO₂/CDs polymer nanocomposites: effect of carbon dots for photocatalytic degradation of Rhodamine B. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 33(7), 4643–4658. <https://doi.org/10.1007/S10854-021-07653-0>
- Genc, R., Alas, M. O., Harputlu, E., Repp, S., Kremer, N., Castellano, M., Colak, S. G., Ocakoglu, K., & Erdem, E. (2017). High-Capacitance Hybrid Supercapacitor Based on Multi-Colored Fluorescent Carbon-Dots. *Scientific Reports 2017 7:1*, 7(1), 1–13. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-11347-1>
- Kavgacı, M., Kalmış, H. V., & Eskalen, H. (2023). Synthesis of Fluorescent Carbon Quantum Dots with Hydrothermal and Solvothermal Method Application for Anticounterfeiting and Encryption. *International Journal of Innovative Engineering Applications*, 7, 1. <https://doi.org/10.46460/ijiea.1182009>

- Korkmaz, U., Özlem, B., Erol, E., Alas, M. Ö., Genç Altürk, R., Çelikbilek Ersundu, M., & Ersundu, A. E. (2023). The coupling of blue emitting carbon dots with Eu³⁺/Tb³⁺ co-doped luminescent glasses for utilization in white light emitting diodes. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 25(16), 11452–11463. <https://doi.org/10.1039/D3CP00137G>
- Makhija, A., Punia, R., Dahiya, S., Ohlan, A., & Maan, A. S. (2023). Development trends of rare-earth luminescence: A bibliometric analysis. *Materials Today: Proceedings*, 79, 11–17. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2022.07.424>
- Navidfar, A., Peker, M. I., Budak, E., Unlu, C., & Trabzon, L. (2022). Carbon quantum dots enhanced graphene/carbon nanotubes polyurethane hybrid nanocomposites. *Composites Part B: Engineering*, 247, 110310. <https://doi.org/10.1016/J.COMPOSITESB.2022.110310>
- Özğan, A. O., & Aluçla, İ. (2023.a). Biyofilik Tasarımın Akademik Değerlendirmesi. *Turkish Journal of Forest Science*, 7(2), 267–283. <https://doi.org/10.32328/TURKJFORSCI.1347473>
- Özğan, A. O., & Aluçlu, İ. (2023.b). Doğayla Uyumlu Mekânlar: Biyofilik Tasarımın Bibliyometrik Değerlendirmesi. *İdealkent*, 15(41), 483–505. <https://doi.org/10.31198/IDEALKENT.1350785>
- Sagbas, S., & Sahiner, N. (2019). Carbon dots: preparation, properties, and application. *Nanocarbon and Its Composites: Preparation, Properties and Applications*, 651–676. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-102509-3.00022-5>
- Sahiner, M., Ari, B., Ram, M. K., & Sahiner, N. (2022). Nitrogen Doped Carbon-Dot Embedded Poly(lactic acid-co-glycolic acid) Composite Films for Potential Use in Food Packing Industry and Wound Dressing. *Journal of Composites Science 2022, Vol. 6, Page 260, 6(9)*, 260. <https://doi.org/10.3390/JCS6090260>
- Simsek, S., Alas, M. O., Ozbek, B., & Genc, R. (2019). Fluorescent Carbon Dots from Nerium oleander: Effects of Physical Conditions and the Extract Types. *Journal of Fluorescence*, 29(4), 853–864. <https://doi.org/10.1007/S10895-019-02390-4>
- Suner, S. S., Sahiner, M., Yilmaz, A. S., Ayyala, R. S., & Sahiner, N. (2022). Light-Activated Modified Arginine Carbon Dots as Antibacterial Particles. *Catalysts 2022, Vol. 12, Page 1376, 12(11)*, 1376. <https://doi.org/10.3390/CATAL12111376>
- Sutekin, S. D., Sahiner, M., Suner, S. S., Demirci, S., Güven, O., & Sahiner, N. (2021). Poly(Vinylamine) Derived N-Doped C-Dots with Antimicrobial and Antibiofilm Activities. *C 2021, Vol. 7, Page 40, 7(2)*, 40. <https://doi.org/10.3390/C7020040>
- Umar, E., Ikram, M., Haider, J., Nabgan, W., Haider, A., Imran, M., & Nazir, G. (2023). A state-of-the-art review on carbon quantum dots: Prospective, advances, zebrafish biocompatibility and bioimaging in vivo and bibliometric analysis. *Sustainable Materials and Technologies*, 35, e00529. <https://doi.org/10.1016/J.SUSMAT.2022.E00529>



Kahramanmaraş Sütçü İmam University

Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 27.03.2024
Kabul Tarihi : 14.06.2024

Received Date : 27.03.2024
Accepted Date : 14.06.2024

ÇEVRE DOSTU HAMMADDELERDEN ÜRETİLEN AKTİF KARBONLAR VE UYGULAMA ALANLARI

ACTIVE CARBONS PRODUCED FROM ECO-FRIENDLY RAW MATERIALS AND THEIR APPLICATIONS

Naciye Olcay HELVACI^{1*} (ORCID: 0009-0008-6628-9325)
Yasemin KORKMAZ¹ (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

Aktif karbon, su arıtmadan ağır metal giderimine, gıdadan metal sanayisine, savunmadan sağlık sektörüne kadar endüstrinin birçok alanında kullanılan ticari potansiyeli çok yüksek olan bir malzemedir. Aktif karbon, karbon miktarı fazla olan maddelere uygulanan yüksek sıcaklıktaki aktivasyon süreciyle elde edilen (350-1000°C), yüksek gözenekliliği ve geniş yüzey alanı olan bir adsorban malzemesidir. Aktif karbonlar fosil kaynaklardan ve sentetik polimerlerden üretilebilirler. Ticari aktif karbon üretiminde odun talaşı, odun, odun kömürü, turba, linyit ve Hindistan cevizi kabukları yaygın olarak kullanılmaktadır. Kömür ve linyitten aktif karbon üretimi, yüksek oranda inorganik madde içermesinden dolayı üretim aşamasında ve sonrasında su veya asit ile ek yıkama işlemleri yapılır. Bu yüzden uzun ve maliyetli işlemdir. Üretim maliyetlerinin artması, araştırmaların daha ekonomik çevre dostu hammaddelere ve üretim yöntemlerine odaklanmasına sebep olmuştur. Bu nedenle biyokütle atıklarından çevre dostu aktif karbon üretimi son yıllarda önem kazanmıştır. Bu çalışmada, aktif karbon üretiminde kullanılan çevre dostu, ucuz, zirai atık niteliğindeki hammaddeler araştırılmış ve aktif karbon üretim sürecinde kullanılan aktivasyon yöntemleri karşılaştırılarak uygulama alanları verilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Aktif karbon, karbonizasyon, aktivasyon, biyokütle, adsorbsiyon

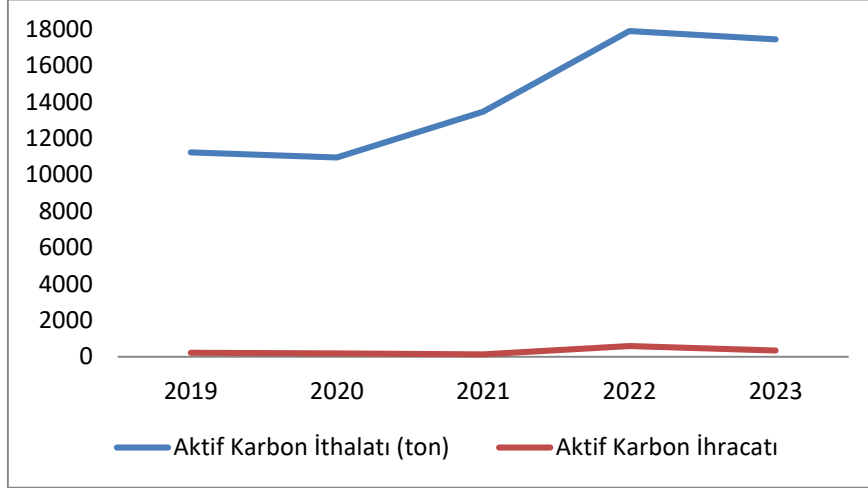
ABSTRACT

Activated carbon is a material with very high commercial potential used in many areas of industry, from water purification to heavy metal removal, from food to metal industry, from defense to the health sector. Activated carbon is an adsorbent material with high porosity and large surface area, obtained by the high temperature activation process (350-1000°C) applied to substances with high carbon content. Activated carbons can be produced from fossil sources and synthetic polymers. Wood sawdust, firewood, charcoal, peat, lignite and coconut shells are widely used in commercial activated carbon production. Since the production of activated carbon from coal and lignite contains high amounts of inorganic substances, additional washing processes are carried out with water or acid during and after the production phase. That's why it is a long and costly process. Increasing production costs have caused research to focus on more economical alternative raw materials and production methods. For this reason, the production of environmentally friendly activated carbon from biomass waste has gained importance in recent years. In this study, environmentally friendly, cheap, agricultural waste raw materials used in activated carbon production were investigated and the activation methods used in the activated carbon production process were compared and their application areas were given.

Keywords: Activated carbon, carbonization, activation, biomass, adsorption

GİRİŞ

Dünyada 2023 yılı itibariyle 5 milyar doları aşan ticari aktif karbon pazarı bulunmaktadır. Türkiye’de ise aktif karbon pazarı 38 milyon dolar civarında olup, 35 milyon dolar dış ticaret açığı bulunmaktadır (Trade Map, 2024). Bu nedenle Türkiye aktif karbon açısından ithalatçı konumunda olan bir ülkedir. Bu durum ülkemiz açısından önemli bir fırsat sunmaktadır.



Şekil 1. Türkiye’de Yıllara Göre Gerçekleşen Aktif Karbon İthalatı (Trade Map,2024)

Şekil 1’e göre genel olarak aktif karbon ithalatı yıllara göre artış göstermekle birlikte ihracat miktarı çok düşük seviyelerde kalmıştır. 2023 yılına baktığımızda Türkiye’de aktif karbon ithalatı 17.000 ton üzerinde iken sadece 349 ton ihracat gerçekleşmiştir (Trade Map, 2024). Ülkemizde 17.000 ton civarında aktif karbon ihtiyacı olduğunu varsayarsak, 2021 yılında yayınlanan Sivas İli Aktif Karbon Üretimi Ön Fizibilite Raporuna göre fındık kabuğundan elde edilen aktif karbon üretim verimini %10 olarak kabul ettiğimizde yıllık olarak yaklaşık 170.000 ton/yıl hammaddeye ihtiyacımız olacaktır. Ülkemiz fındık üretiminde dünya ticaretinin %70’ini karşılamaktadır. Tarım Ürünleri Piyasasının raporuna göre ülkemizde 2022 yılında 765.000 ton fındık üretimi gerçekleşmiştir. Üretilen fındığın kabuk miktarının %50 kadar olduğu tahmin edilmektedir. Yaklaşık 380.000 ton/yıl fındık kabuğunun hammadde maliyetinin de çok düşük olduğu göz önünde bulundurduğumuzda sadece fındık kabuğunun bile ülkemizin aktif karbon ihtiyacını karşılama potansiyeline sahip olduğu görülmektedir. Aynı zamanda diğer birçok tarımsal atık hammaddeyi de aktif karbon üretim sürecine kazandırdığımızda ülkemizin de dahil olduğu Yeşil Mutabakat Eylem Planı, Sıfır Atık gibi ekolojik hedeflere daha hızlı ulaşabileceği aşikardır.

AKTİF KABONUN TARİHÇESİ

Aktif karbonun bilinen en eski kullanımı M.Ö. 3750 yıllarında başlamaktadır. Sümerliler ve Mısırlılar bronz üretiminde çinko, bakır, kalayın indirgenmesinde odun kömürünü kullanmışlardır. Tıp alanında odun kömürünün kullanımına ilişkin verilere M.Ö. 1550 yıllarına ait Mısır papirüslerinde, sonrasında Gaius Plinius Secundus Maior ve Hipokrates’in kaynaklarında rastlanmıştır (Beton, 2011; Patrick, 1995). 1773 yılında, Carl Wilhelm Scheele tarafından gaz adsorpsiyon özelliğine sahip olan aktif karbonun keşfi yapılmıştır.1785’te Johann Tobias Lowitz, odun kömürünün birçok sıvıları renk giderme özelliği olduğunu gözlemlemiştir (Çetinkaya, 2015).

Aktif karbon, endüstriyel alanda ilk defa İngiltere’de 1811 yılında Pierre Figuiet tarafından, kemik külü, içeriğindeki az miktardaki karbon ile şeker çözeltisinin renksizleştirilmesi işlemi için kullanılmıştır. Kemik külü, az miktarda karbon ve kalsiyum fosfat içeren bir yapıya sahiptir. Dolayısıyla, aslında karbon değildir. (Beton, 2011; Othmer,1992). 1822’de Antoine Alexandre Brutus Bussy, kullanılan başlangıç maddesi ve ısıtma prosesinin karbonların renk giderme özelliklerini ve partikül boyutunu belirlediğini göstermiştir. Buna ilaveten, aktif karbonun adsorpsiyon özelliklerini ve gözenek yapısını çok yüksek sıcaklıkta yapılan ve uzun süren karbonizasyon sürecinin olumsuz etkilediğini söylemiştir. (Şamdan, 2013). Hunter, 1865 yılında hindistan cevizinden ürettiği odun kömürünün gaz adsorpsiyon kapasitesinin çok yüksek olduğunu keşfetmiştir. 1856 yılında John Stenhouse katran esaslı ağartıcı odun kömürü, 1863 yılında Lee turbadan koku engelleyici aktif karbon üretmiştir. Ancak bu ürünler endüstriyel boyutta üretime geçmemiştir. (Hassler, 1967). Johnson, 1894 yılında yaptığı çalışma sonucunda, odun

kok kömürünün siyanat çözeltisinden altın eldesinde kullanılmasıyla ilgili bir patent almıştır. (Akyıldız, 2007; McDougall, 1991).

Ticari aktif karbonun patentini 1900 -1901 yılları arasında Raphael Von Ostrejko almıştır. İlk ticari toz aktif karbon, 1909'da Raphael Von Ostrejko'nun patenti kullanılarak odun ile hazırlanan Eponit tarafından ortaya çıkarılmıştır. Norit ise, 1911 yılında Hollanda'da şeker endüstrisinde kullanılan aktif karbonu üretmiştir. Amerika'da ise, ilk aktif karbon üretimi, soda hamuru üretiminde ortaya çıkan atık ürün olan siyah külün değerlendirilmesiyle gerçekleşmiştir. Siyah kül, fabrikalarda pigment olarak kullanılmaktaydı ve bir fabrika çalışmasının tesadüfen keşfettiği ağartma özelliğiyle dikkat çekmiştir. Bu ürün günümüzde "Filtchar" olarak bilinmektedir. Ancak, Filtchar'ın ürün özelliklerinin parti bazında değişkenlik göstermesi ve istikrarlı bir ürün kalitesi sunmaması, pazarlama sürecinde zorluklar yaşanmasına neden olmuştur. Sudan III yöntemiyle geliştirilen, Filtchar'ın özelliklerini daha iyi belirlemeye ve daha homojen aktif karbon üretimine olanak sağlamıştır. (Akyıldız, 2007).

Zehirli gazların 1. Dünya Savaşı'nda yaygın olarak kullanılması, gaz maskelerinde kullanılan adsorban karbonların büyük ölçekte üretilmesi ihtiyacını ortaya çıkarmıştır. Gaz maskeleri üretiminde Nikolay Dmitriyevič Zelinski tarafından aktif karbonların metal kap içine doldurulması ilk kez önerilmiştir. Sonrasında, Amerika'da Chaney, zehirli gazların uzaklaştırılması amacıyla hindistan cevizi esaslı granüler aktif karbon üzerine çalışmalar gerçekleştirmiştir.

Savaştan sonra, aktif karbon üretimi yeni hammaddelerle büyük ölçüde artış göstermiştir. $ZnCl_2$ ile aktivasyonu ile badem kabuğu ve hindistan cevizinden yüksek adsorpsiyon kapasitesine sahip mekanik dayanıklı aktif karbonlar elde edilmiştir. Günümüzde, bilimsel ilerlemeler sayesinde çeşitli hammaddelerden üretilen aktif karbonlar birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. (Şamdan, 2013). Aktif karbon, karışımların ayrılmasında, gazların temizlenmesinde, gıda endüstrisinde saflaştırma işlemlerinde, su ve atık su arıtımında, savunma sanayisinde koruyucu giysi üretiminde, metal endüstrisinde, silah sanayisinde patlayıcı ve elektronik sistemlerin susturulmasında, bomba yapımında ve sağlık sektöründe geniş bir alanda kullanılmaktadır. Günlük yaşamda çeşitli nedenlerle başvurduğumuz aktif karbon, hayati bir maddedir. (Küçükgül, 2004; Stoeckli ve Kraehenbuehl, 1984).

Bu çalışmada aktif karbon üretiminde kullanılan çevre dostu hammaddeler araştırılmış, üretim yöntemleri karşılaştırılarak, avantajları tartışılmıştır. Ayrıca biyokütle atıklarından üretilen aktif karbonların adsorpsiyon uygulamalarında ve diğer uygulama alanlarında kullanım amaçları belirlenmiştir.

AKTİF KARBON

Aktif karbon, karbon elementinin bir allotropu olup, temel bileşeni %80-95 oranında karbondur. Ayrıca, yapısında hidrojen, oksijen, sülfür ve azot gibi elementler de bulunur. Bu hetero-atomların miktarı ve türü, kullanılan hammaddeye, aktivasyon sürecine ve yöntemine bağlı olarak değişmektedir. Bir aktif karbon genellikle %80-95 karbon, %6-7 oksijen, %1sülfür, %0,5 azot ve %0,5 hidrojenden oluşmakta olup, ayrıca uçucu madde de içermektedir. (Şamdan, 2013; Bansal ve Goyal, 2005). Kullanım öncesi bu tür maddelerin uzaklaştırılması gerekir. Bu işleme kül içeriğinin düşürülmesi denilmektedir ve adsorban olarak kullanımında kül içeriğinin % 0.1-0.2 oranına getirilmesi gerekmektedir (Küçükgül, 2004; Choma ve Jaroniec, 1987). Gözenek yapısı ve iç yüzey alanı, aktif karbonu karakterize eden başlıca fiziksel özelliklerdir. IUPAC (Uluslararası Temel ve Uygulamalı Kimya Birliği) verilerine göre aktif karbonların gözenek boyutu mikro gözenek (2nm'den daha küçük çaplı), mezo gözenek (2-50nm çaplı) ve makro gözenek (50nm'den daha büyük) olarak sınıflandırılır. Aktif karbonun iç yüzeyi ise (aktifleştirilmiş yüzey) çoğunlukla BET (Brunauer-Emmet-Teller) yüzeyi olarak (m^2/g) ifade edilir. Yüzey alanı azot (N_2) gazı kullanılarak ölçülür. Kirlilik oluşturan maddeler, aktif karbonun yüzeyinde tutulacağından, yüzey alanının büyüklüğü kirliliklerin giderilmesinde oldukça etkili bir faktördür. Prensipte olarak, yüzey alanı ne kadar büyükse, adsorpsiyon merkezlerinin sayısının da o kadar büyük olduğu düşünülür (Deniz, 2014).

Piyasadaki ticari aktif karbonlar granüler, toz ve pelet formunda bulunurlar. Bu formların boyutları ve kullanıldığı yerler aşağıda verilmiştir:

Granül Aktif Karbon (GAC): Tanecik boyutları 2,5-5 mm aralığında olup düzensiz şekillere sahiptirler. Granül aktif karbonlar (GAC), hindistancevizi kabukları gibi sert hammaddelerden üretilebilirler (Şekil 2). Yüzey alanları, toz aktif karbona göre daha düşüktür (Sarıcı, 2022; Perrich, 2018).



Şekil 2.Granül Aktif Karbon

Toz Aktif Karbon (PAC): 0,15-0,25 mm aralığında tanecik boyutu değişmektedir (Şekil 3). Başlıca baca gazı arıtımında ve sıvı faz uygulamalarda kullanılır (Delgado vd., 2012).



Şekil 3.Toz Aktif Karbon

Pelet Aktif Karbon (AC): 0,8-5 mm çapında, basınçla sıkıştırılmış silindirik formdadır (Şekil 4). Yüksek mekanik dayanıklılığa sahip olmasından, düşük toz içermesinden ve düşük basınç sağlamasından dolayı gaz fazı uygulamalarında çoğunlukla kullanılır (Küçükgül, 2004).



Şekil 4.Pelet Aktif Karbon

Ticari aktif karbonlarda aranan ortak özellikler aktif karbonun pelet, toz ve granül olmasına, kullanım alanına ve hammaddeye göre farklılıklar göstermektedir. Genel olarak yüzey alanı, gözenek hacmi, kül miktarı, sertlik gibi özellikler ön plana çıkmaktadır. Örneğin toz aktif karbonda yüzey alanı ve gözenek hacmi daha ön planda iken, pelet aktif karbonda yüzey alanı ve gözenek hacminin yanı sıra pelet çapı ve sertlik yüzdesi de önemli olmaktadır. Kömürden elde edilen toz aktif karbonda yüzey alanı $1300\text{m}^2/\text{g}$ 'ye kadar ulaşırken, gözenek hacmi 1.3 ml/g civarındadır. Yine kömürden elde edilen pelet ticari aktif karbonda pelet çapı $20\pm 4\text{mm}$ civarında olup, sertlik %96 ve yüzey alanı $1000\text{m}^2/\text{g}$ ölçülebilmektedir.

AKTİF KARBONUNUN ÜRETİM AŞAMALARI

Hammadde Seçimi

Aktif karbon, birçok farklı hammaddeden üretilmektedir. Ticari aktif karbonların, başlıca üretim hammaddeleri odun, kömür, petrol artıkları, linyit ve polimerler olmasına rağmen; son yıllarda düşük maliyetli biyokütle atıklarının aktif karbon üretiminde kullanımı yaygınlaşmıştır. Kullanılacak olan hammaddelerin yüksek karbon ve

düşük mineral içeriğine sahip, ucuz, verimli ve saklama koşullarına dayanıklı yapıda olması gerekmektedir (Güngör, 2013;Ahmadpour ve Do, 1995).

Aktif karbonun kullanım alanına göre istenen özelliklerinin değişmesinden dolayı, üretilecek olan nihai ürün özellikleri tercih edilen hammaddeye bağlı olarak değişir. Son yıllarda ucuz, yüksek karbon ve düşük inorganik madde içeriğine sahip ve kolay bulunabilir olmalarından dolayı daha çok tarımsal kaynaklı atıklardan aktif karbon üretimi yaygınlaşmıştır. Biyokütle atıklardan aktif karbon üretimi hem ekonomik hem de çevresel yönden önemli katkılar sağlamaktadır. Literatürlerde rastlanılan biyokütle atıklarından üretilen aktif karbonların aktivasyon yöntemi, aktivasyon sıcaklığı, yüzey alanları(m²/g) Tablo 1’de verilmiştir.

Tablo 1. Biyokütle Atıklarından Üretilen Aktif Karbonlar

Hammadde	Aktivasyon Kimyasalı	Aktivasyon Sıcaklığı (°C)	Yüzey Alanı(BET; m ² /g)	Literatür
Zeytin çekirdeği	H ₃ PO ₄	500	1133	Akyıldız, 2007
Muz gövdesi atıkları	H ₃ PO ₄	845	1173,16	Danisha vd., 2018
Nişasta	Na ₂ CO ₃ /KOH	300/400	160,6	Suo vd., 2019
Üzüm küspesi	H ₃ PO ₄	400	1455	Güngör, 2010
Pamuk sapı	H ₃ PO ₄	500-800	1720	Nahil ve Williams, 2012
Kiraz çekirdeği	K ₂ CO ₃	850	-	Gerçel ve Seydioğlu, 2015
Çay atıkları	H ₃ PO ₄	450	701,8	Öztrak, 2010
Elma kabuğu	ZnCl ₂	-	794	Bhadusha ve Ananthabaskaran, 2011
Mısır Koçanı	H ₂ O ₂	450	500-1500	Christica ve Muchlisyam, 2018
Kenevir sapı	KOH	800	337,5	Zhang vd., 2017
Vişne çekirdeği	ZnCl ₂	700	1704	Angin, 2013
Kabak çekirdeği	ZnCl ₂	500	1564	Şamdan, 2013
Kenevir kamışı	H ₃ PO ₄	400	1500	Rosas vd., 2008
Kenevir hemiselülozu	Ön İşlem (Hidrotermal karbonizasyon)	-	3062	Wang vd., 2015
Tekstil atıkları (Co/PE)	KOH			
	Ön işlem (Hidrotermal karbonizasyon)/			Duman, 2021
	KOH	700	363	
	ZnCl ₂	500	1795	
	İnert CO ₂	850	788	
Kimyon bitkisi atıkları	H ₃ PO ₄	Mikroalga, 1000W	>1000	Taş, 2017
Nar Kabuğu	KOH	600	900,12	Yılmaz ve Alagöz, 2019
Fındık Kabuğu	%30 K ₂ CO ₃ + %5 borik asit	900	780,31	Sayın vd., 2016
Fındık Kabuğu	ZnCl ₂	823K (549°C)	647	Özçimen ve Ersoy, 2010
Kakao kabuğu	ZnCl ₂	-	780	Cruz vd., 2012
	K ₂ CO ₃		615	
	KOH		490	
Antep Fıstığı kabuğu	CO ₂	900	778,1	Lua vd., 2004
Hindistan Cevizi Kabuğu	CO ₂	600	1700	Guo vd., 2009
Hindistan Cevizi Kabuğu	Buhar	1000	1962	Li vd., 2008
Zeytin çekirdeği	Buhar	850	813	Gonzalez vd., 2009
Badem ağacı(budama)	Buhar	850	1080	Gonzalez vd., 2009
Badem kabuğu	Buhar	850	601	Gonzalez vd., 2009
Ceviz kabuğu	Buhar	850	792	Gonzalez vd., 2009
Fıstık kabuğu	Buhar	600	253	Girgis vd., 2002

Tablo 1’de biyokütle atıklarından farklı aktivasyon yöntemleri ve farklı sıcaklıklar kullanılarak üretilen aktif karbonların yüzey alanları verilmiştir. Buna göre kenevir hemiselülozu 3062 m²/g, hindistan cevizi kabuğu 1962 m²/g, tekstil atıkları 1795 m²/g, pamuk sapı 1720 m²/g yüksek yüzey alanlarına sahip olduğu görülmektedir.

Aktif Karbon Üretim Yöntemleri

Aktif karbon üretiminde, düşük inorganik madde içeren ve yüksek karbon içeriğine sahip (% 40-80) hammaddeler çeşitli ön işlemlerden geçirilir; bunlar yıkama, arıtma ve öğütme gibi işlemleri içerir (Öztrak, 2010). Ön işlem sonrası, karbonizasyon 350-900°C sıcaklık aralığında, inert ortamda hammaddeye uygulanmaktadır. Böylece, organik maddeden uçucu maddeler ve nem uzaklaşmakta ve yapının karbon miktarı artmaktadır. Aynı zamanda yüksek sıcaklık altında çapraz bağlar oluşarak, sert ve gözenekli bir doku meydana gelmektedir (Akyıldız, 2007). Karbonizasyon sonrasında, yüksek sıcaklık altında aktivasyon işlemi gerçekleştirilmektedir. Aktivasyonda, fiziksel ve kimyasal aktivasyon olmak üzere iki ayrı yöntem kullanılmaktadır (Öztrak, 2010).

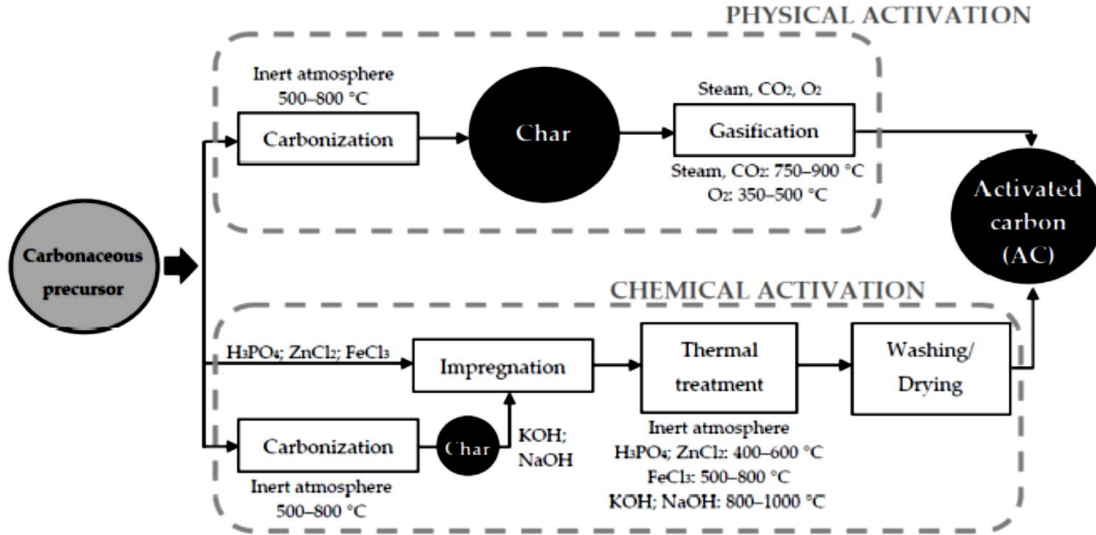
Fiziksel Aktivasyon Yöntemi

Fiziksel aktivasyon yönteminde su buharı, hava, karbondioksit gibi oksitleyici gazlar ve bu gazların uygun oranlarda karışımı kullanılabilir. Fiziksel aktivasyon yöntemi öncelikle uygun hammaddenin karbonizasyonu ve akabinde aktivasyonu olmak üzere iki aşamada gerçekleştirilmektedir (Şekil 4). Karbonizasyon aşaması genellikle inert bir ortamda gerçekleşmekte ve hammaddenin yapısında bulunan hidrojen, oksijen gibi uçucu maddelerin uzaklaştırılması ve gözenekli yapının oluşması sağlanmaktadır. Aktivasyon aşamasında ise daha önceden oluşmuş gözenek yapısı daha da belirginleşmekle beraber yeni gözeneklerin oluşması sağlanmakta ve gözenek hacmi ve yüzey alanı gibi özellikler uygulanan sıcaklık ve süreye bağlı olarak değişmektedir. Ayrıca bu yöntemde sistemin daha az korozif olması ve emdirme-yıkama gibi işlemlere gereksinim duyulmaması avantajları olarak sayılabilir (Ganan vd., 2006). Diğer bir çalışmada farklı karbonizasyon sıcaklıkları kullanarak (400, 600, 800 ve 1000°C) farklı aktivasyon sürelerinde hindistancevizi kabuğunu karbonize etmişlerdir. 120 dakika aktivasyon süresi ile 1000°C’de üretilen aktif karbonun yüzey alanının 1926 m²/g olduğunu gözlemlemişlerdir. Sonuçta yüksek karbonizasyon sıcaklığı ve uygun aktivasyon süresi ile fiziksel aktivasyon (buhar aktivasyonu) yöntemi kullanarak hindistancevizi kabuklarından yüksek yüzey alanına sahip aktif karbonlar üretebileceği sonucuna varmışlardır (Li vd., 2008). Bouchelta vd., (2008) çalışmalarında hurma çekirdeğinden su buharı kullanarak fiziksel aktivasyon yöntemi ile aktif karbon üretmişlerdir. Aktivasyon süresi ve karbonizasyon sıcaklığının aktif karbon özelliklerine etkisini incelemişler ve 700°C’de 1 saat sürede gerçekleştirilen aktivasyon aşamasında en yüksek yüzey alanına ulaşmışlardır. Cagnon vd., (2009) çalışmalarında ise erik ve elma posası, erik ve zeytin çekirdeği, Hindistan cevizi kabuğu ve lignin kullanarak su buharı ortamında fiziksel aktivasyon yöntemini kullanmışlardır. 800°C’de, 2 saat sürede gerçekleşen aktivasyon sonucunda ligninin aktif karbon üretiminde en verimli olduğu sonucuna ulaşmışlardır. Diğer bir çalışmada fındık kabuğundan aktivasyon yöntemi ile aktif karbon üretilmişlerdir. Karbonizasyon aşamasında N₂ ortamında 600°C ve 1 saat süre ile aktivasyon aşamasında CO₂ atmosferinde 800°C’de ve 3 saat süre ile en verimli aktif karbon üretim parametrelerine ulaşmışlardır (Örkün, 2011).

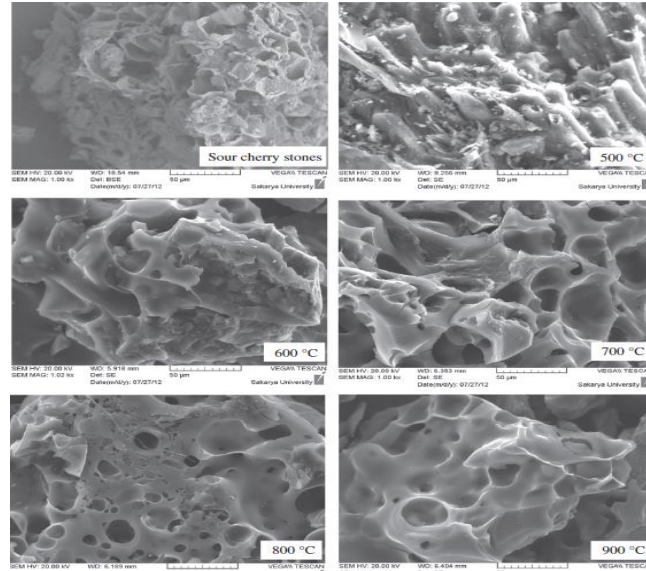
Kimyasal Aktivasyon Yöntemi

Kimyasal aktivasyon yönteminde; öncelikle başlangıç maddesi belli oranlarda uygun kimyasal ile emdirme, yoğurma veya kuru karıştırma gibi farklı yöntemlerle etkinleştirilmektedir. Uygulanan yöntem seçilen kimyasala bağlı olarak değişmektedir (Gündoğdu, 2010; Hayashi vd., 2002; Ahmadpour ve Do, 1995). Kimyasal aktivasyon aşamasında genellikle hem karbonizasyon hem de aktivasyon aynı anda gerçekleşmektedir. Ancak ön işlem olarak karbonizasyon da uygulanabilmektedir (Şekil 5). Isıl işlem sırasında oluşan uçucu maddeler, oksijenle birleşerek ortamdan uzaklaşır; bu da gözenek hacmini ve yüzey alanını genişletmektedir (Dermanlı, 2006).

Kimyasal aktivasyon için literatürde yaygın olarak fosforik asit (H₃PO₄), potasyum karbonat (K₂CO₃), potasyum hidroksit (KOH) ve çinko klorür (ZnCl₂) gibi maddelerin kullanıldığı görülmektedir. Fosforik asit ve çinko klorür gibi kimyasallar yıkama işlemi ile yapıdan tam anlamıyla giderilememekte olup, çevreye zarar vermesinden dolayı kullanım alanı her geçen gün azalmaktadır. Ancak, potasyum karbonatın etkili bir aktivasyon aracı olarak kabul edilmesi ve insan sağlığına zarar vermeyen bir madde olması nedeniyle gıda katkı maddesi olarak kullanımı giderek artmaktadır. (Tsai vd., 2001). Meyve suyu endüstrisinin atık maddesi olan vişne çekirdekleri kullanılarak yapılan çalışmada reaksiyon sıcaklıkları sırasıyla 500, 600, 700, 800 ve 900 °C olarak belirlenmiş ve farklı emdirme oranlarında çinko klorür kullanılarak kimyasal aktivasyon yöntemine göre aktif karbonlar elde edilmiştir. Aktivasyon sıcaklığı ve emdirme oranının gözenekli yapıyı, yüzey alanını, aktif karbonların gözenek hacmini ve BET yüzey alan değerlerini etkilediği görülmüş ve Şekil 6’da aktif karbon üretimi için optimum koşulların 700 °C aktivasyon sıcaklığı ve 3:1 emdirme oranı olarak belirlenmiştir (Angin, 2014).



Şekil 5. Fiziksel ve Kimyasal Aktivasyon Mekanizması (Bedia vd.,2020)



Şekil 6. Farklı Aktivasyon Sıcaklıklarında Vişne Çekirdeklerinden Üretilen Aktif Karbonların SEM Resimleri (Angin, 2014).

Diğer bir çalışmada ise Ladin ağacı kraft hamurunun atık maddesi olan siyah likör kullanılmış ve lignin izole edilmiştir. Ligninden alkali metal bileşikleri (K_2CO_3 , Na_2CO_3 , KOH, NaOH) ve $ZnCl_2$, H_3PO_4 reaktifleri kullanarak kimyasal aktivasyon yöntemine aktif karbon üretmişlerdir. Sonuçlara göre lignin esaslı aktif karbonun $600^\circ C$ karbonizasyon sıcaklığında $ZnCl_2$ ve H_3PO_4 aktivasyonunda maksimum yüzey alanına sahip olduğunu ve aynı zamanda yüzey alanının ticari aktif karbonlarınkı kadar büyük olduğu gözlemlenmiştir. Alkali metal aktivasyonunda ise, maksimum yüzey alanlarının, $800^\circ C$ karbonizasyon sıcaklığında elde edildiği ve Na_2CO_3 haricinde maksimum yüzey alanlarının ticari aktif karbonlardan çok daha büyük olduğunu görmüşlerdir (Hayashi vd.,2000).

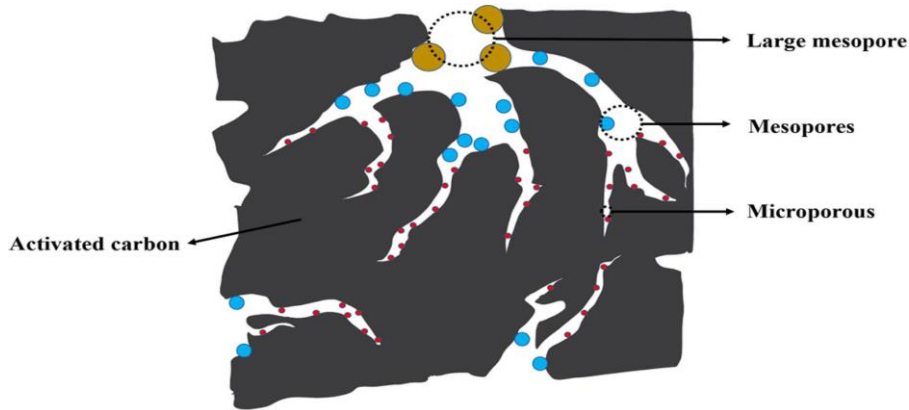
Kimyasal ve fiziksel aktivasyon yöntemi karşılaştırıldığında; kimyasal aktivasyonda karbonizasyon ve aktivasyon aşamalarının tek basamakta gerçekleşmesi, karbonizasyonun düşük sıcaklıklarda yapılması, verimin yüksek olması, yüksek yüzey alanı elde edilmesi ve gözenekliliğin geliştirilebilir ve kontrol edilebilir olması ve mineral madde içeriğinin az olması nedeniyle avantaj sağladığı görülmektedir (Tiryaki, 2013; Marsh ve Rodriguez-Reinoso,2006; Yeganeh vd., 2006; Bansal ve Goyal, 2005; Manocha, 2003; Hayashi vd., 2000). Tarım ve gıda endüstrisindeki atıklardan olan kayısı ve şeftali çekirdeği ile badem kabuğundan yapılan bir çalışmada, fiziksel ve kimyasal

aktivasyon yöntemleri kullanılarak aktif karbon üretilmiştir. Çalışmanın ilk aşamasında; saf karbondioksit ortamında farklı sıcaklıklarda fiziksel aktivasyon, ikinci aşamasında ise farklı $ZnCl_2$ /üçlü karışım oranlarında çinko klorürle, farklı sıcaklıklarda ve sürelerde kimyasal aktivasyona yapılmıştır. Sonuçlara göre; fiziksel aktivasyonda istenen özelliklerde aktif karbonların elde edilemediği ancak kimyasal aktivasyonunda ticari aktif karbon özelliklerine yakın aktif karbonların elde edildiği söylenmiştir (Akçakal, 2017). Diğer bir çalışmada tekstil atıklarına (pamuk, pamuk-poliester, poliester) $230^{\circ}C$ 'de 1 saat hidrotermal karbonizasyon ön işlemi uygulanmış ve sonrasında fiziksel aktivasyon ($850^{\circ}C$, CO_2 , 3 saat) ve kimyasal aktivasyon (KOH, $700^{\circ}C$ ve $ZnCl_2$, $500^{\circ}C$) yöntemleri ayrı ayrı uygulanarak aktif karbon elde edilmiştir. Neticede $ZnCl_2$ aktivasyonu ve pamuk içeren hammaddenin yüksek yüzey alanına $1795 m^2/g$ sahip olduğunu görülmüştür (Duman, 2021).

AKTİF KARBON ADSORBSİYONU

Adsorpsiyon, çözültide çözülmüş halde bulunan atom, iyon veya moleküllerin uygun bir yüzeyde biriktirilmesi ve bir katının yüzeyine bağlanması olarak tanımlanır. Adsorpsiyonda maddeleri üzerinde tutan katıya adsorban veya adsorplayıcı, katı üzerine tutunan maddeye adsorbat veya adsorplanan denir. Katı üzerinde tutunan maddenin tekrar ortamdan ayrılması olayına ise desorpsiyon denir (Sarıcı, 2022; Yagub vd., 2014). Adsorpsiyon işlemi adsorplanan tanecik ile adsorplayan yüzey arasındaki çekme kuvvetine bağlı olarak meydana gelmektedir. Fiziksel ve kimyasal olmak üzere 2 farklı adsorpsiyon çeşidi bulunmaktadır. Fiziksel adsorpsiyon, adsorplayan madde ile adsorplanan madde arasında Van der Waals, hidrojen, dipol-dipol, iyon-dipol gibi zayıf bağlar içeren, moleküller arası ikincil etkileşimlere dayanmaktadır. (Sarıcı, 2022; Eckenfelder, 2000). Kimyasal adsorpsiyon, adsorplanacak taneciğin adsorbanın katı yüzeyine molekül içi kovalent bağlarla bağlanıp yapışması ve adsorban maddenin yapısını bozmasıyla gerçekleşir (Abdullah vd., 2011).

Aktif karbon, geniş yüzey alanı ve iç gözenek yapısı ile adsorbanlar arasında en çok tercih edilmektedir. Granül veya toz formunda bulunan aktif karbon, kesikli veya sürekli-dinamik sistemlerde yüzeye tutunma açısından en yüksek arıtma performansını sağlar (Şekil 7). Bu adsorpsiyon işlemi, çözülmüş haldeki klorlu-hidrokarbon bileşikleri, bazı ağır metaller, su arıtımı, yüzey aktif maddeler, atık su arıtımı, çürümeyen biyolojik atıklar, tarım ilaçları ve bazı zehirli metal iyonlarının giderimi gibi çeşitli uygulamalarda kullanılır. (Gür, 1994).



Şekil 7. Aktif Karbonun Gözenek Yapısı ve Adsorbsiyon Mekanizması (Wang vd.,2023)

Adsorpsiyon, gaz-katı, sıvı-katı veya karışmayan sıvı-sıvı arayüzeylerinin meydana geldiği durumlarda gerçekleşen bir durumdur. Tekstil endüstrisinde kullanılan Basic Blue 41 (BB 41) ve Basic Red 46 (BR 46) boyarmaddelerinin sulu çözültiden adsorpsiyon yöntemi ile uzaklaştırılmasını inceleyen bir çalışmada, ticari aktif karbona (AC) alternatif olarak düşünülen kömürden fiziksel (PAC) ve kimyasal (CAC) aktivasyon sonucu elde edilen adsorbentler, boyar madde adsorpsiyonları açısından karşılaştırılmış ve PAC, AC ve CAC BET yüzey alanlarını sırasıyla 52.6, 741 ve $1325 m^2/g$ olarak bulunmuştur. En yüksek yüzey alanı kimyasal aktivasyonla hazırlanan $800^{\circ}C$ 'de CAC numuneleri olduğu belirtilmiştir (Sulu, 2011). Lo vd., tarafından 2011 yılında yapılan çalışmada, Moso ve Ma bambu türü ağaçlardan elde edilen aktif karbonlar üzerinde araştırmalar yapılmıştır. Aktif karbonların adsorpsiyon kapasiteleri, zeta potansiyelleri, karbon ve ağır metal uzaklaştırma verimleri, gözenek hacimleri ve yüzey alanları zamana, pH etkisine ve aktif karbon miktarına bağlı olarak belirlenmiştir. Ağır metal adsorpsiyonu için optimum pH, Moso için 5,81-7,86; Ma için 7,10-9,82 aralığında bulunmuştur. Moso için optimum adsorpsiyon süresi Cu^{+2} için 4-8 saat, Pb^{+2} için 2-4 saat, Cr^{+3} için 4 saat olarak belirlenirken, Ma için tüm ağır metallerde bir saat olarak belirlenmiştir. Ayrıca iki kez aktive edilmiş Ma bambu esaslı aktif karbonunun düşük zeta potansiyeline

sahip olduğu ve adsorblama kapasitesinin yüksek olduğu bulunmuştur. Gökara, 2013 yılında aktif karbon çalışmasında iğde meyvesi çekirdeği kullanmıştır. İğde çekirdeği esaslı aktif karbonun boyarmaddelerin sulu çözeltisinde bulunan rhodamine B, metilen mavisi, malahit green gideriminde adsorpsiyon kapasitelerini sırasıyla 282 mg/g, 288 mg/g, 433mg/g olarak bulmuştur (Tablo 2).Tablo 2’de saman, bambu, hindistan cevizi, şeftali çekirdeği, iğde çekirdeğinden elde edilen aktif karbonların adsorbsiyon kapasiteleri yüksek olduğu görülmektedir.

Tablo 2.Doğal Atık Esaslı Aktif Karbonlar için Adsorpsiyon Kapasiteleri (Gökara, 2013)

Aktif Karbon Üretiminde Kullanılan Atık Madde	Adsorbsiyon Kapasitesi(mg/g)
Bambu tozu	143,20
Yer fıstığı kabuğu	164,90
Kauçuk ağacı tohumu	227,27
Bezelye kabukları	246,91
Zeytin çekirdeği	263,00
Hindistan cevizi kabuğu	277,90
Yağ palmyesi lifi	277,90
İğde çekirdeği(Rhodamine B)	281,69
İğde çekirdeği(Metilen mavisi)	288,18
Hint kamışı talaşı	294,12
Çeltik kavuzu	343,50
Hurma çekirdeği	398,19
Palmye ağacı elyafı	400,00
Şeftali çekirdeği	412,00
İğde çekirdeği(Malahit yeşili)	432,90
Hindistan cevizi kavuzu	434,78
Bambu	454,20
Saman	472,10

Doğanay, 2013 yılında yaptığı çalışmada kağıt sanayisi atık sularında fenolün giderim oranlarını incelemiştir ve deneylerinde adsorbent olarak palmye kabuğu kökenli aktif karbon kullanmıştır. Deneyler sonucunda, fenolün %70,58 oranında giderildiği belirlenmiştir. Başka bir çalışmada, çay fabrikası atıklarından aktif karbon üretmek için mikrodalga ön işlemlili kimyasal aktivasyon(fosforik asit) kullanılmıştır. Çay atığı temelli aktif karbonun, krom, bakır, nikel ve kurşun gibi ağır metallerin giderim kapasiteleri araştırılmıştır. Karşılaştırma amacıyla, su ile yıkanmış çay fabrikası atığı da adsorbent olarak kullanılmıştır. Çay atığı esaslı aktif karbonun mezo gözenekli olduğu ve yüzey alanı ise 1387 m²/g olarak ölçülmüştür. Çay atığı esaslı aktif karbonun nikel ve kromun uzaklaştırılmasında, su ile yıkanmış çay fabrikası atığının kurşun gideriminde daha etkili olduğu bulunmuştur. Bakır gideriminde ise her ikisinin de başarılı olduğu gözlemlenmiştir (Deniz, 2014).

AKTİF KARBONUN UYGULAMA ALANLARI

Aktif karbon, su arıtmadan ağır metal giderimine, gıdadan metal sanayisine, savunmadan sağlık sektörüne kadar endüstrinin birçok alanında kullanılan ticari potansiyeli çok yüksek olan bir malzemedir. Aktif karbonun en güncel uygulama alanları aşağıda sıralanmıştır.

Çözücü Geri Kazanımı: Birçok çözücü buharı, hava ile karıştırıldığında yanıcı özellik göstermektedir. Kimyasalın cinsine bağlı olarak değişen hava/kimyasal buhar oranı, kritik miktarın üstüne çıktığında yanıcılık görülmektedir. Bu durumda kullanılan aktif karbon, hem çözücü buhar konsantrasyonu belli bir değerin altında tutmakta hem de yaklaşık %95 oranında çözücünün geri kazanımını sağlamaktadır. Günümüzde, aktif karbon uygulamaları ile aseton, izopropanol, tetrakloretilen, benzen, metanol, trikloretilen, metil asetat, etanol, toluen, ksilen, etil asetat, petrol naftası, etil eter, solvent nafta vb çözücülerin geri kazanılması mümkün olmaktadır.

Fermentasyon: Aktif karbon, mikroorganizmalar için zararlı olan maddeleri adsorbe ederek fermentasyonu hızlandırır. Ancak, mikroorganizma besinlerini ve enzimlerini de adsorbe edebilir ve bu durum işlemin yavaşlamasına neden olabilir (Akyıldız, 2007;Hassler, 1967).

Filtreler: Sigara ağızlıklarında filtre olarak yaygın bir şekilde kullanılan aktif karbon, kötü kokuları ve duman içerisinde bulunan bazı zararlı maddeleri uzaklaştırmada etkilidir. Aynı zamanda, atıkların bertarafında kullanılan baca gazı filtrelerinde, sanayi kaynaklı gazların filtrelenmesinde ve soğutucu filtrelerinde de kullanılmaktadır.

Endüstriyel Gazların Filtrasyonu: Aktif karbon boya, vernik, suni deri, barut ve plastik üretimi sonucu atmosferi kirleten gazların tutulmasında tercih edilmektedir. Ayrıca ofis, laboratuvar, restoran ve hastane gibi kapalı alanların havasının temizlenmesinde de kullanılmaktadır. Hava temizliği için, genellikle 2-3 ppm gibi düşük kirlilik konsantrasyonlarında, levha şeklinde aktif karbon kullanılabilir.

Nükleer reaktörlerde meydana gelen bir kaza durumunda, aktif karbon filtreler, iyot, özellikle metil iyot gibi organik iyotlar, kripton, ksenon gibi noble gazlar ve radyoaktif buharın giderilmesinde ve helyum soğutması için kullanılan suyun arıtılmasında da kullanılmaktadır. %3 propan ve %4-5 oranında yüksek hidrokarbonları içeren doğalgaz, aktif karbon adsorpsiyonu ile arıtım sağlanmaktadır (Akyıldız, 2007; Bansal ve Goyal, 2005).

Atık Su Arıtma: Tekstil atık suları, içerdikleri çeşitli kimyasallar ve özellikle boyar maddeler nedeniyle arıtılması zor olan bir atık su kategorisine dahil edilmektedir. Boyarmaddelerin giderimi genellikle fiziksel ve kimyasal yöntemlerle yapılır. Fakat, bu yöntemlerin maliyeti oldukça yüksektir. Bu nedenle, büyük hacimli atık sularındaki boyar maddelerin etkili ve ekonomik bir şekilde uzaklaştırılabilmesi için alternatif yöntemlere ihtiyaç duyulmaktadır. Adsorpsiyon, renk giderimi için en önemli yöntemlerden biridir. Renk gideriminde en yaygın olarak kullanılan malzeme ise aktif karbondur.

Gıda Renklendirme: Gıda sektöründe kullanılan aktif karbon, tatsız ve kokusuz olup, insan sağlığına zararsızdır. Her türlü ekmek ve pastane ürünü ile dondurma, dondurma külahı ve makarna gibi yiyeceklerin renklendirilmesinde güvenle kullanılabilir. Ayrıca nişasta, glikoz, şeker şurupları ve yağların rengini açmak veya rafinerizasyon amacıyla da aktif karbon tercih edilmektedir.

Su Saflaştırma: Aktif karbon, suyun arıtılması sürecinde oldukça yaygın olarak kullanılmaktadır. Hem yüzey suları hem de yer altı kaynak sularının arıtılmasında aktif karbon kullanılır.

İçme Suyu Arıtma: Aktif karbon, insan tüketimine uygun suyun arıtılma sürecinde, çok düşük miktarlardaki çözünmüş organik maddelerin dahi giderilmesine olanak sağlar.

Klor Giderimi: Su arıtma süreçlerinde, suyun genellikle klor ile dezenfekte edilmesi gerekmektedir. Klorun sudan uzaklaştırılması, genellikle granül aktif karbon filtreleri kullanılarak gerçekleştirilir.

Yer Altı Kaynak Suyu İyileştirme: Kaynak suları genellikle yüksek miktarlarda organik madde içerdiğinden kirlidir. Bu kirleticiler genellikle rafineri ve petrol istasyonlarından kaynaklanan hidrokarbonlardır. Bu tür işlemlerde, uygun adsorpsiyon kapasitesine ve parçacık boyutuna sahip granül aktif karbon seçimi, hidrokarbonların etkili bir şekilde uzaklaştırılmasında önemli rol oynar.

Soğuk Depolama: Tarımsal ürünlerin uzun süreli saklanması, sebze ve meyvelerin metabolizmalarının kontrol edilerek yavaşça olgunlaştırılmasıyla gerçekleştirilir. Soğuk depolama sürecinde, bu ürünler karbondioksit gazı üretirler. Karbondioksitin ortamdan uzaklaştırılarak belirli bir seviyenin altına indirilmesi, bozulmayı hızlandıran etkileri engellemek için önemlidir. Bu süreçlerde, aktif karbon, karbondioksiti adsorbe ederek soğuk hava depolarında bozulmayı önlemek, kayıpları azaltmak ve depolama süresini uzatmak için kullanılmaktadır.

Biyogaz: Biyogaz, yenilenebilir enerji üretmek için güç motorlarında yakılarak kullanılmaktadır. Ancak, içerdiği çeşitli safsızlıkların motora zarar vermemesi için temizlenmesi gerekmektedir. Biyogaz sanayisinde, hidrojen sülfür (H₂S) gazı, siloksanlar ve çeşitli uçucu organik bileşiklerin uzaklaştırılması için aktif karbon yaygın olarak kullanılmaktadır (Anonim, 2021).

Savunma Sanayi: Son yıllarda nükleer, biyolojik ve kimyasal savaş (NBC) ajanları, hem savunma kuvvetleri hem de siviller için kaçınılmaz bir tehdit oluşturmaktadır. Bu toksik ajanlara maruz kalmak, yaşamda çok fazla hasara neden olmaktadır. Kirli havadan kimyasal veya fiziksel adsorpsiyon yoluyla toksik kimyasalların uzaklaştırılmasında aktif karbon ve HEPA (yüksek verimli partikül hava) veya ULPA (ultra düşük) gibi adsorban malzeme içeren filtreler tercih edilmektedir. Önümüzdeki yıllarda muharebe sahası koşullarında daha uzun süre kullanılacak gaz maskelerinin geliştirilmesine yönelik çalışmalar yapılmaktadır. Bertaraf problemlerini önlemek için kimyasal, biyolojik ve radyolojik ajanlara karşı gelişmiş koruma potansiyeline sahip biyolojik olarak parçalanabilir, yeniden kullanılabilir ve kullanıcı dostu maskeler geliştirilmelidir (Kiani vd.,2021).

Superkapasitör Üretiminde: Son yıllarda süperkapasitör üretiminde yaygın olarak biyoatıklardan üretilen aktif karbonlar kullanılmaktadır. Örneğin kahve atıklarından fiziksel ve kimyasal aktivasyon yöntemleriyle üretilen aktif karbonlar süperkapasitör üretiminde kullanılmış ve kimyasal aktivasyonla üretilen aktif karbonlarda üretilen süperkapasitörün 84 F/g spesifik kapasitans değerine ulaştığı bulunmuştur (Adan-Mas vd., 2021). Ayrıca *Tectona grandis* yaprağı (Taer vd., 2021) ve kenaf dahil olmak üzere birçok biyokütle atığı (Park vd.,2021), şeker kamışı ucu (Wei vd.,2021), manyokun yeşil buharı (Taer vd.,2020), bambu yaprağı (Jayachandran vd.,2021), *Sapindus trifoliatus* fındık kabukları (Vinayagam vd.,2021), kaju fıstığı kabuğu (Merin vd.,2021), çürük patates (Wang vd.,2021), *Allium cepa* kabuğu (Ali vd.,2021), narenciye kabuğu lifi (Mondal vd., 2021), *Acacia auriculiformis* (Bhat vd., 2021), *Caesalpinia Sappan* (Bhat vd., 2022) ve huş ağacı (dondurma çubukları) (Selvaraj vd.,2022), süperkapasitör üretimi için alternatif karbon kaynakları olarak kullanılmıştır.

Ağır Metal İyonların Adsorbsiyonunda: Aktif karbonlar endüstriyel çözeltilerde bulunan ağır metal iyonlarının adsorbsiyonunda kullanılmaktadır. Atık sigara tütününden $ZnCl_2 + CO_2$ kimyasal ve fiziksel aktivasyon kombine yöntemi ile elde edilen aktif karbonlar Pb^{2+} metal iyonunun adsorblanmasında kullanılmıştır (Manfrin vd.,2021).

SONUÇ

Aktif karbonun son yıllarda savunma sanayisinden süperkapasitör üretimine, arıtmadan adsorsiyona kullanım amacına göre üretilebilmesinden dolayı uygulama alanları sürekli artmıştır. Gelecekte aktif karbon pazarının daha da büyüyeceği öngörülmekte olup, bu büyüme oranına uyumlu olarak uygulama alanlarının daha da çeşitleneceği ve biyokütle atıklarından üretilen nitelikli aktif karbonların endüstriyel aktif karbonların yerini alacağı düşünülmektedir. Ticari aktif karbon yüksek oranda inorganik maddeler içeren kaynaklardan üretilmekte olup, bu durum hem maliyetin daha da artmasına hem de çevresel problemlere yol açmasına neden olmaktadır. Bu nedenle araştırmalar alternatif çevre dostu hammaddelere yönelmiştir. Biyokütle atıkları, kolay bulunabilirlikleri, ucuz olmaları ve karbonlu yapıları nedeniyle aktif karbon üretimi için büyük bir potansiyel sunmaktadır. Biyokütle atıklarının aktif karbon üretim sürecine dahil edilmesiyle beraber hem çevresel sorunların azalması hem de sıfır atık ve yeşil dönüşüm çalışmaları kapsamında ülke ekonomisine büyük oranda katkı sağlanması öngörülmektedir.

KAYNAKLAR

- Abdullah, M.O., Tan, I.A.W. & Lgm, L.S. (2011). Automobile adsorption air-conditioning system using oil palm biomass-based activated carbon: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(4), 2061-2072. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.01.012>
- Adan-Mas, A., Alcaraz, L., Arévalo-Cid P., López-Gómez F.A., & Montemor F.(2021). Coffee-derived activated carbon from second biowaste for supercapacitor applications. *Waste Management* 120 (2021) 280–289. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.11.043>
- Ahmadpour, A., & Do, D.D.(1995). The Preparation of Active Carbons from Coal by Chemical and Physical Activation, *Carbon*, 34 (1995) 471–479. [https://doi.org/10.1016/0008-6223\(95\)00204-9](https://doi.org/10.1016/0008-6223(95)00204-9)
- Akyıldız, H. (2007). H_3PO_4 Aktivasyonu ile Zeytin Çekirdeğinden Aktif Karbon Üretimi. Yüksek Lisans Tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Kimya Mühendisliği Bölümü.
- Ali, G. A. M., S. Supriya, K. F. Chong, E. R. Shaaban, H. Algarni, T. Maiyalagan, & G. Hegde. (2021). Superior supercapacitance behavior of oxygen self-doped carbon nanospheres: A conversion of *Allium cepa* peel to energy storage system. *Biomass Conversion and Biorefinery* 11 (4):1311–23. <https://doi.org/10.1007/s13399-019-00520-3>
- Angin, D. (2014). Production and characterization of activated carbon from sour cherry stones by zinc chloride. *Fuel* 115 (2014) 804–811. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.04.060>
- Anonim. (2021). Sivas İli Aktif Karbon Üretimi Ön Fizibilite Raporu. Sanayi ve Teknoloji Bakanlığı Orta Anadolu Kalkınma Ajansı.
- Bansal, R. C., & Goyal, M. (2005). *Activated carbon adsorption*, Taylor & Francis Group, 497 p.
- Bedia, J., Penas Garzon, M., Gomez Aviles, A., Rodriguez, J.J., & Belver, C. (2020). Review on Activated Carbons by Chemical Activation with $FeCl_3$. *C-Journal of Carbon Research* 2020, 6, 21. <https://doi.org/10.3390/c6020021>
- Beton, İ. (2011). Zeytin Çekirdeğinden Üretilen Aktif Karbona CO_2 Adsorpsiyonun İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Enerji Enstitüsü.

- Bhadusha, N., & Ananthabaskaran, T. (2011). Adsorptive Removal of Methylene Blue onto ZnCl₂ Activated Carbon from Wood Apple Outer Shell: Kinetics and Equilibrium Studies. *E-Journal of Chemistry*, 8(4), 1696-1707. <https://doi.org/10.1155/2011/429831>
- Bouchelta, C., Medjram, M.S., Bertrand, O. & Bellat, J.P. (2008). Preparation and characterization of activated carbon from date stones by physical activation with steam. *J. Anal. Applied Pyrolysis*, 82, 70-77. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2007.12.009>
- Cagnon, B., Py, X., Guillot, A., Stoeckli, F., & Chambat, G.(2009). Contributions of hemicellulose, cellulose and lignin to the mass and the porous properties of chars and steam activated carbons from various lignocellulosic precursors, *Bioresource Technology* 100, 292–298. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.06.009>
- Christica, I.S., & Muchlisyam, J.R. (2018). Activated Carbon Utilization From Corn Cob(Zea mays) as a Heavy Metal Adsorbent in Industrial Waste. *Asian Journal of Pharmaceutical Research and Development*.6(5): 01-04. <https://doi.org/10.22270/ajprd.v6i5.411>
- Choma J., & Jaroniec M. (1987).*Materials Chem. Phys.*18,409.
- Cruz, G., Pirlä, M., Huuhtanen, M., Carrión, L., Alvarenga, E., & Keiski, R. (2012). Production of Activated Carbon from Cocoa (Theobroma cacao) Pod Husk. *Civ. çevre. Müh.*,2(1–6)(2012),s.2. <https://dx.doi.org/10.4172/2165-784X.1000109>
- Çetinkaya, M.Ş. (2015). Badem Kabuğu ve Çam Fıstığı Kabuğundan Kimyasal yöntem ile Aktif Karbon Üretimi ve Karakterizasyonu. Yüksek Lisans Tezi.Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Orman Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı.
- Danisha, M., Ahmadb, T., Majeedc, S., Ahmadd. M., Ziyange. L., Pine. Z., & Iqubalf S.M.S. (2018). Use of banana trunk waste as activated carbon in scavenging methylene blue dye: Kinetic, thermodynamic, and isotherm studies. *Bioresource Technology Reports* 3, 127–137. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2018.07.007>
- Delgado, L.F., Charles, P., Glucina, K., & Morlay, C. (2012). The removal of endocrine disrupting compounds, pharmaceutically activated compounds and cyanobacterial toxins during drinking water preparation using activated carbon—A review. *Science of the Total Environment*, 435, 509-525. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.07.046>
- Deniz, T. (2014). Çay Atığından Üretilen Aktif Karbon ile Sulu Çözeltilerden Ağır Metallerin Giderimi. Yüksek Lisans Tezi. Ankara Üniversitesi, Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı.
- Dermanlı, Y. (2006). Gıda Fabrikasyon Atıklarından Aktif Karbon Üretimi ve Soya Yağını Ağartma Performansının İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü Gıda Mühendisliği.
- Doğanay, M. (2013). Kağıt Atıksularının Palmiye Kabuğu Kökenli Aktif Karbon Adsorpsiyonu ile Arıtılması. Yüksek Lisans Tezi. Süleyman Demirel Üniversitesi, Çevre Mühendisliği Ana Bilim Dalı.
- Duman, G. (2021). Preparation of novel porous carbon from hydrothermal pretreated textile wastes: Effects of textile type and activation agent on structural and adsorptive properties. *Journal of Water Process Engineering* 43 (2021) 102286. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2021.102286>
- Eckenfelder, W. W. (2000). *Industrial water pollution control* (McGrawHill). Boston, EUA.
- Ganan J., Gonzalez J.F., Gonzalez-Garcia C.M., Ramiro A., Sabio E. & Roman S. (2006). Carbon dioxide-activated carbons from almond tree pruning: Preparation and characterization. *Applied Surface Science* 252 (2006) 5993–5998. <https://doi:10.1016/j.apsusc.2005.11.025>
- Gerçel, Ö., & Seydioğlu, G. (2015). Kiraz Çekirdeğinden Granül Aktif Karbon Üretimi. *Anadolu University Journal of Science and Technology A- Applied Sciences and Engineering Cilt: 16 Sayı: 2, Sayfa: 189 – 193.* <https://doi.org/10.18038/btd-a.93727>
- Girgis, B.S., Yunis, S.S., & Soliman, A.M. (2002). Characteristics of activated carbon from peanut hulls in relation to conditions of preparation. *Mater. Lett.* 57 (1), 164–172. [https://doi.org/10.1016/S0167-577X\(02\)00724-3](https://doi.org/10.1016/S0167-577X(02)00724-3)
- Gonzalez, J., Roman, S., Encinar, J.M., & Martínez, G., (2009). Pyrolysis of various biomass residues and char utilization for the production of activated carbons. *J. Anal. Appl. Pyrol.* 85 (1–2), 134–141. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2008.11.035>

- Gökara, G. (2013). İğde Çekirdeğinden Elde Edilen Aktif Karbon Üzerinde Tekstil Boyarmaddelerinin Adsorpsiyonu. Yüksek Lisans Tezi. Trakya Üniversitesi, Fizikokimya Anabilim Dalı.
- Guo, S., Peng, J., Li, W., Yang, K., Zhang, L., Zhang, S., & Xia, H. (2009). Effects of CO₂ activation on porous structures of coconut shell-based activated carbons. *Appl. Surf. Sci.* 255 (20), 8443–8449. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2009.05.150>
- Gündoğdu, A. (2010). Fabrika Çay Atıklarından Aktif Karbon Üretimi, Karakterizasyonu ve Adsorpsiyon Özelliklerinin İncelenmesi. Doktora Tezi. Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Kimya Bölümü
- Güngör, S. (2013). Tarımsal Atıklardan Aktif Karbon Üretimi. Yüksek Lisans Tezi. İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kimya Mühendisliği Ana Bilim Dalı Temel İşlemler ve Termodinamik Programı.
- Güngör, C. (2010). Üzüm Küspesinden Aktif Karbon Üretimi ve Bakır Gideriminde Kullanılması. Yüksek Lisans Tezi. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kimya Mühendisliği, Termodinamik ve Temel İşlemler Bölümü.
- Gür, N. (1994). Pestisitlerin Bentonitle Adsorpsiyonu, Bitirme Ödevi, İTÜ Kimya-Metalurji Fak., İstanbul.
- Hassler, J. (1967). Activated Carbon, Chemical Publishing Co. Inc., Leonard Hill-London.
- Hayashi, J., Horikawa, T., Takeda, I., Muroyama, K. & Ani, F.N.(2002). Preparing Activated Carbon from Various Nutshells by Chemical Activation with K₂CO₃, *Carbon*, 40 (2002) 2381–2386. [https://doi.org/10.1016/S0008-6223\(02\)00118-5](https://doi.org/10.1016/S0008-6223(02)00118-5)
- Hayashi J., Kazehaya A., Muroyama K., & Watkinson A.P.(2000).Preparation of activated carbon from lignin by chemical activation. *Carbon* 38 (2000) 1873–1878. [https://doi.org/10.1016/S0008-6223\(00\)00027-0](https://doi.org/10.1016/S0008-6223(00)00027-0)
- Jayachandran, M., S. Kishore Babu, T. Maiyalagan, N. Rajadurai, & T. Vijayakumar. (2021). Activated carbon derived from bamboo-leaf with effect of various aqueous electrolytes as electrode material for supercapacitor applications. *Materials letters* 301 (June):130335. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2021.130335>
- Kiani, S.S., Farooq, A., Ahmad, M., Irfan, N., Nawaz, M. & Irshad, M.A.(2021). Impregnation on activated carbon for removal of chemical warfare agents (CWAs) and radioactive content. *Environmental Science and Pollution Research* (2021) 28:60477–60494. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-15973-1>
- Küçükgül, E.Y. (2004). Ticari Aktif Karbon Üretimi ve Özelliklerinin Belirlenmesi. DEU Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi Cilt: 6 Sayı: 3 s. 41-56 Ekim 2004. <https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/590657>
- Li, W., Yang, K., Peng, J., Zhang, L., Guo, S., & Xia, H. (2008). Effects of carbonization temperatures on characteristics of porosity in coconut shell chars and activated carbons derived from carbonized coconut shell chars. *Ind. Crop. Prod.* 28 (2), 190–198. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2008.02.012>
- Lo, S., Wang, S., Tsai, M. & Lin, L. (2011). Adsorption capacity and removal efficiency of heavy metal ions by moso and ma bamboo activated carbons. *Chemical Engineering Research and Design*, 90, 1397-1406. <https://doi.org/10.1016/j.chemd.2011.11.020>
- Lua, A.C., Yang, T., & Guo, J. (2004). Effects of pyrolysis conditions on the properties of activated carbons prepared from pistachio-nut shells. *J. Anal. Appl. Pyrol.* 72 (2), 279–287. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2004.08.001>
- Manfrin J., Gonçalves, A.C., Schwantes, D., Conradi, E., Zimmermann, J. & Ziemer, G. L. (2021). Development of biochar and activated carbon from cigarettes wastes and their applications in Pb²⁺ adsorption. *Journal of Environmental Chemical Engineering* 9 (2021) 104980. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104980>
- Manocha, S.M. (2003). Porous carbons. *Sadhana*, 28, 335-348. <https://doi.org/10.1007/BF02717142>
- Marsh, H., & Rodriguez-Reinoso, F. (2006). *Activated Carbon*, Elsevier Science and Technology Books, 542 p., United Kingdom
- McDouGall, G.J. (1991). The physical nature and manufacture of activated carbon, *Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy*, pp 109-120. https://hdl.handle.net/10520/AJA0038223X_2042

- Merin, P., Jimmy Joy, P., Muralidharan, M.N., Veena Gopalan, E., & Seema, A. (2021). Biomass-derived activated carbon for high-performance supercapacitor electrode applications. *Chemical Engineering & Technology* 44 (5):844–51. <https://doi.org/10.1002/ceat.202000450>
- Mondal, M., Kumar D., & T. Kanti. (2021). Lignocellulose based bio-waste materials derived activated porous carbon as superior electrode materials for high-performance supercapacitor. *Journal of Energy Storage* 34 (December 2020):102229. <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.102229>
- Nahil M.A., & Williams P.T. (2012). Pore characteristics of activated carbons from the phosphoric acid chemical activation of cotton stalks. *Biomass and Bioenergy* 37, 142-149. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.12.019>
- Othmer, K. (1992). *Encyclopedia of Chemical Technology*, John Wiley&Sons. 4: 1015-1035.
- Örkün, Y. (2011). Fındık Kabuğundan Fiziksel ve Kimyasal Aktivasyonla Aktif Karbon Üretimi ve Karakterizasyonu. Yüksek Lisans Tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi Enerji Enstitüsü. Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı.
- Özçimen, D., & Ersoy, M.A. (2010). Characterization of biochar and bio-oil samples obtained from carbonization of various biomass materials. *Renewable Energy* 3, 1319–1324. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2009.11.042>
- Öztrak, M. (2010). Biyokütle Atıklarından Aktif Karbon Üretimi. Doktora Tezi. Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı.
- Park, H. Y., M. Huang, T. H. Yoon, & K. H. Song. (2021). Electrochemical properties of kenaf-based activated carbon monolith for supercapacitor electrode applications. *RSC advances* 11 (61):38515–22. <https://doi.org/10.1039/D1RA07815A>
- Patrick, J. W. (1995). *Porosity in Carbons*, Edward Arnold(eds), Halsted Pres, London.
- Perrich, J. R. (2018). *Activated carbon adsorption for wastewater treatment*. CRC press.12-47
- Rosas, J.M., Bedia, J., Rodriguez-Mirasol, J., & Cordero, T. (2008). Preparation of Hemp-Derived Activated Carbon Monoliths. Adsorption of Water Vapor. *Ind. Eng. Chem. Res.* 2008, 47, 4, 1288–1296. <https://doi.org/10.1021/ie070924w>
- Sarıcı, B. (2022). Fındık Kabuğundan Aktif Karbon Üretimi ile Nanopartiküler Gümüş Eklenerek Aktif Karbonun Patojen Mikroorganizmalara Etkisinin Araştırılması. Doktora Tezi. İstanbul Aydın Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Gıda Güvenliği ve Beslenme Bilimleri Ana Bilim Dalı.
- Sayın, Z. E., Kumaş C., & Ergül B. (2016). Fındık Kabuğundan Aktif Karbon Üretimi. *AKU J. Sci. Eng.* 16 (2016) 025805(409-419) <https://doi.org/10.5578/fmbd.28129>
- Selvaraj, A. R., Chinnadurai, D., Cho, I., Bak, J. S. & Prabakar. K. (2022). Bio-waste wood-derived porous activated carbon with tuned microporosity for high performance supercapacitors. *Journal of Energy Storage* 52 Part B(15 August 2022):104928. <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.104928>
- Stoeckli, H.F., & Kraehenbuehl F. (1984). “The External Surface of Microporous Carbons, derived from Adsorption and Immersion Studies”, *Carbon*, 22, 297. [https://doi.org/10.1016/0008-6223\(84\)90174-X](https://doi.org/10.1016/0008-6223(84)90174-X)
- Sulu, E. (2011). Bazık Blue 41 ve Bazık Red 46'nın Kömürden Elde Edilen Aktif Karbon Üzerine Adsorbsiyonu. Yüksek Lisans Tezi. Zonguldak Karaelmas Üniversitesi, Kimya Anabilim Dalı.
- Suo, F., Liu, X., Li, C., Yuan, M., Zhang, B., Wang, J., Ma, Y., Lai, Z., & Ji, M. (2019). Mesoporous activated carbon from starch for superior rapid pesticides removal. *International Journal of Biological Macromolecules* Volume 121, Pages 806-813. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2018.10.132>
- Şamdan, C.A. (2013). Kabak Çekirdeği Kabuğundan Kimyasal Aktivasyonla Aktif Karbon Üretimi, Boya ve Ağır Metal Gideriminde Değerlendirilmesi. Yüksek Lisans Tezi. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Kimya Mühendisliği Bölümü.
- Taer, E., Melisa, M., Agustino, A., Taslim, R., Sinta, W., & Apriwandi, A. (2021). Biomass-based activated carbon monolith from *Tectona grandis* leaf as supercapacitor electrode materials. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects* 00 (00):1–12. <https://doi.org/10.1080/15567036.2021.1950871>

- Taer, E., Yanti, N., Mustika, W. S., Apriwandi, A., Taslim, R., & Agustino, A. (2020). Porous activated carbon monolith with nanosheet/nanofiber structure derived from the green stem of cassava for supercapacitor application. *International Journal of Energy Research* 44 (13):10192–205. <https://doi.org/10.1002/er.5639>
- Taş, R. (2017). Mikrodalga Enerji ile Kimyon Bitkisinden Aktif Karbon Üretimi ve Karakterizasyonu. Yüksek Lisans Tezi. Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı.
- Tiryaki, B. (2013). Selüloz, Hemiselüloz ve Ligninden Aktif Karbon Üretimi. Yüksek Lisans Tezi. Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı.
- Trade Map, Uluslararası İş Geliştirme İçin Ticaret İstatistikleri. (2024) . https://www.trademap.org/Product_SelCountry_TS.aspx?nvpm=1%7c792%7c%7c%7c%7c380210%7c%7c%7c8%7c1%7c1%7c1%7c2%7c1%7c1%7c2%7c1%7c1%7c1/ErişimTarihi:17.05.2024.
- Tsai, W.T., Chang, C.Y., Wang, S.Y., Chang, C.F., Chien, S.F. & Sun, H.F. (2001). Preparation of activated carbons from corn cob catalyzed by potassium salts and subsequent gasification with CO₂. *Bioresource Technology*, 78, 203-208. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(00\)00111-5](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(00)00111-5)
- Wang, A., Sun, K., Xu, R., Sun, Y., & Jiang, J. (2021). Cleanly synthesizing rotten potato-based activated carbon for supercapacitor by self-catalytic activation. *Journal of Cleaner Production* 283:125385. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125385>
- Wang, B., Lan J., Bo C., Gong B., & Ou, J. (2023). Adsorption of heavy metal onto biomass-derived activated carbon: review. *RSC Adv.*, 2023, 13, 4275. <https://doi.org/10.1039/D2RA07911A>
- Wang, Y., Yang, R., Li, M., & Zhao, Z. (2015). Hydrothermal preparation of highly porous carbon spheres from hemp (*Cannabis sativa* L.) stem hemicellulose for use in energy-related applications. *Industrial Crops and Products*. Volume 65, March 2015, Pages 216-226. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2014.12.008>
- Wei, B., Wei, T., Xie, C., Li, K., & Hang, F. (2021). Promising activated carbon derived from sugarcane tip as electrode material for high-performance supercapacitors. *RSC advances* 11 (45):28138–47. <https://doi.org/10.1039/D1RA04143F>
- Yagub, M.T., Sen, T.K., Afroze, S., & Ang, H.M. (2014). Dye and its removal from aqueous solution by adsorption: a review. *Advances in Colloid and Interface Science*, 209, 172-184. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2014.04.002>
- Yeganeh, M.M., Kaghazchi T., & Soleimani, M. (2006). Effect of raw materials on properties of activated carbons. *Chem. Eng. Technol.* 29, No. 10, 1247–1251. <https://doi.org/10.1002/ceat.200500298>
- Yılmaz, N., & Alagöz, O. (2019). Nar Kabuklarından Kimyasal Aktivasyon ile Hazırlanan Aktif Karbon Üzerinde Metilen Mavisinin Adsorpsiyonu. *El-Cezeri Fen ve Mühendislik Dergisi* Cilt: 6, No: 3, 2019 (817-829). <https://doi.org/10.31202/ecjse.583102>
- Zhang, J., Gao, J., Chen, Y., Hao, X., & Jin, X. (2017). Characterization, preparation, and reaction mechanism of hemp stem based activated carbon. *Results in Physics* 7, 1628–1633. <https://dx.doi.org/10.1016/j.rinp.2017.04.028>
- Zhang, L., Xu, L., Zhang, Y., Zhou, X., Zhang, L., Yasin, A., Wang, L. & Zhi, K. (2018). Facile synthesis of bio-based nitrogen- and oxygen-doped porous carbon derived from cotton for supercapacitors. *RSC* 8 (7):3869–77. <https://doi.org/10.1039/C7RA11475C>



Kahramanmaraş Sütçü İmam University

Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 13.04.2024
Kabul Tarihi : 22.05.2024

Received Date : 13.04.2024
Accepted Date : 22.05.2024

ESPEY KOLEMANİT ATIKLARININ MİKRODALGA YÖNTEMİYLE ZENGİNLEŞTİRİLMESİNDE CEVAP YÜZEY YÖNTEMİNİN (RSM) UYGULANMASI

APPLICATION OF THE RESPONSE SURFACE METHODOLOGY (RSM) TO THE ENRICHMENT OF ESPEY COLEMANITE WASTES BY MICROWAVE

Arzu KAHVECİOĞLU^{1*} (ORCID: 0000-0002-6570-6456)
Kırali MÜRTEZAOĞLU² (ORCID: 0000-0002-0810-2816)
Zehra ZEYBEK³ (ORCID: 0000-0002-1715-0844)
Ahmet AYDIN⁴ (ORCID: 0009-0004-4368-8244)

¹ Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kimya Mühendisliği Anabilim Dalı, Ankara, Türkiye

² Gazi Üniversitesi, Kimya Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye

³ Ankara Üniversitesi, Kimya Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye

⁴ Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Kütahya, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Arzu KAHVECİOĞLU, arzu.kahvecioglu@gazi.edu.tr

ÖZET

Bu makalede, Türkiye'deki Espey konsantratör tesisinde atık barajlarına gönderilen ince (-3 mm), %15.22 B₂O₃ içeren atıkların kimyasal, termal, mineralojik, tane boyutu özellikleri belirlenmiş ve atıklardaki borun zenginleştirilmesi, mikrodalga yöntemi uygulanarak araştırılmıştır. Çalışmada B₂O₃'ün zenginleştirilmesini, etkileyen bağımsız değişkenler olarak, mikrodalga cihazında kalma süresi ve mikrodalga gücü seçilmiştir. (+0.045) mm tane boyutu için kolemanit konsantre B₂O₃ tenörü (Y₁), konsantre ürün verim (Y₂), atık tenörü (Y₃) ve atık verimi (Y₄) bağımlı değişkenlerdir. (-0.045) mm tane boyutu için ise konsantre B₂O₃ tenörü (Y₅), ürün verimi (Y₆), atık tenörü (Y₇) ve atık verimi (Y₈) olarak tanımlanmıştır. Deneylerin istatistiksel tasarımı ve cevap yüzey yöntemi ile bu değişkenler, ikinci dereceden modellere uymuştur. Modelin yeterliliğini doğrulamak için design expert 12 paket programıyla varyans analizi ANOVA testi ve optimizasyonu yapılmıştır. (+0.045) mm ve (-0.045) mm tane boyutlarındaki Y₁ – Y₈'e kadar olan 8 modelin optimizasyonu sonucunda 490 watt mikrodalga gücü ve 35 dakika cihazda kalma süresi optimum değer olarak bulunmuştur. ANOVA varyans analizine göre modellerin geçerliliği Y₁, Y₂, Y₃, Y₄, Y₅, Y₆, Y₇, Y₈ verimi için belirlenen regresyon katsayıları R² değeri sırasıyla 0.9601, 0.8810, 0.9332, 0.8245, 0.8381, 0.8074, 0.7259 ve 0.8825 olarak bulunmuştur. Bu, deneysel değerlerin %95'inin modelden tahmin edilenlerle eşleştiğini göstermiştir. Çalışmanın sonucunda konsantre tenörü %33.33 B₂O₃'e yükselmiştir.

Anahtar Kelimeler: Kolemanit, mikrodalga, bor zenginleştirme, cevap yüzey yöntemi, optimizasyon

ABSTRACT

In this article, the chemical, thermal, mineralogical and grain size properties of fine (-3 mm), 15.22 % B₂O₃ containing wastes sent to tailings dams at the Espey concentrator facility in Turkey were determined and the enrichment of boron in the wastes was investigated by applying the microwave method. In the study, residence time in the microwave device and microwave power were selected as independent variables affecting the enrichment of B₂O₃. For (+0.045) mm grain size, colemanite concentrated B₂O₃ grade (Y₁), concentrated product yield (Y₂), waste grade (Y₃) and waste yield (Y₄) are dependent variables. It was defined as concentrated B₂O₃ grade (Y₅), concentrated product yield (Y₆), waste grade (Y₇) and waste yield (Y₈) for (-0.045) mm grain size. By the statistical design of the experiments and the response surface method, these variables fit quadratic models. To verify the adequacy of the model, variance analysis, ANOVA test and optimization were performed with the design

ToCite: KAHVECİOĞLU, A., MÜRTEZAOĞLU, K., ZEYBEK, Z., & AYDIN, A., (2024). ESPEY KOLEMANİT ATIKLARININ MİKRODALGA YÖNTEMİYLE ZENGİNLEŞTİRİLMESİNDE CEVAP YÜZEY YÖNTEMİNİN (RSM) UYGULANMASI. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 27(4), 1529-1543.

expert 12 package program. As a result of the optimization of 8 models from Y_1 to Y_8 with grain sizes of (+0.045) mm and (-0.045) mm, 490 watts of microwave power and 35 minutes of residence time in the device were found to be the optimum value.. According to ANOVA analysis of variance, the R^2 value of the regression coefficients determined for the validity of the models $Y_1, Y_2, Y_3, Y_4, Y_5, Y_6, Y_7, Y_8$ efficiency were found to be 0.9601, 0.8810, 0.9332, 0.8245, 0.8381, 0.8074, 0.7259 and 0.8825, respectively. This showed that 95% of the experimental values matched those predicted from the model. As a result of the study, the concentrate grade increased to 33.33% of B_2O_3 .

Keywords: Colemanite, microwave, boron enrichment, response surface methodology (RSM), optimization

GİRİŞ

Bor elementi metalle ametal arasında yarı iletken, farklı bileşik yapma kapasitesi ve nötronları absorbe özellikleri olan sanayide birçok alanda kullanılan hammaddedir. Bor mineralleri ise yapılarında farklı oranlarda bor oksit (B_2O_3) içeren doğal bileşiklerdir. Tinkal, kolemanit, üleksit ve kernit ticari yönden önemli bor mineralleridir. Madencilik sektöründe kullanılan çeşitli yöntemler ile bor mineralleri elde edildikten sonra fiziksel işlemlerden geçirmek suretiyle zenginleştirme yapılarak bor konsantrasi elde edilir. 2021 yılı için tahminen dünya bor ürünleri tüketiminin sektörel bazda dağılımını %50 cam, %17 tarım, %15 seramik firit ve %2 deterjan-temizlik sektörü oluşturmaktadır (Eti Maden İşletmeleri Bor Sektör Raporu, 2022).

İnşaat sektöründe yapılan bir çalışmada bor jipsinin harçlar üzerindeki etkisini anlamak için bor jipsinin mineral katkı olarak kullanılacağını araştırmışlardır. Bor jipsi içeren harç numunelerinin akış tablosu, eğilme ve basınç dayanımı, aşınma, karbonatlaşma, içine alma ve büzülme testleri yapılmış ve bor jipsinin harçta kütlece çimentonun %5-10'u kadar katkı maddesi olarak kullanılması tavsiye edilmiştir. Harcın sertleştirilmiş özellikleri, varyans analizi ve cevap yüzeyi yöntemi (RSM) regresyon modelleriyle belirlenmiştir. ANOVA sonuçlarına göre eğilme ve basınç dayanımının bor jipsini değiştirme oranından doğrudan etkilendiği belirlenmiştir (Sevim vd., 2019).

Yapılan başka bir çalışmada ham öğütülmüş kolemanit mineralinin beton dayanımına etkisi araştırılmış beton dayanımı üzerine etkisi araştırılmış %5 kadar ham öğütülmüş kolemanit katıldığında C30-37 beton sınıfı için istenen basınç dayanımı sağladığı bulunmuştur. Optimal kolemanit katkı oranı %3 olarak belirlenmiştir (Kara vd., 2023).

Borun sulu çözeltilerden verimli bir şekilde geri kazanılmasının araştırıldığı bir çalışmada yanıt yüzey yöntemi ile elde edilen (RSM) temas süresi, bor konsantrasyonu, adsorban dozajı ve pH'ı kapsayan temel işletim parametrelerinin bor geri kazanım verimliliğini elde etmek için en uygun koşulları araştırmışlardır. Bunun sonucunda 200 dakikalık bir temas süresi 1450 mg/lit'lik bir bor derişimi, 800 mg/lit'lik adsorban dozajı ve pH=7'yi optimum değer olarak bulmuşlardır. Ayrıca çalışma sonuçları sulu çözeltilerden bor geri kazanımında B Mg-Al-LDH'nin etkinliğini göstermektedir (Al-dhawi vd., 2023).

Şişen bir sistemde yeni bir sinerjistik ajan olarak kolemanitin etkisinin optimizasyonu çalışmasında (Atikler vd., 2006) polipropilenin alev geciktiriciliğini artırmak için asit kaynağı ve şişirme maddesi olarak amonyum polifosfat, karbofik madde olarak pentaeritrol ve sinerjistik madde olarak kolemanit madde içeren şişen bir sistem kullanılmış ve çalışmalarda D-optimal karışım tasarımı kullanılmıştır. Sınırlayıcı oksijen indeksini (LOI) tanımlayan kübik modelin istatistiksel analizine göre R-kare belirleme katsayısı 0.9881 bulunmuştur. Bu yanıtta göre optimum alev geciktiricili polipropilen kompozitleri belirlenmiştir.

Kolemanit mineraline ani olarak ısıtma ve soğutma ya da belirli bir sıcaklığa kadar ısıtma işlemleri yapıldığında kristal sularını kaybederek dağılma ve ufalanma özelliği göstermektedirler. Kolemanit cevherine ısı işlem uygulandığında belirli sıcaklıklarda kristal suyunu kaybedip ince boyutlara geçerek, tane boyutuna göre elek analizi gerçekleştirildiğinde, iri boyutlardaki gang ve ince boyutlarda konsantrasyon bor ürünü elde edilmektedir. (Çiftçi ve Atik, 2015).

Emet Bor İşletmesinin Hisarcık konsantratör tesisindeki kolemanit artığı 350-500°C sıcaklık ve 15-60 dakika zaman aralıklarında kalsinasyon işlemine tabi tutularak kalsine ürün elde edilmiştir. Pilot ölçekli testlerin sonucunda, kalsine konsantrasyon üretiminin optimum 450°C sıcaklık ve 25 dakika sürede %30 B_2O_3 tenör ve %92.96 B_2O_3 verim ile gerçekleştirileceği bulunmuştur (Büyükyıldız, 2007).

Bor cevheri genellikle fiziksel, kimyasal ve fizikokimyasal prosesleri içeren konsantrasyon teknikleri ile iyileştirilmektedir. Bir yöntem olarak mikrodalga ile ısıtma önerilebilir bu yöntem, malzemeler arasındaki etkileşime dayanması nedeniyle sentez ve malzeme proseslerinde daha geniş uygulamalara sahiptir. Mikrodalgalar önemli miktarda enerji ve işlem süresi tasarrufu sağlayabilir. Ayrıca mikrodalga ile ısıtmada malzemeye aktarılan enerjinin mekânsal dağılımının kontrol edilmesi mümkündür. Mikrodalgalarla enerji transferi geleneksel ısıtmada olduğu gibi öncelikli iletim veya konveksiyona değil dielektrik kaybına dayalıdır. Bu nedenle bir numunenin mikrodalga ısıtmaya maruz kalma eğilimi büyük ölçüde dielektrik özelliklerine bağlıdır. Yapılan bir çalışmada düşük dereceli Espey (-10 mm)'li kolemanitin zenginleştirilmesi amaçlanmıştır. Kullanılan Emet-Espey -Türkiye havzasındaki kolemanitin 10 mm boyutunda %28.87 B₂O₃ olduğu belirtilmektedir. Yaptıkları mikrodalga deneylerinde %88.13 verimli, %50.82 B₂O₃ konsantrasyonu elde etmişlerdir (Bütüner ve Aydın, 2016).

Bu çalışmanın temel amacında mikrodalga çalışmalarında düşük dereceli Espey kolemanitin boyutu (-3 mm) seçilmiştir. Bu boyuttaki numuneler maksimum 800 watt minimum 180 watt gücünde bir mikrodalga cihazında maksimum 60 dakika minimum 10 dakika süre ile tutularak daha önce denenmemiş eşanlı değişimini ele alan iki faktöriyel deneylerin merkezi kompozit tasarımına göre B₂O₃'ün zenginleştirilmesi deneyleri gerçekleştirilmiştir. Ve cevap yüzey yöntemine göre optimum mikrodalga gücü ve süresi bu çalışmada elde edilmiştir.

MATERYAL VE YÖNTEM

Atık Barajından Numune Alınması

DeneySEL çalışmalarda kullanılan ince (-3 mm) atık numunesi, Eti Maden İşletmeleri Genel Müdürlüğü Emet Bor İşletme Müdürlüğü, Espey konsantratör tesisi atık barajından numune alma teknikleri uygulanarak alınmıştır. Atık barajının değişik konumlarından alınan 100 kg atık numunesi Teknik Ateş Mukavim Malzeme San. ve Tic. Ltd. Şti. (Çorum) Kimyasal Analiz Laboratuvarında bir hafta dinlendirildikten sonra etüvde 106 °C'de yaklaşık 2 saat kurutulmuştur. Atık numunesi, bölücü ve konileme-dörtleme yöntemi ile temsili olarak ayrılmış, 1'er kg'lık torbalara konularak analiz ve deneylerde kullanılmak üzere hazır hale getirilmiştir.

Bor Numunesi Karakterizasyon Testleri

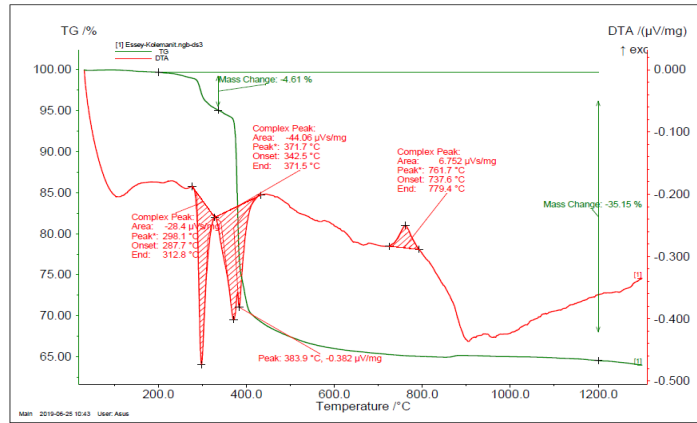
Karakterizasyon testleri kapsamında Emet Bor İşletme Müdürlüğü, Espey konsantratör tesisi ince (-3 mm) atıklarının kimyasal, ısıl ve mineralojik özellikleri incelenmiştir.

Kimyasal İnceleme

Karakterizasyon testleri kapsamında ilk olarak Ankara Üniversitesi Yer Bilimleri Uygulama ve Araştırma Merkezinde XRF Analizi ile Espey atık barajı numunesinin Specto X-Lab 2000 marka cihaz ile kimyasal analizi yapılmıştır. Tablo 1'de kimyasal analiz sonucu gösterilmiştir.

Isıl Özelliklerin İncelenmesi

Termo Gravimetrik Analiz (TGA) cihazı ile Diferansiyel Termal Analiz (DTA) cihazı ile analizler Ulusal Bor Araştırma Enstitüsü laboratuvarında bulunan, Netzsch marka Jupiter 449 F3 model 1650°C'ye kadar çıkabilen Rodyum fırına sahip TG/DTA cihazlarında gerçekleştirilmiştir. Çekimler Argon atmosferinde 25-1300°C aralığında yapılmıştır. Şekil 1'deki TGA ve DTA grafiğindeki difraktogramda toplamda %35.15'lik bir kütle kaybı gözlenmiştir. Şekil 2'deki TGA ve DSC grafiğindeki difraktogramda ise toplamda %57.11'lik bir kütle kaybı gözlenmiştir.



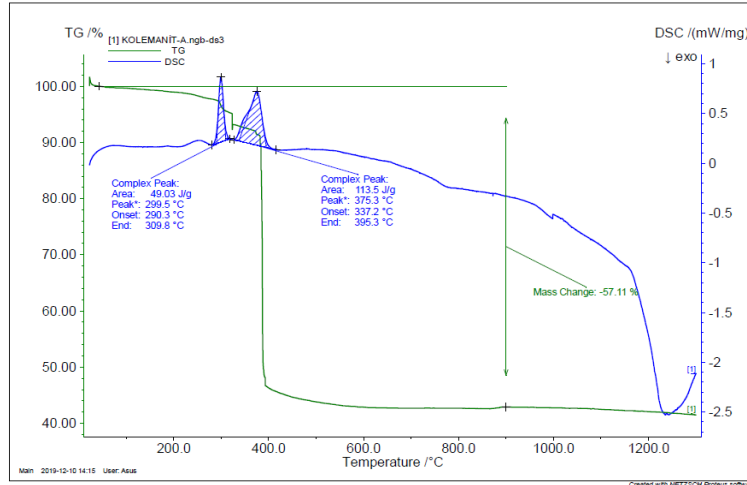
Şekil 1. Espey Atık Barajı Kolemanit Numunesinin TGA ve DTA Grafiği

Tablo 1. Espey Atık Barajı Kolemanit Numunesinin Kimyasal Analiz Sonucu

İçerik	Miktar (%)	İçerik	Miktar (ppm)	İçerik	Miktar (ppm)	İçerik	Miktar (ppm)
B2O3	15.22	Co	16.5	Cd	2	Bi	2.9
SiO2	24.86	Ni	55.1	In	2.3	Th	5.3
CaO	13.27	Cu	11.2	Sn	1.1	U	16.3
MgO	4.869	Zn	49.3	Sb	1.1		
Fe2O3	2.283	Ga	8	Te	1.4		
K2O	1.95	Ge	5.2	I	2.4		
Na2O	0.035	As	1647	Cs	638.8		
Al2O3	6.781	Se	0.6	Ba	181.8		
TiO2	0.2714	Br	2.5	La	7.3		
P2O5	0.0895	Rb	332.6	Ce	33.6		
SO3	0.1745	Sr	5558	Hf	3.1		
Cl	0.00408	Y	3.1	Ta	3.2		
V2O5	0.0155	Zr	96	W	6.3		
Cr2O3	0.0085	Nb	13.1	Hg	1.6		
MnO	0.0478	Mo	3.4	Tl	3.5		
K.K.	29.55	Ag	5.4	Pb	37.6		

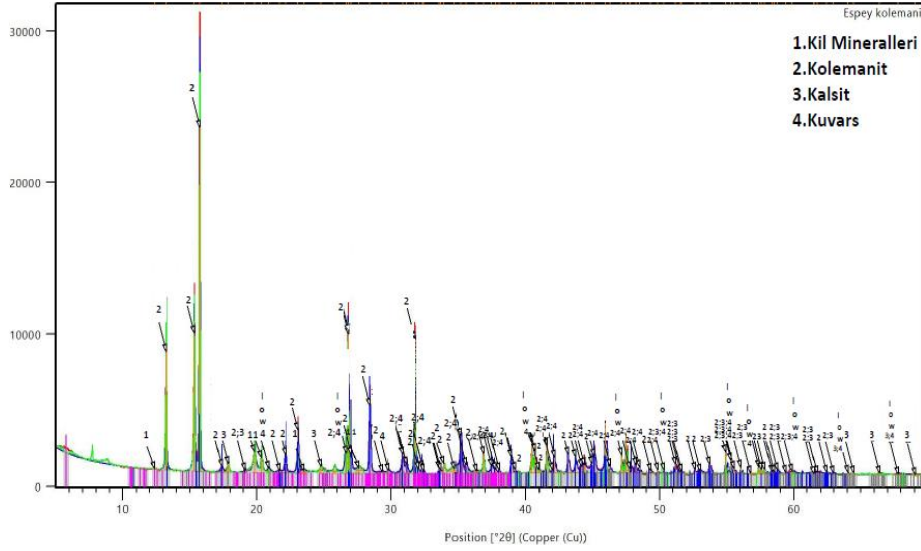
Tablo 2. Espey Atık Barajı Kolemanit Numunesinin Mineral Bileşimi

Mineral Bileşimi	Mineral (%)	Tane boyu (Mikron)
Kuvars	11	150
Kolemanit	14	210
Amfibol	12	180
Piroksen	11	175
Mika	09	135
Kil mineralleri	22	50
Kalsit	14	190
Diğerleri	7	-

**Şekil 2.** Espey Atık Barajı Kolemanit Numunesinin TGA ve DSC Grafiği

Mineralojik İnceleme

(-3 mm) atık numunesi üzerinde mineralojik yapının belirlenmesi için XRD (X-Işını Kırınımı) analizi yapılmıştır. Kolemanit numunelerinin mineralojik analizleri Ulusal Bor Araştırma Enstitüsü laboratuvarında bulunan, Panalytical marka Empeyan model XRD cihazı ile 5-70 °C (2θ) aralığında çekilmiş olup X ışın kaynağı olarak Cu tüp (1.54 nm) kullanılmıştır. Şekil 3'e göre difraktogramdaki piklere bakılacak olursa yapının büyük çoğunluğunun kolemanit olduğu görülmüştür. Tablo 2'de Espey atık barajı numunesinin mineral bileşimi yer almaktadır.



Şekil 3. Espey Atık Barajı Kolemanit Numunesinin XRD Grafiği

Tane Boyutu İncelemeleri

Deneylerde kullanılacak olan Espey Atık Barajı numunesinin %15.22 B_2O_3 içeren (-3 mm) atığın tane boyutunu dağılımını belirlemek amacıyla Espey atık barajı numunesinin elek analizi Çelikler Tunçbilek Termik Santral Laboratuvarında yapılmıştır. Tablo 3’de Espey atık barajı kolemanit numunesinin tane boyutlarına göre tenör dağılımları verilmiştir. Bu barajına ait numunelerde B_2O_3 dağılım tenörleri birbirine yakın olduğu için (+0.045) mm ve (-0.045) mm olmak üzere 2 fraksiyona ayrılarak mikrodalga deneyleri yapılmıştır. B_2O_3 miktarını artırmak için yapılan mikrodalga deneylerinde kullanılan Espey atık barajı kolemanit numunesinin (+0.045) mm ve (-0.045) mm tane boyutlarına göre tenör dağılımları Tablo 4’de verilmiştir. (+0.045) mm boyutundaki atık, toplam atığın ağırlıkça %76.19’unu oluştururken ortalama tenör değeri %15.78 B_2O_3 olarak bulunmuştur. (-0.045) mm boyutundaki atık, toplam atığın ağırlıkça %23.81’ini oluştururken ortalama tenör değeri %12.63 B_2O_3 olarak bulunmuştur. Bu sonuçlara göre tane boyutu incelidikçe tenör değeri, belirli boyuta kadar yükselmekte ve (-0.075) mm’den sonra azalmaktadır. Bor Trioksit analizlerinde Türk Standardları Enstitüsünün TS 13665:2017 Sanayide kullanılan borik asit ve bor trioksit-Bor trioksit tayini -Titrimetrik yöntemi kullanılmıştır.

Tablo 3. Espey Atık Barajı Kolemanit Numunesinin Tane Boyutlarına Göre Tenör Dağılımları

Tane boyutu (mm)	Ağırlık (%)	ΣEÜ (%)	ΣEA (%)	B_2O_3 (%)
+2	0.00	0.00	100.00	
-2+1	0.06	0.06	100.00	
-1+0.5	7.57	7.63	99.94	13.60
-0,5 +0.425	5.482	13.11	92.37	15.35
-0.425+0.300	9.454	22.56	86.89	17.07
-0.300+0.212	20.692	43.25	77.44	15.67
-0.212+0,125	17.916	61.17	56.75	17.75
-0,125+0.075	9.336	70.51	38.83	15.36
-0.075+0.045	5.68	76.19	29.49	15.64
-0.045	23.81	100.00	23.81	12.63
TOPLAM	100.00			

Tablo 4. Espey Atık Barajı Kolemanit Numunesinin (+0.045) mm ve (-0.045) mm Tane Boyutlarına Göre Tenör Dağılımları

Tane boyutu (mm)	Ağırlık (%)	ΣEÜ (%)	ΣEA (%)	B_2O_3 (%)
+0,045	76,19	76,19	100,00	15,78
-0,045	23,81	100,00	23,81	12,63
TOPLAM	100,00			

Mikrodalga Cihazı ile Deneysel Tasarım Çalışmaları

Mikrodalga cihazı ile 2 farklı tane boyutunda olan atık numuneleri zenginleştirilmiştir. Bunun için mikrodalga deneylerinde kullanılan cihaz 2450 MHz sabit frekans özelliğine ve maksimum 800 watt çıkış gücüne sahip

Samsung marka MS23F300EEK / TR modelindedir. Zenginleştirme sürecinin optimal koşulları B₂O₃ oranı (+0.045) mm ve (-0.045) mm tane boyutlarına ait mikrodalga deneyleri için konsantre ve atık olmak üzere optimum B₂O₃ ve onun verim değerleri gibi izleme değişkenlerine dayalı olarak deney tasarım yöntemi (DTY) kullanılarak araştırılmıştır. Bu çalışmada B₂O₃ zenginleştirmeyi etkileyen değişkenler, kolemanit atığının mikrodalga cihazında kalma süresi ve mikrodalga gücü iki değişken olarak atanmıştır. Kalma süresi için 10 ile 60 dakika arasındaki değerler mikrodalga gücü için 180 ile 800 watt arasındaki değerler seçilmiştir. Bu değerlerin deney tasarımında kullanılması için kodlanmış olarak her değişken için 5 seviye faktörü belirlenmiştir. Böylelikle sembolleri ile her değişkenin seviyeleri Tablo 5’de gösterilmiştir.

Tablo 5. Deneysel Ölçeğin Seviyeleri ve Bağımsız Test Değişkenleri

Gerçek değişkenler (x _j)	Sembol	Kodlanmış değişkenler X ₁ , X ₂				
		-1,41421	-1	0	+1	+1,41421
ξ ₁ : Zaman	dk	10	17,32	35	52,68	60
ξ ₂ : Güç	watt	180	270,80	490	709,20	800

Çalışmanın prensibi regresyonun varyansını ANOVA yöntemiyle analiz etmektedir. Bu yöntem 2.dereceden modellerin uyumunu doğrulamaktadır. Güven düzeyine göre (%95, %99 veya %99.99) en pratik terimler belirlendikten sonra regresyon denklemleri elde edilmiştir. Cevap Yüzey Yöntemine göre eşyanıt eğrileri ve yanıt yüzeyleri oluşturmak için sıralı bir süreç olarak kullanılmıştır (Yi vd., 2010). Bu sonuçlar doğrusal etkileri incelemek için kullanılmıştır. 2 gruba ayrılan deney matrisi 13 deneyden oluşmaktadır. Design-Expert 12.0 programı tarafından elde edilen 3 boyutlu grafiklerle işletim parametrelerinin sistem cevapları üzerindeki çoklu etkileri verilmiştir. Eşitlik 1 ile deney sayısı elde edilmiştir.

k: faktör sayısı (k=2)

$$N_f = 2^k = 4 \quad (1)$$

Deneysel tasarım yapılırken, kaç adet deneyin yapılacağı k < 5 için Eşitlik 2 ve k > 5 için Eşitlik 3’e göre hesaplanmıştır.

$$N = 2^k + 2k + n_0 \quad (k < 5) \quad (2)$$

$$N = 2^{k-1} + 2k + n_0 \quad (k > 5) \quad (3)$$

N: deney sayısı, k: bağımsız değişken sayısı ve n₀: merkezdeki deney sayısını göstermektedir (Duman, 2010).

2. derece eğrisel model için kodlanmış değerler gerçek değerlerle Eşitlik 4, 5 ve 6’ya göre hesaplanmıştır.

$$x_i = \frac{\xi_i - \xi_i^0}{\Delta \xi_i} \quad (4)$$

$$\Delta \xi_i = \frac{\xi_i^{max} - \xi_i^{min}}{2} \quad (5)$$

$$\xi_i^0 = \frac{\xi_i^{max} + \xi_i^{min}}{2} \quad (6)$$

Genel olarak deneylerin istatistiksel planlamasında matematiksel modellerin oluşturulması doğrusal ve doğrusal olmayan regresyon denklemleri şeklinde çoğu zaman 1. ve 2. dereceden polinomlarla ifade edilmiştir. Doğrusal model Eşitlik 7’de verilmiştir.

$$y = \beta_0 + \beta_1 \xi_1 + \beta_2 \xi_2 + \dots + \beta_k \xi_k + \varepsilon \quad (7)$$

Eşitlik 7’de; bağımlı değişken, y bağımsız değişken, ξ_i regresyon katsayısı, β_i ve deneysel hata, ε olarak ifade edilir. Modeldeki regresyon katsayıları elde edilen deney verilerinin regresyonu ile bulunur. Eşitlik 7’de bağımsız

değişkenlerde gerçek değerler ve kodlanmış olarak verilir. Birçok uygulamada gerçek değişkenler kodlanarak kullanılmaktadır. Bu kodlamada boyutsuz koordinat sisteminde en yüksek seviye +1, en düşük seviye -1 ve merkez noktası 0'dır (Köfter, 2021). Etkileşim terimlerini de içermektedir (Eşitlik 8).

Doğrusal Model

$$Y = f(X) = \beta_0 + \sum_{i=1}^2 \beta_i X_i + \sum_{\substack{j=1 \\ i < j}}^2 \beta_{ij} X_i X_j \quad (8)$$

Eşitlik 9'da Eşitlik 7'den farklı olarak bağımlı değişken üzerine bağımsız değişkenlerin birbiriyle etkileşimi ve kuadratik etkisi gösterilmiştir.

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^2 \beta_i X_i + \sum_{i=1}^2 \beta_{ii} X_i^2 + \sum \sum_{i < j} \beta_{ij} X_i X_j + \varepsilon \quad (9)$$

y: Tahmin edilen cevap, X_i : Bağımsız değişken, X_{i2} : Değişkenlerin kare etkileri, $X_i X_j$: Değişken etkileşim etkileri, β_0 : Sabit katsayı, β_i : Doğrusal regresyon katsayısı, β_{ii} : İkinci dereceden regresyon katsayısı, β_{ij} : Etkileşim regresyon katsayısı verilmiştir (Myers vd., 2016).

BULGULAR VE TARTIŞMA

Deney Tasarımı ve Merkezi Kompozit Tasarımı

Tüm araştırmalar Cevap Yüzey Yenileme (CYY), Merkezi Kompozit Tasarımı (MKT)'ye göre yapıldı. Tasarım yazılımı Dizayn Expert 12 kullanılarak B_2O_3 'ün mikrodalga ile zenginleştirilmesi işleminde toplanan tüm deneysel veriler incelenmiştir. Deney tasarımında, (+0.045) mm ve (-0.045) mm tane boyutları için konsantre ve atık numunede olmak üzere, konsantre B_2O_3 tenörü, konsantre ürün verimi, atık B_2O_3 tenörü ve atık verimi olmak üzere toplam 8 yanıtın, 2 bağımsız değişken sırasıyla konsantrenin mikrodalgada kalma süresi (X_1) ve mikrodalga gücü (X_2) ile arasındaki ilişkiyi bulmada bir merkezi kompozit tasarım seçilmiştir. Çalışılan sekiz yanıt Y_1 : (+0.045) mm tane boyutunda konsantre B_2O_3 tenörü, Y_2 : (+0.045) mm tane boyutunda konsantre ürün verimi, Y_3 : (+0.045) mm tane boyutunda atık tenörü ve Y_4 : (+0.045) mm tane boyutunda atık verimi, Y_5 : (-0.045) mm tane boyutunda konsantre B_2O_3 tenörü ve Y_6 : (-0.045) mm tane boyutunda konsantre ürün verimi Y_7 : (-0.045) mm tane boyutunda atık tenörü ve Y_8 : (-0.045) mm tane boyutunda atık verimidir. Tablo 6'da gösterildiği gibi faktör sayısı $k=2$ 'dir ve her faktör 5 seviyeye yükseltilmiştir. Toplam deney sayısı $2^k + 2k + n_0$ denkleminde göre matris $2^2 = 4$ faktöriyel deney + $2 \times 2 = 4$ eksenel + $n_0 = 5$ merkezi noktadan oluşan toplam deney sayısı 13 olarak hesaplanmıştır. Bağımlı değişken ile bağımsız değişken arasındaki deneysel verilerin 2.dereceden bir polinom regresyon modeline uydurulması ile belirlenmiştir. Aşağıdaki yanıt yüzey analizi kullanılarak oluşturulan 2.dereceden polinom regresyon modeli $Y_1, Y_2, Y_3, Y_4, Y_5, Y_6, Y_7, Y_8$ için bulunmuştur.

İkinci Derece Regresyon Modellerinin Uygunluğu

Deneysel parametreler cevap yüzey yöntemiyle birlikte merkezi kompozit tasarımı kullanılarak başarı ile optimize edilmiştir. Bu deney tasarımı kolemanit atığını mikrodalgada kalma süresi ve mikrodalga gücü parametrelerinin doğrusal, etkileşim ve ikinci dereceden etkilerinin B_2O_3 en yüksek zenginleştirme verimini bulan kombinasyonuna dayalı olarak optimize edilmiştir. Çoklu belirleme katsayıları incelenerek ve varyans analizleri yapılarak ikinci dereceden polinom modeline deneysel verilerin uygunluğu ve türetilen denklemin yanıtlardaki değişkenliği açıklayıp açıklamayacağını görmek için değerlendirilmiştir. Analitik gücü değerlendirmek için tek yönlü varyans analizi (ANOVA) testi kullanılmıştır. F testi ve p testi kullanılarak katsayıların anlamlılığı %95 güven düzeyinde ölçülmüştür (Lakens, 2013). F değeri artarken p değeri azalırsa bu tahmin edilen modelin önemini gösterir (Wu vd., 2011). Önemli olarak p değerleri $< 0.05 < 0.01$ ve < 0.0001 olduğunda model terimleri sırasıyla anlamlı, son derece anlamlı ve etkileyci bir şekilde anlamlı olduğunu göstermektedir.

(+0.045) mm Tane Boyutunda Konsantre B_2O_3 Tenörü (Y_1)

$$Y_1 = 33.28 + 0.4251X_1 + 0.0468X_2 - 0.0625X_1X_2 - 0.3075X_1^2 - 0.1550X_2^2 \quad (R^2 = 0.9601) \quad (10)$$

Eşitlik 10'a göre mikrodalgada kalma süresi (X_1), karesel terim X_1^2 ve mikrodalga gücünün karesi (X_2^2), katkısının önemi p değerleri < 0.05 'den olduğu Tablo 7'de de görülmektedir.

Tablo 6. (+0,045) mm ve (-0,045) mm Tane Boyutlarında Güç ve Zaman Değişkenlerine Karşı Konsantre B₂O₃ Tenörü ve Konsantre Ürün Verimi, Atık Tenörü ve Atık Verimi Değerlerini Açıklayan Doğrusal Olmayan Model İçin Deneysel Tasarımı

Deneysel No	Faktör 1: X ₁ A: Zaman dakika	Faktör 2: X ₂ B: Güç watt	Gerçek t, dakika t, ξ ₁	Gerçek E, watt E, ξ ₂	(+0,045) mm tane boyutu Cevap 1: Y ₁ Konsantre B ₂ O ₃ Tenör R ₁ (%)	(+0,045) mm tane boyutu Cevap 2: Y ₂ Konsantre Ürün Verim R ₂ (%)	(+0,045) mm tane boyutu Cevap 3: Y ₃ Atık Tenör R ₃ (%)	(+0,045) mm tane boyutu Cevap 4: Y ₄ Atık Verim R ₄ (%)	(-0,045) mm tane boyutu Cevap 5: Y ₅ Konsantre B ₂ O ₃ Tenör R ₅ (%)	(-0,045) mm tane boyutu Cevap 6: Y ₆ Konsantre Ürün Verim R ₆ (%)	(-0,045) mm tane boyutu Cevap 7: Y ₇ Atık Tenör R ₇ (%)	(-0,045) mm tane boyutu Cevap 8: Y ₈ Atık Verim R ₈ (%)
1	0	0	35	490	33,28	85,58	22,80	14,60	32,31	93,80	26,60	6,35
2	-1	-1	17,32	270,80	32,45	83,80	25,50	15,80	32,29	93,05	27,80	6,90
3	-1,41421	0	10	490	31,92	82,20	27,93	17,83	32,50	93,14	27,30	6,85
4	1,41421	0	60	490	33,37	85,78	22,30	14,25	32,28	94,30	26,00	5,80
5	1	-1	52,68	270,80	33,25	85,20	22,80	14,78	32,13	93,47	28,00	6,50
6	0	1,41421	35	800	33,10	85,30	23,80	15,10	32,30	93,60	27,00	6,58
7	0	0	35	490	33,28	85,58	22,80	14,60	32,31	93,80	26,60	6,35
8	0	-1,41421	35	180	32,80	84,00	24,00	16,00	32,24	93,50	27,50	6,70
9	0	0	35	490	33,28	85,58	22,80	14,60	32,31	93,80	26,60	6,35
10	-1	1	17,32	709,20	32,55	83,80	25,00	16,00	32,35	92,80	27,60	7,00
11	1	1	52,68	709,20	33,10	84,70	23,50	15,20	32,25	93,60	27,00	6,43
12	0	0	35	490	33,28	85,58	22,80	14,60	32,31	93,80	26,60	6,35
13	0	0	35	490	33,28	85,58	22,80	14,60	32,31	93,80	26,60	6,35

Tek başına değişken X_2 mikrodalga gücü anlamlı değildir. Regresyon katsayısı R^2 0.9601 olarak bulunmuştur. Bulunan modelden elde edilen yanıt değerlerinin anlamlı ve yüksek oranda deneysel verilerle uyumlu olduğunu göstermektedir. R^2 1'e yakın olduğunda deneysel ve tahmin edilen değerler arasında iyi bir uyum olduğunu gösterir (Myers vd., 2016). Benzer şekilde modellerin uyumu düzeltilmiş belirleme katsayısı ($R^2_{adjusted}$) 0.9316 olarak bulunmuştur. Bir modelin çok iyi uygun olduğu bu katsayıyla onaylanır ve korelasyon veya otokorelasyon arasındaki hataların olup olmadığı da Durbin Watson istatistiği ile belirlenir. Bu durumda düzeltilmiş belirleme katsayısının değeri kabul edilebilirdir.

Tablo 7 (+0.045) mm tane boyutunda konsantre B_2O_3 tenörü için varyans analizini (ANOVA) özetlemektedir. Fisher'in F-testi, ana faktörlerin ve bunların etkileşimlerini gösteren yanıtlar üzerindeki etkilerini incelemek için bu analizi gerçekleştirir. %95 güven düzeyi için p değerleri ne kadar küçükse (< 0.05), F istatistik oranı ne kadar büyükse karşılık gelen katsayı terimi de o kadar önemlidir. İncelenen faktörlerin tüm doğrusal ve etkileşim etkileri için F istatistik oranı p değeri Tablo 7'de de görüldüğü gibidir. F değerinin 1.32 ve 1.18'e sahip olduğu sırasıyla X_2 , X_1X_2 mikrodalga gücünün ve mikrodalga gücü ile mikrodalgada kalma süresinin etkileşimi model için önemsizdir. Şekil 4'de gözlenen ile tahmin edilen değerler arasındaki korelasyonu (+0.045) mm tane boyutunda konsantre B_2O_3 tenörü için verilmektedir. Şekil 4.(a)'da Y_1 için gözlenen ile deneysel verileri arasındaki korelasyonun çok iyi olduğunu göstermektedir. Bu grafikler hizalaması düz çizgiye yakın olan nokta bulutları ile karakterize edilir. Buda, modelin yanıt için yeterli olduğunu gösterir. Şekil 4.(b) ve 4.(c) kontur ve yüzey grafiklerinden (+0.045) mm tane boyutunda maksimum konsantre B_2O_3 tenörü (Y_1) 33.4'e karşılık gelen optimum mikrodalga cihazında kalma süresi (X_{1opt}) 35 dakika ve 490 watt (X_{2opt}) mikrodalga gücüne karşılık geldiği görülmektedir.

(+0,045) mm Tane Boyutunda Atık Numuneden Elde Edilen Konsantre Ürün Verimi (Y_2)

$$Y_2 = 85.58 + 0.9204X_1 + 0.1673X_2 - 0.1250X_1X_2 - 0.7812X_1^2 - 0.4512X_2^2 \quad (R^2 = 0.8810) \quad (11)$$

Tablo 8'deki RSM tasarımının istatistiksel analizine ve model denklemlerine dayanarak konsantre verimi doğrusal terimleri X_1 : mikrodalgada kalma süresi, sırasıyla X_1^2 , X_2^2 : mikrodalgada kalma süresinin ve mikrodalga gücünün ikinci dereceden terimleri her verim üzerinde önemli etkilere sahiptir. Ek olarak mikrodalgada kalma süresi ($p < 0.05$) olduğundan önemli ölçüde etkilemiştir. Y_1 'deki gibi aynı terimlerin (X_2 , X_1X_2) uyum eksikliği için karşıt gelen p değerleri ise sırasıyla 0.3613, 0.6218'dir. Tablo 8'de görülmektedir. Eşitlik (11) için R^2 0.8810 bulunmuştur. ($R^2 \gg 0.7$) regresyon katsayısının yüksek değeri iyi bir uyumu olduğunu Şekil 4.(d) göstermektedir. (+0.045) mm tane boyutunda atık numuneden elde edilen maksimum konsantre verimi (Y_2) 85.5 dir. Şekil 4.(e) ve 4.(f)'deki grafiklerden Y_2 'nin bu değerine karşılık gelen optimum değerler, maksimum konsantre B_2O_3 oranı (Y_1) için bulunan optimum değerler ile aynı bulunmuştur.

Tablo 7. (+0.045) mm Tane Boyutunda Konsantre B_2O_3 Tenör İçin İkinci Dereceden Polinom Modu İçin Varyans Analizi (ANOVA)

Faktörler	Kareler toplamı	Serbestlik derecesi	Ortalama kare	F değeri	p değeri
Model	2.23	5	0.4460	33.69	< 0.0001
x_1	1.45	1	1.45	109.19	< 0.0001
x_2	0.0175	1	0.0175	1.32	0.2879
x_1x_2	0.0156	1	0.0156	1.18	0.3133
x_1^2	0.6578	1	0.6578	49.69	0.0002
x_2^2	0.1671	1	0.1671	12.62	0.0093

Tablo 8. (+0.045) mm Tane Boyutunda Konsantre Ürün Verimi İçin İkinci Dereceden Polinom Modu İçin Varyans Analizi (ANOVA)

Faktörler	Kareler toplamı	Serbestlik derecesi	Ortalama kare	F değeri	p değeri
Model	12.17	5	2.43	10.37	0.0039
x_1	6.78	1	6.78	28.86	0.0010
x_2	0.2239	1	0.2239	0.9536	0.3613
x_1x_2	0.0625	1	0.0625	0.2662	0.6218
x_1^2	4.25	1	4.25	18.08	0.0038
x_2^2	1.42	1	1.42	6.03	0.0437

(+0.045) mm Tane Boyutunda Atık B₂O₃ Tenörü (Y₃)

$$Y_3 = 22.80 - 1.52X_1 - 0.0104X_2 + 0.3000X_1X_2 + 1.08X_1^2 + 0.4731X_2^2 \quad (R^2 = 0.9332) \quad (12)$$

Eşitlik 12 için regresyon katsayısı R² 0.9332 bulunmuştur. R²'nin 1'e daha yakın değeri olması regresyonun çok iyi olduğunu ifade etmektedir. (+0.045 mm) tane boyutunda atıkta bulunan B₂O₃ tenörü (Y₃)'ü ifade eden model denklemde yine aynı terimler (X₂, X₁X₂) önemsizdir. Bunu bu terimler için Tablo 9'daki p değerlerine bakarak 0.05'den büyük olmasından anlayabiliriz. Sırasıyla 0.9577 ve 0.2973'dür. F testi değerleri de bu terimler için F_{kritik} 3.69 değerinden küçük kalmaktadır. Sırasıyla 0.0030, 1.27'dir. Model mikrodalgada kalma süresi X₁ ve onun karesi X₁², mikrodalga gücünün karesi X₂² olarak daha yalın ifade edilebilir. Modelin uyumluluğu Şekil 4.(g)'de verilerin doğru üzerindeki yakın dağılımından anlaşılmaktadır. Şekil 4.(h) ve 4.(i)'de sırasıyla kontür ve yüzey grafiklerinden atıktaki minimum B₂O₃ tenörü 23 olarak okunmaktadır. Bu değer için optimum değerler X₁ ve X₂ sırasıyla 35 dakika ve 490 watttır.

Tablo 9. (+0.045) mm Tane Boyutunda Atık Tenör İçin İkinci Dereceden Polinom Modu İçin Varyans Analizi (ANOVA)

Faktörler	Kareler toplamı	Serbestlik derecesi	Ortalama kare	F değeri	p değeri
Model	27,75	5	5,55	19,55	0,0006
x ₁	18,49	1	18,49	65,12	< 0,0001
x ₂	0,0009	1	0,0009	0,0030	0,9577
x ₁ x ₂	0,3600	1	0,3600	1,27	0,2973
x ₁ ²	8,12	1	8,12	28,61	0,0011
x ₂ ²	1,56	1	1,56	5,48	0,0517

(+0.045) mm Tane Boyutunda Atık Numuneden Elde Edilen Atık Verimi (Y₄)

$$Y_4 = 14.60 - 0.8604X_1 - 0.0816X_2 + 0.0550X_1X_2 + 0.6325X_1^2 + 0.3875X_2^2 \quad (R^2 = 0.8245) \quad (13)$$

Atık numunede konsantr verimini mikrodalgada kalma süresi (X₁) ve mikrodalga gücü (X₂)'ye bağlayan 2. dereceden model Eşitlik 13 ile verilmiştir. Bu modelin uyumluluğu R² 0.8245 bulunmuştur. Model katsayılarının ANOVA analizine göre geçerliliği Tablo 10'da sunulmuştur. Bu tabloya göre yine doğrusal etki olarak tek başına X₁'in etkisi, X₁X₂'nin birbirini etkilediği etkileşim teriminin p değerlerinin 0.05'den küçük bulunmasıyla önemsiz oldukları kanıtlanmıştır. Şekil 4.(j) modelin deneysel verilerle uyumluluğunu göstermektedir. Şekil 4.(k) ve 4.(l)'de yüzeyin minimum değerine yani 14.5'i karşılayan optimum değerler 35 dakika kalma süresi ile yine 490 watt mikrodalga gücüdür.

Tablo 10. (+0.045) mm Tane Boyutunda Atık Verim İçin İkinci Dereceden Polinom Modu İçin Varyans Analizi (ANOVA)

Faktörler	Kareler toplamı	Serbestlik derecesi	Ortalama kare	F değeri	p değeri
Model	9,43	5	1,89	6,58	0,0141
x ₁	5,92	1	5,92	20,65	0,0027
x ₂	0,0533	1	0,0533	0,1858	0,6794
x ₁ x ₂	0,0121	1	0,0121	0,0442	0,8431
x ₁ ²	2,78	1	2,78	9,70	0,0170
x ₂ ²	1,04	1	1,04	3,64	0,0980

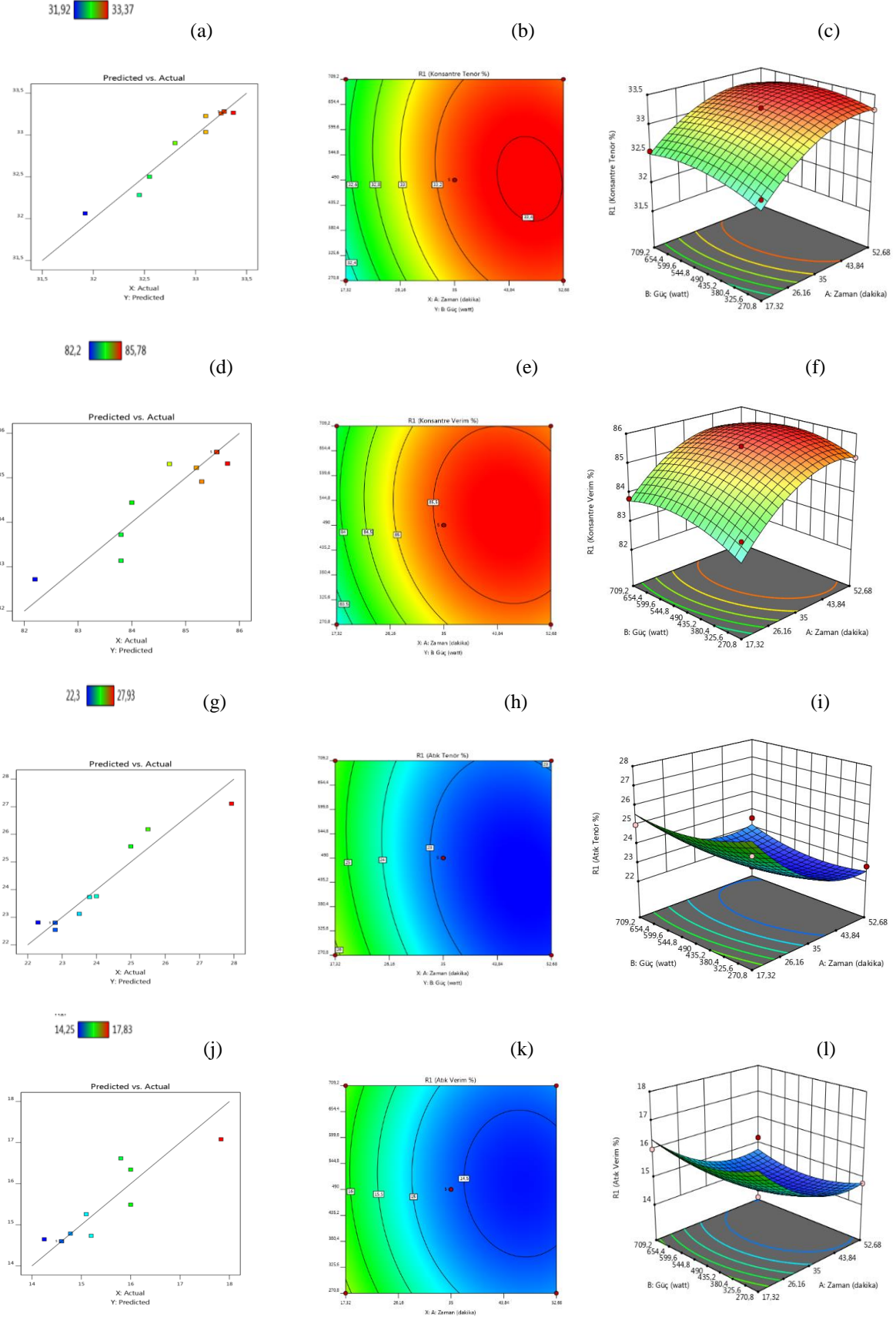
(-0.045) mm Tane Boyutunda B₂O₃'ün Konsantr ve Atıkta Olmak Üzere Tenör, Verim Modelleri (Y₅, Y₆, Y₇, Y₈)

$$Y_5 = 32.31 - 0.0714X_1 + 0.0331X_2 + 0.0150X_1X_2 + 0.0213X_1 - 0.0387X_2^2 \quad (R^2 = 0.8381) \quad (14)$$

$$Y_6 = 93.80 - 0.3576X_1 + 0.0027X_2 + 0.0950X_1X_2 + 0.1412X_1^2 - 0.2262X_2^2 \quad (R^2 = 0.8074) \quad (15)$$

$$Y_7 = 26.60 - 0.2798X_1 - 0.2384X_2 - 0.2000X_1X_2 + 0.1875X_1^2 + 0.4875X_2^2 \quad (R^2 = 0.7259) \quad (16)$$

$$Y_8 = 6.35 - 0.3069X_1 + 0.0175X_2 - 0.0425X_1X_2 + 0.0438X_1^2 + 0.2012X_2^2 \quad (R^2 = 0.8825) \quad (17)$$



Şekil 4. (+0.045) mm Tane Boyutunda Modelin (a), (d), (g), (j) Korelasyon, Güç ve Zamanın Konsantr Tenörüne, Konsantr Verimine, Atık Tenörüne, Atık Verimine Etkisini Gösteren (b), (e), (h), (k) Kontur ve (c), (f), (i), (l) 3D Yüzeği Grafikleri

Eşitlik 14 (-0.045) mm tane boyutundaki konsantre B_2O_3 tenörü (Y_5) için mikrodalgada kalma süresi ve mikrodalga gücünün fonksiyonu olarak 2.dereceden bir modelle ifade edilmektedir. Regresyon katsayısı $R^2 = 0.8381$ elde edilmiştir. Yine R^2 'nin 0.7 den büyük olması nedeniyle eşitliğin 2.derece modele uygun olduğu görülmektedir. Ayrıca doğrusal model için yapılan faktöriyel deney tasarımı sonucu $R^2=0$ bulunmuştur. Bu nedenle (-0.045) mm tane boyutundaki konsantre B_2O_3 verim (Y_6), atık numunede konsantre B_2O_3 tenörü Y_7 ve atık numunede atık verimi Y_8 için bulunan sırasıyla Eşitlik 15, 16 ve 17'nin regresyon katsayılarının da $R^2 > 0.7$ olması 2.derece modele daha uygun olduklarını Şekil 5.(m)'deki deneysel veri ile model uyum doğrusundaki verilerin sıklığından kanıtlamaktadır. Tablo 11'de Y_5 modeli için X_1 mikrodalga kalma süresi ve X_2 mikrodalga gücünün tek başlarına doğrusal etkisi ve X_2^2 mikrodalga gücünün quadratik etkisinin önemli olduğunu, onların p değerlerine baktığımızda 0.05'den küçük ve aynı terimlere karşılık gelen F değerlerinede bakıldığında $F_{kritik} = 3.69$ değerinden büyük olmasından anlaşılmaktadır. Bu model (-0.045) mm tane boyutunda, (+0.045) mm tane boyutunda farklı olarak her iki parametrenin doğrusal etkisinin yanında mikrodalga gücünün quadratik etkisinin Şekil 5.(n) ve 5.(o)'daki kontur ve cevap yüzeyi grafiklerinden görülmektedir. Optimum değerler X_1 35 dakika, X_2 290 watt olarak aynı bulunmuştur.

Tablo 11. (-0.045) mm Tane Boyutunda Konsantre Tenör İçin İkinci Dereceden Polinom Modu İçin Varyans Analizi (ANOVA)

Faktörler	Kareler toplamı	Serbestlik derecesi	Ortalama kare	F değeri	p değeri
Model	0,0658	5	0,0132	7,25	0,0108
x_1	0,0408	1	0,0408	22,46	0,0021
x_2	0,0088	1	0,0088	4,83	0,0640
x_1x_2	0,0009	1	0,0009	0,4957	0,5041
x_1^2	0,0031	1	0,0031	1,73	0,2298
x_2^2	0,0104	1	0,0104	5,75	0,0476

Tablo 12'de Y_6 konsantre atık verimi için yine Y_5 deki modelin geçerliliğini gösteren p ve F değerlerine bakıldığında Y_6 içinde aynı terimler uygundur.

Tablo 12. (-0.045) mm Tane Boyutunda Konsantre Verim İçin İkinci Dereceden Polinom Modu İçin Varyans Analizi (ANOVA)

Faktörler	Kareler toplamı	Serbestlik derecesi	Ortalama kare	F değeri	p değeri
Model	1,50	5	0,3007	5,87	0,0191
x_1	1,02	1	1,02	19,96	0,0029
x_2	0,0001	1	0,0001	0,0011	0,9742
x_1x_2	0,0361	1	0,0361	0,7045	0,4290
x_1^2	0,1388	1	0,1388	2,71	0,1438
x_2^2	0,3561	1	1,3561	6,95	0,0336

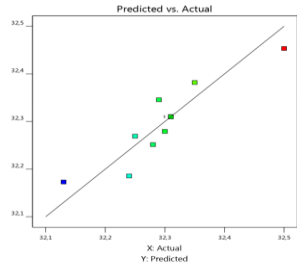
Bunu takip eden Y_7 atık tenörü ve Y_8 atık verimi Tablo 13 ve Tablo 14'e göre aynı terimler önemli olmuştur.

Tablo 13. (-0.045) mm Tane Boyutunda Atık Tenör İçin İkinci Dereceden Polinom Modu İçin Varyans Analizi (ANOVA)

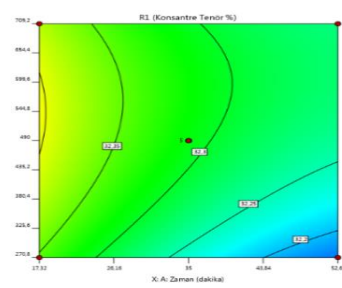
Faktörler	Kareler toplamı	Serbestlik derecesi	Ortalama kare	F değeri	p değeri
Model	3,00	5	0,6006	3,71	0,0585
x_1	0,6263	1	0,6263	3,87	0,0900
x_2	0,4546	1	0,4546	2,81	0,1378
x_1x_2	0,1600	1	0,1600	0,9876	0,3534
x_1^2	0,2446	1	0,2446	1,51	0,2589
x_2^2	1,65	1	1,65	10,21	0,0152

32,13 

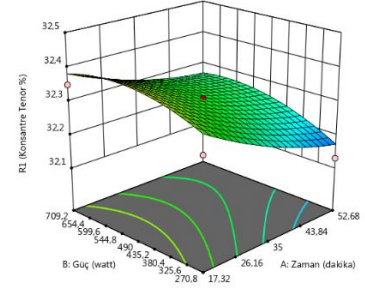
(m)



(n)

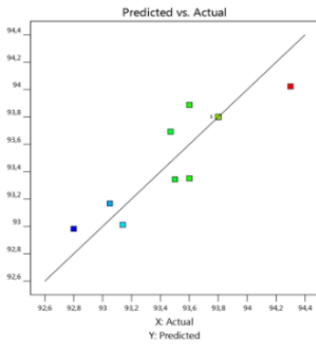


(o)

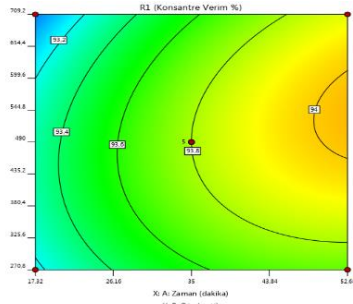


92,8 

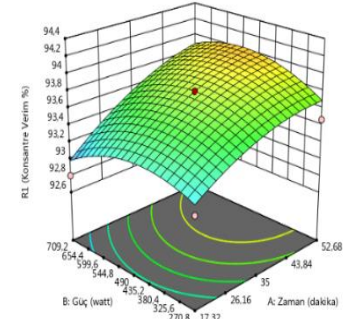
(p)



(r)

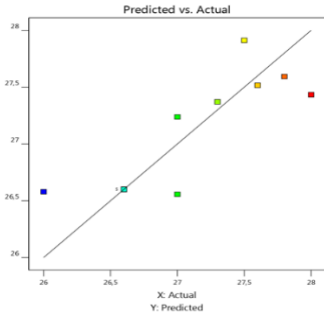


(s)

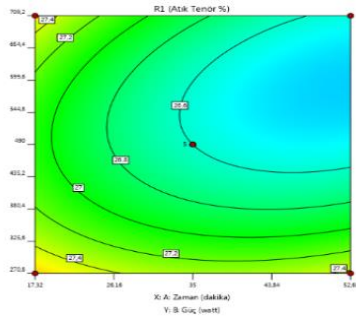


26 

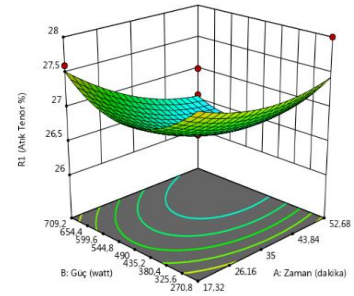
(t)




(u)

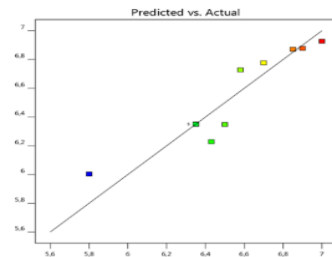


(v)

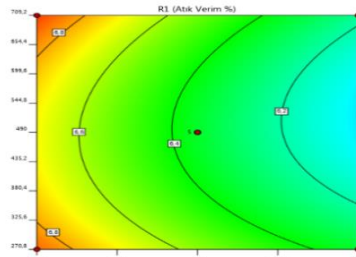


5,8 

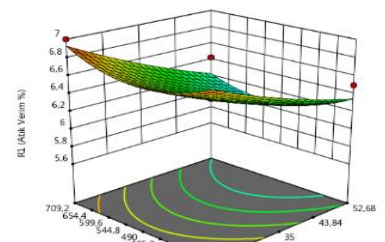
(w)



(y)



(z)



Şekil 5. (-0.045) mm Tane Boyutunda Modelin (m), (p), (t), (w) Korelasyon, Güç ve Zamanın Konsantrite Tenörüne Konsantrite Verimine, Atık Tenörüne, Atık Verimine Etkisini Gösteren (n), (r), (u), (y) Kontur ve (o), (s), (v), (z) 3D Yüzeyi Grafikleri

Tablo 14. (-0.045) mm Tane Boyutunda Atık Verim İçin İkinci Dereceden Polinom Modu İçin Varyans Analizi (ANOVA)

Faktörler	Kareler toplamı	Serbestlik derecesi	Ortalama kare	F değeri	p değeri
Model	1,05	5	0,2094	10,52	0,0037
x ₁	0,7533	1	0,7533	37,83	0,0005
x ₂	0,0024	1	0,0024	0,1225	0,7366
x ₁ x ₂	0,0072	1	0,0072	0,3629	0,5659
x ₁ ²	0,0133	1	0,0133	0,6687	0,4404
x ₂ ²	0,2818	1	0,2818	14,15	0,0071

Y₅, Y₆, Y₇, Y₈ için Şekil 5'de (m), (n), (o), (p), (r), (s), (t), (u), (v), (w), (y), (z) grafiklerine bakıldığında optimum değer aynı bulunmuştur. Bütün grafikler için watt gücü ve zaman arttıkça konsantre tenörü ve verimi artmıştır. Atıkta da watt gücü ve zaman arttıkça konsantre tenörü ve verimi azalmıştır.

SONUÇ

Bu çalışmada geliştirilen modellerin yeterliliğini doğrulamak için değişkenlerin varyans analizi regresyon (ANOVA) yapılmıştır. ANOVA aşağıdakileri değerlendirmek için kullanılır. Değişken faktörler arasındaki etkileşimler ve bunların ilgili yanıtlarıdır (Adelodun vd., 2019). Model şu şekilde bulunabilir: p değeri 0.05'ten düşük olduğunda anlamlı model Tablo 8 sonuçları modelin öngörülebilirliğinin %99.9'luk güven düzeyi tahmin edilen yanıtın deneysel olarak elde edilen yanıtla karşılık geldiğini gösterir. Modellerin deneysel Fisher % değerleri (+0.045) mm tane boyutunda konsantre tenörü ve konsantre verimi için sırasıyla 28.37 ve 10.88, atık tenörü ve atık verimi için 15.68 ve 6.00 mertebesindedir.

F testi deneysel bir değer için daha dikkat çekici olduğunu ve F kritik değerinden (=3.69) daha yüksek olması modelin anlamlı olduğunu gösterir. Aslında modellerin önemli olduğunu görüyoruz. ($F_{\text{konsantre tenör}} > F_{\text{kritik}}$, $F_{\text{konsantre verimi}} > F_{\text{kritik}}$) Böylece p değeri ne kadar küçükse (< 0,05) model o kadar anlamlıdır. Bu nedenle küçük p değerleri modellerin konsantre tenörü zenginliği ve konsantre tenörü verimliliği açısından istatistiksel olarak anlamlıdır. Model seçilen değişken aralığında tahmin için yeterlidir. Süreç değişkenlerinin anlamlılığı p ve F değeri ile kontrol edilmiştir. Sonuçlar yüksek F değerleri, düşük p değerlerine sahip olduğu için kullanılan modellerin anlamlı olduğunu göstermektedir. Konsantre (+0.045) mm tane boyutunda tenör zenginliği ve tenör verimine yönelik varyans analizi ANOVA Tablolarında özetlenmektedir.

Dolayısıyla bu optimizasyon çalışmasından elde edilen yüksek R² değerleri nihai indirgenmiş modeller kullanılarak yapılan tahminler için yeterlidir. Ayrıca düzeltilmiş R²'nin yaklaşık yüksek değeri geliştirilen modellerin tahmin edici bir şekilde tanımlama yeteneğini gösterir. Tahmin edilen regresyon modelindeki bir değişken, değişkenin p değeri 0.005 den küçükse anlamlı olarak belirtilir. Bir tane doğrusal değişken (X₁), 2 tane 2.dereceden terim (X₁², X₂²) hem konsantre ve atık tenörü hem de konsantre ve atık verimi üzerinde önemli etkiler (p < 0.05) olduğunu göstermiştir. Konsantre zenginleştirmesinde yer alan tüm faktörlerin (X₁, X₂) doğrusal, ikinci dereceden etkisi olarak önemli olduğundan, mikrodalgada kalma süresi ve mikrodalga gücü konsantre tenörünün zenginleştirilmesinde önemli ölçüde katkıda bulunmuştur.

Çoklu belirlenen katsayıların irdelenmesiyle ve varyans analizi performansı ile deneysel veri ikinci derece polinom modele uymuştur ve çıkartılan eşitlikler, cevaptaki geçerliliği tanımlayabilmek için değerlendirilmiştir.

ANOVA, bulunan regresyon eşitliğini analiz etmek için kullanılmıştır. F testi ve p testi kullanarak, katsayıların önemi %95 güven aralığında ölçülmüştür. F testinin sonuçları her bir katsayı değişkeninin anlamlılığını göstermiştir, Mikrodalga kalma süresi ile mikrodalga gücü r arasındaki etkileşimin önemsizliği ortaya çıkan p değeri ile belirlenmiştir.

Eğer p değeri, F değeri artarken azalıyorsa tahmin edilen modelin anlamlı olduğunu göstermektedir. Daha da önemlisi, p değerleri < 0.05, < 0.01 ve < 0.001 olduğunda model terimleri, sırasıyla anlamlı, son derece anlamlı ve etkileyici derecede anlamlıdır. Ek olarak, model terimleri, p değeri 0.05'den büyük değerleri için anlamsız olduğu bulunmuştur.

Optimizasyon sonucunda Kolemanit atığındaki B₂O₃ oranı %15.22'den %33.33'e 490 watt mikrodalga gücü ve 35 dakika kalma süresinde ulaşılmıştır.

KAYNAKLAR

- Atikler, U., Demir, H., Tokatlı, F., Tıhminlioğlu, F., Balköse, D., Ülkü, S., (2006). Optimisation of the effect of colemanite as a new synergistic agent in an intumescent system. *Polymer Degredation and Stability* . 91, 1563-1570.
- Adelodun, B., Ajibade, F.O., Ogunshina, M.S., Choi, K., (2019). Dosage and settling time course optimization of Moringa oleifera in municipal wastewater treatment using response surface methodology. *Desalin. Water Treat.* 167, 45–56.
- Büyükyıldız, E. (2007). Emet Borik Asit Fabrikası Atıklarından Bor'un Kazanılması. Yüksek lisans tezi, Dumlupınar Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 52s, Kütahya.
- Bütüner, R., Aydın, A., (2016). Enrichment of Low Grade Eti Mine-Espey Colemanite Stocks Using Microwave Methods, *Journal of Environmental Science and Engineering A5* 327-332.
- B. Al-dhawi, S. Kutty, N. Almahbashi, A. Alawag, N. Almahbashi, F. Al-Towayti, A. Algamili, N. Aminu, A. Al-Mekhlafi, A. Birniwa, A. Jagaba, (2023) Optimal parameters for boron recovery in a batch adsorption study: Synthesis, characterization, regeneration, kinetics, and isotherm studies, *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*. 8, 100508.
- Çiftçi, H., Atik, S., (2015). Kolemanit Artığının Mekanik Aşındırma ve Isı ile Dağıtma Yöntemleri ile Zenginleştirilmesi. 19(1), 57-62.
- Duman, N. (2010). AISI 1040 ve AISI 4140 Çeliklerinin Dinamik Sürtünme Katsayısının Cevap Yüzey Metodu ile İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi, Cumhuriyet Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 40s, Sivas.
- Eti Maden İşletmeleri Genel Müdürlüğü, (2021 Yılı bor sektör raporu, (Mayıs 2022)
- Köfter, B. (2021). Yün Yıkama Atık Suyunun Koagülasyon Flokülasyon Prosesiyle Arıtımının Cevap Yüzey Metodolojisiyle Optimizasyonu ve Arıtma Tesisi Tasarımı. Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 48-49, Ankara.
- Kara, C., Küçük, S., Küçük Sert, T., (2023). Improvement of the durability of concrete by substitution of raw ground colemanite. *Case Studies in Construction Materials*. 19, e02393
- Lakens, D., (2013). Calculating and reporting effect sizes to facilitate cumulative science: a practical primer for t-tests and ANOVAs. *Front. Psychol.* 4, 863. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2013.00863>.
- Myers, R.H., Montgomery, D.C. and Anderson - Cook, C.M. (2016). Response surface methodology: process and product optimization using designed experiments. John Wiley and Sons.
- Sevim, U.K., Öztürk, M., Ontürk, S., Balçıklanlık Bankır, M., (2019). Utilization of boron waste borogypsum in mortar. *Journal of Building Engineering*. 22, 496-503.
- TS 13665, (2017). Sanayide kullanılan borik asit ve bor trioksit-Bor trioksit tayini -Titrimetrik yöntem. Türk Standartları Enstitüsü. Ankara.
- Wu, M.C., Lee, S., Cai, T., Li, Y., Boehnke, M., Lin, X., (2011). Rare-variant association testing for sequencing data with the sequence kernel association test. *Am. J. Hum. Genet.* 89, 82–93. <https://doi.org/10.1016/j.ajhg.2011.05.029>.
- Yi, S, Su, Y, Qi, B, Su, Z, Wan, Y, (2010). Application of response surface methodology and central composite rotatable design in optimizing the preparation conditions of vinyltriethoxysilane modified silicalite/polydimethylsiloxane hybrid pervaporation membranes. *Separation and Purification Technology* 71(2), 252- 262.



Kahramanmaraş Sutcu Imam University

Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi: 19.04.2024
Kabul Tarihi: 11.05.2024

Received Date: 19.04.2024
Accepted Date: 11.05.2024

ATIKSUDAN BOYA GİDERİMİNDEKİ GELİŞMELER: ADSORPSİYON TEKNOLOJİSİ VE GELECEĞE YÖNELİK BEKLENTİLER

ADVANCES IN DYE REMOVAL FROM WASTEWATER: ADSORPTION TECHNOLOGY AND FUTURE PROSPECTS

Hakan YILDIZ¹ (ORCID: 0000-0002-2181-7226)

¹ Harran Üniversitesi, Bozova Meslek Yüksekokulu, Çevre Teknolojileri Bölümü, Şanlıurfa, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Hakan YILDIZ, hyildiz@harran.edu.tr

ÖZET

Su kaynaklarının boya ile kirlenmesi hem insan sağlığı hem de çevre için önemli bir sorun teşkil etmektedir. Son zamanlarda, adsorpsiyon teknolojisinin kullanımı, etkinliği ve maliyet verimliliği nedeniyle boyaların sudan uzaklaştırılması için umut verici bir yaklaşım olarak ortaya çıkmıştır. Bu derleme makalesi, adsorpsiyon süreçleri yoluyla boyaların sudan uzaklaştırılmasındaki gelişmelere kapsamlı bir genel bakış sunmaktadır. Hem doğal hem de sentetik malzemeler dahil olmak üzere çeşitli adsorbanlar, boyaları sudan uzaklaştırma kapasiteleri açısından incelenmiştir. Adsorpsiyon etkileşimlerinin altında yatan mekanizmalar aydınlatılmış ve boya giderme verimliliğini etkileyen faktörler tartışılmıştır. Adsorpsiyon yoluyla sudan boya gideriminde gelecekteki gelişmeler için beklentiler, sürdürülebilir ve ölçeklenebilir çözümlere duyulan ihtiyaç vurgulanarak kapsamlı bir şekilde araştırılmıştır. Mevcut zorlukların üstesinden gelmek ve boya gideriminin genel verimliliğini artırmak için yeni malzemelerin entegrasyonu, proses optimizasyonu ve hibrit teknolojilerin geliştirilmesi için öneriler sunulmuştur. Adsorpsiyona dayalı boya giderimindeki ilerlemenin ve gelecekteki eğilimlerin bu kapsamlı değerlendirmesi, herkes için güvenli ve erişilebilir içme suyu sağlama hedefi doğrultusunda çalışan araştırmacılar, politika yapıcılar ve uygulayıcılar için değerli bilgiler sağlamaktadır.

Anahtar Kelimeler: Atıksu arıtma, boya giderimi, adsorpsiyon

ABSTRACT

The contamination of water sources with dyes poses a significant problem for both human health and the environment. In recent times, the use of adsorption technology has emerged as a promising approach for removing dyes from water due to its effectiveness and cost-efficiency. This review article provides a comprehensive overview of the advancements in the removal of dyes from water through adsorption processes. Various adsorbents, including both natural and synthetic materials, have been examined for their capacities in removing dyes from water. The underlying mechanisms of adsorption interactions are elucidated and the factors influencing dye removal efficiency are discussed. The expectations for future developments in dye removal from water through adsorption are thoroughly explored, emphasizing the need for sustainable and scalable solutions. Suggestions for the integration of new materials, process optimization, and the development of hybrid technologies are proposed in order to overcome current challenges and enhance the overall efficiency of dye removal. This comprehensive evaluation of the progress and future trends in adsorption-based dye removal provides valuable insights for researchers, policy makers, and practitioners working towards the goal of providing safe and accessible drinking water for all.

Keywords: Wastewater treatment, dye removal, adsorption

GİRİŞ

Nüfus artışı, kentleşme ve sanayileşme, gezegenimiz üzerinde önemli bir etkiye sahip olan çok sayıda çevre sorununa neden olmuştur. Hava kirliliği, su kirliliği, kara ve denizlerin bozulması bugün karşı karşıya olduğumuz başlıca sorunlardan bazılarıdır (Adeleye vd., 2023). 1950 yılında dünya nüfusu sadece 2,5 milyar iken 1990 yılında 5 milyara yükselmiştir. Nüfustaki bu kayda değer artışın devam etmesi beklenmekte olup, Birleşmiş Milletler 2050 yılına kadar küresel nüfusun 9 milyara kadar ulaşabileceğini öngörmektedir (United Nations, 2019). Artan nüfusla birlikte, temiz içme suyuna erişim giderek daha önemli hale gelmektedir. Ne yazık ki, dünya nüfusunun çoğunluğu hala güvenli içme suyuna erişmekte zorlanıyor. Atık su, çeşitli insan faaliyetlerinde kullanılmış ve daha sonra kirleticiler, kimyasallar veya diğer maddelerle kirlenmiş herhangi bir su olarak tanımlanır. Bu kategori, ilk kullanımından sonra çevreye salınan hem evsel, endüstriyel, ticari hem de tarımsal kaynaklı suyu kapsar (İdrissi vd., 2023). Atık su, organik ve inorganik kirleticiler, patojenler, besinler, ağır metaller, boyar maddeler ve çeşitli tehlikeli maddelerden oluşan çok çeşitli kirleticiler içerebilir (Ciğeroğlu, vd., 2024). Atık suyun uygun şekilde yönetilmesi ve arıtılması, halk sağlığının korunması, çevrenin korunması ve sürdürülebilir su kaynağı için zorunludur. Atık su arıtma süreci, çeşitli fiziksel, kimyasal ve biyolojik yöntemlerle kirliliklerin ve zararlı maddelerin ortadan kaldırılması veya azaltılmasını içerir (Arslan vd., 2024; Daverey vd., 2019). Arıtma süreçleri eleme, çökeltme, filtrasyon, adsorpsiyon, biyolojik oksidasyon, dezenfeksiyon ve membran filtrasyonu ve ileri oksidasyon gibi ileri yöntemler de dahil olmak üzere çeşitli tekniklerden oluşmaktadır (Silva vd., 2023; Fiyadh vd., 2023; Asheh vd., 2021). Atık su olarak da bilinen arıtılmış atık su, temizlik derecesine ve tabii tutulduğu arıtma seviyesine bağlı olarak su ekosistemlerine uygun şekilde deşarj edilme veya sulama, endüstriyel işlemler veya yeraltı suyunun yeniden doldurulması gibi çeşitli amaçlar için kullanım alanına sahiptir (Yıldız & Yüksel, 2024).

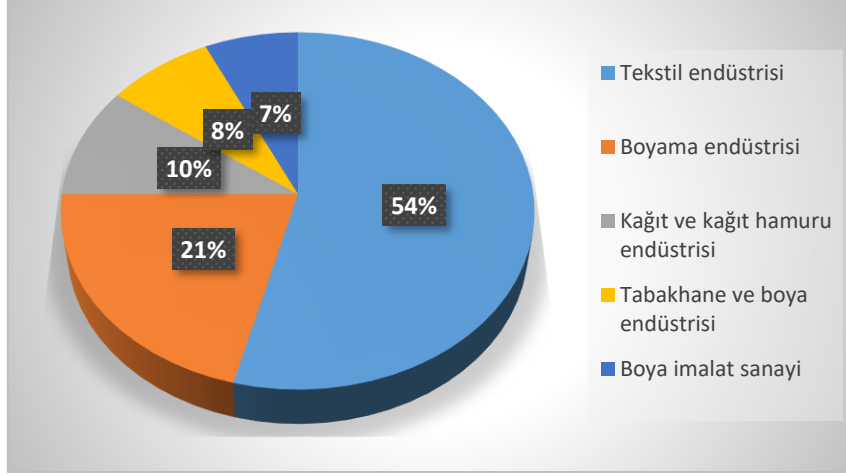
Yukarıda da bahsedildiği gibi suyu kirleten farklı kirlilik türleri vardır ve boyalar başlıca kirletici kategorilerinden biridir (Yıldız & Yüksel, 2023; Chequer vd., 2009). Boyaların su sistemlerine girmesi, suyu kullanım için uygunsuz hale getirir ve genellikle arıtılmasında zorluklar çıkarır. Bu durum, boyaların karmaşık moleküler yapısına ve birçok endüstriyel boyanın oldukça kararlı ve doğal bozulmaya karşı dirençli sentetik kaynaklardan elde edilmesine bağlanabilir (Gupta vd., 2021; Deniz & Yıldız, 2019b).



Şekil 1. Farklı Boya Sınıflarının Neden Olduğu Tehlikeli Etkiler

Boyalar renk veren kimyasal bileşiklerdir ve çeşitli ürünlerin renklendirilmesi için kozmetik, baskı ve plastik endüstrilerinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Doğal ve sentetik olmak üzere iki farklı boya kategorisi vardır. İlki, herhangi bir kimyasal işleme tabii tutulmadan bitkiler, hayvanlar, mineraller ve böceklerden elde edilir (Yagub vd., 2014). Öte yandan, sentetik boyalar kimyasal sentez yoluyla üretilir, bu da onları oldukça esnek ve canlılar için tehlikeli hale getirir. Ticari sentetik boyalar, renk tonu, bileşim ve uygulama teknikleri gibi faktörlere dayalı olarak birçok şekilde sınıflandırılabilir. Boyalar, sulu bir ortamda çözündüklerinde yüklerine göre, özellikle katyonik, anyonik veya iyonik olmayan boyalar olarak da kategorize edilebilir (Khan vd., 2023; Sasmaz vd., 2021). Boyaların

çevresel etkileri, üretim sürecinden atık yönetimine kadar birçok faktörü içerebilir. Bazı boyalar, üretim aşamasında kullanılan kimyasallar nedeniyle toksik olabilir ve atık sulara veya toprağa zarar verebilir. Ayrıca, boyalı yüzeylerin çevredeki ekosistemlere ve su kaynaklarına doğrudan veya dolaylı olarak salınması, eko-toksikolojik etkilere neden olabilir. Bu etkiler arasında sucül organizmaların zarar görmesi, habitat kaybı ve biyolojik çeşitliliğin azalması gibi sonuçlar yer alabilir (Dutta vd., 2021). Şekil 1, sınıflandırmadan kaynaklanan çeşitli sağlık etkilerini göstermektedir.



Şekil 2. Çevreye Boya Salınımına Neden Olan Başlıca Endüstriler (Samsami vd., 2020)

Tekstil ve diğer sanayi sektörlerinde boya üretimi ve uygulaması, doğrudan boya içeren atık su oluşumuna yol açmaktadır (Yıldız vd., 2023). Çevreye boya salınımına neden olan başlıca endüstriler Şekil 2'de gösterilmektedir. Tekstil endüstrileri (%54) dünya çapında çevrede görülen mevcut boya atıklarının yarısını oluştururken, bunu boyama endüstrileri (%21), kâğıt ve kâğıt hamuru endüstrileri (%10), tabakhane ve boya endüstrileri (%8) ve boya imalat endüstrileri (%7) takip etmektedir. Çevre yönetmeliklerine göre, atık sularda toksik boyaların varlığı kabul edilemez olarak görülmektedir. Bunun nedeni, boya moleküllerinin düşük biyolojik parçalanabilirlik oranına sahip olmaları ve su ortamlarında kalıcı olmalarıdır. Ayrıca, bu moleküller fotoliz ve oksitleyici maddelere karşı dirençlidir ve bu da zararlı etkilerine katkıda bulunur (Deniz & Yıldız, 2019a).

Tekstil boya, kumaşların renklendirilmesi veya desenlendirilmesi için kullanılan kimyasal maddelerdir. Bu boyalar, kumaş liflerine nüfuz ederek istenilen renk veya deseni oluştururlar. Tekstil boya, genellikle sulu çözeltiler halinde veya pigment formunda gelirler ve kumaş yüzeyine uygulanarak veya boyama işlemi sırasında kumaşa daldırılarak kullanılırlar. Sentetik boyaların sanayi sektöründe kullanımı, oksitleyici maddeler, ısı ve ışık gibi faktörlere karşı dayanıklılık gösteren organik moleküllerin varlığı ile karakterize edilir. Ayrıca, bu moleküller aerobik sindirime karşı dayanıklılık göstererek endüstriyel kullanım için oldukça cazip hale gelmektedir. Bununla birlikte, renkli atık suların çevreye deşarjının canlı organizmalar üzerinde zararlı etkileri olduğu gözlemlenmiştir (Azimi vd., 2021; Quansah vd., 2020; Othmani vd., 2019; Karcher vd., 2002). Boya atıklarının deşarjı su toplulukları üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Bunun nedeni, sulu sistemlerdeki belirli organizmalara zarar verebilecek parçalanma ürünlerinin potansiyel toksisitesidir. Boyaların varlığı ışığın nüfuz etmesini engelleyerek fotosentez sürecinde aksamalara ve sucül yaşam ekosistemi üzerinde zararlı etkilere yol açmaktadır. Sentetik boyalar karsinogenez ile ilişkilendirilmiştir ve kötü huylu tümörlere yol açan alerjik reaksiyonlara neden olabilir. Ticari olarak kullanılan sentetik boyaların çoğu fotodegradasyona ve biyodegradasyona karşı direnç göstermektedir. Bu tür boyaların solunması yaygın solunum sorunları tehlikesi yaratır ve bağışıklık sistemini de tehlikeye atabilir. Ayrıca, boyaların cilt tahrişine, burun tıkanıklığına veya kaşıntısına, göz tahrişine ve hapşirmaya neden olduğu bilinmektedir (Key vd., 2024; Sharma vd., 2021).

Sonuç olarak, akarsuyun doğal döngüsü bozulur ve çevrenin estetik değeri azalır. Sudaki ve tekstil atık suyundaki boya konsantrasyonunun tipik olarak sırasıyla 1 mg/L ve 10-200 mg/L olduğu ve bu miktarın dikkate değer bir miktar olduğu unutulmamalıdır (Kausar vd., 2023).

Bu çalışmanın temel amacı, atıksudan boya giderimi konusundaki durumu değerlendirmek ve özellikle adsorpsiyon teknolojisinin bu alandaki rolünü vurgulamaktır. Endüstriyel boyahaneler ve benzeri tesisler, üretim süreçlerinde kullanılan kimyasallar nedeniyle atık sularda çeşitli boya kirleticilerini oluşturur. Bu kirleticilerin etkili bir şekilde arıtılması, çevre kirliliğinin azaltılması ve su kaynaklarının korunması için kritik önem taşır. Ayrıca, adsorpsiyon

teknolojisinin atıksudan boya giderimindeki güçlü yönlerini ve potansiyelini ele alarak, bu teknolojinin mevcut durumu ve gelecekteki beklentileri tartışmayı hedeflemektedir. Adsorpsiyonun etkili bir şekilde boya kirleticilerini uzaklaştırmak için nasıl kullanılabileceği, mevcut araştırma bulguları ve endüstriyel uygulamalar üzerinden incelenecektir. Bu çalışma, atıksudan boya giderimi alanında çalışan araştırmacılar, mühendisler ve çevre koruma uzmanları için bir kaynak olmayı amaçlamaktadır ve adsorpsiyon teknolojisinin potansiyelini vurgulayarak, çevresel sürdürülebilirlik ve su kaynaklarının korunması konularında bilgilendirmeyi hedeflemektedir.

ATIK SU ARITMA YÖNTEMLERİ

1990'ların sonlarında, boya çıkış suyu deşarj limiti olmadığından, boya giderme yöntemleri olarak kullanılan ön su arıtma prosesleri dengeleme ve çökeltme idi (Robinson vd., 2001). Biyolojik olarak parçalanamayan boyaların kullanımı, bu atık suların arıtılması için uygun olmadıklarından hem birincil hem de ikincil konvansiyonel sistemler için bir zorluk teşkil etmektedir. Sonuç olarak, ileri oksidasyon ve biyolojik prosesler de dahil olmak üzere boya atık suları için potansiyel arıtma proseslerini araştırmak üzere çeşitli çalışmalar yapılmıştır. İleri oksidasyon, KOİ'nin azaltılmasında ve askıda katı maddelerin giderilmesinde etkinlik gösterirken, atık sudan rengin giderilmesinde etkisiz olduğu kanıtlanmıştır. Benzer şekilde, boya atık suyunun karmaşık bileşimi ve yüksek organik içeriği nedeniyle, biyolojik proseslerin kullanımı da verimli arıtma ve saflaştırma elde etmede sınırlı kalmıştır (Kumari & Kumar, 2023; Feuzer vd., 2022; Dinçer, 2020; Suzuki vd., 2020). Atık sulardan boyaların giderilmesi için flokülasyon/koagülasyon, biyolojik arıtma, ileri oksidasyon işlemleri, ozonlama, adsorpsiyon ve membran filtrasyonu gibi çeşitli arıtma yöntemleri kullanılmıştır (Tablo 1).

Tablo 1. Atıksudan Boya Giderme Teknolojileri Avantaj-Dezavantajları

Teknikler	Avantajlar	Dezavantajlar	Referans
Kimyasal yöntemler			
Ozonlama	Ozon, atık su miktarında herhangi bir artışa yol açmadan gaz halinde kullanılabilir. Çamur üretimi söz konusu değildir.	Maddenin yarı ömrü kısadır ve sadece yirmi dakika sürer. Ayrıca, prosedürün uygulanmasıyla ilgili masraflar da oldukça yüksektir.	(Lim vd., 2022)
Fotokimyasal			
Sodyum hipoklorit (NaOCl)	Çamur üretimi ve hoş olmayan kokuların varlığı önemli ölçüde azaltılmıştır.	Yan ürünler oluşur ve aromatik aminler açığa çıkar.	(Bonetta vd., 2021)
Elektrokimyasal imha	Azo bağlarının bölünmesinin başlaması ve hızlanması gözlenir. Çamur birikiminin olmaması ve kimyasal tüketiminin minimum düzeyde olması dikkat çekicidir.	Boyaların giderim hızı daha yüksek, akış hızlarıyla ters orantılıdır.	(Rajoria vd., 2021)
Fenton Ayırıcı	Reaktifin maliyeti düşükken, prosedürün etkinliği önemli ölçüde yüksektir.	Üretim ve çamur bertarafına ilişkin sorunlar.	(Ghernaout vd., 2020)

Biyolojik yöntemler

Aerobik biyobozunma	Bu işlemin maliyeti nispeten düşüktür ve özellikle azo-boyaların giderilmesi için faydalıdır.	Mikroorganizmalar uygun ortam nedeniyle büyür, işlem hızı azalır.	(Han vd., 2020)
Anaerobik biyobozunma	Yan ürünlerin enerji kaynağı olarak kullanılması son derece uygulanabiliridir.	H ₂ S ve CH ₄ gazını serbest bırakmak için aerobik bir ortamda ek arıtma gereklidir.	

Fizikokimyasal yöntemler

Adsorpsiyon	Çok çeşitli boyalar etkili bir şekilde ortadan kaldırılabılır.	Bazı adsorbanlar için yüzey alanı nispeten düşüktür ve adsorbanların maliyeti yüksektir.	(Yıldız vd., 2023)
Membran filtrasyonu	Tüm boyalar etkili bir şekilde uzaklaştırılır.	Önemli miktarda konsantre çamur üretilir.	(Hube vd., 2020)
İyon değişirme	Adsorbanlar kaybolmaz, bunun yerine yenilenirler.	Bu özel yöntem, özellikle dispers boyalar olmak üzere tüm boya türlerinin giderilmesinde etkili olmayabilir.	(Swanckaert vd., 2022)
Işınlama	Laboratuvar ölçeğinde oksidasyon etkin bir şekilde gerçekleştirilir.	Yüksek konsantrasyonda çözünmüş oksijene ihtiyaç vardır.	(Masula vd., 2022)
Elektrokoagülasyon	Ekonomik açıdan uygulanabilir.	Filtrasyon, flokülasyon ve çamur üretimini içeren daha ileri işlemler gereklidir.	(Shahedi vd., 2020)

ADSORPSİYON TEKNOLOJİSİ İLE SUDAN BOYA GİDERİMİ

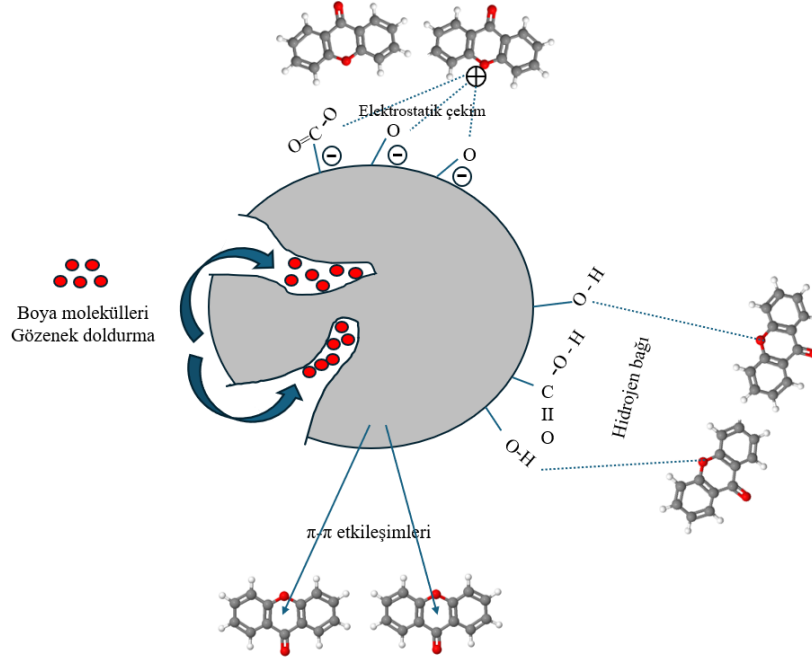
Adsorpsiyon, bir maddenin yüzeyine başka bir maddenin bağlanması sürecidir. Bu süreç, atık sularındaki organik ve inorganik kirleticilerin giderilmesinde etkili bir yöntem olarak öne çıkmaktadır. Adsorpsiyon yöntemi, kolay erişilebilirliği, ekonomik olması ve daha yüksek oranda kirletici giderimi sağlaması nedeniyle diğer tüm proseslerden daha rekabetçidir. Endüstriyel su arıtma kriterlerini ve tüm standartlarını karşılayan bu tür adsorbanların araştırılması aynı zamanda düşük maliyetli, çevre dostu, yüksek verimliliğe sahip ve büyük ölçekte kullanılabilirliği mümkündür (Dolas, 2023; Yıldız & Yuksel, 2023; Alagha vd., 2020; Sharifi Pajaie vd., 2018; Tang vd., 2017). Boyaların adsorban yüzeyine adsorpsiyonu, hidrojen bağı, π - π etkileşimleri, elektrostatik çekim ve hidrofobik etkileşim gibi çeşitli mekanizmalar tarafından yönetilen bir süreçtir (Şekil 3). Yüzey kompleksleşme mekanizması, iyonların adsorbanın yüzey fonksiyonel gruplarına bağlanmasının yanı sıra adsorban ve adsorbat arasındaki elektrostatik etkileşimi de içerir (Genli vd., 2022; İzgi vd., 2019; Baytar vd., 2018).

Adsorpsiyonu etkileyen faktörler

Adsorpsiyon, bir maddenin yüzeyine başka bir maddenin moleküllerinin veya iyonlarının tutunması sürecidir. Bu süreci etkileyen birçok faktör bulunmaktadır. Bu faktörler, adsorpsiyon sürecinin karmaşıklığını ve çeşitliliğini yansıtır. Adsorpsiyonun pratik uygulamalarında, bu faktörlerin dikkate alınması ve kontrol edilmesi önemlidir (Shahir vd., 2020).

Adsorbatın ve Adsorbanın Özellikleri

Adsorbatın özellikleri: Adsorbanın yüzeyine bağlanan moleküllerin yapısal özellikleri, boyutu, yükü, polaritesi ve kimyasal özellikleri adsorpsiyon sürecini etkiler. Adsorbanın özellikleri: Adsorbanın yüzey alanı, yapısal özellikleri, porozite, yüzey kimyası ve yüzey reaktivitesi adsorpsiyon kapasitesini belirler.



Şekil 3. Boya Gideriminde Yer Alan Farklı Adsorpsiyon Mekanizmaları

Sıcaklık

Genellikle, sıcaklık arttıkça fiziksel adsorpsiyon azalırken, kimyasal adsorpsiyon artar. Ancak bu, adsorbat ve adsorbanın özelliklerine ve spesifik adsorpsiyon koşullarına bağlı olarak değişebilir.

Basınç

Fiziksel adsorpsiyon, adsorpsiyon basıncı ile doğrudan ilişkilidir. Basınç arttıkça, adsorpsiyon miktarı artar. Bunun nedeni, artan basıncın adsorbatın yüzeye tutunma eğilimini artırmasıdır.

Adsorpsiyon Ortamı

Adsorpsiyon süreci, adsorbat ve adsorban arasındaki etkileşimlerin yanı sıra ortamın özellikleri tarafından da etkilenir. Örneğin, çözeltideki pH değeri, iyonik kuvvetler, çözücü kimyasal yapısı ve sıcaklık gibi faktörler adsorpsiyon sürecini etkileyebilir.

Yüzey Alanı ve Porozite

Adsorbanın yüzey alanı, adsorpsiyon kapasitesini doğrudan etkiler. Daha yüksek yüzey alanına sahip adsorbanlar, daha fazla adsorbatı çekebilir. Ayrıca, adsorbanın porozitesi, adsorbat moleküllerinin yüzeyine daha fazla erişim sağlayarak adsorpsiyon kapasitesini artırabilir.

Adsorbatın Konsantrasyonu

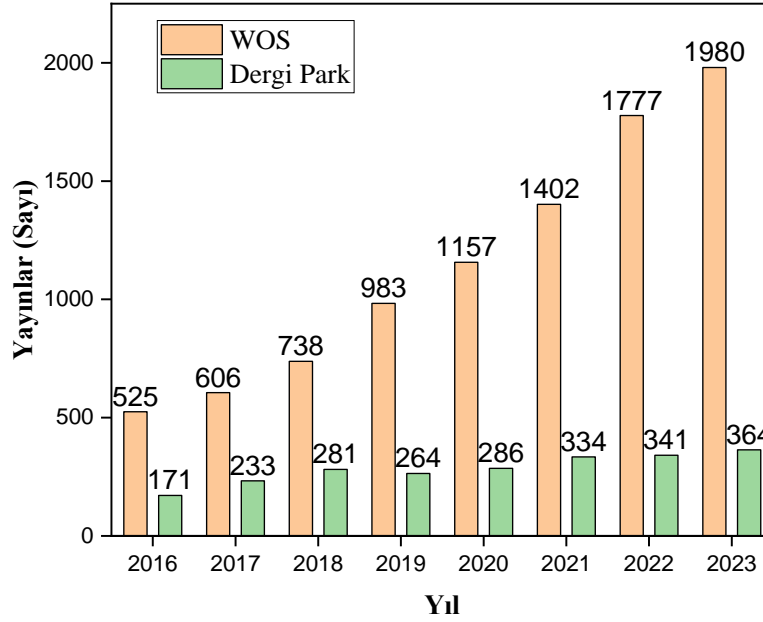
Adsorbatın başlangıç konsantrasyonu, adsorpsiyon sürecinin hızı ve kapasitesi üzerinde belirleyici bir faktördür. Daha yüksek başlangıç konsantrasyonları, daha yüksek adsorpsiyon miktarlarına yol açabilir.

Çözücü Etkisi

Adsorbatın ve adsorbanın çözücü içindeki çözünürlüğü, adsorpsiyon sürecini etkileyebilir. Çözücü, adsorbat ve adsorban arasındaki etkileşimleri değiştirerek adsorpsiyon kapasitesini artırabilir veya azaltabilir.

Boyaların giderilmesi için çeşitli adsorbanlara genel bakış

Şekil 4'te adsorpsiyon teknolojisinin atık su arıtımı alanındaki önemi ve artan kullanımı görülmektedir. 7 yılı kapsayan veriler, araştırmacıların, mühendislerin ve endüstri profesyonellerinin atık sudan kaynaklanan boya kirliliğini azaltmak için adsorpsiyon teknolojisine daha fazla odaklanmaya başladığını göstermektedir. Buna dayanarak, adsorpsiyon teknolojisinin etkinliği ve uygulanabilirliği konusunda artan bir farkındalığı yansıtabilir ve potansiyel olarak gelecekte bu alandaki araştırma ve uygulamalarda daha fazla artışa yol açabileceği söylenebilmektedir.



Şekil 4. Atıksudan Adsorpsiyon İle Boya Giderim Çalışmalarındaki Yayın İstatistikleri (Kaynak: Web of Science (WOS) ve Dergi Park, Anahtar Kelimeler: Atıksu, Boya Giderimi, Adsorpsiyon, Erişim tarihi: 5 Nisan 2024)

Atık sulardan boya giderimi için ticari aktif karbon, iyon değiştirici reçineler, selüloz bazlı malzemeler, ticari aktif alümina, silika jeller vb. gibi farklı adsorbanlar kullanılmaktadır (Alvarado vd., 2020; Aabdullah vd., 2018; Largitte & Pasquier, 2016; Li vd., 2011). Tablo 2, farklı adsorbentler kullanılarak maksimum adsorpsiyon kapasiteleri q_{max} (mg/g) hakkında bilgi vermektedir. Veriler, boya adsorpsiyonu için Langmuir izoterm modeli kullanılarak elde edilmiştir.

ELEŞTİRİLER VE GELECEK PERSPEKTİFLERİ

Atık sudan boya giderimi için adsorpsiyon teknolojisi, etkinliği ve çok yönlülüğü nedeniyle dikkat çekmiştir. Bununla birlikte, eleştiriler ve zorluklar da yok değildir.

Eleştiriler:

Seçici Adsorpsiyon

Birçok adsorban belirli boyalara karşı seçicilik gösterir ve bu da onları atık sudan çok çeşitli boyaların giderilmesinde daha az etkili hale getirir (Zhou vd., 2019).

Adsorbent Rejenerasyonu

Kullanılmış adsorbentlerin rejenerasyonu enerji yoğun ve maliyetli olabilir, bu da prosesin ekonomik uygulanabilirliğini azaltır (Elfving vd., 2021).

Laboratuvar ölçekli çalışmalar

Literatürdeki çalışmalar umut verici sonuçlar ortaya koysa da adsorpsiyon proseslerinin verimlilik kaybı olmadan endüstriyel seviyelere ölçeklendirilmesi bir zorluk olmaya devam etmektedir (Operti vd., 2021).

Rekabetçi Adsorpsiyon

Atık sudaki diğer kirlenmelerin varlığı, adsorpsiyon bölgeleri için boyalarla rekabet ederek prosesin etkinliğini azaltabilir (Chen vd., 2021).

Tablo 2. Adsorpsiyon ile Atıksudan Boya Giderim Çalışmaları

Adsorbent	Boya	pH	Adsorpsiyon Kapasitesi	Referans
Kitosan Kaplı Pamuk Elyaf Kompozit	Remazol Parlak Kırmızı F3B	7	169.33 mg/g	(Salman vd., 2023)
Amin Fonksiyonlu Karbon Nano Tüpler	Mordant Siyah Boya 11	2	33.33 mg/g	(Qazi vd., 2023)
Mezo Gözenekli Ag-MOF	Malakit Yeşili	8	809.71 mg/g	(Aljohani vd., 2023)
Kitosan Gömülü Kompozit	Metil Oranj	5.5	175.45 mg/g	(Rehan vd., 2023)
Kişniş Bitkilerinden Üretilen Aktif Karbon	Metil Oranj ve Rodamin-6G	2-10	467.29 mg/g ve 143.47 mg/g	(Bhat vd., 2023)
Huş Ağacı Atıklarından Biyoçar	Asit Kırmızısı 18	5.2	545.2 mg/g	(dos Reis vd., 2023)
<i>Prosopis Juliflora</i> kökünden üretilen aktif karbon	Metilen Mavisi	7.07	38.75 mg/g	(Vasiraja vd., 2023)
Manyetik gümüş metal-Organik Nanokompozit	Gentian Menekşe Boyası	9	169 mg/g	(Mogharbel vd., 2023)
Zeolit	Kongo Kırmızı	2-3	666.5 mg/g	(Imessaoudene vd., 2023)
Manyetik Kitosan-Grafen Oksit Nanokompoziti	Safranin-O ve İndigo Karmin	3-7	112.6 ve 66.15 mg/g	(M. A. Ahmed vd., 2023)
Karbon@Sepiyolit Kompozitleri	Malakit Yeşili	6	1198.67 mg/g	(Largo vd., 2023)
Hurma Tohumlarından Üretilen Aktif Karbon	Metil Turuncu	8	7.57 mg/g	(Alardhi vd., 2023)
Kahve Telvesi ile Hazırlanan Selüloz ve Sodyum Aljinattan Jel Boncuklar	Metilen Mavisi ve Kongo Kırmızısı	6-2	400.50 ve 411.45 mg/g	(Kasbaji vd., 2023)

Adsorbanların Çevresel Etkisi

Yaygın olarak kullanılan bazı adsorbanların, üretim veya bertaraf sırasında çevresel etkileri olabilir (Kozyatnyk vd., 2020).

Gelecek Perspektifleri:

Nanoteknoloji

Nanomalzemelerin geliştirilmesi, seçici boya giderimi için geniş yüzey alanlarına ve özel özelliklere sahip yüksek verimli adsorbanlar için potansiyel sunmaktadır (Homaeigohar, 2020).

Hibrit Sistemler

Adsorpsiyonun membran filtrasyonu veya gelişmiş oksidasyon prosesleri gibi diğer arıtma yöntemleriyle entegre edilmesi genel verimliliği ve çok yönlülüğü artırabilir (S. F. Ahmed vd., 2021).

Yeşil Adsorbanlar

Tarımsal atık, biyokömür veya yenilenebilir kaynaklardan elde edilen aktif karbon gibi doğal ve sürdürülebilir malzemelerin adsorban olarak kullanılması çevresel kaygıları azaltabilir (Crini vd., 2019).

Proses Optimizasyonu

pH, sıcaklık, adsorban dozajı ve temas süresi gibi adsorpsiyon parametrelerinin optimize edilmesine yönelik araştırmaların sürdürülmesi verimliliği artırabilir ve işletme maliyetlerini azaltabilir (Azari vd., 2023).

Rejenerasyon Teknikleri

Kullanılmış adsorbanların rejenerasyonu için uygun maliyetli ve çevre dostu yöntemlerin geliştirilmesi, adsorpsiyon proseslerinin sürdürülebilirliğini artıracaktır (Baskar vd., 2022).

SONUÇ ve ÖNERİLER

Atık su arıtımı, çevresel sürdürülebilirlik ve insan sağlığı açısından kritik öneme sahiptir, özellikle de endüstriyel faaliyetlerin neden olduğu kirlilik göz önüne alındığında. Boyahaneler gibi endüstriyel tesisler, kullanılan

kimyasalların türü ve miktarı nedeniyle atık suların yoğun bir şekilde kirlenmesine neden olur. Bu nedenle, etkili arıtma teknolojileri ve süreçleri, çevre üzerindeki olumsuz etkileri en aza indirmek için kritik öneme sahiptir. Adsorpsiyon teknolojisi, boyahane atık sularının arıtılmasında etkili bir rol oynamaktadır. Ancak, gelecekte daha da ileriye gitmek için çeşitli fırsatlar ve beklentiler bulunmaktadır. Daha etkili adsorbanların geliştirilmesi, ileri adsorpsiyon proseslerinin benimsenmesi ve dijitalleşmenin artması gibi faktörler, atık su arıtımında önemli gelişmeler sağlayacaktır. Bu gelişmelerle birlikte, gelecekte atık su arıtımı alanında daha sürdürülebilir ve ekonomik çözümler beklenmektedir. Bu çözümler hem çevresel hem de ekonomik açıdan endüstrinin daha sürdürülebilir bir şekilde yönetilmesine katkıda bulunacaktır. Ayrıca, bu teknolojilerin yaygınlaşması ve benimsenmesi, küresel çapta su kaynaklarının korunmasına ve gelecek nesillere temiz bir çevre bırakılmasına yardımcı olacaktır. Sonuç olarak, adsorpsiyon teknolojisinin atık su arıtımında mevcut ve gelecekteki rolü büyük öneme sahiptir. Sürekli olarak gelişen bu teknoloji, endüstriyel atık suların daha etkili bir şekilde arıtılmasını sağlayarak çevre üzerindeki olumsuz etkileri azaltmaya yardımcı olacaktır. Bu doğrultuda, araştırma ve yenilikçilik çabalarının devam etmesi ve uluslararası iş birliğinin artması önemlidir, böylece atık su arıtımında daha sürdürülebilir ve geleceğe yönelik çözümler bulunabilir. Bu çalışmada, boyahane atık sularının arıtılmasında adsorpsiyon teknolojisinin önemli bir rol oynayacağını göstermektedir. Ancak, bu alandaki araştırma ve geliştirme çalışmalarının devam etmesi ve endüstriyel uygulamalarda yeniliklerin benimsenmesi gerekmektedir. Bu sayede, gelecek nesillerin daha temiz bir çevrede yaşamasına ve doğal kaynakların korunmasına katkıda bulunulabilir.

KAYNAKLAR

- Adeleye, A. T., Bahar, M. M., Megharaj, M., & Rahman, M. M. (2023). Recent developments and mechanistic insights on adsorption technology for micro- and nanoplastics removal in aquatic environments. *Journal of Water Process Engineering*, 53, 103777. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2023.103777>
- Ahmed, M. A., Ahmed, M. A., & Mohamed, A. A. (2023). Synthesis, characterization and application of chitosan/graphene oxide/copper ferrite nanocomposite for the adsorptive removal of anionic and cationic dyes from wastewater. *RSC Advances*, 13(8), 5337–5352. <https://doi.org/10.1039/D2RA07883J>
- Ahmed, S. F., Mofijur, M., Nuzhat, S., Chowdhury, A. T., Rafa, N., Uddin, M. A., Inayat, A., Mahlia, T. M. I., Ong, H. C., Chia, W. Y., & Show, P. L. (2021). Recent developments in physical, biological, chemical, and hybrid treatment techniques for removing emerging contaminants from wastewater. *Journal of Hazardous Materials*, 416, 125912. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.125912>
- Al-Asheh, S., Bagheri, M., & Aidan, A. (2021). Membrane bioreactor for wastewater treatment: A review. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 4, 100109. <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2021.100109>
- Alagha, O., Manzar, M. S., Zubair, M., Anil, I., Mu'azu, N. D., & Qureshi, A. (2020). Magnetic Mg-Fe/LDH Intercalated Activated Carbon Composites for Nitrate and Phosphate Removal from Wastewater: Insight into Behavior and Mechanisms. *Nanomaterials*, 10(7), 1361. <https://doi.org/10.3390/nano10071361>
- Alardhi, S. M., Fiyadh, S. S., Salman, A. D., & Adelikhah, M. (2023). Prediction of methyl orange dye (MO) adsorption using activated carbon with an artificial neural network optimization modeling. *Heliyon*, 9(1), e12888. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e12888>
- Aljohani, M. M., Al-Qahtani, S. D., Alshareef, M., El-Desouky, M. G., El-Bindary, A. A., El-Metwaly, N. M., & El-Bindary, M. A. (2023). Highly efficient adsorption and removal bio-staining dye from industrial wastewater onto mesoporous Ag-MOFs. *Process Safety and Environmental Protection*, 172, 395–407. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2023.02.036>
- Arslan, D. Ş., Ertap, H., Şenol, Z. M., El Messaoudi, N., & Mehmeti, V. (2024). Preparation of Polyacrylamide Titanium Dioxide Hybrid Nanocomposite by Direct Polymerization and Its Applicability in Removing Crystal Violet from Aqueous Solution. *Journal of Polymers and the Environment*, 32(2), 573–587. <https://doi.org/10.1007/s10924-023-03004-8>
- Azari, A., Nabizadeh, R., Mahvi, A. H., & Nasser, S. (2023). Magnetic multi-walled carbon nanotubes-loaded alginate for treatment of industrial dye manufacturing effluent: adsorption modelling and process optimisation by central composite face-central design. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry*, 103(7), 1509–1529. <https://doi.org/10.1080/03067319.2021.1877279>
- Azimi, B., Abdollahzadeh-Sharghi, E., & Bonakdarpour, B. (2021). Anaerobic-aerobic processes for the treatment of textile dyeing wastewater containing three commercial reactive azo dyes: Effect of number of stages and bioreactor type. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 39, 228–239. <https://doi.org/10.1016/j.cjche.2020.10.006>

- Baskar, A. V., Bolan, N., Hoang, S. A., Sooriyakumar, P., Kumar, M., Singh, L., Jasemizad, T., Padhye, L. P., Singh, G., Vinu, A., Sarkar, B., Kirkham, M. B., Rinklebe, J., Wang, S., Wang, H., Balasubramanian, R., & Siddique, K. H. M. (2022). Recovery, regeneration and sustainable management of spent adsorbents from wastewater treatment streams: A review. *Science of The Total Environment*, 822, 153555. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153555>
- Baytar, O., Şahin, Ö., Saka, C., & Ağrak, S. (2018). Characterization of Microwave and Conventional Heating on the Pyrolysis of Pistachio Shells for the Adsorption of Methylene Blue and Iodine. *Analytical Letters*, 51(14), 2205–2220. <https://doi.org/10.1080/00032719.2017.1415920>
- Bhat, S., Uthappa, U. T., Sadhasivam, T., Altalhi, T., Soo Han, S., & Kurkuri, M. D. (2023). Abundant cilantro derived high surface area activated carbon (AC) for superior adsorption performances of cationic/anionic dyes and supercapacitor application. *Chemical Engineering Journal*, 459, 141577. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.141577>
- Bonetta, S., Pignata, C., Bonetta, S., Amagliani, G., Brandi, G., Gilli, G., & Carraro, E. (2021). Comparison of UV, Peracetic Acid and Sodium Hypochlorite Treatment in the Disinfection of Urban Wastewater. *Pathogens*, 10(2), 182. <https://doi.org/10.3390/pathogens10020182>
- Chen, Q., Zhang, Q., Yang, Y., Wang, Q., He, Y., & Dong, N. (2021). Synergetic effect on methylene blue adsorption to biochar with gentian violet in dyeing and printing wastewater under competitive adsorption mechanism. *Case Studies in Thermal Engineering*, 26, 101099. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2021.101099>
- Chequer, F. M. D., Angeli, J. P. F., Ferraz, E. R. A., Tsuboy, M. S., Marcarini, J. C., Mantovani, M. S., & de Oliveira, D. P. (2009). The azo dyes Disperse Red 1 and Disperse Orange 1 increase the micronuclei frequencies in human lymphocytes and in HepG2 cells. *Mutation Research/Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis*, 676(1–2), 83–86. <https://doi.org/10.1016/j.mrgentox.2009.04.004>
- Crini, G., Lichtfouse, E., Wilson, L. D., & Morin-Crini, N. (2019). Conventional and non-conventional adsorbents for wastewater treatment. *Environmental Chemistry Letters*, 17(1), 195–213. <https://doi.org/10.1007/s10311-018-0786-8>
- da Silva, A. F. V., da Silva, J., Vicente, R., Ambrosi, A., Zin, G., Di Luccio, M., & de Oliveira, J. V. (2023). Recent advances in surface modification using polydopamine for the development of photocatalytic membranes for oily wastewater treatment. *Journal of Water Process Engineering*, 53, 103743. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2023.103743>
- Daverey, A., Pandey, D., Verma, P., Verma, S., Shah, V., Dutta, K., & Arunachalam, K. (2019). Recent advances in energy efficient biological treatment of municipal wastewater. *Bioresource Technology Reports*, 7, 100252. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2019.100252>
- Deniz, F., & Yıldız, H. (2019a). Bioremediation potential of a widespread industrial biowaste as renewable and sustainable biosorbent for synthetic dye pollution. *International Journal of Phytoremediation*, 21(3), 259–267. <https://doi.org/10.1080/15226514.2018.1524451>
- Deniz, F., & Yıldız, H. (2019b). Taguchi DoE methodology for modeling of synthetic dye biosorption from aqueous effluents: parametric and phenomenological studies. *International Journal of Phytoremediation*, 21(11), 1065–1071. <https://doi.org/10.1080/15226514.2019.1594687>
- Dinçer, A. R. (2020). Increasing BOD5/COD ratio of non-biodegradable compound (reactive black 5) with ozone and catalase enzyme combination. *SN Applied Sciences*, 2(4), 736. <https://doi.org/10.1007/s42452-020-2557-y>
- Dolas, H. (2023). Activated carbon synthesis and methylene blue adsorption from pepper stem using microwave assisted impregnation method: Isotherm and kinetics. *Journal of King Saud University - Science*, 35(3), 102559. <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2023.102559>
- dos Reis, G. S., Bergna, D., Grimm, A., Lima, E. C., Hu, T., Naushad, M., & Lassi, U. (2023). Preparation of highly porous nitrogen-doped biochar derived from birch tree wastes with superior dye removal performance. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 669, 131493. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2023.131493>
- Dutta, S., Gupta, B., Srivastava, S. K., & Gupta, A. K. (2021). Recent advances on the removal of dyes from wastewater using various adsorbents: a critical review. *Materials Advances*, 2(14), 4497–4531. <https://doi.org/10.1039/D1MA00354B>
- El Messaoudi, N., Çiğeroğlu, Z., Şenol, Z. M., Bouich, A., Kazan-Kaya, E. S., Noureen, L., & Américo-Pinheiro, J. H. P. (2024). *Green synthesis of nanoparticles for remediation organic pollutants in wastewater by adsorption (ss.*

305–345). <https://doi.org/10.1016/bs.apmp.2023.06.016>

Elfving, J., Kauppinen, J., Jegoroff, M., Ruuskanen, V., Järvinen, L., & Sainio, T. (2021). Experimental comparison of regeneration methods for CO₂ concentration from air using amine-based adsorbent. *Chemical Engineering Journal*, 404, 126337. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.126337>

Feuzer-Matos, A. J., Testolin, R. C., Pimentel-Almeida, W., Radetski-Silva, R., Deomar-Simões, M. J., Poyer-Radetski, L., Ariento-Neto, R., Batista-Barwinski, M. J., Somensi, C. A., & Radetski, C. M. (2022). Treatment of Wastewater Containing New and Non-biodegradable Textile Dyes: Efficacy of Combined Advanced Oxidation and Adsorption Processes. *Water, Air, & Soil Pollution*, 233(7), 273. <https://doi.org/10.1007/s11270-022-05751-1>

Fiyadh, S. S., Alardhi, S. M., Al Omar, M., Aljumaily, M. M., Al Saadi, M. A., Fayaed, S. S., Ahmed, S. N., Salman, A. D., Abdalsalm, A. H., Jabbar, N. M., & El-Shafi, A. (2023). A comprehensive review on modelling the adsorption process for heavy metal removal from waste water using artificial neural network technique. *Heliyon*, 9(4), e15455. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e15455>

Genli, N., Kutluay, S., Baytar, O., & Şahin, Ö. (2022). Preparation and characterization of activated carbon from hydrochar by hydrothermal carbonization of chickpea stem: an application in methylene blue removal by RSM optimization. *International Journal of Phytoremediation*, 24(1), 88–100. <https://doi.org/10.1080/15226514.2021.1926911>

Ghernaout, D., Elboughdiri, N., & Ghareba, S. (2020). Fenton Technology for Wastewater Treatment: Dares and Trends. *OALib*, 07(01), 1–26. <https://doi.org/10.4236/oalib.1106045>

Gupta, S. A., Vishesh, Y., Sarvshrestha, N., Bhardwaj, A. S., Kumar, P. A., Topare, N. S., Raut-Jadhav, S., Bokil, S. A., & Khan, A. (2021). Adsorption isotherm studies of Methylene blue using activated carbon of waste fruit peel as an adsorbent. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.12.044>

Han, Y., Yang, L., Chen, X., Cai, Y., Zhang, X., Qian, M., Chen, X., Zhao, H., Sheng, M., Cao, G., & Shen, G. (2020). Removal of veterinary antibiotics from swine wastewater using anaerobic and aerobic biodegradation. *Science of The Total Environment*, 709, 136094. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136094>

Homaeigohar, S. (2020). The Nanosized Dye Adsorbents for Water Treatment. *Nanomaterials*, 10(2), 295. <https://doi.org/10.3390/nano10020295>

Hube, S., Eskafi, M., Hrafnkelsdóttir, K. F., Bjarnadóttir, B., Bjarnadóttir, M. Á., Axelsdóttir, S., & Wu, B. (2020). Direct membrane filtration for wastewater treatment and resource recovery: A review. *Science of The Total Environment*, 710, 136375. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.136375>

Imessaoudene, A., Cheikh, S., Hadadi, A., Hamri, N., Bollinger, J.-C., Amrane, A., Tahraoui, H., Manseri, A., & Mouni, L. (2023). Adsorption Performance of Zeolite for the Removal of Congo Red Dye: Factorial Design Experiments, Kinetic, and Equilibrium Studies. *Separations*, 10(1), 57. <https://doi.org/10.3390/separations10010057>

İzgi, M. S., Saka, C., Baytar, O., Saraçoğlu, G., & Şahin, Ö. (2019). Preparation and Characterization of Activated Carbon from Microwave and Conventional Heated Almond Shells Using Phosphoric Acid Activation. *Analytical Letters*, 52(5), 772–789. <https://doi.org/10.1080/00032719.2018.1495223>

Karcher, S., Kornmüller, A., & Jekel, M. (2002). Anion exchange resins for removal of reactive dyes from textile wastewaters. *Water Research*, 36(19), 4717–4724. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(02\)00195-1](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(02)00195-1)

Kasbaji, M., Mennani, M., Grimi, N., Oubenali, M., Mbarki, M., EL Zakhem, H., & Moubarik, A. (2023). Adsorption of cationic and anionic dyes onto coffee grounds cellulose/sodium alginate double-network hydrogel beads: Isotherm analysis and recyclability performance. *International Journal of Biological Macromolecules*, 239, 124288. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2023.124288>

Kausar, A., Zohra, S. T., Ijaz, S., Iqbal, M., Iqbal, J., Bibi, I., Nouren, S., El Messaoudi, N., & Nazir, A. (2023). Cellulose-based materials and their adsorptive removal efficiency for dyes: A review. *International Journal of Biological Macromolecules*, 224, 1337–1355. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2022.10.220>

Key, S., Ryan, P. G., Gabbott, S. E., Allen, J., & Abbott, A. P. (2024). Influence of colourants on environmental degradation of plastic litter. *Environmental Pollution*, 347, 123701. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2024.123701>

khalidi-idrissi, A., Madinzi, A., Anouzla, A., Pala, A., Mouhir, L., Kadmi, Y., & Souabi, S. (2023). Recent advances in the biological treatment of wastewater rich in emerging pollutants produced by pharmaceutical industrial

- discharges. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 20(10), 11719–11740. <https://doi.org/10.1007/s13762-023-04867-z>
- Kozyatnyk, I., Yacout, D. M. M., Van Caneghem, J., & Jansson, S. (2020). Comparative environmental assessment of end-of-life carbonaceous water treatment adsorbents. *Bioresource Technology*, 302, 122866. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.122866>
- Kumari, P., & Kumar, A. (2023). ADVANCED OXIDATION PROCESS: A remediation technique for organic and non-biodegradable pollutant. *Results in Surfaces and Interfaces*, 11, 100122. <https://doi.org/10.1016/j.rsurfi.2023.100122>
- Largitte, L., & Pasquier, R. (2016). A review of the kinetics adsorption models and their application to the adsorption of lead by an activated carbon. *Chemical Engineering Research and Design*, 109, 495–504. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2016.02.006>
- Largo, F., Haounati, R., Ouachtak, H., Hafid, N., Jada, A., & Addi, A. A. (2023). Design of organically modified sepiolite and its use as adsorbent for hazardous Malachite Green dye removal from water. *Water, Air, & Soil Pollution*, 234(3), 183. <https://doi.org/10.1007/s11270-023-06185-z>
- Lim, S., Shi, J. L., von Gunten, U., & McCurry, D. L. (2022). Ozonation of organic compounds in water and wastewater: A critical review. *Water Research*, 213, 118053. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.118053>
- Masula, K., Bhongiri, Y., Raghav Rao, G., Vijay Kumar, P., Pola, S., & Basude, M. (2022). Evolution of photocatalytic activity of CeO₂–Bi₂O₃ composite material for wastewater degradation under visible-light irradiation. *Optical Materials*, 126, 112201. <https://doi.org/10.1016/j.optmat.2022.112201>
- Mogharbel, R. T., Alkhamis, K., Felaly, R., El-Desouky, M. G., El-Bindary, A. A., El-Metwaly, N. M., & El-Bindary, M. A. (2023). Superior adsorption and removal of industrial dye from aqueous solution via magnetic silver metal-organic framework nanocomposite. *Environmental Technology*, 1–17. <https://doi.org/10.1080/09593330.2023.2178331>
- Operti, M. C., Bernhardt, A., Grimm, S., Engel, A., Figdor, C. G., & Tagit, O. (2021). PLGA-based nanomedicines manufacturing: Technologies overview and challenges in industrial scale-up. *International Journal of Pharmaceutics*, 605, 120807. <https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2021.120807>
- Othmani, A., Kesraoui, A., Boada, R., Seffen, M., & Valiente, M. (2019). Textile Wastewater Purification Using an Elaborated Biosorbent Hybrid Material (Luffa–Cylindrica–Zinc Oxide) Assisted by Alternating Current. *Water*, 11(7), 1326. <https://doi.org/10.3390/w11071326>
- Qazi, R. A., Ullah, N., Bibi, N., Khattak, R., Jamila, N., Begum, B., Aman, N., Rahayu, F., & Karami, A. M. (2023). Amine-Functionalized MWCNTs for the Removal of Mordant Black 11 Dye. *Water, Air, & Soil Pollution*, 234(10), 644. <https://doi.org/10.1007/s11270-023-06662-5>
- Quansah, J. O., Hlaing, T., Lyonga, F. N., Kyi, P. P., Hong, S.-H., Lee, C.-G., & Park, S.-J. (2020). Nascent Rice Husk as an Adsorbent for Removing Cationic Dyes from Textile Wastewater. *Applied Sciences*, 10(10), 3437. <https://doi.org/10.3390/app10103437>
- Rajoria, S., Vashishtha, M., & Sangal, V. K. (2021). Review on the treatment of electroplating industry wastewater by electrochemical methods. *Materials Today: Proceedings*, 47, 1472–1479. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.04.165>
- Rehan, A. I., Rasee, A. I., Awual, M. E., Waliullah, R. M., Hossain, M. S., Kubra, K. T., Salman, M. S., Hasan, M. M., Hasan, M. N., Sheikh, M. C., Marwani, H. M., Khaleque, M. A., Islam, A., & Awual, M. R. (2023). Improving toxic dye removal and remediation using novel nanocomposite fibrous adsorbent. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 673, 131859. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2023.131859>
- Robinson, T., McMullan, G., Marchant, R., & Nigam, P. (2001). Remediation of dyes in textile effluent: a critical review on current treatment technologies with a proposed alternative. *Bioresource Technology*, 77(3), 247–255. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(00\)00080-8](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(00)00080-8)
- Salman, M. S., Sheikh, M. C., Hasan, M. M., Hasan, M. N., Kubra, K. T., Rehan, A. I., Awual, M. E., Rasee, A. I., Waliullah, R. M., Hossain, M. S., Khaleque, M. A., Alsukaibi, A. K. D., Alshammari, H. M., & Awual, M. R. (2023). Chitosan-coated cotton fiber composite for efficient toxic dye encapsulation from aqueous media. *Applied Surface Science*, 622, 157008. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2023.157008>

- Samsami, S., Mohamadizani, M., Sarrafzadeh, M.-H., Rene, E. R., & Firoozbahr, M. (2020). Recent advances in the treatment of dye-containing wastewater from textile industries: Overview and perspectives. *Process Safety and Environmental Protection*, 143, 138–163. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2020.05.034>
- Sasmaz, M., Senel, G. U., & Obek, E. (2021). Boron Bioaccumulation by the Dominant Macrophytes Grown in Various Discharge Water Environments. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 106(6), 1050–1058. <https://doi.org/10.1007/s00128-021-03222-7>
- Shabir, F., Sultan, M., Miyazaki, T., Saha, B. B., Askalany, A., Ali, I., Zhou, Y., Ahmad, R., & Shamshiri, R. R. (2020). Recent updates on the adsorption capacities of adsorbent-adsorbate pairs for heat transformation applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 119, 109630. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109630>
- Shahedi, A., Darban, A. K., Taghipour, F., & Jamshidi-Zanjani, A. (2020). A review on industrial wastewater treatment via electrocoagulation processes. *Current Opinion in Electrochemistry*, 22, 154–169. <https://doi.org/10.1016/j.coelec.2020.05.009>
- Sharifi Pajaie, S. H., Archin, S., & Asadpour, G. (2018). Optimization of Process Parameters by Response Surface Methodology for Methylene Blue Removal Using Cellulose Dusts. *Civil Engineering Journal*, 4(3), 620. <https://doi.org/10.28991/cej-0309121>
- Sharma, J., Sharma, S., & Soni, V. (2021). Classification and impact of synthetic textile dyes on Aquatic Flora: A review. *Regional Studies in Marine Science*, 45, 101802. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2021.101802>
- Suzuki, M., Suzuki, Y., Uzuka, K., & Kawase, Y. (2020). Biological treatment of non-biodegradable azo-dye enhanced by zero-valent iron (ZVI) pre-treatment. *Chemosphere*, 259, 127470. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127470>
- Swanckaert, B., Geltmeyer, J., Rabaey, K., De Buysser, K., Bonin, L., & De Clerck, K. (2022). A review on ion-exchange nanofiber membranes: properties, structure and application in electrochemical (waste)water treatment. *Separation and Purification Technology*, 287, 120529. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2022.120529>
- Tang, R., Dai, C., Li, C., Liu, W., Gao, S., & Wang, C. (2017). Removal of Methylene Blue from Aqueous Solution Using Agricultural Residue Walnut Shell: Equilibrium, Kinetic, and Thermodynamic Studies. *Journal of Chemistry*, 2017, 1–10. <https://doi.org/10.1155/2017/8404965>
- United Nations. (2019). *World Population Prospects 2019 Highlights*.
- Vasiraja, N., Saravana Sathiyar Prabhakar, R., & Joshua, A. (2023). Preparation and Physio-Chemical characterisation of activated carbon derived from prosopis juliflora stem for the removal of methylene blue dye and heavy metal containing textile industry effluent. *Journal of Cleaner Production*, 397, 136579. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136579>
- Yagub, M. T., Sen, T. K., Afroze, S., & Ang, H. M. (2014). Dye and its removal from aqueous solution by adsorption: A review. *Advances in Colloid and Interface Science*, 209, 172–184. <https://doi.org/10.1016/j.cis.2014.04.002>
- Yildiz, H., Gülşen, H., Şahin, Ö., Baytar, O., & Kutluay, S. (2023). Novel adsorbent for malachite green from okra stalks waste: synthesis, kinetics and equilibrium studies. *International Journal of Phytoremediation*, 1–13. <https://doi.org/10.1080/15226514.2023.2243621>
- Yildiz, H., & Yuksel, A. Y. (2023). Novel Adsorbent for Methylene Blue from Waste Fish Scales (Cyprinus Carpio): Kinetics and Equilibrium Studies. *Environmental Engineering and Management Journal*, 22(6), 1073–1080. <https://doi.org/10.30638/eemj.2023.088>
- Yildiz, H., & Yuksel, A. Y. (2024). A novel biosorbent material from waste fish scales (Cyprinus carpio) for biosorption of toxic dyes in aquatic environments. *Biomass Conversion and Biorefinery*. <https://doi.org/10.1007/s13399-024-05900-y>
- Zhou, Y., Lu, J., Zhou, Y., & Liu, Y. (2019). Recent advances for dyes removal using novel adsorbents: A review. *Environmental Pollution*, 252, 352–365. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.05.072>



Kahramanmaraş Sutcu Imam University

Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 07.06.2024
Kabul Tarihi : 26.06.2024

Received Date : 07.06.2024
Accepted Date : 26.06.2024

SÜRDÜRÜLEBİLİR KENTSEL BİYOATIK YÖNETİMİ

SUSTAINABLE MANAGEMENT OF THE MUNICIPAL BIOWASTES

Süreyya ALTIN¹* (ORCID: 0000-0002-6853-8873)

¹ Zonguldak Bülent Ecevit Üniversitesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Zonguldak, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Süreyya ALTIN, sureyya.altin@beun.edu.tr

ÖZET

Kentsel atık yönetimi, sürdürülebilir çevre ve küresel iklim değişikliğinin önemli bir bileşenidir. Biyoatıklar, kentsel atıkların %30-65 gibi büyük bir yüzdesini oluşturmaktadır. AB atık çerçeve direktifinde, 2035 yılına kadar belediye atıklarının sadece %10'unun depolandığı atık yönetim planlaması istenmektedir. Ancak, kentsel biyoatık yönetimi gelişmekte olan ülkeler başta olmak üzere tüm ülkeler için ciddi sosyal ve ekonomik zorluklar içermektedir. Halkın gıda israfının önlenmesi hakkında bilinçlendirilmesi veya "attığın kadar öde" gibi maddi teşvikler biyoatığın oluşumunu azaltabilir. Böylece, doğal kaynaklar korunabilir, gıda üretim sürecinden kaynaklanan sera gazı etkisi %15-22 oranında azaltılabilir. Ayrı toplanan biyoatığı kompostlayarak iyi kalitede ve pazarlanabilir gübre üretilir. Kompostlamanın CH₄ emisyonu hammadde karbonunun %1-4'ü kadar olduğundan sera gazı oluşumunu önemli oranda engeller. Anaerobik bozunma (AD) süreci, yüksek metan içeren biyogaz üreten, karbon nötr bir süreç olduğundan yenilenebilir bir enerji kaynağı olarak kabul edilir. AD prosesi kullanıldığında oluşan metan hacmi ve elde edilen enerji, gaz yakalamalı deponilere göre yaklaşık 5 kat daha fazladır. Bu çalışmada biyoatık yönetimi stratejileri ve yaklaşımlarına ilişkin mevcut bilgiler daha önce yapılan çalışmalardan derlenmiştir. Böylece belediye biyoatık yönetimi alternatifleri tanımlanarak avantaj ve dezavantajları, uygulama zorlukları, elde edilecek faydalar ortaya konmuştur. Sürdürülebilir biyoatık yönetimi, doğal kaynakların korunmasına katkı sağlar, atığın karbon ayak izi azalır ve madde döngüsü tamamlanır.

Anahtar Kelimeler: Anaerobik bozunma (AD), kentsel biyoatık yönetimi, kompost, evde kompost

ABSTRACT

Municipal waste management is a major component of sustainable environment and global climate change. Municipal waste includes in rate of 30-65 biowaste. According to directives of EU, will be allow only 10% of municipal waste go to landfill by 2035. However, municipal biowaste management contains serious social and economic challenges for all country, especially developing country. Biowaste generation may be reduced by training of people about prevent food waste and economical incentives as "pay as you throw". Thus, natural resources can be protected and the greenhouse effect resulting from the food production process can be reduced by 15-22%. Quality and marketable fertilizer is obtained by composting of separately collected biowaste. CH₄ emissions generated in the composting are 1-4% of the initial carbon. Anaerobic digestion (AD) is carbon-neutral process and considered a renewable energy source. Methane volume obtained from AD is more 5 times than gas capture landfill. In this study, available information on biowaste management strategies and approaches was compiled from prior studies. Thus, biowaste management alternatives were defined and their advantages and disadvantages were explained. Sustainable biowaste management contributes to the conservation of natural resources and reducing the carbon footprint of biowaste. Moreover, the material cycle is also completed.

Keywords: Anaerobic digestion, municipal biowaste management, composting, home composting

GİRİŞ

Son yıllarda gelişmiş ve gelişmekte olan ülkeler gün geçtikçe artan atıklarını en az çevresel etki ve en fazla ekonomik fayda sağlayan bir şekilde yönetme çabası içerisinde. Kentsel katı atık üretiminin 2025 yılına kadar küresel ölçekte 2.3 milyar tona ulaşacağı tahmin edilmektedir (Hoorweg & Bhada-Tata, 2012). UNEP (2009)'e göre, gelişmekte olan ülkelerde birçok yerel yönetim toplam bütçesinin %20-50'sini atık yönetim uygulaması için kullanmasına rağmen, atığının ancak %40-70'ini toplayabilmektedir. Üstelik hizmet verilen halk yüzdesi %50'den daha azdır. Kentsel atık yönetimi, atık içinde bulunan tüm atık türlerinin, atık yönetim hiyerarşisinde önerilen adımlara göre yönetilmesini amaçlar. Bu kapsamda, kentsel atıklar içerisindeki ambalaj atıkları ve biyoatıklar, depolama alanına gitmeden önce yaşam döngüsüne uygun dönüşüm süreçlerinden geçirilerek mümkün olan ekonomik faydanın sağlanması gereklidir (European Environment Agency [EEA], 2020).

Kentsel biyoatıklar; gıda atıkları, park-bahçe süprüntüleri ve kompostlanabilir kağıt olmak üzere kabaca üçe ayrılır. Toplam katı atık içerisinde, yerleşim yerinin özelliklerine de bağlı olarak %30-65 oranında biyoatık bulunabilir (EEA, 2020; Pandyaswargo vd., 2014). Bu atıkların yarısı, yani toplam atığın yaklaşık %15'i evlerden kaynaklanır (Hebda vd., 2016; Pandyaswargo vd., 2014). Küresel olarak her gün 2.6 milyon ton evsel biyoatık oluştuğu tahmin edilmektedir (Jalalipour vd., 2020).

Atık içindeki biyobozunur (BB) maddelerin depolanması anaerobik bozunma süreci nedeniyle sera gazı etki potansiyeline sahip metan ve azotoksit gazı oluşumuna neden olur (Roberts, 2015). Gaz çıkışı depolama alanları kapatıldıktan sonra da bir süre devam eder. Bu yüzden, küresel iklim değişikliği endişelerinin ulusal çevre politikalarını etkilediği günümüzde, kentsel biyoatıkların depolama alanlarına gitmemesi sera gazı emisyonlarının azaltılmasına önemli katkı yapar (Pickin & Randell, 2017). Gıda ve bahçe atıklarının yüksek nem içeriği (%60) nedeniyle (gıda atıkları~3.8 MJ/kg, bahçe atıkları~5.5 MJ/kg) kalorifik değerleri, termokimyasal dönüşüm proseslerinde kullanım için Dünya Bankası tarafından tavsiye edilen değerin (7 MJ/kg) oldukça altında olduğundan termokimyasal dönüştürme prosesi gıda ve bahçe atıkları için uygun değildir (Roberts, 2015).

Kentsel biyoatıkların çevreye duyarlı olarak yönetilmesi, gelişmekte olan ülkeler başta olmak üzere tüm ülkeler için ciddi sosyal ve ekonomik zorluklar içermektedir. Kentsel biyoatıkların hızlı biyolojik bozunma ve koku oluşturma potansiyeli nedeniyle, ayrı toplanarak kısa sürede biyolojik dönüşüm prosesine ulaştırılma faaliyetinin planlanması ve uygulaması oldukça zordur. Halihazırda birçok Asya ve Avrupa ülkesinin atık bileşiminde biyoatıklar baskın olmasına karşın halen kaynağında ayırma yapılmamaktadır (EEA,2020; Pandyaswargo vd., 2014). En yaygın bertaraf yöntemi ucuz ve kolay olan doğrudan depolamadır. Depolama alanında biyolojik bozulan biyoatıkların yeraltı suyunu kirleten sızıntı suyu ve sera gazı etkisine sahip deponi gazı oluşumuna neden olur. Ayrıca, depolama yerinin kullanım ömrü de kısalmaktadır. Buna rağmen, günümüzde, kentsel biyoatıkların yaklaşık %70'i hiçbir işlem görmeden diğer atıklarla birlikte depolama alanlarına götürülmektedir (Lim vd., 2019, Hebda vd., 2016).

Biyoatıklar iyi yönetildiğinde sosyal, çevresel ve ekonomik açıdan olumlu potansiyele sahiptir. Ancak günümüzde, gelişmiş ülkelerde bile evsel biyoatıkların doğrudan depolamaya gitmemesi ve faydalı yönetim seçeneklerinin uygulamaya alınması tam olarak başarılamamıştır. Evsel biyoatıklardan maksimum faydayı sağlamak için gıda, park-bahçe atıkları ve kompostlanabilir kağıt bileşenleri kontrol altında alınmalıdır. Son yıllarda AB komisyonları gibi küresel çapta birçok kuruluş biyoatıktan faydalı bir ürün elde ederek ekonomiye katkı sağlamak, atığın olumsuz çevresel etkilerini indirgemek ve depolama ihtiyacını azaltmak amacıyla çalışmalar yapmakta, raporlar hazırlamaktadır.

EPA (Environmental Protection Agency) (2013) verilerine göre; ABD'deki tüm emisyonlar dikkate alındığında hesaplanan toplam küresel ısınma potansiyelinin %9'unun deponilerde bulunan BB atıkların kontrolsüz bozunması sonucu oluşan metandan kaynaklandığı belirlenmiştir. ABD'nin toplam metan emisyonunun yaklaşık %20'sinin depolama alanlarından kaynaklandığı ve metanın küresel ısınma üzerindeki katkısının CO₂'ye göre 20 kat daha fazla (EPA, 2013) olduğu dikkate alındığında BB maddelerin depolama alanlarına gönderilmemesinin önemi daha iyi anlaşılabilir.

Kentsel biyoatıkların yönetim sürecinde oluşması muhtemel sera gazı emisyonu miktarı, atıkların depolanması durumunda oluşabilecek emisyon potansiyelinden çok daha az olmalıdır. Sera gazı emisyon azaltımından söz edebilmek için biyoatıkların yönetimi sırasında elde edilen ürünlerin planlandığı gibi değerlendirilmesi ve bunun sürdürülebilir olması gereklidir.

KENTSEL BİYOATIKLAR İLE İLGİLİ AB DİREKTİFLERİ

Avrupa birliği, atık politikaları ve döngüsel ekonomi açısından kentsel biyoatıkları önemli atık akışı olarak değerlendirmektedir. Bu kapsamda, kentsel biyoatıkların toplanması, proseslenmesi ve ürün elde edilmesi ile ilgili hedefler belirlemekte ve stratejiler ortaya koymaktadır. AB tarafından yapılan çalışmalar 2017’de ortaya çıkan 86 milyon ton kentsel katı atığın %34’ünün biyoatık olduğunu göstermiştir (EEA, 2020). Kentsel biyoatıkların yönetim stratejilerini esas alarak hazırlanan AB direktifleri, AB üye ülkeler için kentsel biyoatıkların ayrı toplama ve proselama hedefleri koymakta, geri dönüşümü teşvik etmektedir.

1999 AB direktifinde BB atık aerobik ve anaerobik bozunmaya uğrayabilen, yiyecek, bahçe atığı, kağıt ve karton olarak tanımlanmıştır. AB direktiflerine göre, 2016 yılına kadar yerleşim yerlerinde oluşan kentsel BB atıkların depolamaya kabul edilen miktarı, 1995 yılında oluşan BB atığın %35’ini geçmeyecek şekilde planlanmalıdır. 2008’de çıkarılan AB direktifinde biyoatık ve biyobozunabilir atık terimleri ayrı tanımlanmıştır. Biyoatık, biyobozunabilir park-bahçe atıkları, gıda ve mutfak atıkları olarak tanımlanmaktadır. Direktif, üye ülkelerden yeniden kullanılabilir belediye atıklarının 2020’ye kadar %50’sinin ayrılmasını ve bu hedefe ulaşılabilmesi için atık yönetim programı hazırlanmasını ister.

Son olarak AB atık çerçeve direktifinde (EU, 2018) ise 2035 yılına kadar belediye atıklarının sadece %10’u depolamaya gidecek şekilde atık yönetim planlaması yapılması istenmektedir. Direktife uyum sürecinde, AB kapsamındaki ülkeler biyoatıklarının depolama alanlarına gitmesini önleyecek atık yönetim stratejileri ve politikaları oluşturmak zorunda kalmıştır (EEA, 2020).

AB yenilenebilir enerji direktifi, üye ülkelerin 2020 yılına kadar ulaşım yakıtlarının en az %10’nunun ve 2030’a kadar ise enerji üretiminin %32’sinin yenilenebilir enerji kaynaklarından sağlanması için hedeflerini planlamasını öngörmektedir. Anaerobik bozunma (Anaerobic Digestion; AD) prosesi yenilenebilir enerji kaynağı olarak kabul edildiğinden, biyoatıkların dönüşümü için kullanılması hem atık yönetim hedeflerine, hem de AB enerji direktiflerine uyum sağlamaya katkıda bulunabilir. Bu nedenle, AD proseslerinin yaygınlaştırılması ve kapasitesinin artırılması teşvik edilebilir (Allen & Wentworth, 2011).

KENTSEL BİYOATIKLARIN YÖNETİMİ

Biyoatık sorunuyla başa çıkabilmek için gelişmiş ve gelişmekte olan ülkeler; atık önleme, atık azaltma, prosesleyerek ekonomik fayda temini ve bertaraf adımlarını içeren hiyerarşik bir çalışma çerçevesi benimsemiştir (Price & Joseph, 2000). Yerel yönetimler biyoatık yönetimini planlarken, mevcut kentleşme durumunu ve sosyo-ekonomik koşulları dikkate alarak, aşağıda verilen proselama yöntemlerinden bir ya da birkaçını kullanabilir.

Evde kompostlama,

Ayrı toplama ve aerobik kompostlama ile pazarlanabilir gübre üretimi,

Ayrı toplama ve anaerobik bozunma ile biyogaz ve gübre benzeri son ürün elde edilmesi,

Ayrı toplama ve fermentasyon ile biyodizel üretimi.

Yerel yönetimler çoğu zaman ideal biyoatık yönetimi planlamakta profesyonel bir ekip ve uygulamakta da ekonomik desteğe ihtiyaç duyar. Biyoatık yönetimin sürdürülebilir olması için; atık yönetiminin tüm paydaşlarının (kamu ve özel sektör, halk, yerel yönetim) yükümlülüklerini yerine getirmeleri gerekir. Bu katkının sürekliliği denetleyici bir otorite tarafından yeterli eğitim, teşvik ve ceza yaptırımları yardımıyla sağlanmalıdır. Seçilen biyoatık yönetimi; çevresel ve sosyal göstergeleri yükseltirken, ekonomik getirisi de yönetimin sürekliliği için yeterli olmalıdır.

Biyoatıkların Azaltılması

Genel atık yönetiminde olduğu gibi kentsel atıklar içindeki biyoatıkların yönetiminde de ilk adım atık oluşumunun azaltılmasıdır. Biyoatıkların miktarının azaltılmasının en etkili yolu gıda israfının önlenmesidir. Diğer alternatifler ise; “Attığın Kadar Öde (Pay as You Throw;PAYT)” ya da atıkların kaynağında yani evde kompostlanarak kişisel bahçelerde kullanımının sağlanmasıdır.

Gıda israfının önlenmesi; Kentsel biyoatıkların en büyük bileşeni gıda atıklarıdır. Bu nedenle gıda israfının önlenmesi biyoatık azaltılmasına önemli katkı sağlar. Bu amaçla, tüketiciler ihtiyaç fazlası gıda almaması veya alınan ürünleri tam tüketmesi ile elde edeceği ekonomik fayda konusunda bilinçlendirilmelidir. Gıda israfının önlenmesi, gıda üretim, tedarik ve nakliye faaliyetlerini de azaltır. Sonuç olarak daha az gıda üretimi ile doğal kaynaklar korunur,

ayrıca enerji sağlamak ve nakliye için gerekli yakıt kullanımı azalacağından sera gazı emisyonu da azalır. İsrar edilen gıdanın üretimi, nakliyesi ve bertarafı sırasında oluşan sera gazı emisyonunun, toplam üretim ve bertaraf faaliyetlerinde gerçekleşen sera gazı emisyonunun %15-22'si olduğu (EEA, 2012) dikkate alınır bu fayda daha iyi anlaşılabilir.

Attığın Kadar Öde (PAYT) yaklaşımı; Atığın azaltılmasına yönelik yaklaşımlardan biri de halkın katılımını artıracığı düşünülen “kullandıkça öde” veya “attığın kadar öde (PAYT)” yaklaşımıdır. Buna göre, tüketiciler ürettikleri atık kadar atık bedeli ödemelidir. PAYT uygulamasının esası, biyoatık miktarındaki azalmanın tüketiciye maddi katkı olarak geri dönüşünü sağlamaktır. Böylece atık üreticileri daha az atık üretme konusunda teşvik edilebilir. PAYT uygulamasının başarılması, biyoatıkların ayrı toplanma performansını artırarak, biyoatıkları hammadde olarak kullanan AD ve kompost tesislerinin ürün verim ve kalitesinin artmasını sağlar, ticari kârlılığı artırır (Skumatz & Freeman, 2006; Miranda vd., 1999). Bunun sonucunda biyoatıkların ekonomiye katkısı maksimum, çevreye olumsuz etkisi minimuma yaklaşır. Atık üreticilerinin gıda israfının önlenmesi veya PAYT yaklaşımını benimsemesi bilinçlendirme çalışmaları ve halkın ilgisini çekecek teşviklerle artırılabilir.

Biyoatıkların Ayrı Toplanması

Biyoatıkların ayrı toplanması, seçilen prosesleme işleminin sürdürülebilir olması için ön şarttır. Biyoatıkların ayrı toplanması durumunda kompost ve AD proseslerinin işletimi sorunsuz sürdürülebilir ve elde edilen ürün kalitesi dolayısıyla pazar payı artar (EEA, 2020; Xevgenos vd., 2015). Ayrı toplama uygulaması kapı önünden toplama veya atık üreticilerinin biyoatıklarını atık toplama merkezlerine getirmesi şeklinde yapılabilir. Yerleşim yerindeki halkın ayrı toplama yöntemine uyum sağlaması ve katılımı önemlidir. Bu nedenle uygulanacak toplama yöntem için önce halkın görüşü alınmalı, halk bilinçlendirilmeli ve katılım için teşvik edilmelidir (Xevgenos vd., 2015). Ayrı toplanması istenilen biyoatığın nitelikleri atık üreticilerine tam olarak anlatılmalıdır. Örneğin kompostlama kullanılacaksa atığın “kompostlanabilir” olarak tanımlanmış olması gereklidir, “çözünebilir” veya “biyolojik olarak parçalanabilir” şeklinde etiketlenmiş olması kompost için uygun değildir. Kaliteli kompost üretebilmek için sadece kompostlanabilir olanların ayrılması sağlanmalıdır.

Ayrı toplamanın ilk yatırımı ve işletilmesi yerel yönetimlere veya ilgili kuruluşa önemli bir maddi yük getirmektedir, bu yüzden detaylı bir fizibilite çalışması yapılmalıdır. Optimize edilmiş bir ayrı toplama sisteminin hem atık üreticilerine, hem de yüklenici firmaya ekonomik fayda sağlandığını gösteren analizler mevcuttur (Bras vd., 2022; Niskanen & Kempfi, 2019).

Biyoatıklar doğası gereği herhangi bir koku ve bozunma olmaksızın, fazla bekletilmeden günlük olarak toplanmalı ve ilgili prosese ulaştırılmalıdır. Ancak, çok sayıda toplama aracının, sürekli kapı önlerinden ve kaldırım kenarlarından konteynir taşınması işletme maliyetini yükseltir, ayrıca hijyenik şartların sağlanması da oldukça zordur. Bu yüzden halkın biyoatıklarını atık getirme merkezlerine getirmesinin teşvik edilmesi daha ekonomik ve sağlıklı bir çözüm yolu olabilir. Ayrı toplama sistemi, biyoatıkların proseslenmesi sonucu elde edilen kaliteli ürünlerden (kompost veya enerji) elde edilebilecek ekonomik gelir ile desteklenebilir. Pilot ölçekli olarak başlatılan ayrı toplama sistemleri zamanla geliştirilerek genişletilmelidir.

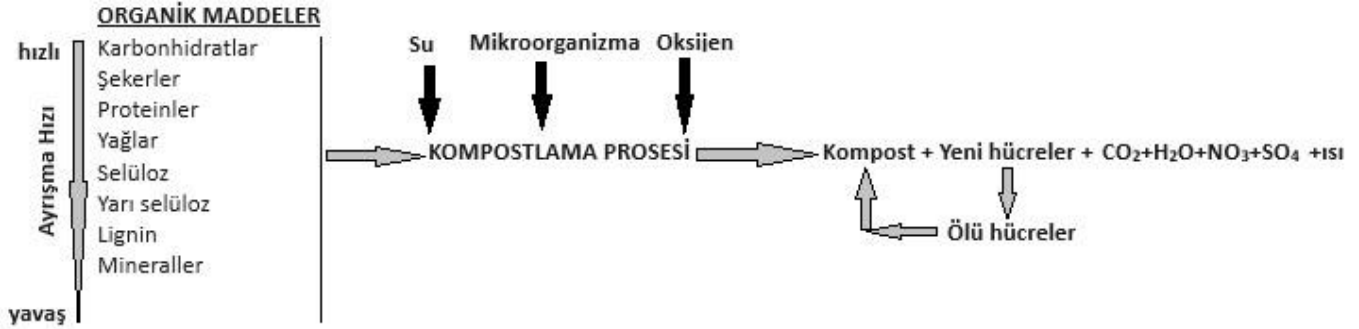
AB'nin raporuna göre (EEA, 2020) 2017 yılında veri sağlanabilen Avrupa ülkelerinde oluşan toplam biyoatığın yaklaşık %50'si ayrı, kalan %50'si karışık atıklarla birlikte toplanmaktadır. Ayrı toplama oranları ise Avusturya ve Slovenya'da %80, Portekiz, İspanya, Kuzey Makedonya, Türkiye'de %10'un altında olarak rapor edilmiştir. Toplamda AB üyesi ülkelerin biyoatıklarının ortalama %43 kadarı ayrı toplanırken, Yaklaşık %57'si karışık evsel atıklar içinde sonlanmakta ve yeniden dönüşüme dâhil olamamaktadır.

Kentsel Biyoatıkların İşlenmesi

Kentsel biyoatıklar toplandıktan kısa süre sonra, olası çevresel etkilerinin kontrol altına alınması, ekonomik değeri olan ürün veya enerji elde edilmesi için bir prosesleme işlemine tabii tutulmalıdır. Kentsel biyoatıklar, gelişmiş ülkelerde yaygın olarak kullanılan kompostlama ve anaerobik çürütme yöntemleri ile proseslenebilir. Mevcut prosesler dikkate alındığında halihazırda kompostlama kapasitesi daha yüksek görünmekle birlikte, yenilenebilir enerji kaynağı olarak kabul edilen AD prosesi sağladığı çevresel ve ekonomik faydadan dolayı gün geçtikçe daha fazla tercih edilmektedir (EEA, 2020).

BİYOATIKLAR İÇİN KOMPOSTLAMA

Kompostlama işlemi, BB maddelerin oksijenli ortamda kontrollü olarak mikroorganizmaların metabolizma faaliyetleri ile parçalanmasını içeren bir biyolojik dönüşüm prosesidir (Şekil1).



Şekil 1. Kompost Süreci

Kompost oluşum prosesinin tamamlanması tesise gelen atık materyale olduğu kadar kompost sürecinde görev alan canlılar için uygun ortam şartlarının sağlanmasına bağlıdır. Kompost sürecinde görev alan mikroorganizmaların yaşamsal aktivitelerini biyoatık kütlelerinin sıcaklığı, pH değeri, partikül boyutu, havalandırma (oksijen) ve nem içeriği ve elektriksel iletkenliği etkiler (Li vd., 2013). Etkin bir kompostlama için yeterli oksijen varlığında nem seviyesinin %50-60 olması önerilmiştir (Zhang vd., 2011). Yeterli oksijen ise karıştırma ile sağlanabilir (Andersen vd., 2010).

Kompostlamanın faydaları;

Biyoatık hacmi %30'dan daha fazla indirgenir, atık kararlı hale getirilir (El-Sayed, 2015)

İdeal şartlar altında çalışan bir kompostlama prosesinde metandan çok karbondioksit oluşur. Kompostlama sırasında meydana gelen CH₄ emisyonları başlangıçtaki karbonun yaklaşık %1-4'ü kadardır (Pickin & Randell, 2017; Jiang vd., 2011).

Azot, fosfor ve kalsiyum bakımından zengin bir gübre elde etmek için biyoatık, ağır metal ve paketlenmiş kullanılabilecek biyobozunur etiketli plastik ürünler gibi yabancı maddeler içermemelidir (Kulikowska vd., 2015)

Saf biyoatıktan elde edilen kompost toprağın su tutma, nütrient tutma ve karbon depolama yeteneğini artırabilir ve gübre olarak tarımda kullanılabilir (EEA, 2020).

Mineral azot, fosfor ve potasyum gübrelerin yerine kompost ürünü kullanılması gübre üretiminden ve kullanımından kaynaklanacak çevresel etkiyi indirger.

Kompost aynı zamanda ağır metallerle kirlenmiş topraklarda, ağır metalleri toprak matriksi içinde tutarak bioremedation sağlayabilir (Kulikowska vd., 2015).

Kompost Prosesinde Oluşan Gaz Emisyonları

Kompostlama sürecinde kompost yığınının nem içeriği, oksijen seviyesi, sıcaklığı, C/N oranı ve mikroorganizma aktivitesi uygun olduğunda ortaya çıkan gaz emisyonları, CO₂ ve NH₃'den oluşur. Amonyak emisyonları, azot bakımından zengin substratların kompostlaşmaya başladığı, yüksek sıcaklık ve pH> 6'nın olduğu termofilik faz sırasında en yüksek seviyededir (Jarvis vd., 2009).

Kompost proseslerinin çalışma şartlarının bozulması koku ve sera gazı emisyonlarına neden olabilir (DiMaria vd., 2018). Kompost içinde oksijenin azaldığı bölgelerde oluşan anoksik şartlarda nitrifikasyon ve denitrifikasyon süreçleri eş zamanlı gerçekleşerek N₂O emisyonu artabilir (Angnes vd., 2013; Hwang & Hanaki, 2000). Kompost ortamında oksijen yokluğunda oluşan anaerobik şartlar CH₄ emisyonlarına neden olabilir (Jiang vd., 2011). Kompost yığınının sıcaklığı yığın içerisinde faaliyet gösteren mikroorganizmaların ve metanojenlerin aktivitesini etkiler. Örneğin; 40- 60 °C ve üzerindeki sıcaklıklar sera etkisi yüksek CH₄ ve N₂O gaz emisyonlarının çıkışına neden olabilir (Amlinger et al. 2008). CH₄ ve N₂O emisyonları 100 yıllık küresel ısınma potansiyeli (global warming potential; GWP) tahmininde önemli bir etkiye sahiptir (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007). Bu yüzden, her iki gazın emisyonlarının minimize edilmesi küresel ısınma açısından oldukça önemlidir.

Kompostun Kalitesi

Elde edilen kompostun ulusal ve uluslararası pazarlarda rekabet edebilmesi için ilgili standartları sağlaması gerekir. Bu amaçla kompost tesislerine giren maddeler sürekli denetlenmeli ve aksaklıklar giderilerek kompostun kalitesi satışı

uygun seviyede tutulmalıdır. Ayrı toplamayı ve kompost tesislerini etkin çalıştırmayı başarabilen ülkelerde kompost kalite standartları oluşturulmaktadır. Şimdiye kadar 11 AB ülkesi ilgili standartları hazırlamış ve uygulamaktadır (EEA, 2020). Kompost ürünü için belirlenen standartlar kompost tesisi işletmecileri tarafından benimsenir ve uygulanırsa kentsel biyoatıkların çevresel döngüsü sürdürülebilir şekilde başarılmış olur. Şekil 2’de Avrupa kompost çalışma ağının (European Compost Network; ECN) yönetim ve güvence (teminat) planı verilmiştir (ECN, 2018). Avrupa kompost ağının kalite yönetimi ve güvence planının temel unsurlarını tamamlayan yönetimlere kompost sertifikası verilir.



Şekil 2. Avrupa Kompost Ağının Kalite Yönetimi ve Güvence Planının Temel Unsurları (ECN, 2018).

Kompostlama faaliyeti depolama ile karşılaştırıldığında pahalı gibi görünse de 20 yıllık bir değerlendirme sürecinde depolama faaliyetlerinin maliyetinin yarısından daha az olacaktır (Lee vd., 2017). Kompostlama faaliyeti yerel yönetimler tarafından planlanan ve işletilen merkezi kompost tesislerinde gerçekleştirilebileceği gibi evde kompost uygulaması da mümkündür. Kentsel biyoatıkların yönetimi planlanırken mevcut şartlar değerlendirilerek, her iki kompostlama uygulaması plana dâhil edilebilir.

Evde Kompostlama

Evde veya bahçede kompost uygulaması sürdürülebilir kentsel biyoatık yönetimi kapsamında gün geçtikçe daha fazla önem kazanmaktadır (Andersen vd., 2011). Evde kompostlama uygulamasında atık üreticisi, hem kompostu üreten, hem de kullanan durumdadır. Evde kompost; mutfak atıklarının ve bahçe artıklarının diğer atıklardan ayrılmasını, atık üreticisi tarafından kompostlanmasını ve elde edilen ürünün de saksı veya bahçede kullanılmasını içerir (Colon vd., 2010). Evde kompostlamanın kullanılması ile biyoatıkların ayrı toplanmasına gerek kalmaz. Böylece atık toplama ve taşıma prosesi süresince oluşabilecek emisyonlar ve maliyetler azalır (European Commission, 2015; Andersen vd., 2011). Son yıllarda Avrupa atık depolama direktiflerinde (Council of the European Communities, 1999) yer alan biyoatıkların depolama alanlarına gelmemesi kuralı kapsamında birçok ülke tarafından atık yönetim hiyerarşisine dâhil edilmeye çalışılmaktadır. Evde kompost yöntemi bireysel bir tercih olduğundan, sürekliliği belediyeler tarafından kontrol edilemez. Bu nedenle biyoatıkların yönetimi için tek başına uygulanabilir bir seçenek değildir. Ancak mevcut yönetim sistemine olumlu katkı yapmak üzere teşvik edilebilir.

Özellikle dağınık yerleşim düzenine sahip kentsel veya kırsal yerleşim alanlarındaki atıkların yönetiminin planlanması yerel yönetimler için bazı zorluklar içerir. Yerel yönetimler, toplama ve taşıma maliyetleri veya coğrafik koşullar nedeniyle kırsal bölgelerdeki atıkların yeterli sıklıkta toplanmasını ve taşınmasını çoğu zaman sağlayamaz. Bu durumda dere kenarlarına, boş arazilere atmak veya yakmak gibi kontrolsüz ve yasa dışı uygulamalar görülebilir. Bu uygulamalar insan sağlığına ve çevreye çok önemli zararlar verebilir; hava, su ve toprak kirliliğine neden olabilir. Bu tip yerleşim alanlarında oluşan atığı yerinde proseslemek ve hacim azalması sağlamak sürdürülebilir atık yönetimine önemli maddi katkı sağlayacaktır (EEA, 2020). Kırsal alandaki halkın evde kompost uygulamasına katılmasında, bireyin kompostu kullanabileceği bir bahçeye sahip olması, kompost yapımı konusunda yerinde uygulamalı eğitim verilmesi ve evde kompost uygulamasının çevreye katkısı hakkında bilgilendirilmesi etkilidir. Aynı zamanda, evde kompost aktivitesinin sürdürülebilir olması için yerel yetkililerin üretilen kompostun kalite ve kullanımını sürekli denetlemesi gerekir (Loan vd., 2019). Evde kompostlama aktivitesine halkın katılımını artırmak için, toplama ve taşıma sürecinden edilecek kârın bir kısmı evde kompost katılımcılarına teşvik desteği olarak verilebilir. Evde kompostlama prosesi birçok AB ülkesinde kısmen kullanılmaktadır (EEA, 2020).

Evde kompost üretiminde uygulama koşullarına bağlı olarak bazen sera gazları ortaya çıkmakla birlikte, kompost malzemesi daha sık karıştırılarak bu olumsuz etki bir miktar indirgenebilir (Andersen vd., 2011). Merkezi kompostlama tesisleri, evde kompostlama uygulamasına oranla 2-5 kat daha az NH_3 , N_2O ve CH_4 oluşumuna neden olabilir (Martinez-Blanco vd., 2010) Bununla birlikte, merkezi kompostlama tesisine ulaşım için toplama mesafesinin 30-40 km'den fazla olduğu yerleşimlerde, evde kompost yapılması; biyoatıklar için toplama ve taşıma faaliyeti sırasında oluşabilecek NO_x , CO ve uçucu organik karbon emisyonunu, dolayısıyla zararlı fotokimyasal ozon oluşumunu da önemli oranda indirgeyebilir. Aynı zamanda, merkezi kompost tesisinin yükü ve proseseleme için gerekli enerji ihtiyacı azalacağından, fosil yakıt kaynaklı sera gazı emisyonları da azalır (Andersen vd., 2010). Evde kompost kaplarının kapasitesinden daha fazla biyoatık çıkması halinde fazla atık proseslenmeden kalabilir. Bu sorunu çözmek ve kompostlanan biyoatık miktarını dengelemek için site veya mahalleyi kapsayan küçük ölçekli merkezi kompost yerleşimleri oluşturulması önerilebilir. Ev kompost uygulaması doğru şartlarda yapılmazsa veya tamamı bahçelerde kullanılmazsa elde edilen kompostun atık depolama tesislerine gitmesi gerekir. Bu nedenle, kompostun her türlü kontrollü olarak üretilmesi ve uygun şekilde değerlendirilmesi planlanmalıdır. Evde kompost uygulaması için, Bahçe Kompostu, Vermikompost, Bukashi (Bokashi) kompostu, Kompost makineleri olmak üzere birkaç alternatif yöntem bulunmaktadır.

Bahçe Kompostu

Bahçe kompostu için havalandırma düzeneği bulunan uygun büyüklükte bir kutu veya sandık hazırlanır. Bu tür ekipmanlar evde yapılabileceği gibi, ticari olarak da kolaylıkla sağlanmaktadır. Bahçe kompost uygulamalarının doğru bir şekilde yapılması ve iyi kalitede kompost elde edilmesi, CH_4 ve N_2O gibi yüksek sera gazı potansiyeline sahip gaz emisyonlarının oluşmaması için çok önemlidir. Aksi halde bahçe kompostundan beklenen faydalar sağlanmadığı gibi kötü kokulu ve bertaraf edilmesi gereken bir atık oluşur. Kompost kutusu, bahçede gölgeye ve su ilavesi mümkün olan bir yere yerleştirilir.

Bahçe kompostu için yeşil-kahverengi bahçe atıkları ve mutfak atıkları kullanılır. Nem-oksijen dengesini sağlamak için arada nemiendirilir ve karıştırılır. Yeşil bahçe atıkları azot kaynağı, kahverengi olanlar ise karbon kaynağı olarak mutfak atıklarının kompostlanması için gerekli ortamın oluşturulmasına destek olur. Kompostlanan materyalin parçalanma hızına bağlı olarak 4-12 hafta arasında kompost oluşumu tamamlanır. Olgun kompost koyu renkli, ufalanabilir ve toprak kokusunda olmalıdır (Beck, 2023). Bahçe de kompost yapmak çevreye duyarlı bir yaklaşım olmasının yanı sıra emek ve dikkat isteyen bir uygulamadır. Uygun işletme koşullarında çalıştırılmayan veya kompost yığımına konmaması gereken malzemeleri içeren kompost kutuları böcek ve kemirgenler için cazip bir ortam haline gelebilir. Kötü bir koku yayılımı söz konusu olabilir.

Vermikompost

Bahçe kompostunun zorluklarından dolayı son zamanlarda "kırmızı solucanlar" kullanılarak yapılan solucan gübresi veya vermikompost oldukça ilgi çekmektedir. Kırmızı solucanlar besin maddesi olarak yemek artıklarını kullanırlar. Solucanların sindirim atıkları azot açısından zengin gübre olarak kullanılabilir. Hayvansal atıklar (yağ, kemik, süt ürünleri, et atıkları), odunsu veya kuru maddeler, plastik çay poşetleri, kahve filtreleri, yapışkan etiketler solucanların tüketmesi için uygun değildir. Solucan kutusundaki solucan sayısı her kompost oluşumu sonrası bir miktar artacağından, kutuya eklenen artık miktarı da her defasında biraz daha artırabilir. Birkaç ay içerisinde kompost kabı tamamen dolunca, alttan kompost sıvısı boşaltılır. Vermikompost uygun şartlarda yapıldığında kötü koku oluşturmaz ve karmaşık bir süreç değildir. Elde edilen vermikompost sıvısı ve kompostu, saksı veya bahçelerde toprak iyileştirici olarak güvenle kullanılabilir (Beck, 2023).

Bokashi Kompostu

Mutfak artıklarının özel bir kaptaki bokashi aşısı kullanılarak anaerobik ortamda mikroorganizmalar tarafından fermente edilmesi sonucu bokashi kompostu elde edilir. Bokashi aşısı, fermentasyon için gerekli mikroorganizmalar ve bu mikroorganizmaların işleyişini kolaylaştırmak için melas, buğday tohumu, buğday kepeği veya talaştan oluşur (Vanderlinden, 2022). Fermentasyon süreci sonunda oluşan fermentasyon sıvısı (Bokashi Çayı) ev bitkilerini gübrelemekte kullanılabilir. Bokashi kompostlama sürecinin ilk adımı 2 hafta içinde tamamlanır (Bokashi O., 2022) Bu zaman süresi içerisinde iki-üç günde bir oluşan sıvının boşaltılması ve fermentasyon kütesinin kuru tutulması gerekir aksi halde kütle çürümeye başlar ki bu istenmeyen bir durumdur. Sıvı ürün elde edildikten sonra kalan malzemenin parçalanmasını tamamlaması ve kararlı hale gelmesi için bahçeye gömülmesi, klasik bir kompost yığımına veya vermikompost kutusuna eklenmesi gereklidir. Bokashi kompostunun klasik kompostlamaya göre avantajları aşağıda verilmiştir (Bokashi O., 2022);

Oluşan kompost karbon ve azot yönünden zengindir. Çünkü klasik kompostlama da olduğu gibi CO₂ ve NH₃ olarak ortamdaki ayrılmaz

Bokashi yönteminde sera gazı çok az üretilir veya hiç üretilmez.

Sıkı bir şekilde kapatılmış kutularda gerçekleştiği için rahatsız edici bir koku ortaya çıkmaz hissedilen koku genellikle maya veya sirke kokusu gibidir.

Kompostlaştırmanın yapılması için artık içindeki karbon/azot oranı önemli değildir.

Kompost Makineleri

Bahçesi olmayan veya evde kompost yöntemlerinin kontrol zorluklarını yaşamak istemeyen bireyler için farklı boyutlarda kompost makineleri satışa sunulmuştur (TOGO, 2022). Mutfak kompost makineleri gıda artıklarını parçalar ve birkaç saat uygun ısıda beklettikten sonra, saksı bitkileri veya bahçe toprağına gübre olarak eklenebilen gevşek ve kuru bir malzeme üretir. Bununla birlikte, kompost makinelerinin elektrikle çalışması çevreye duyarlı kullanım amacına ters düşecek şekilde enerji tüketimine dolayısıyla az da olsa sera gazı üretimine neden olur. Ayrıca bu makinelerin sürekli kullanımı sağlanamazsa son yıllarda büyük sorun olan elektrikli atık, plastik atık ve metal atıklara dönüşme tehlikesi de mevcuttur. Mutfak kompost makineleri aerobik kompostlama yaptıklarından ve karbon fitesine sahip oldukları için metan gazı üretmeleri söz konusu değildir. Mutfak kompostu için ekipman alımına karar verirken, ürün yaşam döngüsünü benimseyen üretici firmaların tercih edilmesi çevre ile ilgili endişeleri azaltabilir (Brown, 2021). Kompost makineleri, evde kompostlamanın teşvik edildiği atık yönetimde önemli avantajlar sağlayabilecek bir alternatiftir. Ancak kullanımı kişisel bir tercih olduğundan denetlenmesi ve sürdürülebilmesi oldukça zordur.

BİYOATIKLAR İÇİN ANAEROBİK BOZUNMA (ANAEROBIC DIGESTION; AD)

Anaerobik bozunma prosesi temel olarak biyobozunabilir materyalin oksijensiz ortamda ve kontrollü olarak biyolojik ayrıştırılması işlemidir. AD prosesinde gerçekleşen parçalanma süreci dört adımda gerçekleşir; hidroliz, asit oluşumu, asetik asit oluşumu ve metan oluşumu. Hidroliz adımı hız sınırlayıcı adımdır. Bu aşamada karbonhidrat, protein ve yüksek moleküllü yağ asitleri, şekerlere, amino asitlere ve düşük moleküllü yağ asitlerine indirgenir (Demichelis vd., 2022). Biyoatıklar AD prosesinde anaerobik şartlar altında parçalandığında esas olarak metan ve karbondioksitten oluşan biyogaz elde edilir. Kentsel biyoatıklar gibi kompleks bir içeriğin AD prosesinde biyogaz gibi temiz ve yenilenebilir enerjiye dönüştürülmesi, oldukça ilgi çeken çevresel olarak sürdürülebilir bir atık yönetim alternatiftir (Ardolino vd., 2018).

Biyoatıkların madde dönüşüm prosesi olarak AD kullanıldığında; fosil yakıt kaynakları korunur, fosil yakıttan enerji üretimi sırasında salınan sera gazı emisyonu azalır, temiz enerji elde edilir. AD proseslerinde üretilen biyogaz veya enerji ile ekonomik bir gelir sağlanırken, uygun kalitede bozunma yan ürünü elde edilirse, bu ürün tarımsal aktiviteler için bir gübre olarak kullanılabilir (Esposito vd., 2012).

Almanya, Fransa, İsveç ve Kanada gibi birçok ülkede kentsel katı atıkların organik kısımlarının kullanılmasıyla biyogaz kazanım uygulamaları önemli gelişmeler göstermiştir. AD prosesi kullanıldığında oluşan metan hacminin ve elde edilen enerjinin, gaz yakalamalı depolama alanlarından elde edilenden yaklaşık 5 kat fazla olduğu hesaplanmıştır (Ayodele vd., 2018).

AD prosesinin verimini doğru değerlendirmek için prosese gelen atık kompozisyonunu tam olarak bilmek gerekir. Çünkü farklı hammaddelerin bozunma oranları ve üretebilecekleri biyogaz miktarı farklıdır. Yüksek lignin içeriğine sahip kağıtlar ve odunsu maddeler anaerobik bozunma prosesi için uygun olmayabilir (Nizami, 2012). Yapılan bir çalışmada gıda atığını ve kaynakta ayrılmış kentsel biyoatığı hammadde olarak kabul eden iki AD prosesinde yapılan incelemeler sonucunda potansiyel enerji kazanımının yaklaşık 400 kWh/ton hammadde olduğu belirlenmiştir (Banks vd., 2011).

Biyoatıkların AD prosesinde kullanılmasının sürdürülebilir olması için, proses yan ürünlerinin yönetimi de planlanmalıdır. Prosesin yan ürünü, biyobozunur madde ve mineraller yönünden zengin yarı kararlı bir malzemedir. Avrupa Atık kataloğunda (EUR-Lex.,2000) atık olarak tanımlanan bu yan ürünün, hijyen, safsızlıklar, fermantasyon seviyesi, koku, biyobozunur madde içeriği ile ilgili yasal standartları sağlayacak şekilde işlem gördükten sonra araziye uygulanabileceği belirtilmektedir.

Ancak yüksek taşıma maliyetleri, AD prosesi yan ürününün büyük ölçekli araziye uygulanmasını sınırlandırabilir (Delzeit & Kellner, 2013). Ayrıca AD prosesinin yan ürünü zengin besin maddesi içeriğinden dolayı su ortamlarında

ötrifikasyona da sebep olabilir, bu nedenle azot ve fosfora doygun olan arazilerde nihai bertarafı uygun değildir (Lukehurst vd., 2010). Anaerobik proses yan ürününün araziye uygulanmasının uygun olmadığı durumlarda, ürünün piroliz prosesinden geçirilmesi bir seçenek olabilir (Lohri vd., 2017). Ürünün içeriği katı atık depolama saha standartlarını karşılarsa, suyu alındıktan ve stabilize edildikten sonra katı atık depolama sahalarında günlük, geçici ve nihai örtü malzemesi olarak da kullanılabilir (Peng & Pivato, 2017).

BİYOATIKLARIN İŞLENMESİ İÇİN ARAŞTIRMA AŞAMASINDAKİ PROSESLER

Evsel atıklar içerisindeki BB maddelerin depolamaya gitmeden çevresel ve ekonomik maksimum fayda elde edilecek şekilde yönetilmesi, gelişmiş ülkelerde gün geçtikçe benimsenmekte ve sürdürülebilir atık yönetiminin bir parçası haline gelmektedir. Aerobik kompostlama, anaerobik bozunma prosesleri dışında kentsel biyoatıkların biyo-ürünler veya biyo-yakıt olarak verimli bir şekilde değerlendirilebilmesi için araştırma ve geliştirme çalışmaları halen devam etmektedir. Bu çalışmalardan birkaçına aşağıda değinilmiştir.

Piroliz; oksijensiz ortamda ve yüksek sıcaklıkta biyo kütleinin faydalı katı sıvı ve gaz ürünler üreterek parçalandığı bir termokimyasal prosestir (Lohri vd., 2017). Piroliz, kullanılarak düşük enerji potansiyeline sahip maddeler, yüksek enerjili biyoyakıtlara dönüştürülebilir, ilave olarak değerli kimyasallar elde edilir. Ancak pirolizi biyoatıklar için ekonomik olarak uygulayabilmek henüz mümkün olmamıştır (Czajczyńska vd., 2017).

Gazlaştırma; biyoatığı, yüksek sıcaklıkta sentez gazına dönüştüren bir ısıl prosestir. Üretilen gaz, yakıt olarak veya kimyasal üretmek için kullanılabilir. Gazlaştırma, minimum emisyon ürettiği ve çeşitli malzemeleri işlemek için uyarlanabilen esnek bir teknoloji olduğu için biyoatık arıtımı için umut verici bir teknoloji olarak kabul edilir (Watson vd., 2018).

HTK (Hidro Termal Karbonizasyon); biyoatıklardan aktif karbon elde edilen, yüksek basınçta, 180-250 °C sıcaklıkta, kısa sürede gerçekleşen termokimyasal bir işlemdir (Heidenreich vd., 2016). HTK, özellikle yüksek su içeriğine sahip biyolojik atıklar için uygundur. HTK prosesi atık hacminin önemli oranda azalması, kısa reaksiyon süresi ile biyoatık işlenmesi için dikkat çekici bir seçenektir (Pham vd., 2015).

Etanol üretimi; BB maddelerden fermantasyon prosesi kullanılarak, önemli sıvı biyoyakıtlardan biri olarak kabul edilen etanol üretilebilir. Günümüzde yakıt olarak kullanıma sunulan etanol, gıda olarak da tüketim potansiyeli bulunan mısır veya şeker kamışından üretilmektedir. Bununla birlikte gıda kıtlığının gündeme geldiği son zamanlarda bu hammaddeler yerine kentsel biyoatıkların fermentasyonundan elde edilmesinin de bir alternatif olduğu görüşü mevcuttur (EEA, 2020). Etanol fermentasyonunun maliyetli olması ve kentsel biyoatıkların doğası gereği sahip olduğu heterojenlik endüstriyel boyutlu biyoetanol üretimini zorlaştırmaktadır.

Bioatıkların anaerobik bozundurulması ile buharlaşabilir yağ asitlerinin (VFA's) üretimi; buharlaşabilir yağ asitleri, biyoyakıtların üretimi, biyobazlı plastikler ve atıksulardan nütrientlerin giderimi gibi birçok kullanım alanı olan değerli bir üründür. Günümüzde buharlaşabilir yağ asitleri kimyasal yöntemlerle fosil yakıtlardan üretilmektedir. Son yıllarda biyoatıklardan buharlaşabilir yağ asitleri üretilmesi ilgili çalışmalar, bu yöntemin sürdürülebilir ve ekonomik olarak uygulanabilir bir üretim prosesi olabilmesi için detaylı bir işletme optimizasyonuna ihtiyaç duyduğunu göstermiştir (EEA, 2020; Liu vd., 2018).

Biyorafineriler; Biyokütleinin kimyasallar, biyoyakıtlar, gıda ve yem bileşenleri, biyomalzemeler veya lifler gibi değerli ürünlere dönüştürüldüğü işleme tesislerine biyorafineriler denir (Fava vd., 2015). Mevcut tam ölçekli atık bazlı biyorafineriler, hammadde olarak genellikle tarım ve gıda işleme sonucu çıkan homojen atık akışlarını kullanır. Biyohidrojen üretimi; Biyoatık, değerli bir temiz enerji kaynağı olan hidrojen (H₂) üretmek için de kullanılabilir. Biyolojik atıklardan karanlık fermantasyon ve foto fermantasyon biyolojik süreçleri veya atıktan türetilen uçucu yağ asitleri ile H₂ üretimi mümkün olabilir. Ancak, düşük madde dönüşüm verimliliği ve düşük verim gibi endüstriyel ölçekte H₂ fermentasyon teknolojilerinin kullanımı için hala büyük engeller bulunmaktadır (Sabarathinam vd., 2016). Biyo-atıktan fosfor ve azot geri kazanımı; Fosfat kaynaklarının sınırlı olması nedeniyle gübre üretiminde kullanılmak üzere gıda atıklarından azot ve fosforun geri kazanılması üzerinde önemle durulmaktadır. Besi maddelerinin bu şekilde geri kazanılabilmesi sulardaki ötrifikasyonun da önüne geçebilir (Huang vd., 2017). Ancak geri kazanım teknolojisinin oluşturulması ve elde edilen ürünün gübrelerde kullanım potansiyeli açısından üzerinde çalışılmasına ihtiyaç vardır.

SONUÇLAR VE DEĞERLENDİRMELER

Kentsel atıklar içerisinde önemli bir yüzdeyi oluşturan biyoatıkların (biyobozunabilir organik atıklar) ayrı toplanması ve proseslenmesindeki belirsizlikler nedeniyle sürdürülebilir yönetiminin planlanması oldukça zordur. Sürdürülebilir atık yönetimi kapsamında, kentsel biyoatıkların, ayrı toplanması, proseslenmesi, ürün ve yan ürünlerin kullanılması ve son kalıntının bertarafına kadar yönetiminin bir bütün olarak planlanması ve kesintisiz uygulanması gereklidir. Biyoatıkların doğası gereği, atık yönetim adımlarındaki herhangi bir aksaklık geri dönülmesi zor ve masraflı sorunlara neden olur. Bu yüzden biyoatıkların yönetim planlaması, uygulaması ve kontrolü yerel yönetimlerin kısıtlı ekonomik imkanlarına bırakılmamalı, ulusal bir atık yönetim birimi oluşturularak gerçekleştirilmelidir.

Biyoatığın önlenmesi için alternatifler, gıda israfının önlenmesini sağlayabilmek veya tüketiciye attığın kadar öde (PAYT) yaklaşımının uygulanmasıdır. Gıda israfını önlemek için atık üreticisini bilinçlendirmek ve israftan uzaklaştırmak böylece daha az atık üretmesini sağlamak gereklidir. Gıda israfının önlenmesi, üretim sırasında kullanılan hammadde, enerji, paketlenme ve dağıtım ihtiyacını azaltır. Böylece hem kaynakların korunması sağlanır, hem de sera gazı emisyonları önlenir.

Biyoatıkların ayrı toplanması sonraki yönetim adımlarının başarılı olabilmesi için ön şarttır. Biyoatıklar oluştuktan hemen sonra biyokimyasal aktivite başladığından koku, sinek gibi olumsuzluklar oluşmayacak sıklıkta toplanmalıdır. Tüketicinin biyoatığını atık getirme merkezine getirmesinin sağlanması veya evde kompostlama yapması taşıma maliyetini ve kısa periyotlarda taşımaya bağlı sera gazı emisyon miktarını azaltabilir.

Biyoatıkların dönüşümü için genellikle kompostlama ve AD prosesi önerilir. Biyoatıkların kompostlanması sonucunda toprak iyileştirici olarak kullanılabilen, ekonomik değeri olan bir ürün elde edilir. Bu ürünün tamamının toprağa uygulanması veya satılması başarılırsa prosesin kullanımı amacına ulaşmış olur. Elde edilen kompost ürününün uluslararası pazarda satılması için kalitesini belgeleyen kompost sertifikasına sahip olması gerekir. Kompostlama merkezi sistemlerde yapılabileceği gibi atık üreticisinin istek ve yeteneği doğrultusunda evde de gerçekleştirilebilir. Son yıllarda, yenilenebilir enerji talebine bağlı olarak, yenilenebilir enerji kaynağı olarak kabul edilen AD prosesine olan ilgi de artmıştır. AD prosesinin kullanılması fosil yakıt kaynaklarının kullanımını azaltarak kaynak koruması sağlarken, sera gazı emisyonlarını da azaltmaktadır. Biyoatıklar için AD prosesi kullanılması çevre dostu enerji elde edilmesini sağladığından iyi bir atık yönetim ve geri dönüşüm alternatifidir. Biyoatık yönetiminin sürdürülebilir olması, planlama sırasında teorik bilgilerin yanı sıra, bölgenin coğrafik yapısı, halkın sosyo-ekonomik durumu, eğitim seviyesi, kültürel alışkanlıkları dikkate alınmasına bağlıdır. Ayrıca, biyoatıkların toplanmasından itibaren tüm yönetim planlaması ve uygulaması tek merkezden yapılırsa, bir adımın geliri diğer adımın giderine destek olacağından, atık yönetim uygulamasının ekonomik sürekliliği sağlanabilir.

KAYNAKLAR

- Allen, S. & Wentworth, J. (2011), Anaerobic digestion. POSTNOTE 387, *Parliamentary Office of Science and Technology*, London 1-3. <https://researchbriefings.files.parliament.uk/documents/POST-PN-387/POST-PN-387.pdf> /Accessed 30.08.2023)
- Amlinger, F., Peyr, S., Cuhls, C. (2008). Green house gas emissions from composting and mechanical biological treatment. *Waste Management and Research*, 26;1, 47-60. DOI: 10.1177/0734242X07088432
- Andersen, J.K., Boldrin, A., Christensen, T.H., Scheutz, C. (2011). Mass balances and life cycle inventory of home composting of organic waste. *Waste Management*, 31, 1934-1942. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.05.004>
- Andersen, J.K., Boldrin, A., Samuelsson, J., Christensen, T.H., Scheutz, C. (2010). Quantification of greenhouse gas emissions from windrow composting of garden waste. *J. Environ. Qual.*, 39, 713-724. <https://doi:10.2134/jeq2009.0329>
- Angnes, G., Nicoloso, R.S., da Silva, M.L.B., de Oliveira, P.A.V., Higarashi, M.M., Mezzari, M.P., Miller, P.R.M. (2013). Correlating denitrifying catabolic genes with N₂O and N² emissions from swine slurry composting. *Bioresource Technology*, 140, 368-375. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.04.112>
- Ardolino, F., Parrillo, F., Arena, U. (2018). Biowaste-to-biomethane or biowaste-to-energy? An LCA study on anaerobic digestion of organic waste. *J. Clean. Prod.*, 174, 462-476. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.320>

- Ayodele, T.R., Ogunjuyigbe, A.S.O., Alao, M.A. (2018). Economic and environmental assessment of electricity generation using biogas from organic fraction of municipal solid waste for the city of Ibadan, Nigeria. *Journal of Cleaner Production*, 203, 718-735. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.282>
- Banks, C., Chesshire, M., Heaven, S. (2011). Biocycle anaerobic digester: performance and benefits. *Waste and Resource Management*, 164:1, 141-150. <https://doi.org/10.1680/warm.2011.164.3.141>
- Beck, A., (2023). How to make compost to feed your plants and reduce waste. Better homes & gardens.Dotdash meredith. <https://www.bhg.com/gardening/yard/compost/how-to-compost/Accessed 25.08.2023>
- Bokashi Organko. (2022). How long does it take to convert food in to bokashi compost. Plastik Skaza,EU <https://bokashiorganko.com/bokashi-library/convert-food-into-bokashi-compost/Accessed 28.09.2023>
- Bras, I.P., Maia, S., Simoes,L.M., Rabaça, T.,Silva M.E. (2022). Selective collection of biowaste in a non-intensive urban region- Producers' characterization. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 29. <https://doi.org/10.1016/j.scp.2022.100738.29>,
- Brown, F. (2021) Electric Composters: Sustainability Win or Another Unnecessary Appliance?. Earth911 More Ideas, Less Waste. <https://earth911.com/home-garden/electric-composters-sustainability-win-or-another-unnecessary-appliance/Accessed 15.09.2023>
- Colón, J., Martínez-Blanco, J., Gabarrell, X., Artola, A., Sánchez, A., Rieradevall, J., Font, X. (2010). Environmental assessment of home composting. *Resource Conservation and Recycling*, 54, 893-904. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2010.01.008>
- Council of the European Communities. (1999). Council Directive 1999/31/EC of 26 April 1999 on the landfill of waste. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex%3A31999L0031/Accessed 10.08.2023>
- Czajczyńska, D., Nannoub, T., Anguilanoc, L., Krzyżyńska, R., Ghazald, H., Spencere, N., Jouhara, H. (2017). Potentials of pyrolysis processes in the waste management sector. *Energy Procedia*, 123, 387-394. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.07.275
- Delzeit, R. & Kellner, U.(2013). The impact of plant size and location on profitability of biogas plants in Germany under consideration of processing digestates. *Biomass Bioenergy*, 52, 43-53. DOI:10.1016/j.biombioe.2013.02.029
- Demichelis, F., Tommasi, T., Deorsola, F.A., Marchisio, D., Mancini, G., Fino, D. (2022). Life cycle assessment and life cycle costing of advanced anaerobic digestion of organic fraction municipal solid waste. *Chemosphere*, 289. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.133058>
- Di Maria, F., Sisani, F., Contini, S. (2018). Are EU waste-to-energy technologies effective for exploiting the energy in bio-waste? *Applied Energy*. 230, 1557-1572. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.09.007>
- ECN. (2018). Quality Manual of the European Quality Assurance Scheme for Compost and Digestate. www.compostnetwork.info/download/ecn-qasmanual/Accessed 11.09.2023
- El-Sayed, K. (2015) Some physical and chemical properties of compost. *Int. J. Waste Resour*, 5, 1-5. DOI:10.4172/2252-5211.1000172
- Environmental Protection Agency (EPA). (2013) Inventory of US Greenhouse Gas Emissions and Sinks: 1990–2011. <http://epa.gov/climatechange/Downloads/ghgemissions/US-GHG-Inventory-2013-Main-Text.pdf/Accessed 12.08.2023>
- Esposito, G., Frunzo, L., Giordan, A., Liotta, F., Panico, A., Pirozzi, F. (2012). Anaerobic co-digestion of organic wastes. *Rev Environ Sci Biotechnol*, 11,325-341. <https://doi.org/10.1007/s11157-012-9277-8>
- EU, 2008, Directive 2008/98/EC of the European Parliament and of the Council of 19 November 2008 on waste and repealing certain Directives <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2008/98/oj>
- EU,2018, Directive (EU) 2018/851 of the European Parliament and of the Council of 30 May 2018 amending Directive 2008/98/EC on waste <http://data.europa.eu/eli/dir/2018/851/oj>
- EUR-Lex. (2000). 2000/532/EC: COMMISSION DECISION. An official website of the European Union. <http://data.europa.eu/eli/dec/2000/532/oj>

- European Commission. (2015). Assessment of separate collection schemes in the 28 capitals of the EU, , Brussels <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/2c93de42-a2fa-11e5-b528-01aa75ed71a1>/Accessed 30.11.2023
- European Environment Agency, (2012). The European environment-state and outlook 2010: consumption and the environment-2012 update, <http://www.eea.europa.eu/publications/consumption-and-the-environment-2012>/Accessed 12.10.2023.
- European Environment Agency, 2020, Bio-waste in Europe — turning challenges into opportunities, EEA Report, No 04/2020, ISSN 1977-8449. <https://www.eea.europa.eu/publications/bio-waste-in-europe>/Accessed 18.08.2023.
- Fava, F., Totaro, G., Diels L., Reis M., Duarte J., Carioca, O.B., Poggi-Varaldo H.M., Ferreira B.S. (2015). Biowaste biorefinery in Europe: opportunities and research & development needs. *New Biotechnology*, 32:1, 100-108. DOI: 10.1016/j.nbt.2013.11.003
- Hebda, C., Gaustad, G., Williamson, A., Trabold, T., (2016). Determining economically optimal household organic material management pathways. *Resources, Conservation and Recycling*, 108, 88-96. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.12.002>
- Heidenreich, S., Müller M., Foscolo P.U. (2016). Advanced biomass gasification — new concepts for efficiency increase and product flexibility. Elsevier/Academic Press, Amsterdam. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-804296-0.00002>
- Hoornweg, D. & Bhada-Tata, P. (2012). What a Waste: a Global Review of Solid Waste Management. World Bank, Washington, DC. <https://www.compostnetwork.info/download/ecn-gasmanual>
- Huang, R., Fang C., Lu, X., Jiang, R., Tang, Y. (2017). Transformation of phosphorus during (hydro)thermal treatments of solid biowastes- reaction mechanisms and implications for reclamation and recycling. *Environmental Science & Technology*, 51:18, 10284-10298. DOI: 10.1021/acs.est.7b02011
- Hwang, S.J. & Hanaki, K. (2000). Effects of oxygen concentration and moisture content of refuse on nitrification, denitrification and nitrous oxide production. *Bioresource Technology*, 71:2, 159-165. [https://doi.org/10.1016/S0960-8524\(99\)90068-8](https://doi.org/10.1016/S0960-8524(99)90068-8)
- Intergovernmental Panel on Climate Change, (2007). Climate change 2007- The physical science basis. Contribution of working group I to the fourth assessment report of the IPCC. Cambridge University Press. <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ar4-wg1-frontmatter-1.pdf>
- Jalalipour, H., Jaafarzadeh, N, Morscheck, G., Narra, S., Nelles, M. (2020). Potential of Producing Compost from Source-Separated Municipal Organic Waste (A Case Study in Shiraz, Iran). *Sustainability*, 12. doi:10.3390/su12229704
- Jarvis, A., Sundberg, C., Milenkovski, S., Pell, M., Smårs, S., Lindgren, P.E., Hallin, S. (2009). Activity and composition of ammonia oxidizing bacterial communities and emission dynamics of NH₃ and N₂O in a compost reactor treating organic household waste. *Journal of Applied Microbiology*, 106:5, 1502–1511. doi: 10.1111/j.1365-2672.2008.04111
- Jiang, T., Schuchardt, F., Li, G., Guo, R., Zhao, Y. (2011). Effect of C/N ratio, aeration rate and moisture content on ammonia and green house gase mission during the composting, *Journal of Environmental Sciences*, 23:10, 1754-1760. [https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(10\)60591-8](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(10)60591-8)
- Kulikowska, D., Gusiatin, Z.M., Bułkowska, K., Kierklo, K.(2015). Humic substances from sewage sludge compost as washing agents effectively remove Cu and Cd from soil. *Chemosphere*, 136, 42-49. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2015.03.083>
- Lee, K. H., Oh, J., Chu, K.H., Kwon, S.H. and Yoo, S.S., 2017, Comparison and Evaluation of Large-Scale and On-Site Recycling Systems for Food Waste via Life Cycle Cost Analysis, *Sustainability*, 9, 2186; doi:10.3390/su9122186
- Li, L., Diederick, R., Flora, J.R.V., Berge, N.D. (2013). Hydrothermal carbonization of food waste and associated packaging materials for energy source generation. *Waste Management*, 33:11, 2478-2492. DOI: 10.1016/j.wasman.2013.05.025

- Lim, L.Y., Lee, C.T., Bong, C.P.C., Lim, J.S., Klemeš J.J. (2019). Environmental and economic feasibility of an integrated community composting plant and organic farm in Malaysia. *Journal of Environmental Management*, 244, 431-439. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.05.050>
- Liu, H., Han P., Liu, H., Zhou, G., Fu, B., Zheng, Z. (2018). Full-scale production of VFAs from sewage sludge by anaerobic alkaline fermentation to improve biological nutrients removal in domestic wastewater. *Bioresource Technology*, 260, 105-114. DOI: 10.1016/j.biortech.2018.03.105).
- Loan, L.T.T., Takahashib, Y., Nomurac, H., Yabe, M. (2019). Modeling home composting behavior toward sustainable municipal organic waste management at the source in developing countries. *Resources, Conservation & Recycling*, 140, 65-71. DOI:10.1016/j.resconrec.2018.08.016.
- Lohri, C. R., Diener, S., Zabaleta, I., Mertenat, A., Zurbrügg, C. (2017). Treatment technologies for urban solid biowaste to create value products—a review with focus on low- and middle-income settings. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 16:1, 81-130. DOI: 10.1007/s11157-017-9422-5).
- Lukehurst, C.T., Frost, P., Al Seadi, T. (2010). Utilisation of digestate from biogas plants as biofertiliser. IEA bioenergy. https://energiatalgud.ee/sites/default/files/images_sala/4/46/IEA_Bioenergy._Utilisation_of_digestate_from_biogas_plants_as_biofertiliser._2010.pdf/Accessed 30.11.2023
- Martínez-Blanco, J., Joan, Colón, J., Gabarrell, X., Font X., Sánchez A., Artola A. and Rieradevall J. (2010). The use of life cycle assessment for the comparison of biowaste composting at home and full scale. *Waste Management*, 30:6, 983-994. DOI 10.1016/j.wasman.2010.02.023
- Miranda, M. L., LaPalme, S., & Bynum, D. Z. (1999). Unit based pricing in the United States: a tally of communities. Report submitted to The US Environmental Protection Agency. September. <http://www.epa.gov/payt/pdf/jan99sum.pdf>.
- Niskanen, A. & Kemppi, J. (2019). Analysis of separate collection and treatment of biowaste as possibilities to improve sustainability. Project report for the Council of State.
- Nizami, A.S. 2012, Anaerobic Digestion: Processes, Products and Applications. Nova Science Publishers, Ireland. <https://doi.org/10.4324/9780203137697>
- Pandyaswargo, A.H. & Gamaralalage P.J.D. (2014). Financial sustainability of modern composting: the economically optimal scale for municipal waste composting plant in developing Asia. *Int. J. Recycl. Waste Agricult.*, 3, 66. DOI 10.1007/s40093-014-0066-y
- Peng, W. & Pivato, A. (2017). Sustainable Management of Digestate from the Organic Fraction of Municipal Solid Waste and Food Waste Under the Concepts of Back to Earth Alternatives and Circular Economy. *Waste and Biomass Valorization*, 10,465-481. DOI 10.1007/s12649-017-0071-2
- Pham, T.P.T., Kaushik, R., Parshetti, G.K., Mahmood, R., Balasubramanian, R. (2015). Food waste-to-energy conversion technologies—current status and future directions. *Waste Management*, 38, 399-408. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2014.12.004>.
- Pickin, J. & Randell, P. (2017). Australian National Waste Report 2016. Department of the Environment and Energy & Blue Environment Pty Ltd. <https://dceew.gov.au/system/files/resources/d075c9bc-45b3-4ac0-a8f2-%206494c7d1fa0d/files/national-waste-report-2016.pdf>/Accessed 28.10.2023
- Price, J.L. & Joseph, J.B. (2000). Demand management—a basis for waste policy: a critical review of the applicability of the waste hierarchy in terms of achieving sustainable waste management. *Sustainable Development*. 8:2, 96-105. [https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/\(SICI\)1099-1719\(200005\)8:2%3C96::AID-SD133%3E3.0.CO;2-J](https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/(SICI)1099-1719(200005)8:2%3C96::AID-SD133%3E3.0.CO;2-J)/Accessed 20.10.2023.
- Roberts, D. (2015). Characterisation of chemical composition and energy content of green waste and municipal solid waste from Greater Brisbane, Australia. *Waste Management*. 41, 12-19. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.03.039>
- Sabarathinam, S., Sivasubramanian, S., Swaminathan, K., Subramaniam, S. (2016). Biowaste recycling by microbes for hydrogen production—An alternative strategy for greener fuel. *Journal of Environment and Biotechnology Research*, 3:1.

Skumatz, L. A., & Freeman, D. J. (2006). Pay as You Throw (PAYT) in the U.S. update and analysis. Final report Co-Sponsored by: EPA Office of Solid Waste, Jan Canterbury, Washington DC and Skumatz Economic Research Associates, Inc., Superior, CO. <https://archive.epa.gov/wastes/conserva/tools/payt/web/pdf/sera06.pdf>/Accessed 01.12.2023

TOGO.(2022). Compost machine. <https://www.togocomposter.com/compost-machine/?gclid>

UN Environment Programme (UNEP). (2009). Developing Integrated Solid Waste Management Plan, Training Manual, Volume 1: Waste Characterization and Quantification with Projections for Future. Environmental Technology Centre Osaka/Shiga, Japan.

Vanderlinden, C. (2022). The Basic of Bokashi Composting. The spruce make your best [home](https://www.thespruce.com/basics-of-bokashi-composting-2539742). <https://www.thespruce.com/basics-of-bokashi-composting-2539742>

Watson, J., Zhang, Y., Si, B., Chen W.T., Souza, R. (2018). Gasification of biowaste- a critical review and outlooks. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 83, 1-17. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.10.003>

Xevgenos, D., Papadaskalopoulou, C., Malamis, D. (2015). Success stories for recycling of MSW at municipal level a review. *Waste and Biomass Valorization*, 6:5, 657-684. <http://dx.doi.org/10.1007%2Fs12649-015-9389-9>

Zhang, J., Zeng, G., Chen, Y., Yu, M. (2011). Effects of physico-chemical parameters on the bacterial and fungal communities during agricultural waste composting. *Bioresource Technology*, 102:3, 2950-2956. doi:10.1016/j.biortech.2010.11.089



Kahramanmaraş Sutcu Imam University

Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 13.06.2024
Kabul Tarihi : 08.07.2024

Received Date : 13.06.2024
Accepted Date : 08.07.2024

DIRECT HF ETCHING-DERIVED $Ti_3C_2T_x$: A POTENT ADSORBENT FOR BASIC RED 46 DYE

DOĞRUDAN HF AŞINDIRMA YOLUYLA ELDE EDİLMİŞ $Ti_3C_2T_x$: BASIC RED 46 BOYASI İÇİN GÜÇLÜ BİR ADSORBAN

Yunus AKSOY¹ (ORCID: 0000-0002-6047-2101)

¹ Fırat Üniversitesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Elazığ, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Yunus AKSOY, yaksoy@firat.edu.tr

ABSTRACT

Dye contamination poses a significant threat to water sources and ecosystems, necessitating the development of efficient treatment methods. Basic Red 46 (BR 46), a highly toxic and persistent azo dye, presents specific challenges in removal from water resources. This study investigates the adsorption efficiency of $Ti_3C_2T_x$ (Titanium Carbide) MXene, synthesized via direct HF (Hydrofluoric acid) etching, for BR 46 removal. The physicochemical properties of $Ti_3C_2T_x$ were characterized using Fourier transform infrared (FTIR) spectroscopy, X-ray diffraction (XRD), and scanning electron microscopy (SEM). Additionally, the effects of pH, MXene amount, and initial BR 46 concentration on BR 46 adsorption were also investigated. The results show a maximum BR 46 removal efficiency of 99.98% at pH 2, 4 g/L $Ti_3C_2T_x$ dose, 50 mg/L BR 46 concentration, and 90 min contact time. This research underscores the potential of $Ti_3C_2T_x$ MXene as a potent adsorbent for BR 46 dye removal, offering insights for future water treatment applications.

Keywords: $Ti_3C_2T_x$, adsorption, Basic Red 46

ÖZET

Boya kirliliği, su kaynakları ve ekosistemler için önemli bir tehdit oluşturmakta ve etkili arıtma yöntemlerinin geliştirilmesini gerektirmektedir. Oldukça toksik ve kalıcı bir azo boyası olan Basic Red 46 (BR 46), su kaynaklarından uzaklaştırılmasında belirli zorluklar ortaya çıkarmaktadır. Bu çalışmada, BR 46 giderimi için doğrudan HF (Hidroflorik asit) aşındırma yoluyla sentezlenen $Ti_3C_2T_x$ (Titanyum Karbür) MXene'nin adsorpsiyon verimliliği araştırılmıştır. $Ti_3C_2T_x$ 'in fizikokimyasal özellikleri, Fourier dönüşümlü kızılötesi (FTIR) spektroskopisi, X-ışını difraktometresi (XRD) ve taramalı elektron mikroskobu (SEM) kullanılarak karakterize edilmiştir. Ayrıca pH, MXene miktarı ve başlangıç BR 46 konsantrasyonunun BR 46 adsorpsiyonu üzerindeki etkileri de araştırılmıştır. Sonuçlar, pH 2'de, 4 g/L $Ti_3C_2T_x$ dozunda, 50 mg/L BR 46 konsantrasyonunda ve 90 dakika temas süresinde %99,98'lik maksimum BR 46 giderim verimliliğini gösterir. Bu araştırma, $Ti_3C_2T_x$ MXene'nin BR 46 boya giderimi için güçlü bir adsorban olarak potansiyelinin altını çizerek gelecekteki su arıtma uygulamaları için öngörüler sunmaktadır.

Anahtar Kelimeler: $Ti_3C_2T_x$, adsorpsiyon, Basic Red 46

INTRODUCTION

Dye contamination in water sources is a significant issue with detrimental effects on ecosystems. Dyes, particularly azo dyes, are widely used in industries such as textiles and contribute to water pollution (Hashemi & Kaykhahi, 2022). The discharge of effluents from dye processing industries contains a variety of pollutants, including color compounds, suspended solids, acids, chlorine dyes, chromium, and phenolic substances (Devasia, Anand, & Nair, 2022). These dyes are persistent and non-biodegradable, leading to long-term hazards in the environment (Maheshwari, Agrawal, & Gupta, 2021). The presence of dyes in water bodies reduces aesthetic value, affects photosynthesis, and disrupts the food chain and web. Dyes can accumulate and biomagnify, causing toxicological impacts on aquatic flora, fauna, and human health. Azo dyes, in particular, are highly toxic and can generate harmful byproducts (Lekhak, 2023). The textile industry alone contributes a significant portion of industrial water pollution. Various physical, chemical, and biological methods are employed for dye removal from wastewater, including advanced oxidation, filtration, and microbial degradation (Ghosh & Sarkar, 2022). Nanotechnology, specifically the use of nanoparticles, shows promise in the effective elimination of dye contaminants (Kamsonlian & Agarwal, 2023). Overall, dye contamination poses a serious threat to water sources and ecosystems, necessitating the development and implementation of efficient treatment methods (Hashemi & Kaykhahi, 2022).

Public awareness and education can play a crucial role in mitigating dye contamination in water sources. By increasing public awareness about the harmful effects of dye pollution and the importance of clean water, individuals can be motivated to take action to prevent and reduce contamination. Educating the public about the sources and consequences of dye pollution can help them make informed choices and adopt sustainable practices in industries that use dyes, such as the textile sector (Mustafa, Jamil, Zhang, & Girmay, 2022).

Regulatory frameworks are in place to monitor and control dye pollution in water. Environmental legislation commonly obligates textile factories to treat dye effluents before discharge into water bodies (Allirani, 2022). Stringent regulations are enforced to minimize the introduction of harmful substances into water bodies and reduce total solids in wastewater. The presence of dyes in water streams has unexceptional effects on living organisms, leading to the need for the eradication of dye molecules from wastewater before discharge. Synthetic organic dyes are considered micropollutants of aquatic ecosystems, and their occurrence in water bodies should be monitored due to their toxicological properties (Tkaczyk, Mitrowska, & Posyniak, 2020).

The removal of BR 46 dye from water is crucial for environmental health and human well-being due to its toxic and colored nature. Contamination of groundwater with colored and toxic wastewater, such as BR 46, can cause environmental problems and negatively impact human health (Abdollahi Ghahi et al., 2022). The worldwide production of colored products and intermediates has led to an increase in liquid effluents containing toxic dyes entering the aquatic environment, making it important to dispose of them (Wiśniewska, Chibowski, Wawrzkiwicz, Onyszko, & Bogatyr, 2022).

BR 46 removal presents specific challenges compared to other dye contaminants (Abdollahi Ghahi et al., 2022). It is a colored and toxic wastewater pollutant that is difficult to remove from water resources. The removal of chemical dyes requires advanced oxidation processes (AOPs) or adsorption techniques (Sharma & Qanungo, 2022). A non-thermal plasma reactor using high-voltage corona discharge has shown 85% degradation efficiency for BR 46 within 30 minutes of treatment time (Abdollahi Ghahi et al., 2022). Another study has explored the use of a carbon and silica-based composite for the removal of BR 46, showing temperature-dependent adsorption capacity (Wiśniewska et al., 2022). The challenges in removing BR 46 include its high toxicity, the presence of azo bonds and associated harmful components, and the difficulty in treating wastewater contaminated with this dye (Saad, Ralha, Abukhadra, Al Zoubi, & Ko, 2023).

Advanced technologies such as nanotechnology and membrane filtration can play a significant role in enhancing the removal efficiency of dyes, a harmful pollutants. Nanofiltration membranes, particularly those incorporating nanocomposite materials like graphene oxide (GO) nanosheets, have shown promising results in terms of higher separation performance and antifouling tendencies. These membranes have increased permeation flux, rejection of Congo Red (CR), and flux recovery ratio, making them effective in removing pollutants from wastewater (Adnan Maykhan, Alsahy, & Bakhtiari, 2023). Additionally, the use of carbon nanomaterials in membrane filtration has also been explored. Carbon nanomaterial-based membranes, such as fullerenes, graphenes, and carbon nanotubes (CNTs),

have high surface areas and can efficiently adsorb pollutants, including dyes, from wastewater (Banjare, Behera, & Banjare, 2023).

Innovative technologies and strategies can be employed to address and prevent such as BR 46 dye contamination in water bodies. One approach is the use of phytoremediation, which involves the use of aquatic plants to filter and immobilize contaminants in water bodies (Agarwal & Rani, 2022). Another strategy is the formation of biofilms, which are aggregates of microbes that can absorb, immobilize, and degrade organic matter in water bodies (Verma, Karande, & Mathur, 2022). AOPs, such as heterogeneous photocatalysis, can also be employed to degrade and mineralize organic compounds in water systems. These processes can be enhanced by the use of carbon-based materials as cocatalysts or support materials for photocatalysts (Sadat et al., 2023).

MXene is a unique and promising material for water purification compared to traditional adsorbents due to its exceptional physicochemical characteristics. These include highly active sites, 2D layered morphology, photocatalytic properties, thermal/electrical conductivity, large inter-layer spacing, superior sorption/reduction capacity, high negative zeta-potential, and the existence of surface functional groups ($-OH$ and $-O$) (Bilal, Khan, & Ihsanullah, 2023). The presence of these functional groups allows for electrostatic attraction and surface complexation mechanisms, enabling the removal of heavy metals from water (Y. Zhang et al., 2023). MXenes also exhibit excellent sorption selectivity, making them effective for removing hazardous contaminants. Furthermore, MXenes can be easily functionalized and tuned to optimize their interlayer spacing, further enhancing their adsorption capabilities (Janjhi et al., 2023). MXenes also offer tunable interlayer spacing and tailorable surface chemistry, making them suitable for a variety of applications in environmental purification (Rana et al., 2023). Additionally, MXene-based adsorbents exhibit ultrahigh adsorption capacity and high stability, making them effective for removing pollutants from wastewater (Qing et al., 2023). MXene-based membranes, adsorbents, and photo-catalysts have been developed for removing antibiotics and heavy metals from water, and they show promise compared to other 2D membranes (Janjhi et al., 2023). Overall, MXene's unique physicochemical properties and its potential for various applications make it a promising material for water purification (Bilal et al., 2023).

The tunability of MXene's surface chemistry allows for the customization of its adsorption capabilities for specific water contaminants. MXenes are two-dimensional materials with unique properties such as high surface area, good thermal stability, and large specific surface area (Gopalram, Kapoor, Kumar, Sunil, & Rangasamy, 2023; Ma et al., 2023; Solangi et al., 2023). The surface reactivity of MXenes depends on the exposed atoms or terminated groups, such as oxygen, fluorine, and chlorine. Different terminations result in different adsorption capacities and oxidation rates for specific contaminants. For example, O-terminated MXene exhibits a significantly higher adsorption capacity and oxidation rate for perfluorooctanoic acid (PFOA) compared to MXenes with F and Cl terminations (Ma et al., 2023). MXenes have demonstrated the capability to adsorb various heavy contaminants, particularly metals such as chromium, copper, lead, and mercury. The adsorption capacity and selectivity of MXene-based adsorbents can be influenced by factors such as water quality, adsorbent quantity, pH, adsorption time, and temperature (Solangi et al., 2023).

MXene plays a significant role in addressing emerging contaminants, including dyes in water sources (Bilal et al., 2023). MXenes have demonstrated the capability to adsorb various heavy contaminants, particularly metals and dyes, from water sources (Pouramini et al., 2023). They have been used as effective adsorbents for the enhanced uptake of different kinds of dyes from aqueous environments (Bilal et al., 2023). MXene-based composite materials have been developed as efficient adsorbents for the removal of pollutants from water, including organic dyes (Pouramini et al., 2023).

$Ti_3C_2T_x$ MXene has been studied for its adsorption efficiency in removing dyes from water. The $Ti_3C_2T_x$ MXene nanofiltration (NF) membrane demonstrated a high rejection rate of 95.44% for CR, a type of azo dye (Li et al., 2023). Additionally, $Ti_3C_2T_x$ MXene showed excellent heavy metal adsorption capacity, including Pb(II) and Cu(II) ions. The delaminated titanium carbide (DL- $Ti_3C_2T_x$) MXene exhibited a higher maximum adsorption capacity for Pb(II) (77.0 mg/g) compared to multilayer (ML- $Ti_3C_2T_x$) MXene (56.68 mg/g). However, the maximum adsorption capacity for Cu(II) was higher in ML- $Ti_3C_2T_x$ (55.46 mg/g) compared to DL- $Ti_3C_2T_x$ (23.08 mg/g) (Y. Zhang et al., 2023).

In terms of sustainability, MXene-based materials offer a promising solution for wastewater treatment, as they can be synthesized from abundant and low-cost precursors. However, the scaling-up process of MXene production is

currently costly, and the applications are still limited. Future research should focus on developing more environmentally friendly synthesis methods and reducing the cost of production to ensure the widespread use of MXene-based materials for water treatment (Tawalbeh et al., 2023).

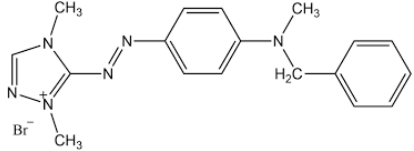
MXene-based materials have been extensively studied for their adsorption efficiency in water treatment applications. However, there is a lack of systematic studies comparing the adsorption efficiency of MXene with other materials specifically for BR 46 removal. While several papers discuss the exceptional physicochemical characteristics of MXenes that make them effective adsorbents for various dyes (Bilal et al., 2023; Li et al., 2023; Qing et al., 2023), including BR 46 (Yan, Liu, Wen, & Liu, 2022), there is no direct comparison with other materials for this specific dye. These studies highlight the potential of MXene-based adsorbents for wastewater treatment and the need for further research to explore their effectiveness in removing BR 46 and other contaminants. The specific aim of this study is to examine the effects of pH, MXene amount, and initial BR 46 concentration on the adsorption of BR 46 from aqueous solutions with $Ti_3C_2T_x$ synthesized by directly etching HF from the MAX phase. The properties of $Ti_3C_2T_x$ were examined using FTIR, XRD, and SEM.

MATERIALS AND METHODS

Materials

Titanium Aluminum Carbide (Ti_3AlC_2 , MAX Phase Micron Powder, APS: 325 Mesh, Purity: 99+ %) was purchased from Nanografi. BR 46 dyestuff was obtained from DyStar and used without purification. The structure and properties of the dyestuff are given in Table 2. HF was obtained from Merck. H_2SO_4 (Sulfuric acid) and NaOH (Sodium hydroxide) were purchased from Merck. Reagent water was produced from a Millipore Milli- Q Ultrapure Gradient 3 V purification system.

Table 1. Properties of the Dyestuff

Chemical Formula	$C_{18}H_{21}BrN_6$
Chemical Structure	
Molecular Weight (g/mol)	401.31
Wavelength Used	534 nm

Characterization Techniques

X-ray diffraction (PANalytical Empyrean XRD, Fourier transform infrared spectroscopy (Jasco FT/IR, 6700, Jasco Inc.), Scanning electron microscope (SEM) (Hitachi SU3500) and UV/Vis spectrometer (PerkinElmer UV/Vis Lambda 365).

Material Synthesis

The Ti_3AlC_2 powder (1 g) was incorporated into 28 mL of a 30% (v/v) HF solution, following a method adapted from the literature (Naguib et al., 2023). Subsequently, the mixture was stirred for 24 hours at 40 °C in a shaking water bath (GFL Shaking Water Bath 1083). The suspension solution underwent multiple washes with deionized water until achieving a neutral pH. Post washes, centrifugation (3 minutes at 4100 rpm) was conducted to isolate the MXene powder after each round of washing with distilled water. This sample was dispersed in 200 mL deionized water and then sonicated (FS-300N Ultrasonic Homogenizer) for 40 min under a nitrogen atmosphere. The solid part was collected by vacuum filtration (membrane pore: 0.22 μm). Finally, the material was dried in a vacuum oven at 60 °C for 24 hours and stored in an environment devoid of light and air.

Material Characterization

XRD patterns were achieved by PANalytical Empyrean XRD at 5 kV voltage and 40 mA current with Cu-K α radiation ($\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$) with a 2θ range of 10–90° and used to study the crystal structures of Ti_3AlC_2 MAX phase and $Ti_3C_2T_x$ MXene phase. FTIR spectra of before and after adsorption MXene material were recorded on Jasco

FT/IR, 6700. The SEM images were carried out using the SEM (Hitachi SU3500). The absorbance values of the liquid samples were read using the UV/Vis spectrophotometer (PerkinElmer UV/Vis Lambda 365) device and the dye concentrations were calculated using the previously prepared calibration curve.

Adsorption Experiment

In experimental studies on batch adsorption, the impact of the initial pH of the solution, the quantity of adsorbent, and the initial concentration of dye on the efficiency of removing BR 46 dyestuff were analyzed. The dye solutions utilized in the experimental series were created at the desired concentrations through dilution of a stock solution. Following the adjustment of pH levels in the prepared dye solutions, specific quantities of adsorbent were introduced to the solutions and placed in an orbital shaker apparatus (Gallenkamp) at a consistent temperature, agitated at 180 rpm. Samples were extracted at set intervals and centrifuged utilizing a centrifuge apparatus (Nüve 400 NF) at 4100 rpm for 2 minutes to segregate the solid and liquid components. The absorbance readings of the liquid samples were measured using a UV/Vis spectrophotometer device, and dye concentrations were determined by referencing a previously established calibration curve. The initial phase of the adsorption experiments involved the investigation of the impact of pH on dye removal across various pH levels while maintaining other variables constant. The pH of the solutions was adjusted to the desired levels using dilute solutions of H₂SO₄ and NaOH. Subsequently, the influence of varying amounts of adsorbent was explored to understand its effect. The impact of the initial dye concentration on removal efficiency was assessed at different concentrations within the range of 25-125 mg/L. The relative calculation formula of the removal rate-R (%) (Eq.1) is as follows:

$$R(\%) = 100 \times \frac{C_0 - C_t}{C_0} \quad (1)$$

Where C₀ (mg/L) and C_t (mg/L) are the initial concentration of the solution (mg/L) and the concentration of the solution at time t.

RESULTS AND DISCUSSION

Characterization

Using an XRD pattern, the structural properties of Ti₃C₂T_x MXene and MAX precursor were examined (Figure 1). Ti₃AlC₂'s strongest peak is located in the 104 plane at 2θ = 38.69°. After etching with 30% (v/v) HF after 24 hours at 40°C, the strongest signals of the MAX precursor at 38.69° vanish, indicating that the Al layers are nearly etched away (G. Zhang et al., 2020). The characteristic peaks (Figure 1) of Ti₃C₂T_x at 2θ = 28.58° and 60.78° correspond to (0 0 6) and (1 1 0) planes of Ti₃C₂T_x, respectively (Y. Wang et al., 2019).

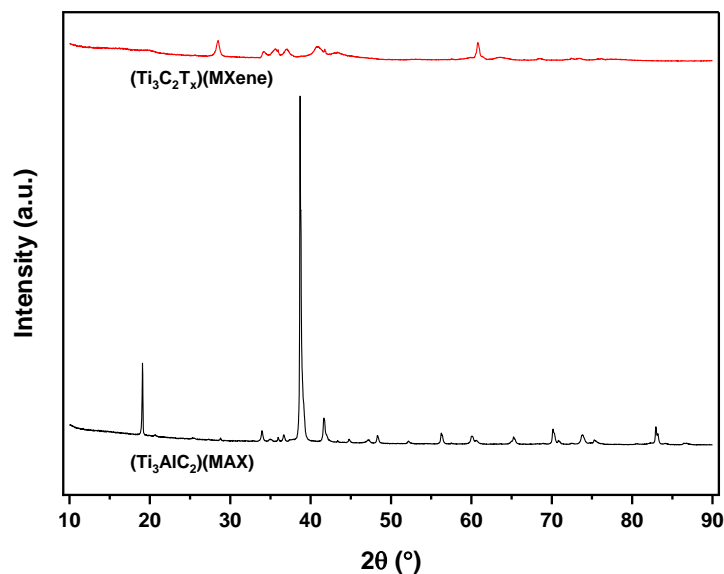


Figure 1. XRD Patterns of Ti₃AlC₂, and Ti₃C₂T_x

Figure 2 (a) and (b) show the SEM images of the synthesized $Ti_3C_2T_x$ before and after adsorption, respectively. Specifically, Figure 2 (a) and (b) display a distinct accordion-like multilayer structure, which is the result of the etching of the A-layer and the breakdown of the weak M–A bond in the MAX phase (R. Wang et al., 2023). As shown in Figure 2 (b), it can be seen that BR 46 molecules enter between $Ti_3C_2T_x$ interlayers after the adsorption process. The presence of these interlayer gaps in the MXene structure provided a good opportunity for BR 46 adsorption.

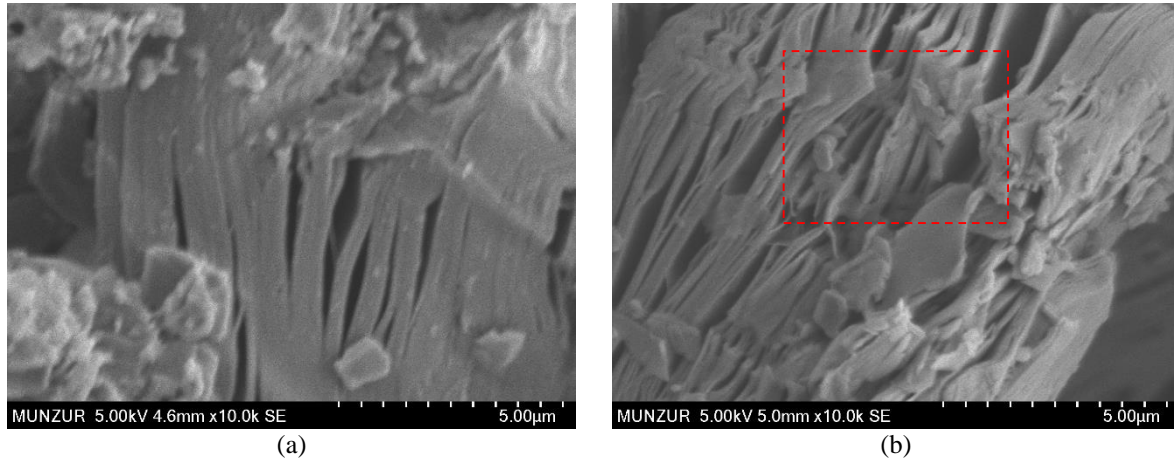


Figure 2. SEM Images of (a) $Ti_3C_2T_x$ Before Adsorption, and (b) $Ti_3C_2T_x$ After Adsorption

Figure 3 illustrates the FTIR spectra of $Ti_3C_2T_x$ before and after BR 46 adsorption. The peaks in the band gap $2365-2309\text{ cm}^{-1}$, the peaks around 2100 cm^{-1} , and the peaks at 1010 and 1021 cm^{-1} correspond to strong $O=C=O$ stretching, weak $C\equiv C$ stretching, and strong $C-F$ stretching, respectively. After adsorption, a new peak appeared at 678 cm^{-1} , which could be attributed to the strong stretching of $C-Br$. The appearance of a new peak suggests the formation of the chemical bond occurred between the material and BR 46 molecules due to the adsorption.

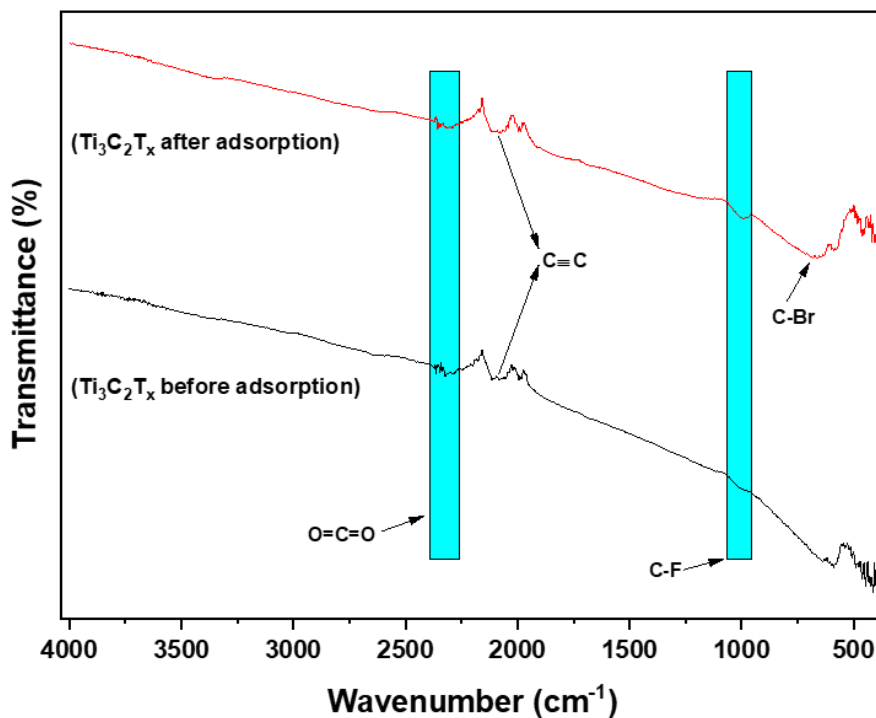


Figure 3. The FTIR Spectra of $Ti_3C_2T_x$ Before and After BR 46 Adsorption

Effect of pH

Figure 4 shows the effect of different pH levels (2, 4, 7, 9, 11) on the removal efficiency of BR 46 over time. The removal efficiency is highest at pH 2 and decreases with increasing pH values. Higher removal efficiency at pH 2 suggests that $Ti_3C_2T_x$ has a higher affinity for BR 46 in acidic conditions. This could be due to the protonation of the adsorbent surface, increasing the positive charge and enhancing the electrostatic attraction between the negatively charged dye molecules and the positively charged surface sites (Obayomi et al., 2024). Lower removal efficiency at higher pH levels (7, 9, 11) indicates reduced adsorption. At higher pH, the surface of $Ti_3C_2T_x$ might be negatively charged due to deprotonation, leading to repulsion between the negatively charged dye molecules and the adsorbent surface (Aguiar et al., 2014). pH 2 was chosen for subsequent experiments because it resulted in the highest adsorption efficiency for BR 46, as indicated by Figure 4 showing maximum removal at this pH level.

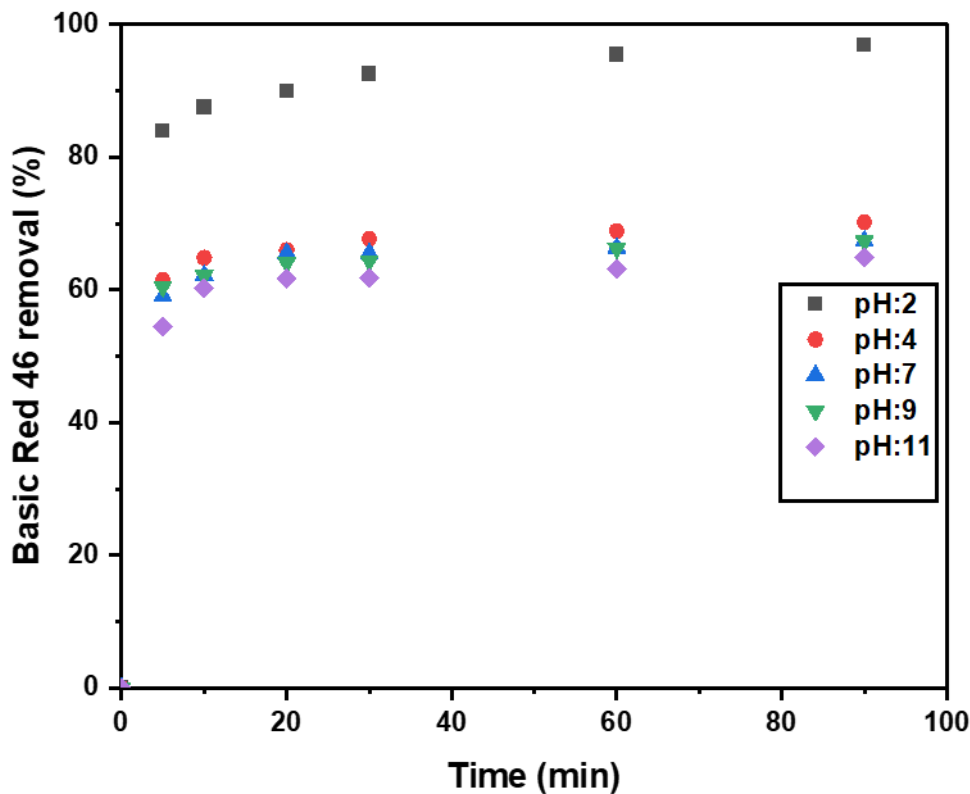


Figure 4. Effect of the Solution pH on BR 46 Adsorption by $Ti_3C_2T_x$ (Initial BR 46 Concentration: 50 mg/L; MXene Amount: 2 g/L; Temperature: 25 °C)

Effect of MXene Amount

Figure 5 shows the removal efficiency of BR 46 over time at different MXene concentrations (1 g/L, 2 g/L, 4 g/L, 6 g/L, 8 g/L). The efficiency increases with the amount of MXene up to 4 g/L and remains constant thereafter. The optimum amount of MXene for maximum adsorption efficiency is 4 g/L. In addition, it is seen that the removal efficiency increases rapidly in the first 20-30 minutes and then gradually stabilizes. An increase in the amount of MXene above 4 g/L did not significantly increase the adsorption efficiency. The plateau indicates that all available adsorption sites are saturated at 4 g/L and that additional MXene does not provide a more effective surface area for adsorption (Ghorbani, Eisazadeh, & Ghoreyshi, 2012). Subsequent experiments were carried out with an amount of 4 g/L MXene as it ensured maximum adsorption efficiency without wasting additional material.

Effect of Initial BR 46 Concentration

Figure 6 illustrates the effect of varying initial BR 46 concentrations (25 mg/L, 50 mg/L, 75 mg/L, 100 mg/L, 125 mg/L) on removal efficiency over time. Table 2 summarizes the adsorption efficiencies and equilibrium uptake

capacities. Conditions were maintained constant during experiments at a pH of 2, an MXene amount of 4 g/L, and a temperature of 25 °C. Higher initial BR 46 concentrations result in lower removal efficiency due to the limited availability of adsorption sites (Wong et al., 2020). Higher initial concentrations result in higher adsorption capacities due to greater availability of dye molecules, which saturate the adsorbent more quickly.

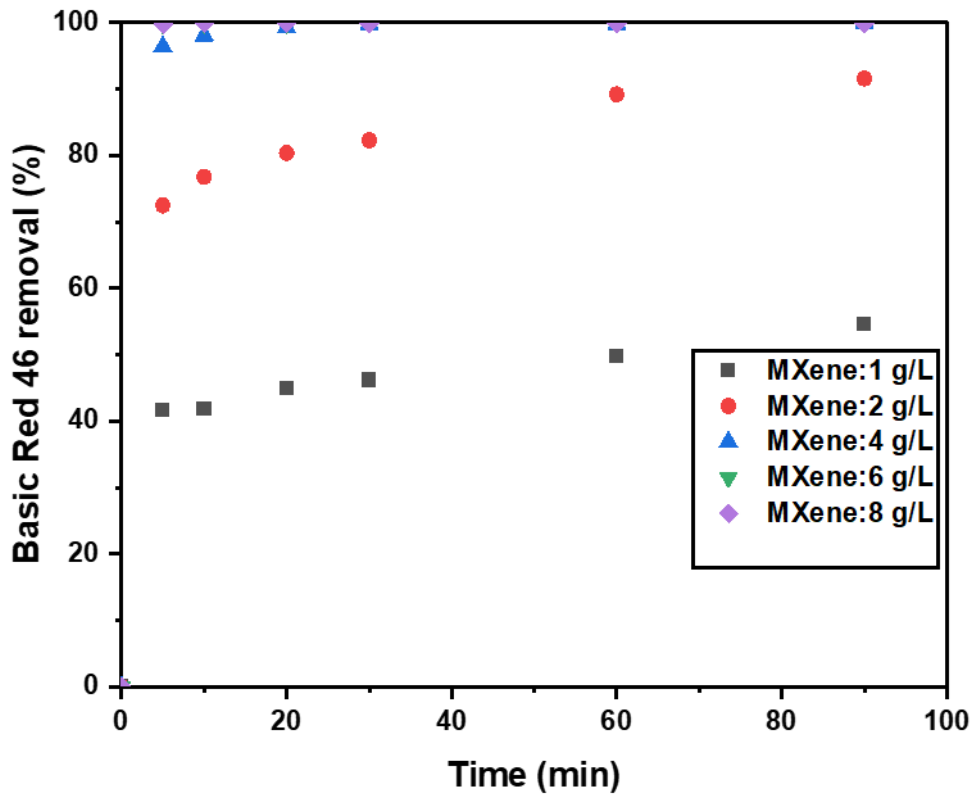


Figure 5. Effect of the MXene Amount on BR 46 Adsorption by $Ti_3C_2T_x$ (Initial BR 46 Concentration: 50 mg/L; pH: 2; Temperature: 25 °C)

Table 2. The Equilibrium Uptake Capacities and Adsorption Efficiencies Obtained at Different Initial BR 46 Concentrations

C_0 mg/L	q_e mg/g	Adsorption (%)
25	6.25	99.96
50	12.48	99.8
75	12.75	68
100	15.93	63.7
125	21.28	68.08

CONCLUSIONS

This study successfully demonstrates the potential of $Ti_3C_2T_x$ MXene as an effective adsorbent for the removal of BR 46 dye from aqueous solutions. The adsorption efficiency was significantly influenced by pH, with acidic conditions (pH 2). XRD analysis confirmed the successful etching of Ti_3AlC_2 to $Ti_3C_2T_x$, indicated by the disappearance of the Al layers. SEM images revealed an accordion-like multilayer structure of $Ti_3C_2T_x$, which facilitated the intercalation of BR 46 molecules. FTIR spectra showed the formation of new peak post-adsorption, suggesting chemical interactions between $Ti_3C_2T_x$ and BR 46 molecules, enhancing the adsorption process. The adsorption efficiency increased with the amount of $Ti_3C_2T_x$ up to 4 g/L. The higher initial concentrations of BR 46 led to greater adsorption capacities, they also resulted in lower removal efficiencies due to the finite number of adsorption sites on the MXene surface. These findings underscore the efficacy of $Ti_3C_2T_x$ MXene as a high-

performance adsorbent for BR 46 removal, offering a promising solution for dye contamination in water treatment applications.

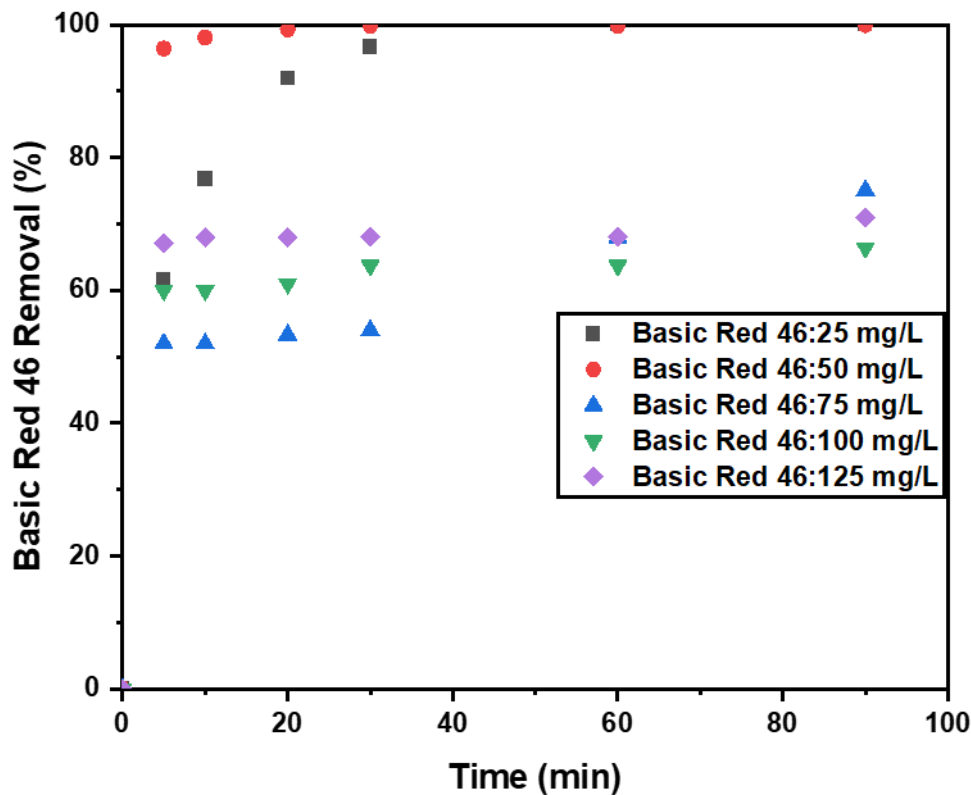


Figure 6. Effect of Initial BR 46 Concentration on BR 46 Adsorption by $Ti_3C_2T_x$ (MXene Amount: 4 g/L; pH: 2; Temperature: 25 °C)

REFERENCES

- Abdollahi Ghahi, N., Nohekhan, M., Rezazadeh Azari, F., Rezaei Fard, B., Bakhtiari Ramezani, M., Beigmohammadi, N., ... Abdollahi Dargah, M. (2022). Degradation of basic red 46 dye from color wastewater using cold atmospheric plasma. *Journal of Nuclear Research and Applications*, 2(4), 21–24. <https://doi.org/https://doi.org/10.24200/jon.2022.1029>
- Adnan Maykhan, N., Alsahy, Q. F., & Bakhtiari, O. (2023). Incorporation of graphene oxide nanosheets into polyethersulfone membranes to improve their separation performance and antifouling characteristics for Congo red removal. *Water Environment Research*, 95(5), e10866. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/wer.10866>
- Agarwal, P., & Rani, R. (2022). Strategic management of contaminated water bodies: Omics, genome-editing and other recent advances in phytoremediation. *Environmental Technology & Innovation*, 27, 102463. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.eti.2022.102463>
- Aguiar, J. E., Bezerra, B. T. C., Siqueira, A. C. A., Barrera, D., Sapag, K., Azevedo, D. C. S., ... Silva Jr, I. J. (2014). Improvement in the adsorption of anionic and cationic dyes from aqueous solutions: A comparative study using aluminium pillared clays and activated carbon. *Separation Science and Technology*, 49(5), 741–751. <https://doi.org/https://doi.org/10.1080/01496395.2013.862720>
- Allirani, S. (2022). Smart and Secure Dyeing Industrial Water Pollution Monitoring Using IoT. *International Journal of Hyperconnectivity and the Internet of Things (IJHIoT)*, 6(1), 1–5. <https://doi.org/https://doi.org/10.4018/ijhiot.305227>
- Banjare, M. K., Behera, K., & Banjare, R. K. (2023). Carbon Allotropes in Other Metals (Cu, Zn, Fe etc.) Removal.

- Carbon Allotropes and Composites: Materials for Environment Protection and Remediation*, 113–154. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/9781394167913.ch7>
- Bilal, M., Khan, U., & Ihsanullah, I. (2023). MXenes: The Emerging Adsorbents for the Removal of Dyes from Water. *Journal of Molecular Liquids*, 122377. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.molliq.2023.122377>
- Devasia, S., Anand, S., & Nair, A. J. (2022). Laccase mediated bioremediation of industrial dyes by a potent strain of *Arthrographis* sp. *International Journal of Environment and Waste Management*, 29(3), 278–290. <https://doi.org/https://doi.org/10.1504/ijewm.2022.122679>
- Ghorbani, M., Eisazadeh, H., & Ghoreyshi, A. A. (2012). Removal of zinc ions from aqueous solution using polyaniline nanocomposite coated on rice husk. *Iranica Journal of Energy & Environment*, 3(1). <https://doi.org/https://doi.org/10.5829/idosi.ijee.2012.03.01.3343>
- Ghosh, S., & Sarkar, B. (2022). Emerging dye contaminants of industrial origin and their enzyme-assisted biodegradation. In *Biodegradation and Detoxification of Micropollutants in Industrial Wastewater* (pp. 79–102). Elsevier. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/b978-0-323-88507-2.00005-1>
- Gopalram, K., Kapoor, A., Kumar, P. S., Sunil, A., & Rangasamy, G. (2023). MXenes and MXene-Based Materials for Removal and Detection of Water Contaminants: A Review. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 62(17), 6559–6583. <https://doi.org/https://doi.org/10.1021/acs.iecr.3c00595>
- Hashemi, S. H., & Kaykhahi, M. (2022). Azo dyes: sources, occurrence, toxicity, sampling, analysis, and their removal methods. In *Emerging freshwater pollutants* (pp. 267–287). Elsevier. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/b978-0-12-822850-0.00013-2>
- Janjhi, F. A., Ihsanullah, I., Bilal, M., Castro-Muñoz, R., Boczkaj, G., & Gallucci, F. (2023). MXene-based materials for removal of antibiotics and heavy metals from wastewater—A review. *Water Resources and Industry*, 100202. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.wri.2023.100202>
- Kamsonlian, S., & Agarwal, V. (2023). Review on synthesis of plant-mediated green iron nanoparticles and their application for decolorization of dyes. *Materials Today: Proceedings*, 78, 99–107. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.11.308>
- Lekhakh, U. M. (2023). Ecotoxicity of synthetic dyes. In *Current Developments in Bioengineering and Biotechnology* (pp. 45–67). Elsevier. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/b978-0-323-91235-8.00021-8>
- Li, Y., Luo, H., Ji, W., Li, S., Nian, P., Xu, N., ... Wei, Y. (2023). Visible-light-driven photocatalytic ZnO@Ti₃C₂T_x MXene nanofiltration membranes for enhanced organic dyes removal. *Separation and Purification Technology*, 124420. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.seppur.2023.124420>
- Ma, Q., Gao, J., Moussa, B., Young, J., Zhao, M., & Zhang, W. (2023). Electrosorption, Desorption, and Oxidation of Perfluoroalkyl Carboxylic Acids (PFCAs) via MXene-Based Electrocatalytic Membranes. *ACS Applied Materials & Interfaces*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1021/acsami.3c03991>
- Maheshwari, K., Agrawal, M., & Gupta, A. B. (2021). Dye pollution in water and wastewater. *Novel Materials for Dye-Containing Wastewater Treatment*, 1–25. https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-981-16-2892-4_1
- Mustafa, S., Jamil, K., Zhang, L., & Girmay, M. B. (2022). Does Public Awareness Matter to Achieve the UN's Sustainable Development Goal 6: Clean Water for Everyone? *Journal of Environmental and Public Health*, 2022. <https://doi.org/https://doi.org/10.1155/2022/8445890>
- Naguib, M., Kurtoglu, M., Presser, V., Lu, J., Niu, J., Heon, M., ... Barsoum, M. W. (2023). Two-dimensional nanocrystals produced by exfoliation of Ti₃AlC₂. In *MXenes* (pp. 15–29). Jenny Stanford Publishing. <https://doi.org/https://dx.doi.org/10.1201/9781003306511-4>
- Obayomi, K. S., Lau, S. Y., Danquah, M. K., Zhang, J., Chiong, T., Obayomi, O. V., ... Rahman, M. M. (2024). A response surface methodology approach for the removal of methylene blue dye from wastewater using sustainable and cost-effective adsorbent. *Process Safety and Environmental Protection*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.psep.2024.01.106>
- Pouramini, Z., Mousavi, S. M., Babapoor, A., Hashemi, S. A., Pynadathu Rumjit, N., Garg, S., ... Chiang, W.-H. (2023). Recent Advances in MXene-Based Nanocomposites for Wastewater Purification and Water Treatment: A Review. *Water*, 15(7), 1267. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/w15071267>

- Qing, Q., Shi, X., Hu, S., Li, L., Huang, T., Zhang, N., & Wang, Y. (2023). Synchronously Enhanced Removal Ability and Stability of MXene through Biomimetic Modification. *Langmuir*, 39(27), 9453–9467. <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.3c00987>
- Rana, G., Dhiman, P., Kumar, A., Sharma, G., Verma, Y., & Chauhan, A. (2023). Functionalization of two-dimensional MXene-based nanomaterials for water purifications and energy conversion applications: A review. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 165, 107645. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.mssp.2023.107645>
- Saad, I., Ralha, N., Abukhadra, M. R., Al Zoubi, W., & Ko, Y. G. (2023). Recent advances in photocatalytic oxidation techniques for decontamination of water. *Journal of Water Process Engineering*, 52, 103572. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2023.103572>
- Sadat, H., Guettai, N., Berkani, M., Hoang, H. Y., Shanmuganathan, R., Pugazhendhi, A., & Kadmi, Y. (2023). Recent advances in photochemical-based nanomaterial processes for mitigation of emerging contaminants from aqueous solutions. *Applied Nanoscience*, 13(6), 3905–3924. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/s13204-022-02627-y>
- Sharma, P., & Qanungo, K. (2022). Challenges in Effluents Treatment Containing Dyes. *Adv Res Text Eng*, 7(2), 1075. <https://doi.org/https://doi.org/10.26420/advrestexteng.2022.1075>
- Solangi, N. H., Karri, R. R., Mubarak, N. M., Mazari, S. A., Jatoi, A. S., & Koduru, J. R. (2023). Emerging 2D MXene-based adsorbents for hazardous pollutants removal. *Desalination*, 549, 116314. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.desal.2022.116314>
- Tawalbeh, M., Mohammed, S., Al-Othman, A., Yusuf, M., Mofijur, M., & Kamyab, H. (2023). MXenes and MXene-based materials for removal of pharmaceutical compounds from wastewater: Critical review. *Environmental Research*, 115919. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.115919>
- Tkaczyk, A., Mitrowska, K., & Posyniak, A. (2020). Synthetic organic dyes as contaminants of the aquatic environment and their implications for ecosystems: A review. *Science of the Total Environment*, 717, 137222. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137222>
- Verma, A. K., Karande, S., & Mathur, A. (2022). Role of biofilms to curb contamination in water bodies. In *Relationship Between Microbes and the Environment for Sustainable Ecosystem Services, Volume 2* (pp. 77–93). Elsevier. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/b978-0-323-89937-6.00006-1>
- Wang, R., Cao, H., Yao, C., Peng, C., Qiu, J., Dou, K., ... Wang, W. (2023). Construction of alkalinized MXene-supported CoFe₂O₄/CS composites with super-strong adsorption capacity to remove toxic dyes from aqueous solution. *Applied Surface Science*, 624, 157091. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2023.157091>
- Wang, Y., Gao, X., Zhang, L., Wu, X., Wang, Q., Luo, C., & Wu, G. (2019). Synthesis of Ti₃C₂/Fe₃O₄/PANI hierarchical architecture composite as an efficient wide-band electromagnetic absorber. *Applied Surface Science*, 480, 830–838. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.03.049>
- Wiśniewska, M., Chibowski, S., Wawrzkiwicz, M., Onyszko, M., & Bogatyrov, V. (2022). CI Basic Red 46 removal from sewage by carbon and silica based composite: equilibrium, kinetic and electrokinetic studies. *Molecules*, 27(3), 1043. <https://doi.org/https://doi.org/10.3390/molecules27031043>
- Wong, S., Ghafar, N. A., Ngadi, N., Razmi, F. A., Inuwa, I. M., Mat, R., & Amin, N. A. S. (2020). Effective removal of anionic textile dyes using adsorbent synthesized from coffee waste. *Scientific Reports*, 10(1), 2928. <https://doi.org/https://doi.org/10.1038/s41598-020-60021-6>
- Yan, J., Liu, P. F., Wen, H. X., & Liu, H. J. (2022). Effective Removal of Basic Red 46 with Ti₃C₂ Powder Modified with Citric acid. *ChemistrySelect*, 7(29), e202201733. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/slct.202201733>
- Zhang, G., Wang, T., Xu, Z., Liu, M., Shen, C., & Meng, Q. (2020). Synthesis of amino-functionalized Ti₃C₂T_x MXene by alkalization-grafting modification for efficient lead adsorption. *Chemical Communications*, 56(76), 11283–11286. <https://doi.org/https://doi.org/10.1039/d0cc04265j>
- Zhang, Y., Luo, J., Feng, B., Xu, H., Sun, Y., Gu, X., ... Ren, H. (2023). Delamination of multilayer Ti₃C₂T_x MXene alters its adsorption and reduction of heavy metals in water. *Environmental Pollution*, 330, 121777. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.121777>



Kahramanmaraş Sütçü İmam University

Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 03.05.2024
Kabul Tarihi : 07.10.2024

Received Date : 03.05.2024
Accepted Date : 07.10.2024

ENERGY AND ENVIRONMENTAL ANALYSIS OF TRANSCRITICAL CO₂ SUPERMARKET REFRIGERATION CYCLES WITH DEDICATED MECHANICAL SUBCOOLER

ÖZEL MEKANİK AŞIRI SOĞUTUCULU TRANSKRİTİK CO₂ SÜPERMARKET SOĞUTMA ÇEVİMLERİNİN ENERJİ VE ÇEVRESEL ANALİZİ

Oğuz ÇALIŞKAN^{1,*} (ORCID: 0000-0002-3364-1360)
H. Kürşad ERSOY¹ (ORCID: 0000-0001-8588-296X)

¹ Konya Technical University, Department of Mechanical Engineering, Konya, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Oğuz ÇALIŞKAN, ocaliskan@ktun.edu.tr

ABSTRACT

Refrigerants with high environmental impact are being prohibited by legal authorities. The commercial refrigeration sector, a huge contributor to emissions, is transitioning to environmentally friendly CO₂ systems. Despite the environmental benefits of CO₂, its low critical temperature and high operation pressure can lead to lower performance in warm climates compared to other refrigerants. Therefore, performance improvements are being made for transcritical CO₂ refrigeration cycles. This paper presents energy and environmental analysis of transcritical booster (BRC), parallel compression (PRC), and ejector expansion (ERC) supermarket refrigeration cycles with dedicated mechanical subcooler (DMS) as well as transcritical cycles without DMS circuits, and subcritical R404A conventional system. R134a, R1234yf, and R290 were studied as working fluids for DMS circuits. Annual energy consumption and total equivalent warming impact (TEWI) values were compared for İstanbul, Konya, and Samsun in Türkiye, which are in different climate zones, as a case study. The case study constitutes the novelty of this paper. Up to 11% annual energy savings were obtained using CO₂ cycles with DMS compared to R404A conventional system. CO₂ cycles have up to 58.4% lower total TEWI values than R404A conventional system.

Keywords: carbon dioxide, dedicated mechanical subcooler, ejector, environmental impact, supermarket refrigeration

ÖZET

Yüksek çevresel etkiye sahip soğutucu akışkanlar resmi otoriteler tarafından yasaklanmaktadır. Emisyonlara büyük katkıda bulunan ticari soğutma sektörü, çevre dostu CO₂ sistemlerine geçiş yapmaktadır. Çevresel faydalarına rağmen CO₂'nin düşük kritik sıcaklığı ve yüksek çalışma basıncı, sıcak iklimlerde diğer soğutucu akışkanlara kıyasla daha düşük performansa yol açabilir. Bu nedenle transkritik CO₂ soğutma çevrimleri için performans iyileştirmeleri yapılmaktadır. Bu makale, özel mekanik aşırı soğutuculu (DMS) çift kademeli (BRC), paralel sıkıştırımlı (PRC) ve ejektör genişlemeli (ERC) transkritik süpermarket soğutma çevrimlerinin yanı sıra DMS'siz çevrimlerin ve kritik nokta altı klasik R404A sistemin enerji ve çevresel analizini sunmaktadır. DMS devreleri için iş akışkanı olarak R134a, R1234yf ve R290 incelenmiştir. Yıllık enerji tüketimi ve toplam eşdeğer ısınma etkisi (TEWI) değerleri, bir uygulama örneği olarak Türkiye'de farklı iklim bölgelerinde yer alan İstanbul, Konya ve Samsun için karşılaştırılmıştır. Uygulama örneği bu çalışmanın özgünlüğünü oluşturmaktadır. R404A klasik sisteme kıyasla DMS'li CO₂ çevrimleri kullanılarak yıllık %11'e varan enerji tasarrufu elde edilmiştir. CO₂ çevrimleri, R404A klasik sisteme göre %58.4'e kadar daha düşük toplam TEWI değerlerine sahiptir.

Anahtar Kelimeler: karbon dioksit, özel mekanik aşırı soğutucu, ejektör, çevresel etki, süpermarket soğutması

ToCite: ÇALIŞKAN, O., & ERSOY, H. K., (2024). ENERGY AND ENVIRONMENTAL ANALYSIS OF TRANSCRITICAL CO₂ SUPERMARKET REFRIGERATION CYCLES WITH DEDICATED MECHANICAL SUBCOOLER. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 27(4), 1582-1601.

INTRODUCTION

Commercial refrigerators are systems that preserve fresh (chilled) and frozen food at desired temperatures in supermarkets, grocery stores, and convenience stores. Commercial refrigeration systems are the biggest energy users within supermarkets, accounting for about 40 to 60% of electricity consumption (Klemick, Kopits, and Wolverton, 2015). On a global basis, commercial refrigeration is the refrigeration subsector with the largest refrigerant emissions calculated as CO₂ equivalents, which represents 40% of the total annual refrigerant emissions (Devotta and Sicars, 2005).

The properties of common refrigerants used in commercial refrigeration systems are presented in Table 1 (Bell, Wronski, Quoilin, and Lemort, 2014; Smith et al., 2021). The global warming potential (GWP) values of the refrigerants are defined by the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) Assessment Report (AR), which is updated periodically. According to the latest IPCC AR6, GWP values of R1234yf and R290 (propane) are below 1. R404A, R134a, and R744 (CO₂) are safe refrigerants while R1234yf is mildly flammable, and R290 is highly flammable.

Table 1. Properties of Common Refrigerants Used in Commercial Refrigerators (Bell et al., 2014; Smith et al., 2021)

Property	R404A	R134a	R1234yf	R744 (CO ₂)	R290 (Propane)
100-year GWP	4728	1530	0.501	1	0.02
Critical temperature [°C]	72.12	101.06	94.7	90.98	96.74
Critical pressure [bar]	37.35	40.59	33.82	73.77	42.51
Normal boiling temperature [°C]	-45.47	-26.07	-29.49	-78.46	-42.12
Saturation pressure at 0 °C [bar]	6	2.93	3.16	34.85	4.75
Vaporization enthalpy at 0 °C [kJ/kg]	165.82	198.6	163.29	230.89	374.87
Vapor density at 0 °C [kg/m ³]	30.46	14.43	17.65	97.65	10.35
Safety class	A1	A1	A2L	A1	A3

The use of hydrofluorocarbons (HFCs) with a GWP above 2500 has been prohibited in all new commercial refrigeration equipment as of January 1st, 2020, and the use of HFCs with a GWP above 150 excluding primary refrigerants of cascade systems with GWP values lower than 1500 has been prohibited in new commercial refrigeration systems with a rated capacity of 40 kW or more placed in the EU market as of January 1st, 2022, by the F-Gas regulation (Schulz and Kourkoulas, 2014). The use of R404A with a GWP value of 4728 according to IPCC AR6 (Smith et al., 2021), which is a common refrigerant in commercial refrigerators, is not possible in the newly installed systems in the European market. The GWP value of R134a is defined as 1430 by the F-Gas regulation (Schulz and Kourkoulas, 2014), in contrast to 1530 declared by the IPCC AR6 (Smith et al., 2021), which makes it possible to use in cascade systems.

There is a significant trend towards the use of transcritical CO₂ refrigeration systems in the food retail sector because CO₂ is cheap, non-toxic, and non-flammable. As of December 2023, approximately 68500 food retail stores in Europe, 2930 in North America, and 8385 in Japan use transcritical CO₂ systems. The market penetration of transcritical CO₂ systems is 22.9% in Europe, 1.27% in North America, and 10.9% in Japan, which is increasing every year (Hayes, Haroldsen, and Thapa, 2023). ALDI US, the leading grocery user of transcritical CO₂ systems in the US, has announced that all of its stores will use natural refrigerants by 2035 (Hines, 2024). Germany-based food wholesaler METRO installed Serbia's first transcritical CO₂ system in Belgrade in November 2023 (Hayes, 2024). Japanese convenience store chain Lawson operates over 34% of its stores with outdoor CO₂ condensing units (Haroldsen, 2023). France-based supermarket chain Carrefour has two stores in İstanbul with CO₂ systems installed. One of these systems, located in Bahçelievler, is an R404A/CO₂ cascade system, whereas the other one, located in Kurtköy, is a transcritical booster system equipped with an adiabatic gas cooler (Chakroun, 2016; Papazahariou, 2010). Olaf Schulze, Director of Energy Management and Real Estate Sustainability at METRO Properties, stated that the company's plans to install transcritical CO₂ equipment in Türkiye have been delayed due to a lack of service technicians, hoping the installation can take place next year (Hayes, 2023).

Despite the benefits of CO₂ as a refrigerant, it has a lower critical temperature and higher operation pressure than HFCs, which can lead to lower performance at high ambient temperatures. Various improvements are being made

to enhance the performance of the CO₂ systems at high ambient temperatures including parallel compression, ejector expansion, and dedicated mechanical subcooling.

A theoretical comparison of different transcritical CO₂ supermarket refrigeration cycle configurations was performed by Isik and Bilir Sag (2023) for 12 provinces in Türkiye, suggesting the cycle with parallel compression and flooded evaporators because it consumes less energy, has lower emissions, and has a reasonable payback period for each investigated province. Atmaca et al. (2018) parametrically investigated a one-stage transcritical refrigeration cycle with ejector expansion that uses CO₂, ethane, and fluoromethane as working fluids. The authors indicated that the performance improvement potential for CO₂ and methane is about 20%, whereas it is about 14% for fluoromethane at various evaporator temperatures. Sengupta and Dasgupta (2023) presented a novel dual ejector-based transcritical CO₂ supermarket refrigeration cycle and compared it with R404A conventional cycle, obtaining 11.35% annual energy savings and 31% TEWI reduction for Seville. Dai et al. (2024) modeled different transcritical CO₂ supermarket refrigeration cycle configurations with parallel compressor and dedicated mechanical subcooler, obtaining 9.85% lower annual energy consumption and up to 6.87% lower carbon emission with the use of triple-stage dedicated mechanical subcooler compared to the base cycle. Liu et al. (2021) proposed a transcritical CO₂ supermarket refrigeration cycle using multi-ejector and dedicated mechanical subcooler. The authors indicated that the proposed cycle has a 61.76% higher COP than the basic booster cycle at the ambient temperature of 40 °C.

This paper presents energy and environmental analysis of transcritical booster (BRC), parallel compression (PRC), and ejector expansion (ERC) supermarket refrigeration cycles with dedicated mechanical subcooler (DMS) as well as transcritical cycles without DMS circuits, and R404A conventional system. R134a, R1234yf, and R290 were studied as working fluids for DMS circuits. Although R404A is prohibited for newly installed systems, it is widely used in actual supermarket refrigeration systems which are allowed to operate for the next years (Tsimpoukis et al., 2021). The aim of the comparison with R404A is to show the energy and environmental superiority of CO₂ cycles against a widely used refrigerant. As a case study, annual energy consumption and total equivalent warming impact (TEWI) values were compared for three provinces in Türkiye, which are in different climate zones. Annual energy and TEWI analysis of transcritical cycles with DMS circuits for different climate regions in Türkiye constitute the novelty of this paper.

CYCLE MODELING

Transcritical booster supermarket refrigeration cycle (BRC) with dedicated mechanical subcooler (DMS) is presented in Figure 1. The cycle consists of medium-temperature (chiller) and low-temperature (freezer) evaporators. The high-pressure refrigerant at the gas cooler outlet is subcooled via the DMS evaporator to lower its enthalpy. The heat absorbed by the DMS evaporator is rejected through the condenser of the DMS circuit. Subcooled refrigerant is expanded to an intermediate pressure level through the high-pressure expansion valve (HXPV). In the flash tank, liquid and vapor streams are separated. Vapor is expanded to the chiller pressure by the flash-gas-bypass (FGB) valve while liquid is sent to the medium-pressure expansion valve (MPXV) and low-pressure expansion valve (LPXV). Refrigerant at the freezer outlet is compressed to the chiller pressure through the low-pressure compressor (LPC). Then, three streams are mixed before the high-pressure compressor (HPC) and compressed to the gas cooler pressure. Heat rejection with no phase change occurs in the gas cooler under transcritical operation.

Figure 2 shows parallel compression supermarket refrigeration cycle (PRC) with dedicated mechanical subcooler (DMS). As opposed to BRC, the vapor stream at the flash tank is compressed through a separate parallel compressor (PC) to reduce the compressor work instead of expanding to the chiller pressure. It consists of an FGB valve in case of insufficient mass flow in the PC to bypass through HPC.

HPXV is replaced by the ejector in the ejector expansion supermarket refrigeration cycle (ERC) with dedicated mechanical subcooler (DMS) as shown in Figure 3. The ejector acts as a pressure recovery component to increase the suction pressure of the HPC.

The cycles were modeled in MATLAB environment using the CoolProp library for the thermophysical properties of the refrigerants (Bell et al., 2014; The MathWorks Inc., 2022). The following assumptions were made for the calculations:

- All cycles operate at a steady state.

- Chiller evaporator temperature (T_{MT}) and design capacity (\dot{Q}_{MT}) values were taken as $-8\text{ }^{\circ}\text{C}$ and 80 kW, respectively (Tsimpoukis et al., 2021).
- Freezer evaporator temperature (T_{LT}) and design capacity (\dot{Q}_{LT}) values were taken as $-32\text{ }^{\circ}\text{C}$ and 25 kW, respectively (Tsimpoukis et al., 2021).
- 10 K of internal (useful) superheat was considered for each CO_2 evaporator (Tsimpoukis et al., 2021).
- 5 K of external superheat was considered for DMS heat exchanger evaporator (Catalán-Gil, Llopis, Sánchez, Nebot-Andrés, and Cabello, 2019).
- Condenser/gas cooler conditions for the CO_2 cycles depending on the ambient temperature (T_{amb}) were taken as shown in Table 2 (Tsimpoukis et al., 2021).
- Condenser conditions for R404A conventional system and DMS cycles depending on the ambient temperature (T_{amb}) were taken as shown in Table 3 (Tsimpoukis et al., 2021).
- Global efficiency correlations shown in Table 4 were considered for compressors depending on pressure ratio (R_p) (de Paula, Duarte, Rocha, de Oliveira, and Maia, 2020; de Paula, Duarte, Rocha, de Oliveira, Mendes, et al., 2020; Tsimpoukis et al., 2021).
- 95% constant mechanical efficiency was considered for each compressor (Mitsopoulos et al., 2019).
- DMS heat exchanger effectiveness was taken as 60% for each cycle (Catalán-Gil et al., 2019).
- Ejector component efficiency values were taken as $\eta_{mn} = 90\%$ for motive nozzle, $\eta_{sn} = 90\%$ for suction nozzle, and $\eta_{dif} = 80\%$ for diffuser (Li and Groll, 2005).
- Pressure drops in the piping and heat exchangers were not considered.
- Heat losses in the piping were not considered.
- Expansion processes in the expansion valves were considered as isenthalpic.
- Electricity consumption of the evaporator and condenser/gas cooler fans was taken as 3% of the heat transfer rate of the corresponding heat exchanger (Karampour and Sawalha, 2018).
- R404A system was considered as subcritical separate cycles for the chiller and freezer (Mitsopoulos et al., 2019).

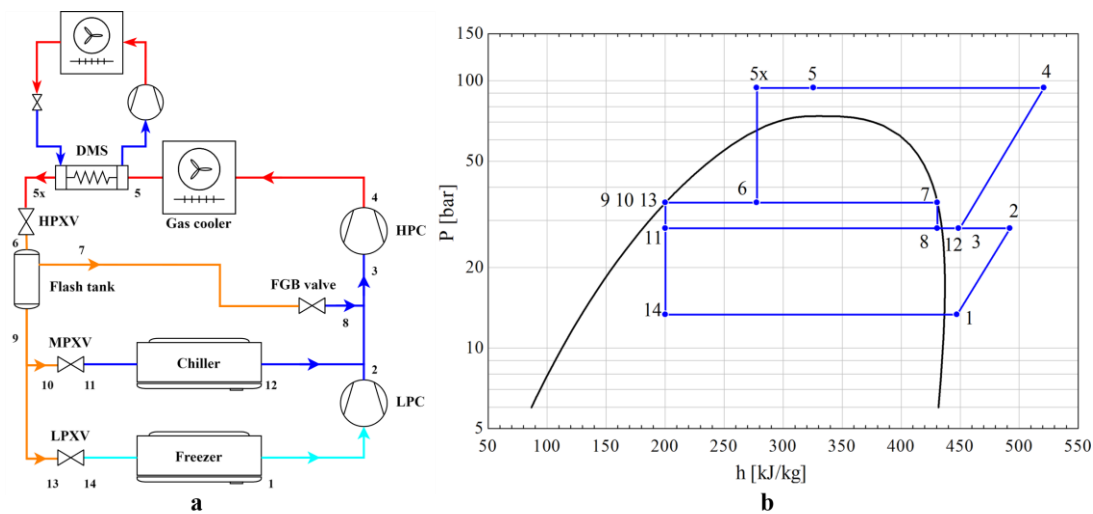


Figure 1. Transcritical Booster Supermarket Refrigeration Cycle (BRC) with Dedicated Mechanical Subcooler (DMS) **a.** Plant Layout, **b.** Pressure-Enthalpy Diagram (Klein, 2020)

Evaporator loads vary between a minimum value and design value depending on the ambient temperature. Evaporator loads are at minimum value when the ambient temperature is below $5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Between the ambient temperatures of 5 and $30\text{ }^{\circ}\text{C}$, evaporator loads were calculated using Eq. (1). Minimum fraction (mf) was taken as 0.66 for the chiller, and 0.80 for the freezer. When the ambient temperature is above $30\text{ }^{\circ}\text{C}$, evaporator loads are at design value. This is because when the ambient temperature deviates from the design point, the indoor air temperature and relative humidity will change and this will cause refrigeration loads to deviate from the design loads defined by the store refrigeration schedule (Zhang, 2006).

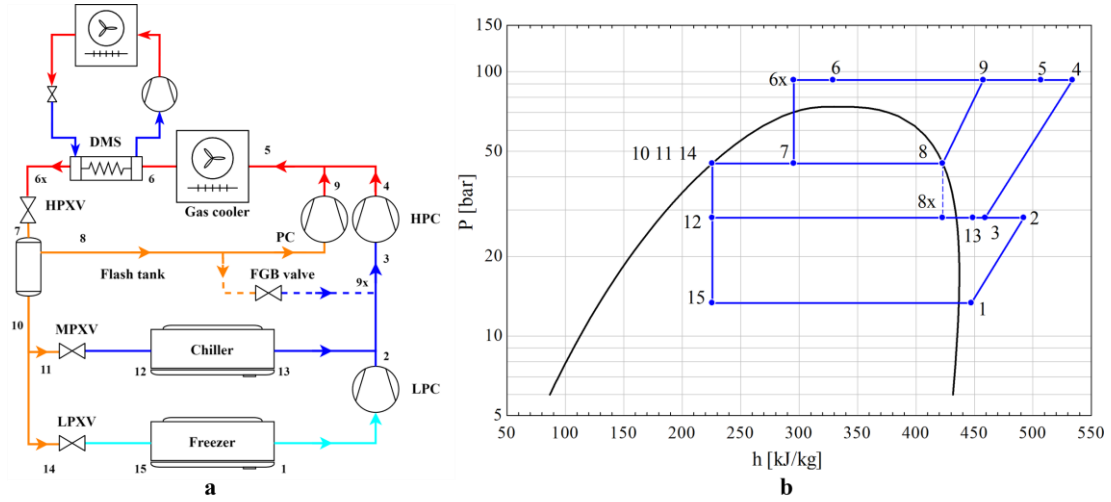


Figure 2. Parallel Compression Transcritical Supermarket Refrigeration Cycle (PRC) with Dedicated Mechanical Subcooler (DMS) **a.** Plant Layout, **b.** Pressure-Enthalpy Diagram (Klein, 2020)

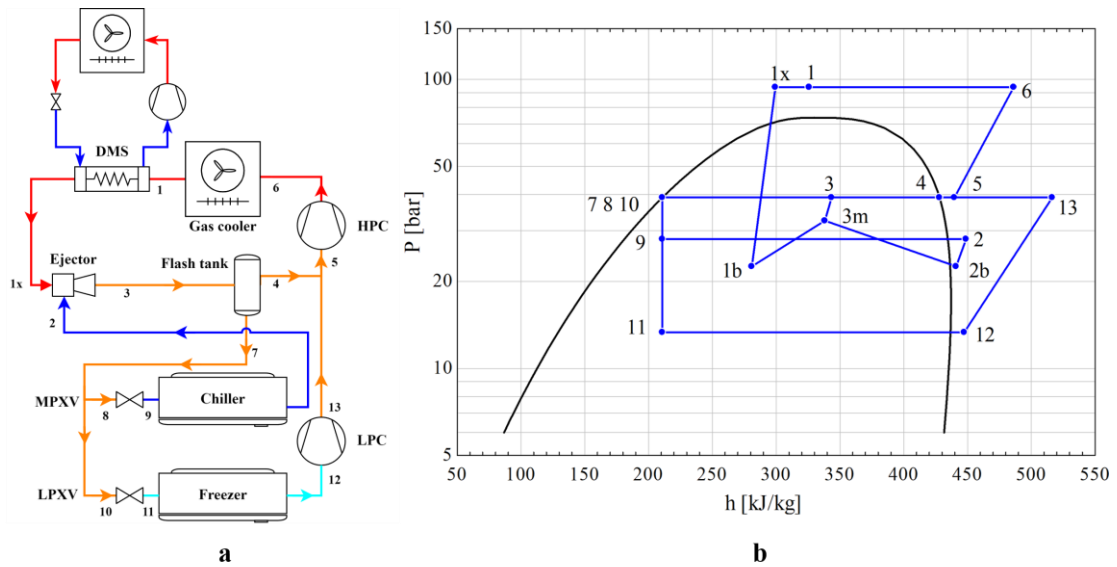


Figure 3. Ejector Expansion Transcritical Supermarket Refrigeration Cycle (ERC) with Dedicated Mechanical Subcooler (DMS) **a.** Plant Layout, **b.** Pressure-Enthalpy Diagram (Klein, 2020)

Table 2. Condenser/Gas Cooler Conditions for CO₂ Cycles (Tsimpoukis et al., 2021)

T_{amb} [°C]	$T_{cond/GC,out}$ [°C]	$P_{cond/GC}$ [bar]
$T_{amb} \leq 5$	11	Saturated pressure at 13 °C
$5 < T_{amb} \leq 14$	$T_{amb} + 6$	Saturated pressure at $T_{amb} + 8$ °C
$14 < T_{amb} \leq 27$	$0.7692T_{amb} + 9.23$	$1.397T_{GC,out} + 32.09$
$T_{amb} > 27$	$T_{amb} + 3$	Optimized (transcritical)

Table 3. Condenser Conditions for R404A Conventional System and DMS Cycles (Tsimpoukis et al., 2021)

T_{amb} [°C]	$T_{cond,out}$ [°C]	P_{cond} [bar]
$T_{amb} \leq 19$	25	Saturated pressure at 27 °C
$T_{amb} > 19$	$T_{amb} + 6$	Saturated pressure at $T_{amb} + 8$ °C

$$\dot{Q}_{ev} = \left[1 - (1 - mf) \left(\frac{30 - T_{amb}}{30 - 5} \right) \right] \dot{Q}_{ev,design} \quad \text{if } 5 \leq T_{amb} \leq 30 \text{ °C} \quad (1)$$

Evaporation temperature ($T_{ev,DMS}$) and capacity (\dot{Q}_{DMS}) of the DMS circuit was determined using Eqs. (2-3) (Catalán-Gil et al., 2019).

$$T_{ev,DMS} = T_{DMS,in,CO_2} - \frac{(T_{DMS,in,CO_2} - T_{DMS,out,CO_2})}{\varepsilon_{DMS}} \quad (2)$$

$$\dot{Q}_{DMS} = \dot{m}_{GC}(h_{DMS,in,CO_2} - h_{DMS,out,CO_2}) \quad (3)$$

Where T_{DMS,in,CO_2} is gas cooler outlet temperature of CO₂, T_{DMS,out,CO_2} is DMS outlet temperature of CO₂, and ε_{DMS} is DMS heat exchanger effectiveness, \dot{m}_{GC} is the gas cooler mass flow rate, h_{DMS,in,CO_2} is enthalpy of CO₂ at DMS inlet, h_{DMS,out,CO_2} is enthalpy of CO₂ at DMS outlet.

Table 4. Global Compressor Efficiency Correlations (de Paula, Duarte, Rocha, de Oliveira, and Maia, 2020; de Paula, Duarte, Rocha, de Oliveira, Mendes, et al., 2020; Tsimpoukis et al., 2021)

System	Global Efficiency of the Compressors
CO ₂	$\eta_{glob,LPC} = -0.0257R_p^2 + 0.1085R_p + 0.5890$
	$\eta_{glob,HPC} = -0.0265R_p^2 + 0.1572R_p + 0.5221$
	$\eta_{glob,PC} = -0.0457R_p^2 + 0.2698R_p + 0.3582$
R134a DMS	$\eta_{glob,DMS} = -0.0058R_p^2 + 0.0766R_p + 0.2819$
R1234yf DMS	$\eta_{glob,DMS} = 0.0018R_p^3 - 0.0342R_p^2 + 0.2012R_p + 0.0499$
R290 DMS	$\eta_{glob,DMS} = -0.0131R_p^2 + 0.1256R_p + 0.2392$
R404A	$\eta_{glob,LPC} = -0.0014R_p^2 + 0.0044R_p + 0.6080$
	$\eta_{glob,HPC} = -0.0216R_p^2 + 0.1423R_p + 0.4664$

Energy equations for the components of the main cycles are given in Table 5.

Table 5. Energy Equations for the Components of the Main Cycles

Component	BRC	PRC	ERC
	$h_{2,is} = f(P_2, s_1)$	$h_{2,is} = f(P_2, s_1)$	$h_{13,is} = f(P_{13}, s_{12})$
Low-pressure compressor (LPC)	$h_2 = h_1 + \frac{h_{2,is} - h_1}{\eta_{LPC,is}}$	$h_2 = h_1 + \frac{h_{2,is} - h_1}{\eta_{LPC,is}}$	$h_{13} = h_{12} + \frac{h_{13,is} - h_{12}}{\eta_{LPC,is}}$
	$\dot{W}_{LPC} = \dot{m}_{LT} \frac{h_{2,is} - h_1}{\eta_{LPC,glob}}$	$\dot{W}_{LPC} = \dot{m}_{LT} \frac{h_{2,is} - h_1}{\eta_{LPC,glob}}$	$\dot{W}_{LPC} = \dot{m}_{LT} \frac{h_{13,is} - h_{12}}{\eta_{LPC,glob}}$
	$\dot{m}_{HPC} = \dot{m}_{LT} + \dot{m}_{MT} + \dot{m}_{FGB}$	$\dot{m}_{HPC} = \dot{m}_{LT} + \dot{m}_{MT}$	$\dot{m}_{HPC} = \dot{m}_{LT} + \dot{m}_{FGB}$
	$h_3 = \frac{\dot{m}_{LT}h_2 + \dot{m}_{MT}h_{12} + \dot{m}_{FGB}h_8}{\dot{m}_{HPC}}$	$h_3 = \frac{\dot{m}_{LT}h_2 + \dot{m}_{MT}h_{13}}{\dot{m}_{HPC}}$	$h_5 = \frac{\dot{m}_{LT}h_{13} + \dot{m}_{FGB}h_4}{\dot{m}_{HPC}}$
High-pressure compressor (HPC)	$s_3 = f(P_{MT}, h_3)$	$s_3 = f(P_{MT}, h_3)$	$s_5 = f(P_3, h_5)$
	$h_{4,is} = f(P_4, s_3)$	$h_{4,is} = f(P_4, s_3)$	$h_{6,is} = f(P_6, s_5)$
	$h_4 = h_3 + \frac{h_{4,is} - h_3}{\eta_{HPC,is}}$	$h_4 = h_3 + \frac{h_{4,is} - h_3}{\eta_{HPC,is}}$	$h_6 = h_5 + \frac{h_{6,is} - h_5}{\eta_{HPC,is}}$
	$\dot{W}_{HPC} = \dot{m}_{HPC} \frac{h_{4,is} - h_3}{\eta_{HPC,glob}}$	$\dot{W}_{HPC} = \dot{m}_{HPC} \frac{h_{4,is} - h_3}{\eta_{HPC,glob}}$	$\dot{W}_{HPC} = \dot{m}_{HPC} \frac{h_{6,is} - h_5}{\eta_{HPC,glob}}$
Parallel compressor (PC)		$h_9 = h_8 + \frac{h_{9,is} - h_8}{\eta_{PC,is}}$	
		$\dot{W}_{PC} = \dot{m}_{FGB} \frac{h_{9,is} - h_8}{\eta_{PC,glob}}$	
Freezer	$h_1 = f(P_{LT}, T_{LT} + \Delta T_{SH,LT})$	$h_1 = f(P_{LT}, T_{LT} + \Delta T_{SH,LT})$	$h_{12} = f(P_{LT}, T_{LT} + \Delta T_{SH,LT})$
	$s_1 = f(P_{LT}, T_{LT} + \Delta T_{SH,LT})$	$s_1 = f(P_{LT}, T_{LT} + \Delta T_{SH,LT})$	$s_{12} = f(P_{LT}, T_{LT} + \Delta T_{SH,LT})$

	$\dot{m}_{LT} = \frac{\dot{Q}_{LT}}{h_1 - h_{14}}$	$\dot{m}_{LT} = \frac{\dot{Q}_{LT}}{h_1 - h_{15}}$	$\dot{m}_{LT} = \frac{\dot{Q}_{LT}}{h_{12} - h_{11}}$
	$h_{12} = f(P_{MT}, T_{MT} + \Delta T_{SH,MT})$	$h_{13} = f(P_{MT}, T_{MT} + \Delta T_{SH,MT})$	$h_2 = f(P_{MT}, T_{MT} + \Delta T_{SH,MT})$
Chiller	$\dot{m}_{MT} = \frac{\dot{Q}_{MT}}{h_{12} - h_{11}}$	$\dot{m}_{MT} = \frac{\dot{Q}_{MT}}{h_{13} - h_{12}}$	$\dot{m}_{MT} = \frac{\dot{Q}_{MT}}{h_2 - h_9}$
	$h_{5x} = f(P_{GC}, T_{5x})$	$h_{6x} = f(P_{GC}, T_{6x})$	
Expansion valves	$h_{5x} = h_6$	$h_{6x} = h_7$	$h_7 = h_8 = h_9 = h_{10} = h_{11}$
Flash-gas-bypass (FGB) valve	$h_9 = h_{10} = h_{11} = h_{13} = h_{14}$	$h_{10} = h_{11} = h_{12} = h_{14} = h_{15}$	
	$h_7 = h_8$		$h_{1x} = f(P_{GC}, T_{1x})$
Ejector			$\dot{m}_3 = \dot{m}_{MT} \left(1 + \frac{1}{\omega}\right)$
			$h_3 = f(P_3, x_3)$
			$\dot{m}_1 h_{1x} + \dot{m}_2 h_2 = \dot{m}_3 h_3$
	$h_7 = f(P_{FGB}, x = 1)$	$h_8 = f(P_{FGB}, x = 1)$	$h_4 = f(P_3, x = 1)$
	$h_9 = f(P_{FGB}, x = 0)$	$s_8 = f(P_{FGB}, x = 1)$	$h_7 = f(P_3, x = 0)$
Flash tank	$\dot{m}_{FGB} = (\dot{m}_{LT} + \dot{m}_{MT}) \left(\frac{h_6 - h_9}{h_7 - h_6}\right)$	$h_{10} = f(P_{FGB}, x = 0)$	$\dot{m}_{FGB} = \dot{m}_3 - (\dot{m}_{LT} + \dot{m}_{MT})$
		$\dot{m}_{FGB} = (\dot{m}_{LT} + \dot{m}_{MT}) \left(\frac{h_7 - h_{10}}{h_8 - h_7}\right)$	
		$\dot{m}_{GC} = \dot{m}_{HPC} + \dot{m}_{FGB}$	
Gas cooler	$h_5 = f(P_{GC}, T_{GC,out})$	$h_5 = \frac{\dot{m}_{HPC} h_4 + \dot{m}_{FGB} h_9}{\dot{m}_{GC}}$	$h_1 = f(P_{GC}, T_{GC,out})$
	$\dot{Q}_{GC} = \dot{m}_{HPC}(h_4 - h_5)$	$\dot{Q}_{GC} = \dot{m}_{GC}(h_5 - h_6)$	$\dot{Q}_{GC} = \dot{m}_{HPC}(h_6 - h_1)$

Table 6 presents energy equations for the components of the DMS cycles.

Table 6. Energy Equations for the Components of the Dedicated Mechanical Subcooler (DMS) Cycles

Component	Energy Equation
	$h_{comp,DMS,out,is} = f(P_{cond,DMS}, s_{ev,DMS,out})$
Compressor	$h_{comp,DMS,out} = h_{ev,DMS,out} + \frac{h_{comp,DMS,out,is} - h_{ev,DMS,out}}{\eta_{comp,DMS,is}}$
	$W_{comp,DMS} = \dot{m}_{DMS} \frac{h_{comp,DMS,out,is} - h_{ev,DMS,out}}{\eta_{comp,DMS,glob}}$
Expansion valve	$h_{cond,DMS,out} = h_{ev,DMS,in}$
	$\dot{Q}_{DMS} = \dot{m}_{GC}(h_{DMS,in,CO_2} - h_{DMS,out,CO_2})$
	$P_{ev,DMS} = f(T_{ev,DMS}, x = 1)$
Evaporator	$h_{ev,DMS,out} = f(T_{ev,DMS}, x = 1)$
	$s_{ev,DMS,out} = f(T_{ev,DMS}, x = 1)$
	$\dot{m}_{DMS} = \frac{\dot{Q}_{DMS}}{h_{ev,DMS,out} - h_{ev,DMS,in}}$
	$P_{cond,DMS} = f(T_{cond,DMS}, x = 0)$
Condenser	$h_{cond,DMS,out} = f(P_{cond,DMS}, T_{cond,DMS} - \Delta T_{SC,cond,DMS})$
	$\dot{Q}_{cond,DMS} = \dot{m}_{DMS}(h_{comp,DMS,out} - h_{cond,DMS,out})$

Coefficient of performance (COP) is defined as the ratio of total evaporator capacity to total power consumption of the compressors and fans as shown in Eq. (4).

$$COP = \frac{\dot{Q}_{MT} + \dot{Q}_{LT}}{\sum \dot{W}_{comp} + \sum \dot{W}_{fan}} \quad (4)$$

The ejector consists of a motive nozzle, suction nozzle, mixing chamber, and diffuser. Constant-area flow model was used in the ejector calculations (Caliskan, Bilir Sag, and Ersoy, 2024). The reason why the constant-area flow model is preferred over the constant-pressure flow model is that theoretical results obtained by using the constant-area flow model agree with experimental results as opposed to the constant-pressure flow model (Keenan, Neumann, and Lustwerk, 1950). Additionally, for the same operating temperatures, the calculated COP of the constant-area ejector flow model system is greater than that of the constant pressure ejector flow model system (Yapici and Ersoy, 2005). Entrainment ratio (ω) is the ratio of the suction flow to the motive flow as shown in Eq. (5). Entrainment ratio (ω) and mixing chamber pressure (P_{3m}) are optimized to satisfy mass, heat, and momentum balance in the ejector. The solution algorithm for ERC is presented in Figure 4.

$$\omega = \frac{\dot{m}_{sn}}{\dot{m}_{mn}} = \frac{\dot{m}_{MT}}{\dot{m}_{HPC}} \quad (5)$$

Where \dot{m}_{MT} is chiller mass flow rate, \dot{m}_{HPC} is HPC mass flow rate.

The BRC model was validated by an experimental study performed by Tsamos et al. (2017) under the same conditions as stated by the authors. The mean deviation of COP values was calculated as 2.5%. The ejector model was validated by Danfoss Coolselector2 software (Danfoss, 2023), which contains the performance data of commercially available ejectors in the market manufactured by Danfoss. The performance data are based on experimental results (Contiero, Pardiñas, and Hafner, 2021). The mean deviation of entrainment ratio values was calculated as 3.3%.

Bin-hour method was used for annual energy consumption calculations of the cycles. Bin data is defined as the number of hours that the ambient temperature was in each of a set of equally sized intervals of ambient temperature as shown in Eq. (6). In this method, energy consumption calculations are performed at each ambient temperature and these are multiplied by the number of occurrence hours at each ambient temperature (Said, Habib, and Iqbal, 2003).

$$E_{tot} = \sum (\dot{W}_{tot} N_{bin})_{@T_{amb}} \quad (6)$$

Total Equivalent Warming Impact (TEWI) method based on the EN378 standard was used for environmental impact calculations of the cycles (Zotl, Lindahl, Nordman, Rivière, and Miara, 2011). Direct TEWI is caused by refrigerant leakage from the system during its lifetime and disposal of the refrigerant at the end of life, while indirect TEWI is caused by electricity generation to operate the system as shown in Eqs. (7-9). Refrigerant charge (m_{ref}) was taken as 3 kg/kW for CO₂ cycles, 2 kg/kW for DMS and R404A chiller cycles, and 4 kg/kW for R404A freezer cycle (Karampour and Sawalha, 2018). Annual refrigerant leakage (L), operation lifetime (n), refrigerant recycling factor (α), and electricity generation emissions (K) were taken as 10% of the refrigerant charge, 15 years, 95%, and 0.44 kg CO_{2e}/kWh, respectively (ETKB, 2022; Karampour and Sawalha, 2018).

$$TEWI_{Direct} = GWP \times L \times n + GWP \times m_{ref} \times (1 - \alpha) \quad (7)$$

$$TEWI_{Indirect} = E \times n \times K \quad (8)$$

$$TEWI_{total} = TEWI_{Direct} + TEWI_{Indirect} \quad (9)$$

RESULTS AND DISCUSSION

The effect of the subcooling degree (ΔT_{SC}) to the performance of the cycles was investigated in Figure 5 for BRC, Figure 6 for PRC, and Figure 7 for ERC under the same operation conditions. With the increase in the subcooling degree, the vapor quality in the flash tank decreases, which leads to lower mass flow rate and lower power consumption in the compressors. However, the mass flow rate in DMS circuit increases due to increased capacity.

The pressure difference in the DMS compressor also increases due to decreased evaporator temperature. Therefore, the power consumption of DMS circuit increases. It can be seen that there is an optimum point of subcooling degree to maximize COP for each cycle. DMS power consumption increases more rapidly than the reduction in power consumption of CO₂ cycle above the optimum point, which reduces the total COP. The performance of R134a and R290 DMS circuits are identical. R290 circuit has the lowest mass flow rate due to its highest vaporization enthalpy among investigated refrigerants.

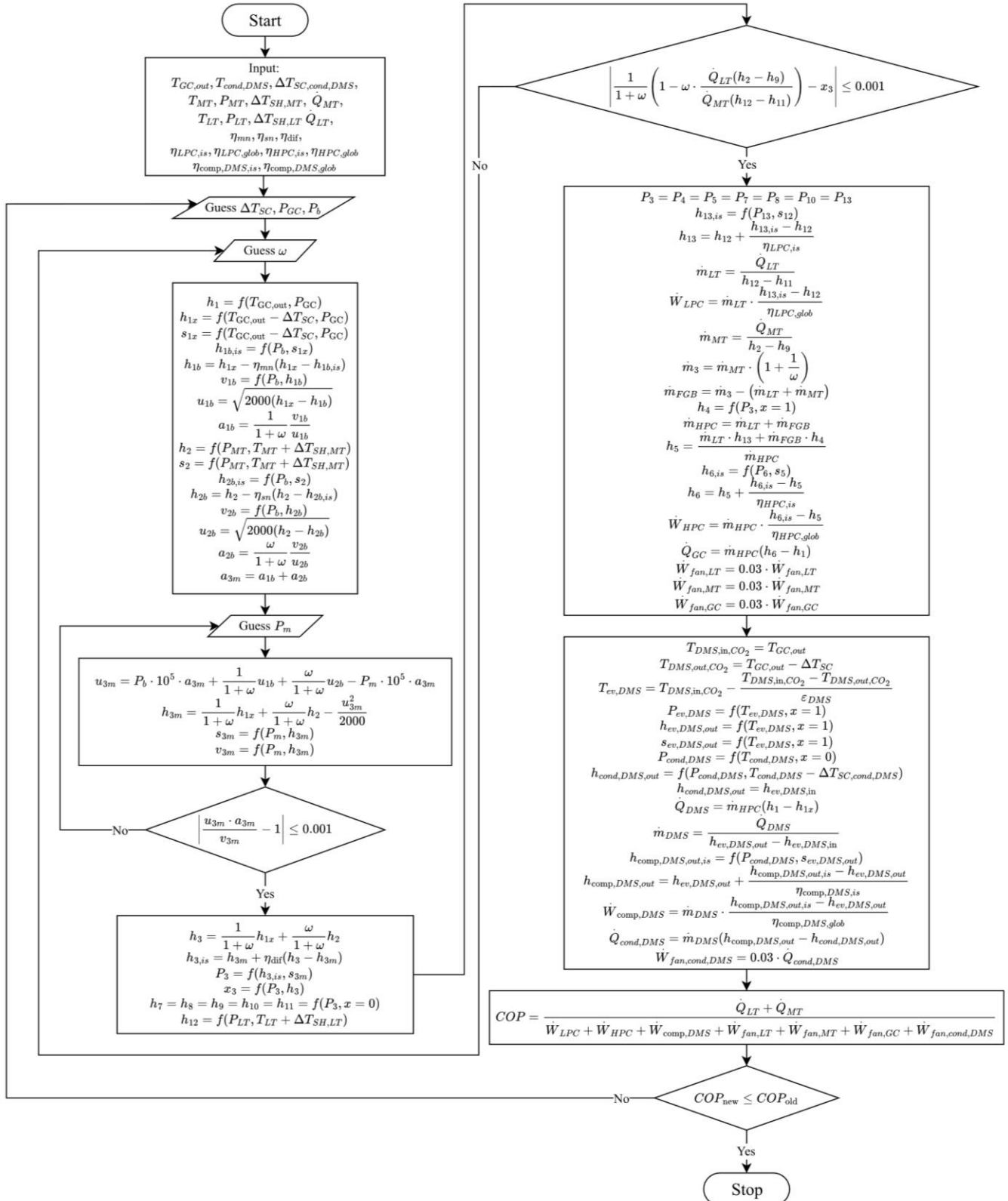


Figure 4. Solution Algorithm for Ejector Refrigeration Cycle (ERC) with Dedicated Mechanical Subcooler (DMS)

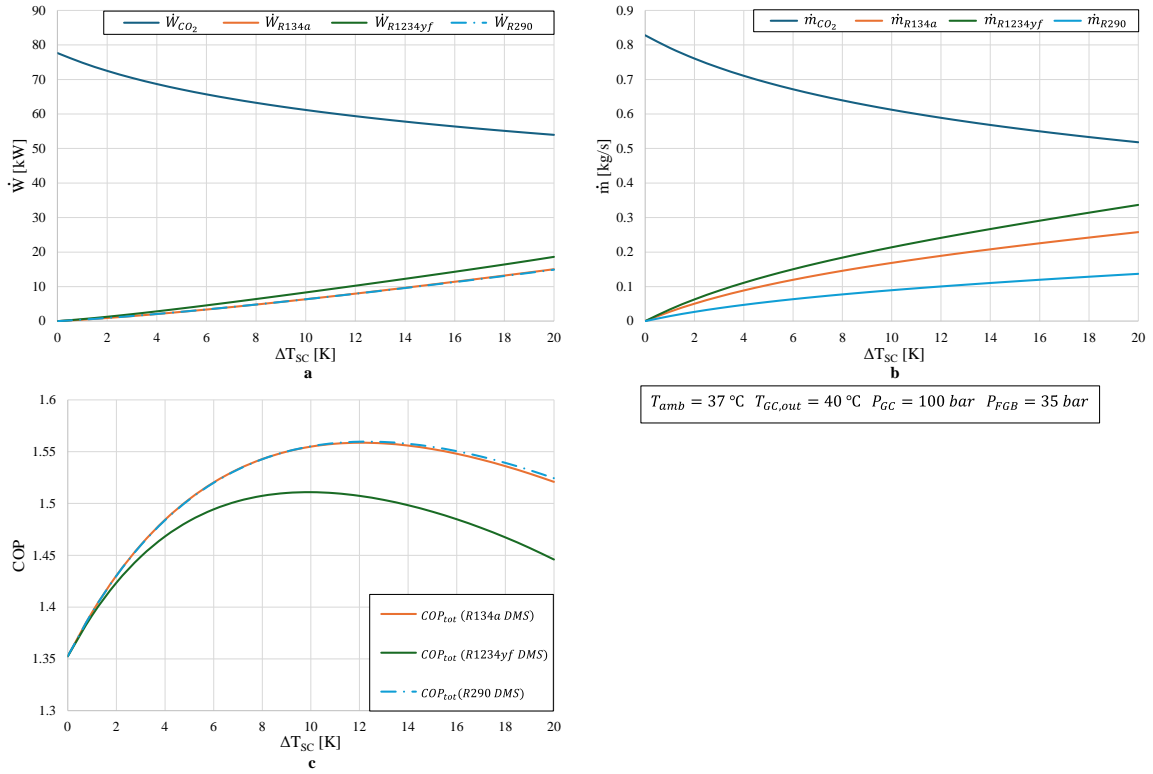


Figure 5. Effect of the Subcooling Degree to **a.** Power Consumptions, **b.** Mass Flow Rates, **c.** COP of BRC

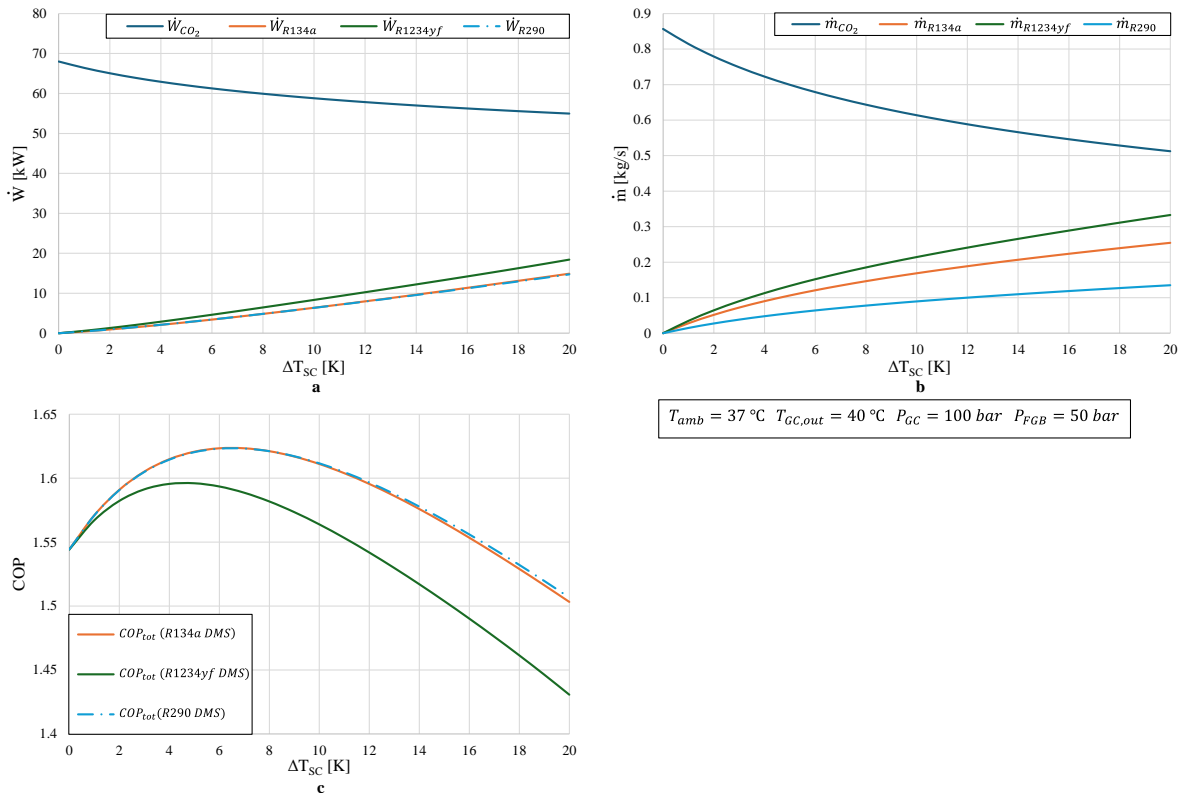


Figure 6. Effect of the Subcooling Degree to **a.** Power Consumptions, **b.** Mass Flow Rates, **c.** COP of PRC

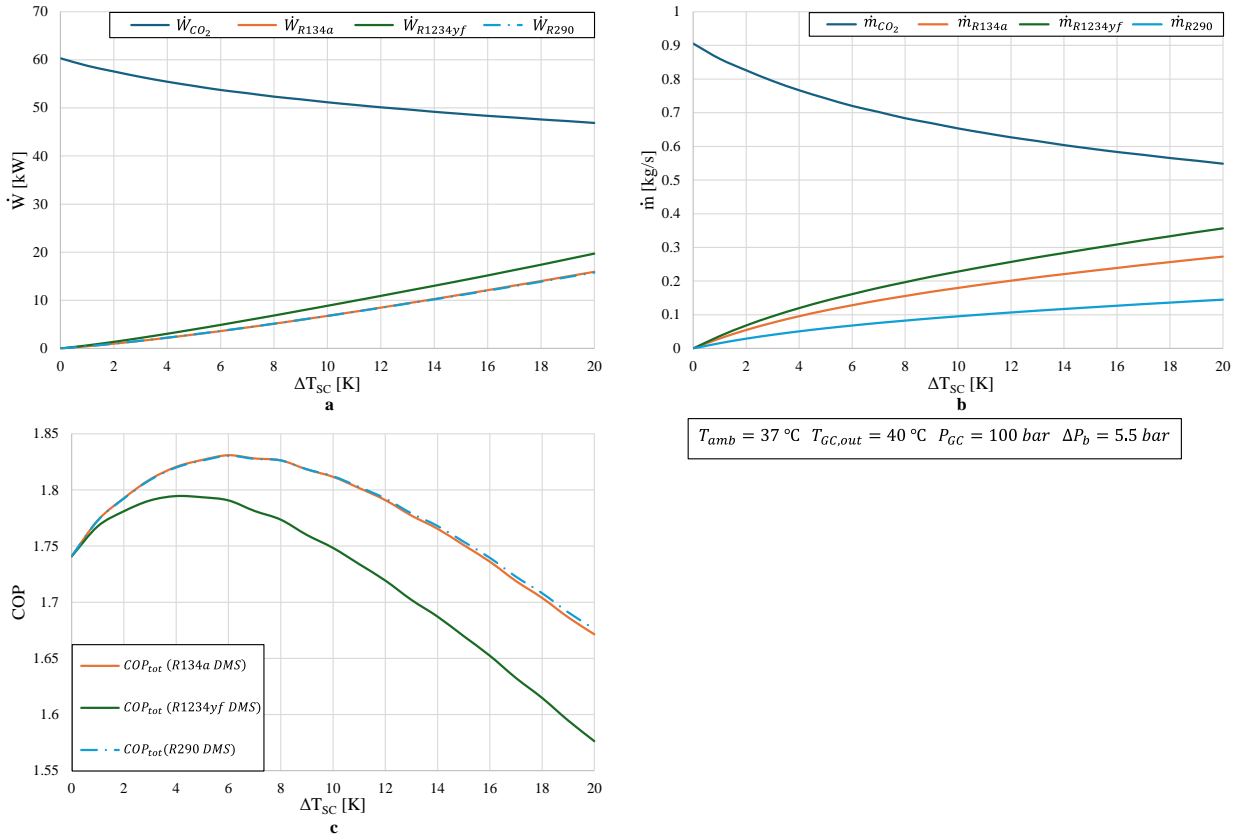


Figure 7. Effect of the Subcooling Degree to **a.** Power Consumptions, **b.** Mass Flow Rates, **c.** COP of ERC

Above the critical point, pressure and temperature are independent of each other. Therefore, the gas cooler pressure (P_{GC}) needs to be optimized under transcritical operation for all cycles. The intermediate pressure (P_{FGB}) in BRC was taken as 35 bar for proper feeding of the evaporators (Mitsopoulos et al., 2019). In PRC, P_{FGB} is needed to be optimized as well for the maximum performance. In ERC, however, there is an optimum pressure drop in the suction nozzle (ΔP_b) for maximum performance (Caliskan and Ersoy, 2022). Golden Section Search (GSS) method was used for one-variable optimization and Genetic Algorithm (GA) method was used for multi-variable optimization with the objective of minimization of the total power consumption (The MathWorks Inc., 2022). Optimized parameters for each CO₂ cycle are presented in Table 7.

Table 7. Optimized Parameters for the Investigated CO₂ Cycles

Cycle	Optimized Parameters	
	without DMS	with DMS
BRC	P_{GC}	$P_{GC}, \Delta T_{SC}$
PRC	P_{GC}, P_{FGB}	$P_{GC}, P_{FGB}, \Delta T_{SC}$
ERC	$P_{GC}, \Delta P_b$	$P_{GC}, \Delta P_b, \Delta T_{SC}$

The optimization process was conducted within the gas cooler outlet temperature ($T_{GC,out}$) range of 30.5 to 45 °C with 0.5 °C increments. The optimized variables of the cycles are presented in Figure 8 for BRC, Figure 9 for PRC, and Figure 10 for ERC. It is noteworthy that the optimum gas cooler pressure ($P_{GC,opt}$) is lower for all cycles with DMS compared to the ones without DMS. The difference is much higher for BRC. Decrease in $P_{GC,opt}$ is between 2.5 and 8.9 bar for BRC, between 0.5 and 6.2 bar for PRC, and between 0.1 and 6.5 bar for ERC. The optimum intermediate pressure ($P_{FGB,opt}$) does not deviate much with the increase in $T_{GC,out}$ and it is around 50 bar for PRC without DMS whereas it decreases to around 44 bar with DMS. $\Delta P_{b,opt}$ for ERC with DMS decreases from around 5.7 bar to 5.1 bar compared to the cycle without DMS. The optimum subcooling degree ($\Delta T_{SC,opt}$) is lower for R1234yf compared to R134a and R290 because of its lower performance than other refrigerants. It is seen that cycles with R134a and R290 DMS circuits have the highest performance compared to cycles without DMS and R1234yf DMS. The difference is higher at higher gas cooler outlet temperatures, and it is more significant for BRC.

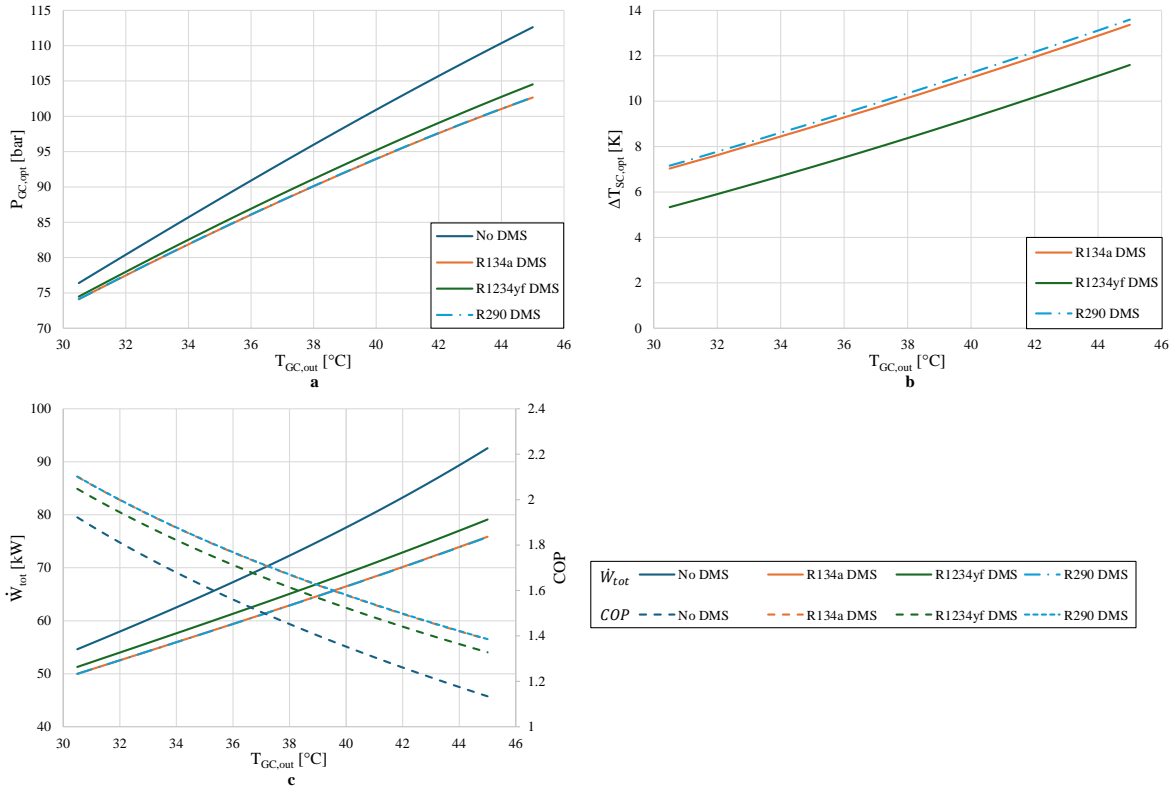


Figure 8. a. Optimized Gas Cooler Pressure, **b.** Optimized Subcooling Degree, **c.** Power Consumption and COP Values of BRC under Different Gas Cooler Outlet Temperatures

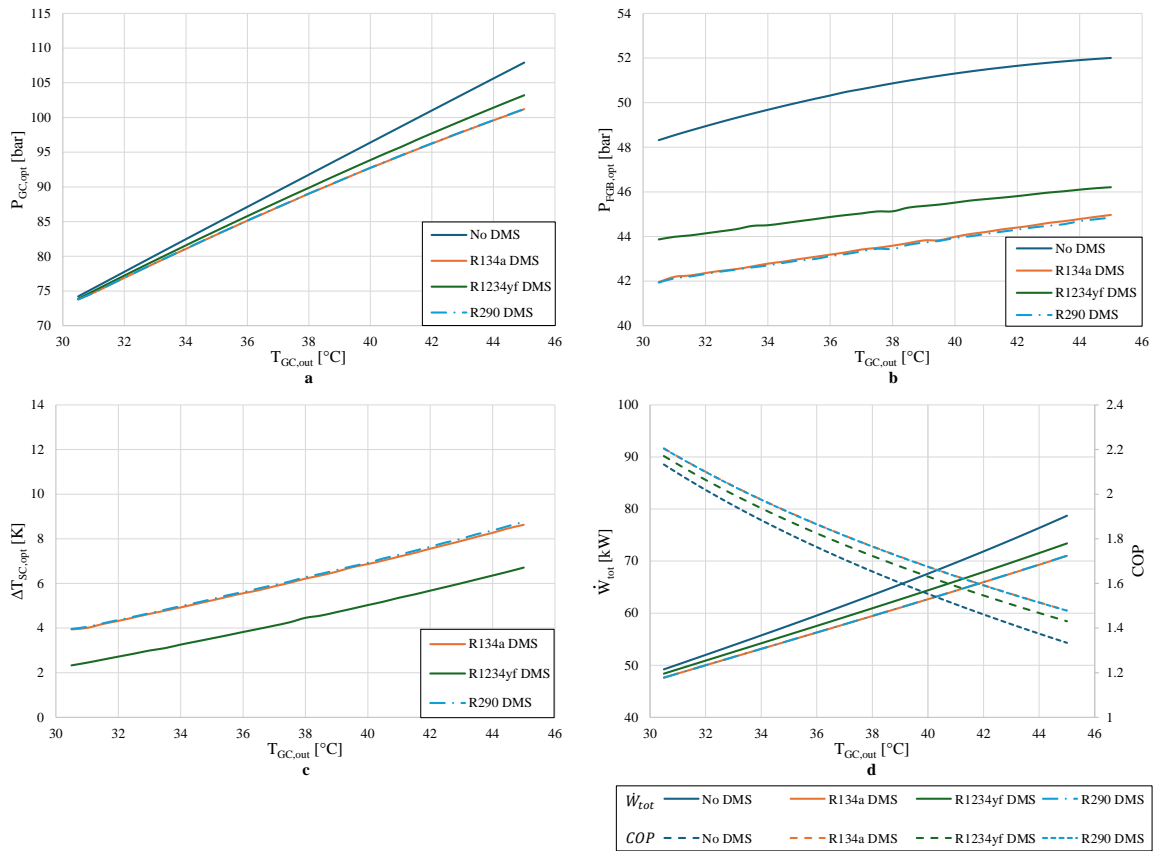


Figure 9. a. Optimized Gas Cooler Pressure, **b.** Optimized Intermediate Pressure, **c.** Optimized Subcooling Degree, **d.** Power Consumption and COP Values of PRC under Different Gas Cooler Outlet Temperatures

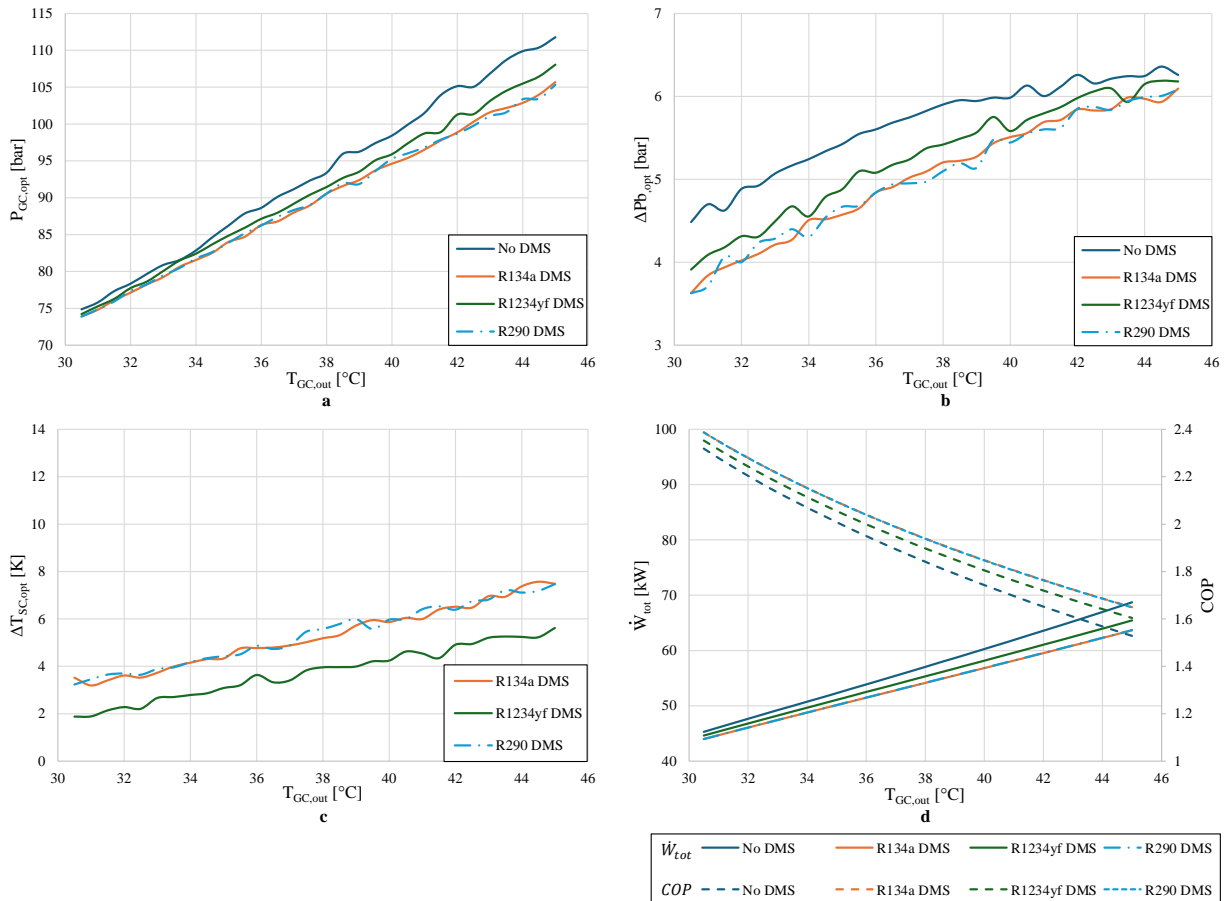


Figure 10. a. Optimized Gas Cooler Pressure, **b.** Optimized Suction Nozzle Pressure Drop, **c.** Optimized Subcooling Degree, **d.** Power Consumption and COP Values of ERC under Different Gas Cooler Outlet Temperatures

Entrainment ratio (ω) and pressure lift ratio (ratio of the diffuser outlet pressure to the chiller pressure) values were investigated within the gas cooler outlet temperature ($T_{GC,out}$) range of 30.5 to 45 °C using optimized values of gas cooler pressure (P_{GC}), suction nozzle pressure drop (ΔP_b), and subcooling degree (ΔT_{SC}). Entrainment ratio varies between 0.423 and 0.35 for ERC without DMS, between 0.485 and 0.434 for R134a DMS, between 0.461 and 0.417 for R1234yf DMS, and between 0.481 and 0.433 for R290 DMS. Pressure lift ratio varies between 1.31 and 1.57 for ERC without DMS, between 1.24 and 1.42 for R134a DMS, between 1.27 and 1.45 for R1234yf DMS, and between 1.25 and 1.42 for R290 DMS. As an example of the results obtained, at $T_{GC,out} = 40$ °C and $P_{GC} = 96$ bar, entrainment ratio is 0.356 and pressure lift ratio is 1.49 for ERC without DMS, while entrainment ratio is 0.44 and pressure lift ratio is 1.37 for R290 DMS at $\Delta T_{SC} = 5$ °C. When DMS is applied to ERC, entrainment ratio increases and pressure lift ratio decreases. Since an increase in entrainment ratio has a positive effect on COP and a decrease in pressure lift ratio has a negative effect on COP, the application of DMS to ERC increases COP less than BRC.

Correlations for the optimum gas cooler pressures were derived using curve-fitting. As other parameters do not deviate much, mean values were used. Correlations for optimized variables of the investigated cycles under transcritical operation are shown in Table 8. The mean deviation of COP from the optimum values presented in Figures 8-10 is below 0.65% for each cycle.

Figure 11 presents total power consumption and COP values of each cycle depending on the ambient temperature using the correlations given in Table 8. DMS circuits operate if $T_{amb} > 27$ °C for all cycles and PC operates if $T_{amb} > 14$ °C for PRC. Subcooling is applied in the condenser under subcritical operation. Under subcritical operation, P_{FGB} was taken as 40 bar for PRC and ΔP_b was taken as 3 bar for ERC. Considering the cycles without DMS, BRC has better performance than R404A system at ambient temperatures below 18 °C while PRC and ERC perform better at any ambient temperature. The performance difference of the cycles with DMS increases with the increase in the ambient temperature. It is more significant for BRC than other cycles. COP improvement of DMS is

up to 20.5% for BRC, up to 9.5% for PRC, and up to 7.1% for ERC. COP improvement of BRC, PRC, and ERC with DMS compared to R404A system is up to 15.2%, 22.9%, and 37.7%, respectively. ERC cycles have the best performance among investigated cycles due to the pressure recovery in the ejector.

Table 8. Correlations for Optimized Variables of the Investigated Cycles under Transcritical Operation

Cycle	$P_{GC,opt}$ [bar]	$P_{FGB,opt}$ [bar]	$\Delta P_{b,opt}$ [bar]	$\Delta T_{SC,opt}$ [K]	COP Mean Deviation
BRC without DMS	$2.505T_{GC,out} + 0.4847$	35	-	-	0.004%
BRC+R134a DMS					0.434%
BRC+R1234yf DMS	$-0.02257T_{GC,out}^2 + 3.7423T_{GC,out} - 18.02$	35	-	9.5	0.360%
BRC+R290 DMS					0.451%
PRC without DMS	$2.323T_{GC,out} + 3.453$	50	-	-	0.035%
PRC+R134a DMS					0.358%
PRC+R1234yf DMS	$-0.01902T_{GC,out}^2 + 3.37967T_{GC,out} - 11.63$	44	-	5.5	0.488%
PRC+R290 DMS					0.363%
ERC without DMS	$2.598T_{GC,out} - 4.847$	-	5.5	-	0.122%
ERC+R134a DMS					0.339%
ERC+R1234yf DMS	$-0.00457T_{GC,out}^2 + 2.5567T_{GC,out} + 0.21767$	-	5	5	0.645%
ERC+R290 DMS					0.336%

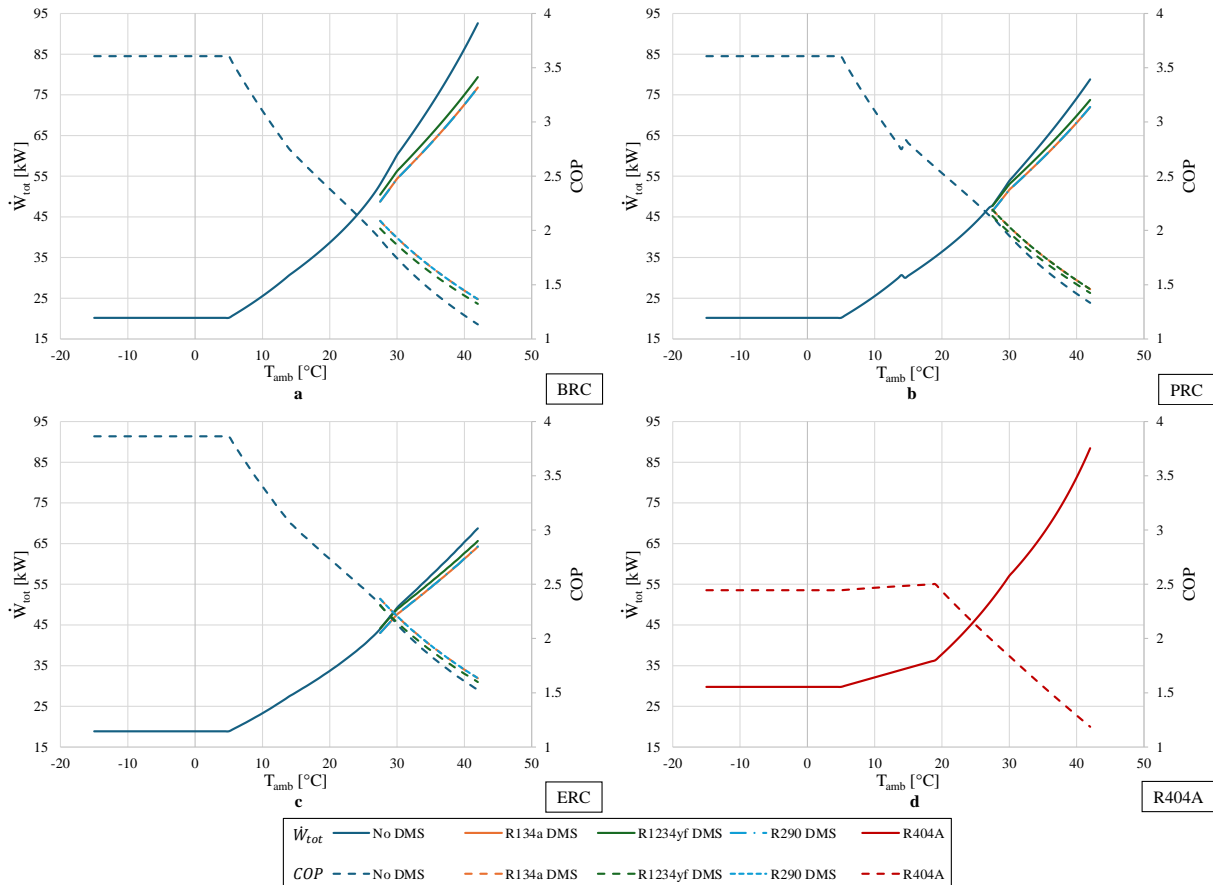


Figure 11. Total Power Consumption and COP Values of a. BRC, b. PRC, c. ERC, d. R404A under Different Ambient Temperatures

Case Study for Annual Energy Consumption and Environmental Impact

Türkiye has 5 different climate zones according to Köppen-Trewartha climate classification (Bölük and Kömüşçü, 2018). İstanbul (Cs - *subtropical dry summer*), Konya (Dc - *temperate continental*), and Samsun (Cf - *subtropical humid*) were chosen as different climate zones for annual energy consumption and TEWI comparison of the investigated cycles. Figure 12 shows the temperature bins and occurrence hours derived from meteorological data

for three investigated provinces (Çalışkan and Ersoy, 2024). Transcritical operation hours are 753 for İstanbul, 788 for Konya, and 313 for Samsun considering the operation conditions shown in Table 2.

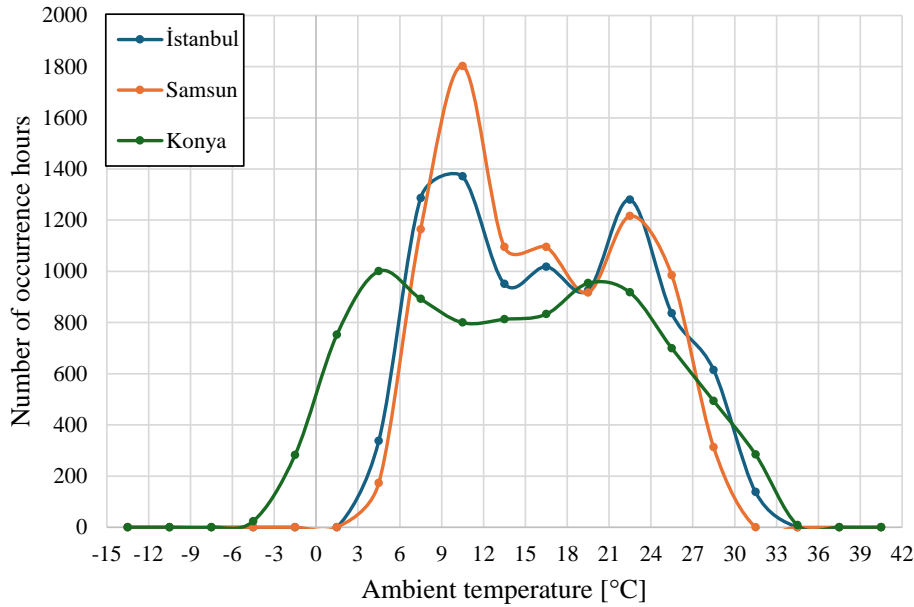


Figure 12. Bin-Hour Data for Three Provinces in Türkiye

Annual energy consumptions of the investigated cycles based on the bin-hour data are presented in Figure 13. R404A system has the highest energy consumption while ERC has the lowest among all cycles. As DMS operates under transcritical conditions, consumptions of the cycles with DMS are similar to the ones without DMS for Samsun, which has lower transcritical operation hours than other investigated provinces. BRC cycles with DMS have up to 8.1%, 11.1%, and 8.1% lower energy consumption compared to R404A for İstanbul, Konya, and Samsun, respectively. Energy savings of PRC cycles are up to 5.3% compared to BRC cycles without DMS whereas energy savings of ERC cycles are up to 13% and 8.6% compared to BRC and PRC cycles without DMS, respectively. Cycles with DMS have lower consumption up to 1.5% for BRC, 0.6% for PRC, and 0.5% for ERC without DMS. It can be seen that the effect of DMS is not remarkable for PRC and PRC.

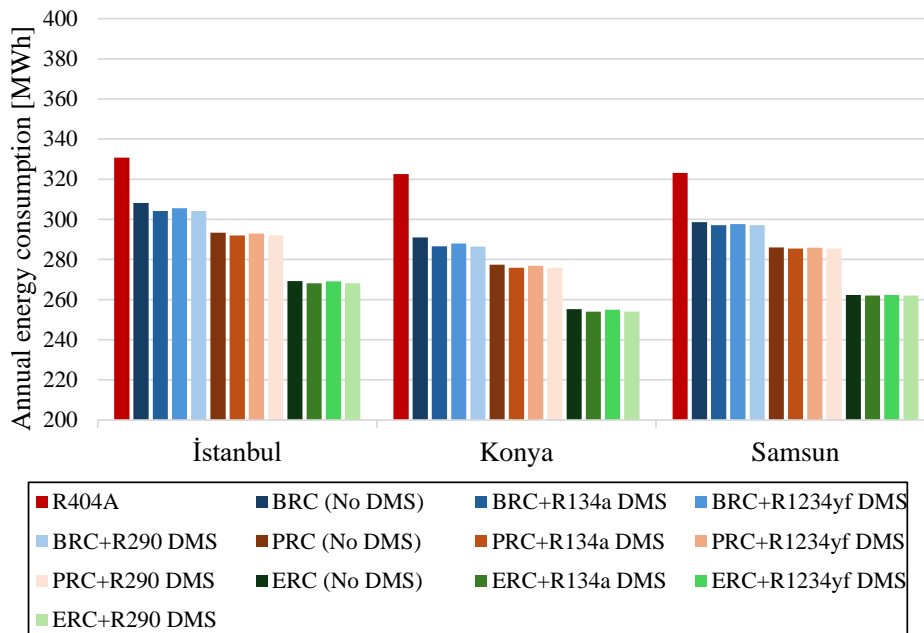


Figure 13. Annual Energy Consumptions of the Cycles for Investigated Provinces

Figure 14 shows the direct and total TEWI values of the investigated cycles for three provinces. R404A system has the highest direct TEWI among all investigated cycles due to its high GWP whereas CO₂ cycles without DMS, with R1234yf and R290 DMS have direct TEWI values below 1 ton. Cycles with R134a DMS have higher direct TEWI (up to 131.6 tons) compared to other CO₂ cycles because of their relatively higher GWP than CO₂, R1234yf, and R290. Total TEWI of R404A system is above 4000 tons while CO₂ cycles have total TEWI values below 2150 tons. CO₂ cycles with R1234yf and R290 DMS have lower total TEWI than other cycles due to their lower GWP values.

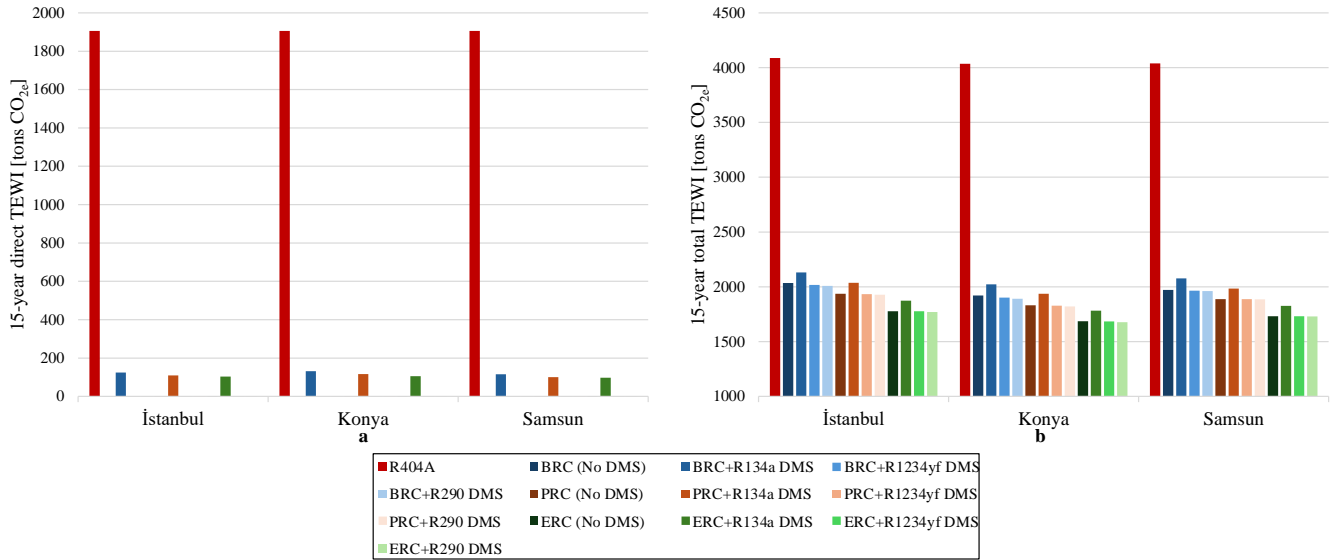


Figure 14. 15-Year a. Direct, b. Total TEWI Values of the Cycles for Investigated Provinces

CONCLUSIONS

In this paper, booster (BRC), parallel compression (PRC), and ejector expansion (ERC) transcritical supermarket refrigeration cycles with dedicated mechanical subcooler (DMS) were modeled in MATLAB environment, optimum parameters were calculated using the Genetic Algorithm (GA) method for different gas cooler outlet temperatures, and correlations for the optimum parameters were derived. Performance comparison of the cycles among each other, cycles without DMS circuits, and R404A conventional system was also made. As a case study, annual energy consumption and total equivalent warming impact (TEWI) calculations were made for three different provinces in Türkiye, which are in different climate zones. The main conclusions are as follows:

- There is an optimum point for the subcooling degree to obtain the maximum COP.
- Cycles with DMS have lower optimum gas cooler pressure compared to the cycles without DMS.
- The performance difference of the cycles with DMS is more remarkable at higher ambient temperatures.
- The effect of DMS is more remarkable for BRC compared to PRC and ERC.
- ERC has the highest performance among the investigated cycles due to its pressure recovery potential.
- R404A conventional system has the highest annual energy consumption and TEWI while ERC has the lowest in the investigated provinces.
- Direct TEWI values of the CO₂ cycles without DMS, with R1234yf and R290 DMS are below 1 ton.
- Total TEWI values of the ejector cycles are below 2000 tons in the investigated provinces. Up to 58.4% reduction in total TEWI was obtained compared to R404A system.
- As R134a and R290 DMS cycles have identical performance, R290 could be preferred due to its lower GWP value.

NOMENCLATURE

Abbreviations

- AR : Assessment Report
 BRC : Booster refrigeration cycle
 ERC : Ejector expansion refrigeration cycle
 DMS : Dedicated mechanical subcooler

FGB : Flash-gas-bypass
GA : Genetic Algorithm
GSS : Golden Section Search
HFC : Hydrofluorocarbon
HPC : High-pressure compressor
HPXV : High-pressure expansion valve
IPCC : Intergovernmental Panel on Climate Change
LPC : Low-pressure compressor
LPXV : Low-pressure expansion valve
MPXV : Medium-pressure expansion valve
PC : Parallel compressor
PRC : Parallel compression refrigeration cycle

Symbols

a : Flow cross-sectional area [m²]
 COP : Coefficient of performance
 E : Annual energy consumption [kWh]
 GWP : 100-year global warming potential [kg CO_{2e}]
 h : Specific enthalpy [kJ/kg]
 K : Electricity generation emissions [kg CO_{2e}/kWh]
 L : Annual refrigerant leakage [kg]
 m : Refrigerant charge [kg]
 \dot{m} : Mass flow rate [kg/s]
 mf : Minimum fraction
 N : Number of temperature bin occurrence hours
 n : Operation lifetime [years]
 T : Temperature [°C]
 $TEWI$: Total equivalent warming impact [kg CO_{2e}]
 P : Pressure [bar]
 \dot{Q} : Heat transfer rate [kW]
 R_p : Pressure ratio
 s : Specific entropy [kJ/kg K]
 u : Velocity [m/s]
 v : Specific volume [m³/kg]
 \dot{W} : Power consumption [kW]

Greek Letters

α : Refrigerant recycling factor
 ε : Heat exchanger effectiveness
 η : Efficiency
 ω : Ejector entrainment ratio

Subscripts

amb : Ambient
b : Ejector suction nozzle outlet
comp : Compressor
cond : Condenser
dif : Diffuser
ev : Evaporator
GC : Gas cooler
glob : Global
is : Isentropic
LT : Low-temperature (freezer)
m : Ejector mixing chamber outlet
mn : Motive nozzle

MT : Medium-temperature (chiller)
opt : Optimum
ref : Refrigerant
SC : Subcooling
sn : Suction nozzle
tot : Total

REFERENCES

- Atmaca, A. U., Ereğ, A., Ekren, O., & Çoban, M. T. (2018). Thermodynamic performance of the transcritical refrigeration cycle with ejector expansion for R744, R170, and R41. *Journal of Thermal Science and Technology*, 38, 111–127.
- Bell, I. H., Wronski, J., Quoilin, S., & Lemort, V. (2014). Pure and Pseudo-pure Fluid Thermophysical Property Evaluation and the Open-Source Thermophysical Property Library CoolProp. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 53(6), 2498–2508. <https://doi.org/10.1021/ie4033999>
- Bölük, E., & Kömüçü, A. Ü. (2018). *Köppen-Trewartha iklim sınıflandırmasına göre Türkiye iklimi*. Ankara, Türkiye: Directorate General of Meteorology.
- Caliskan, O., Bilir Sag, N., & Ersoy, H. K. (2024). Thermodynamic, environmental, and exergoeconomic analysis of multi-ejector expansion transcritical CO₂ supermarket refrigeration cycles in different climate regions of Türkiye. *International Journal of Refrigeration*, 165, 466–484. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2024.05.006>
- Caliskan, O., & Ersoy, H. K. (2022). Energy analysis and performance comparison of transcritical CO₂ supermarket refrigeration cycles. *The Journal of Supercritical Fluids*, 189, 105698. <https://doi.org/10.1016/j.supflu.2022.105698>
- Çalışkan, O., & Ersoy, H. K. (2024). Energy, environmental, and exergoeconomic (3E) analysis of transcritical CO₂ booster and parallel compression supermarket refrigeration cycles in climate zones of Türkiye. *Konya Journal of Engineering Sciences*, 123–137. <https://doi.org/10.36306/konjes.1393426>
- Catalán-Gil, J., Llopis, R., Sánchez, D., Nebot-Andrés, L., & Cabello, R. (2019). Energy analysis of dedicated and integrated mechanical subcooled CO₂ boosters for supermarket applications. *International Journal of Refrigeration*, 101, 11–23. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2019.01.034>
- Chakroun, W. (2016). *Lower-GWP Alternatives in Commercial and Transport Refrigeration: An expanded compilation of propane, CO₂, ammonia and HFO case studies*. Paris: United Nations Environment Programme.
- Contiero, L., Pardiñas, A. A., & Hafner, A. (2021, September 16). *Multi ejector and pivoting-supported R744 application with AC for supermarkets*. Presented at the 9th IIR Conference on Ammonia and CO₂ Refrigeration Technologies, Ohrid, North Macedonia. Ohrid, North Macedonia. <http://dx.doi.org/10.18462/iir.nh3-co2.2021.0019>
- Dai, B., Cao, Y., Zhou, X., Liu, S., Fu, R., Li, C., & Wang, D. (2024). Exergy, carbon footprint and cost lifecycle evaluation of cascade mechanical subcooling CO₂ commercial refrigeration system in China. *Journal of Cleaner Production*, 434, 140186. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.140186>
- Danfoss. (2023). *Coolselector2*. Danfoss A/S.
- de Paula, C. H., Duarte, W. M., Rocha, T. T. M., de Oliveira, R. N., & Maia, A. A. T. (2020). Optimal design and environmental, energy and exergy analysis of a vapor compression refrigeration system using R290, R1234yf, and R744 as alternatives to replace R134a. *International Journal of Refrigeration*, 113, 10–20. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2020.01.012>
- de Paula, C. H., Duarte, W. M., Rocha, T. T. M., de Oliveira, R. N., Mendes, R. de P., & Maia, A. A. T. (2020). Thermo-economic and environmental analysis of a small capacity vapor compression refrigeration system using R290, R1234yf, and R600a. *International Journal of Refrigeration*, 118, 250–260. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2020.07.003>
- Devotta, S., & Sicars, S. (2005). Refrigeration. In *IPCC/TEAP Special Report: Safeguarding the Ozone Layer and the Global Climate System*. Cambridge University Press. Retrieved from <https://archive.ipcc.ch/pdf/special-reports/sroc/sroc04.pdf>

- ETKB. (2022). *Türkiye elektrik üretimi ve elektrik tüketim noktası emisyon faktörleri bilgi formu* (No. ETKB-EVÇED-FRM-042 Rev.00). Ankara, Türkiye: Ministry of Energy and Natural Resources.
- Haroldsen, J. O. (2023, June 21). Japanese C-Store Operator Lawson Operates 5,028 Stores – Over 34% of Its Chain – With CO2 Refrigeration. Retrieved August 22, 2023, from R744.com website: <https://r744.com/japanese-c-store-operator-lawson-operates-5028-stores-over-34-of-its-chain-with-co2-refrigeration/>
- Hayes, C. (2023, February 20). METRO Continues Rollout of Transcritical CO2 in All New Stores. Retrieved March 27, 2024, from R744 website: <https://r744.com/atmo-europe-metro-continues-rollout-of-transcritical-co2-in-all-new-stores-and-refurbishments/>
- Hayes, C. (2024, January 15). METRO Rolls Out First Transcritical CO2 Installation in Serbia. Retrieved March 26, 2024, from R744 website: <https://r744.com/metro-rolls-out-first-transcritical-co2-installation-in-serbia/>
- Hayes, C., Haroldsen, J., & Thapa, S. (2023). *Natural Refrigerants: State of the Industry/Refrigeration in Europe, North America and Japan, Plus Heat Pumps in Europe*. ATMosphere.
- Hines, M. (2024, January 11). All ALDI US Stores Will Transition to Natural Refrigerants by 2035. Retrieved March 26, 2024, from R744 website: <https://r744.com/all-aldi-us-stores-will-transition-to-natural-refrigerants-by-2035/>
- Isik, M., & Bilir Sag, N. (2023). Energetic, economic, and environmental analysis of CO2 booster refrigeration systems of supermarket application for Türkiye. *Sādhanā*, 48(4), 275. <https://doi.org/10.1007/s12046-023-02337-3>
- Karampour, M., & Sawalha, S. (2018). State-of-the-art integrated CO2 refrigeration system for supermarkets: A comparative analysis. *International Journal of Refrigeration*, 86, 239–257. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2017.11.006>
- Keenan, J. H., Neumann, E. P., & Lustwerk, F. (1950). An Investigation of Ejector Design by Analysis and Experiment. *Journal of Applied Mechanics*, 17(3), 299–309. <https://doi.org/10.1115/1.4010131>
- Klein, S. A. (2020). *Engineering Equation Solver*. F-Chart Software.
- Klemick, H., Kopits, E., & Wolverton, A. (2015). *The Energy Efficiency Paradox: A Case Study of Supermarket Refrigeration System Investment Decisions* (No. Working Paper # 15-03). Washington DC, US: U.S. Environmental Protection Agency.
- Li, D., & Groll, E. A. (2005). Transcritical CO2 refrigeration cycle with ejector-expansion device. *International Journal of Refrigeration*, 28(5), 766–773. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2004.10.008>
- Liu, X., Yu, K., Wan, X., & Li, X. (2021). Performance evaluation of CO2 supermarket refrigeration system with multi-ejector and dedicated mechanical subcooling. *Energy Reports*, 7, 5214–5227. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.08.110>
- Mitsopoulos, G., Syngounas, E., Tsimpoukis, D., Bellos, E., Tzivanidis, C., & Anagnostatos, S. (2019). Annual performance of a supermarket refrigeration system using different configurations with CO2 refrigerant. *Energy Conversion and Management: X*, 1, 100006. <https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2019.100006>
- Papazahariou, C. (2010). *Natural refrigerants faster to market, commercial refrigeration with low gwp alternatives*. Presented at the Joint Meeting of the Regional Ozone Networks for Europe & Central Asia and South Asia, Istanbul. Istanbul: Shecco.
- Said, S. A. M., Habib, M. A., & Iqbal, M. O. (2003). Database for building energy prediction in Saudi Arabia. *Energy Conversion and Management*, 44(1), 191–201. [https://doi.org/10.1016/S0196-8904\(02\)00042-0](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(02)00042-0)
- Schulz, M., & Kourkoulas, D. (2014). *Regulation (EU) No 517/2014 of the European Parliament and of the Council of 16 April 2014 on fluorinated greenhouse gases and repealing Regulation (EC) No 842/2006* (No. 517/2014; p. L150/195-230). Retrieved from <http://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2014/517/oj>
- Sengupta, A., & Dasgupta, M. S. (2023). Energy and advanced exergoeconomic analysis of a novel ejector-based CO2 refrigeration system and its optimization for supermarket application in warm climates. *Thermal Science and Engineering Progress*, 44, 102056. <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2023.102056>
- Smith, C., Nicholls, Z. R. J., Armour, K., Collins, W., Forster, P., Meinshausen, M., ... Watanabe, M. (2021). The Earth's Energy Budget, Climate Feedbacks, and Climate Sensitivity Supplementary Material (V. Masson-Delmotte,

P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, ... B. Zhou, Eds.). Retrieved from https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_Chapter07_SM.pdf

The MathWorks Inc. (2022). *MATLAB version: 9.13.0.2399474 (R2022b) update 7*. The MathWorks Inc. Retrieved from www.mathworks.com

Tsamos, K. M., Ge, Y. T., Santosa, Id., Tassou, S. A., Bianchi, G., & Mylona, Z. (2017). Energy analysis of alternative CO₂ refrigeration system configurations for retail food applications in moderate and warm climates. *Energy Conversion and Management*, 150, 822–829. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2017.03.020>

Tsimpoukis, D., Syngounas, E., Petsanas, D., Mitsopoulos, G., Anagnostatos, S., Bellos, E., ... Vrachopoulos, M. G. (2021). Energy and environmental investigation of R744 all-in-one configurations for refrigeration and heating/air conditioning needs of a supermarket. *Journal of Cleaner Production*, 279. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123234>

Yapici, R., & Ersoy, H. K. (2005). Performance characteristics of the ejector refrigeration system based on the constant area ejector flow model. *Energy Conversion and Management*, 46(18–19), 3117–3135. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2005.01.010>

Zhang, M. (2006). Energy Analysis of Various Supermarket Refrigeration Systems. *International Refrigeration and Air Conditioning Conference*. Purdue.

Zottl, A., Lindahl, M., Nordman, R., Rivière, P., & Miara, M. (2011). *Evaluation method for comparison of heat pump systems with conventional heating systems, D4.3. Concept for evaluation of CO₂-reduction potential*. European Commission.



Kahramanmaraş Sütçü İmam University

Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 15.05.2024
Kabul Tarihi : 11.07.2024

Received Date : 15.05.2024
Accepted Date : 11.07.2024

ELİPS ŞEKİLLİ BORU DEMETİ ISI DEĞİŞTİRİCİSİNDE AKIŞ VE ISI TRANSFERİ

FLOW AND HEAT TRANSFER IN ELLIPSE-SHAPED TUBE BANK HEAT EXCHANGERS

Muhammet Nasıf KURU¹ (ORCID: 0000-0002-5941-1221)

Mehmet ÖZKARAKOÇ^{2*} (ORCID: 0009-0000-0312-6707)

Şaban ÜNAL³ (ORCID: 0000-0002-4276-2412)

Mehmet Tahir ERDİNÇ² (ORCID: 0000-0003-2201-2937)

İlyas KARASU⁴ (ORCID: 0000-0003-3118-6236)

Orhan AYDIN⁵ (ORCID: 0000-0002-2492-8212)

¹Tarsus Üniversitesi, Mersin Tarsus Organize Sanayi Bölgesi Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Tarsus, Mersin, Türkiye

²Tarsus Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Tarsus, Mersin, Türkiye

³Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Osmaniye, Türkiye

⁴Samsun Üniversitesi, Havacılık ve Uzay Bilimleri Fakültesi, Havacılık ve Uzay Mühendisliği Bölümü, Samsun, Türkiye

⁵Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Trabzon, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Mehmet ÖZKARAKOÇ, mehmetozkarakoc@gmail.com

ÖZET

Bu çalışmada, kaydırılmış sıralı dizilişe sahip boru demetinde dairesel, elips ve dairesel ile elips şekilli boruların birlikte kullanıldığı durumlar için akış ve ısı transferi performansı sayısal olarak incelenmiştir. Akış, iki boyutlu, sıkıştırılmaz, kararlı ve türbülanslı varsayılmıştır. İncelenen geometriler için ısı transferi yüzey alanları eşit kabul edilerek eşdeğer çap $D_e = 16,4$ mm olarak alınmıştır. Akışkan olarak hava kullanılmış ve boru demeti giriş hızı (V_g), 1 m/s ile 6 m/s aralığında değiştirilmiştir. $V_g = 6$ m/s'de, elips şekilli boru demeti için basınç düşümü ve ısı transferinin dairesel şekilli olana göre, sırasıyla, %75,19 ve %18,14 daha az olduğu ve bu durumun da %230,08'lik bir ısı verim artışına karşılık geldiği belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Boru demeti, elips şekilli boru, ısı transferi, basınç düşümü, ısı verim

ABSTRACT

In this study, flow and heat transfer performance of tube bank with staggered arrangement is numerically investigated for circular, elliptical and combined circular and elliptical shaped tubes. The flow is assumed to be two-dimensional, incompressible, steady and turbulent. Heat transfer surface areas are assumed to be equal for the studied geometries and the equivalent diameter is taken as $D_e = 16,4$ mm. Air was used as the working fluid and the tube bank inlet velocity (V_g) was varied between 1 m/s and 6 m/s. It was found that at $V_g = 6$ m/s, the pressure drop and heat transfer for the elliptical tube bank were 75.19% and 18.14% less than the circular one, respectively, corresponding to a thermal efficiency increase of 230.08%.

Keywords: Tube bank, elliptical shaped tube, heat transfer, pressure drop, thermal performance

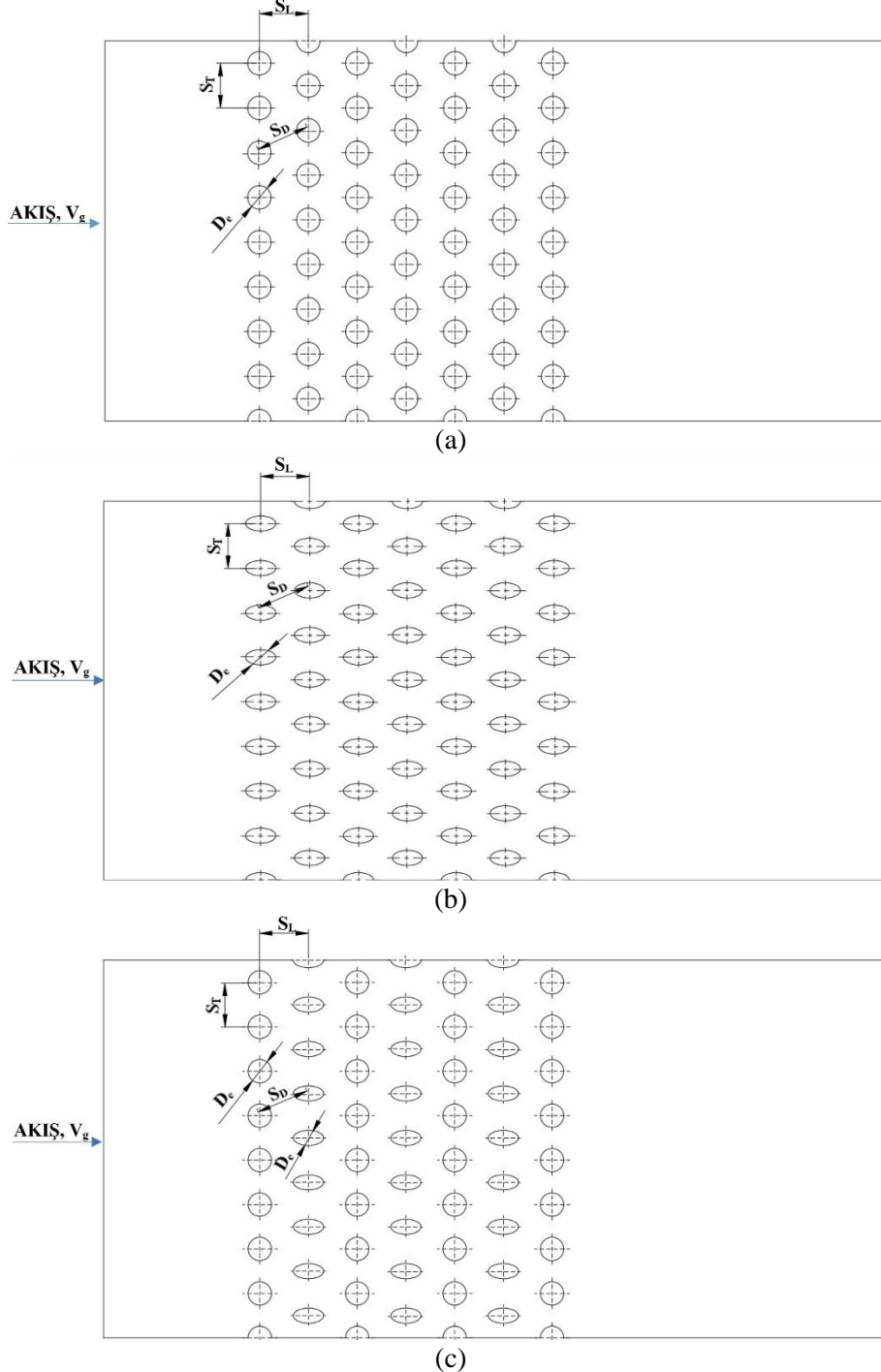
GİRİŞ

Boru demeti ısı değiştiricileri, soğutma kuleleri, kazanlar, elektronik ve otomotiv endüstrisi gibi birçok alanda yaygın olarak kullanılmaktadır. Enerji ve ham madde maliyetlerindeki artışa bağlı olarak ısı veriminin artırılması ve boru demeti ağırlığının azaltılması önem kazanmıştır. Boruların düzgün veya kaydırılmış sıralı dizilişe göre yerleştirilmesi ve farklı geometrilerde (dairese, elips, kanat, kama vb.) boruların kullanılması ile ısı veriminin artırılması araştırmacıların ilgisini çekmiştir.

Boru demeti ısı değiştiricilerinde, yaygın olarak dairese şekilli boru kullanılmaktadır. Buyruk vd. (2001), boyuna boru sayısının dört olduğu kaydırılmış sıralı dizilişe sahip dairese şekilli boru demetinde laminer akışta ısı transferini sayısal olarak incelemiştir. Reynolds sayısının 325'ten 625'e yükseltilmesi ile ısı sınır tabaka kalınlığı azaltılarak ısı transferini iyileştirilmiştir. Kuru vd. (2023), düzgün sıralı dizilişe sahip dairese şekilli boru demetinde art arda yerleştirilmiş dört farklı çapta boru kullanımının eşit çaplı boru kullanımına göre akış ve ısı transferinde iyileştirmeye etkisini sayısal optimizasyon yöntemleri kullanarak incelemiştir. Dört borunun çapının eşit olduğu ($D = 10$ mm) duruma göre kıyaslama yapıldığında; dört farklı çaplı ($D_1 = 5$ mm, $D_2 = 15$ mm, $D_3 = 6$ mm, $D_4 = 14$ mm) durum, ısı transferinde %14,5'lik bir artış ve basınç düşümünde ise %377'lik bir azalma sağlamıştır. Aslan vd. (2023), düzgün ve kaydırılmış sıralı dizilişlere sahip dairese şekilli boru demetinde kararlı ve türbülanslı akışta uzunlamasına iki farklı boyuna mesafe ($S_L=18$ mm, $S_L=21.6$ mm) için akış ve ısı geçişi performansını deneysel ve sayısal olarak incelemiştir. Reynolds sayısının 989 ile 6352 aralığında, her bir diziliş için, S_L 'nin azalması ile ortalama Nusselt sayısının arttığı; basınç düşümünün ise azaldığı tespit edilmiştir. S_L 'nin düşük değerinde, alan uyum faktörünün düzgün sıralı dizilişte daha yüksek olduğu elde edilmiştir. Akçay vd. (2019), sabit duvar sıcaklığı için kaydırılmış sıralı dizilişe sahip dairese şekilli boru demetinde pulsatif akışlı Al_2O_3 – su nano akışkan kullanımının ısı transferi ve sürtünme faktörüne etkisini sayısal olarak incelemiştir. Baz akışkan kullanıldığı durum ile karşılaştırıldığında nano akışkanın kullanımının, Reynolds sayısı ve nanopartikül hacim artışına bağlı olarak ısı transferini iyileştirdiği tespit edilmiştir. Yılmaz ve Yılmaz (2016), dairese şekilli boru demetinde entropi üretimini analitik ve deneysel olarak incelemiştir. Düşük hızlarda, basınç düşümünün entropi üretimi üzerine etkisinin ısı transferine göre daha az olduğunu göstermişlerdir. El-Shaboury ve Ormiston (2005), düzgün sıralı dizilişe sahip dairese şekilli boru demetinde ısı transferini sayısal olarak incelemiştir. Boyuna boru sayısının beş olduğu durum için borular arasındaki mesafeler kare ($S_T = S_L$) ve kare olmayan şekilde belirlenmiştir. Reynolds sayısı 100 ile 300 aralığında değiştiği laminer akış durum için boru demetinin ilk sırasındaki boruda ısı transferi miktarının takip eden borularda gerçekleşenden daha fazla olduğu ve üçüncü sıradaki borudan sonra tekrarlayan düzende akış olduğu tespit edilmiştir. Erguvan ve MacPhee (2019), kare düzenli düzgün sıralı dizilişe sahip dairese şekilli boru demetinde enerji ve ekserji verimlerini sayısal olarak incelemiştir. Türbülans model olarak $k - \epsilon$ RNG kullanılmıştır. Isı kaybı arttıkça enerji ve ekserji veriminin düştüğü, boru sayısının ekserji ve enerji verimine katkısının pozitif olduğu, Prandtl sayısı arttıkça ekserji veriminin düştüğü ve genellikle bununla birlikte enerji veriminin de düştüğü ve akışkan girişi sıcaklığının düşmesi ile birlikte ekserji veriminin arttığı ve enerji veriminin düştüğü tespit edilmiştir. Khan vd. (2006), düzgün ve kaydırılmış sıralı dizilişe sahip dairese şekilli boru demetinde sabit yüzey sıcaklığı için ısı transferini analitik olarak incelemiştir. Boyutsuz adım artışı ile ısı transferinin azaldığı, geniş aralıklı boru demetinde $S_T \times S_L^* = 2 \times 2$ 'den daha küçük olan kompakt boru demetinde ($S_T \times S_L^* = 1,25 \times 1,25$) ısı transferinin geniş aralıklı boru demetine göre %77,6 daha fazla olduğu ve kaydırılmış sıralı dizilişte düzgün sıralı olana göre daha fazla ısı transferi gerçekleştiğini belirlemiştir.

Isı değiştiricilerde, üretimi kolay olduğundan dairese şekilli borular yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak akış şekline uygun hale getirilen boru şekilleri ile sürtünme direnci azaltılabilir ve böylece ısı verim artırılabilir. Akışın boru demeti boyunca dağılımı, girdap oluşumu ve sınır tabaka yenilenmesi ısı transfer miktarını etkileyen faktörlerdir. Bu nedenle, araştırmacılar dairese olmayan boru şekilleri üzerinde de çalışmalar yapmıştır. İbrahim ve Goma (2009), türbülanslı akışta kaydırılmış sıralı dizilişte elips şekilli boyuna boru sayısının beş olduğu boru demetinde akış ve ısı transferini sayısal ve deneysel olarak incelemiştir. Sayısal çalışma Reynolds sayısının 5600-40000 aralığında, deneysel çalışma ise 5300-28000 aralığında gerçekleştirilmiştir. Eliptik eksen oranının 0,25, 0,33, 0,50 ve 1 değerleri için hücum açısı 0° ile 150° aralığında değiştirilmiştir. Eliptik eksen oranı 0,25 iken hücum açısının saat yönünde 90° 'ye kadar döndürüldüğünde ısı taşınım katsayısı artmaktadır. $Re=40000$ ve eliptik eksen oranı 0,25 iken 90° 'deki durumda ısı transferinin 0° 'deki duruma göre 16 kat daha iyi olduğunu tespit etmiştir. Akışkan giriş alanının küçültülmesini sağlayan alan uyum faktörü tüm eliptik eksen oranları için en fazla hücum açısı 0° 'de ($Re=40000$, eliptik eksen oranı 0,50 iken 0,003) olduğunu tespit etmiştir. Sabit pompa gücü dikkate alındığından en iyi ısı performans 0° 'de en kötü ısı performansın hücum açısı 90° 'de gerçekleştiğini tespit etmiştir. Lavasani vd. (2014), düzgün sıralı dizilişte kama şekilli boyuna boru sayısının dört olduğu boru demetinde ısı

transferini deneysel olarak incelemiştir. Kama şekilli boru demetinin ısıl hidrolik performansının dairesel şekilli boru demetinin 6 katı olduğu tespit edilmiştir. Bayat vd. (2014), kaydırılmış sıralı kama şekilli boru demetinde ısı transferi ve akışı deneysel olarak incelemiştir. Kama şekilli boru demetinin eşdeğer çaplı dairesel şekilli boru demetine göre ısı transferinin %5-11 daha düşük gerçekleştiği tespit edilmiştir. Lavasani ve Bayat (2016), dairesel ve kama şekilli boru demetinde nano akışkanlı çapraz akışta, $100 \leq Re_D \leq 400$ için akış ve ısı transferini sayısal olarak incelemiştir. Hacimsel olarak %7 Al_2O_3 kullanımında saf su kullanımına göre sürtünme faktörü düzgün sıralı dairesel şekilli boru demetinde %17, kaydırılmış sıralı da %19; düzgün sıralı kama şekilli boru demetinde %17,2, kaydırılmış sıralı da %17,1 artmıştır. Bahaidarah vd. (2005), düz profil borulu düzgün ve kaydırılmış sıralı dizilişe sahip boru demetinde Reynolds sayısı, Prandtl sayısı, akış yönüne dik ve paralel adımların çapa oranlarının ısı transferi ve basınç düşümüne etkisi sayısal olarak incelenmiş olup eş değer çaplı dairesel şekilli boru demetlerinin ısıl performansı ile karşılaştırma yapmıştır. Kaydırılmış sıralı tip boru demetinin düzgün sıralı boru demetine kıyasla daha fazla ısı transferi gerçekleştirdiği tespit edilmiştir. Isı transferi dairesel şekilli boru demetlerinde daha fazla gerçekleşmekle



Şekil 1. a. Dairesel b. Elips c. Dairesel ile Elips Şekilli Borulardan Oluşan Kaydırılmış Sıralı Dizilişe Sahip Boru Demeti

beraber basınç düşümünde artış olduğu, basınç düşümündeki artışa bağlı olarak ısı performansın düz profil borulu boru demetlerinden daha kötü olduğu tespit edilmiştir. Horvat vd. (2006), kaydırılmış sıralı dizilişe sahip dairesel, kanat ve elips şekilli boru demetlerinde akış ve ısı transferini sayısal olarak incelemiştir. Khan vd. (2004), Reynolds 100-1000 aralığında sabit yüzey sıcaklık ve sabit ısı akısı koşullarında elips şekilli boru üzerindeki toplam sürüklenme katsayısı ve ısı transferi analitik olarak hesaplamıştır. Sabit ısı akısı sınır şartı durumunda Nusselt sayısı, sabit yüzey sıcaklığı sınır şartı durumuna göre %6 daha yüksek hesaplanmıştır. Eliptik eksen oranı küçüldükçe Nusselt sayısı artmakta, sürüklenme katsayısı ise azalmaktadır. Reynolds sayısı 100 için sürüklenme katsayısı eşdeğer çaplı dairesel boru kullanımına göre eliptik eksen oranı 0,5 olan elips şekilli boru kullanılması durumunda %66,7, eliptik eksen oranı 0,25 olan elips şekilli boru kullanılması durumunda ise %83,3 azalmaktadır. Mangrulkar vd. (2020), yaptıkları çalışmada eliptik eksen oranı 0,35, 0,50, hücum açısı 0° olan, akışa paralel boyutsuz adım oranı 1,25 ve 1,50 değerleri için elips şekilli düzgün sıralı boru demetlerinde sürtünme karakteristiklerini, ısı transferini ve ısıl hidrolik performansı sayısal ve deneysel olarak incelemiştir. Isıl hidrolik performans en yüksek 1,35 değeri, Reynolds 21000, boyutsuz adım oranı 1,50 ve eliptik eksen oranı 0,50 iken gerçekleşmiştir. Akış yönüne paralel boyuna adım oranı attıkça sürtünme faktörü ve Nusselt sayısı artmaktadır. Düşük Reynolds sayılarında ($Re < 10000$) elips şekilli boru demetlerinde girdap oluşumu yüksek olduğundan dairesel şekilli boru demetine göre eliptik eksen oranı 0,35 olan elips şekilli boru demetinde %4-6, eliptik eksen oranı 0,50 olan elips şekilli boru demetlerinde %7-8 daha fazla Nusselt sayısı elde edilir. Yüksek Reynolds sayılarında ($Re > 10000$) elips şekilli boru demetlerinde girdap oluşumu düşük olduğundan dairesel şekilli boru demetinde eliptik eksen oranı 0,35 olan elips şekilli boru demetine göre %10, eliptik eksen oranı 0,50 olan elips şekilli boru demetlerinde %5,7 daha fazla Nusselt sayısı elde edilir. Kaydırılmış sıralı dizilişe sahip boru demetlerinde, boru geometrik şekillerinin basınç düşümü, ısı transferi ve ısıl verim üzerinde etkili olduğu literatürdeki çalışmalarda görülmektedir. Bu çalışmada, kaydırılmış sıralı dizilişe sahip boru demetinde dairesel, elips ve dairesel ile elips şekilli boruların birlikte kullanıldığı durumlar için akış ve ısı transferi performansı sayısal olarak incelenmiştir.

MATERYAL VE METOD

Parametrik Modeller

Bu çalışmada kullanılan, kaydırılmış sıralı dizilişe sahip, dairesel, elips ve dairesel ile elips şekilli boru demetine ait parametrik modeller sırasıyla Şekil 1a,1b ve 1c'de gösterilmektedir. Üç durum için enine ve boyuna uzunlukların sabit ($S_T = 34,3$ mm, $S_L = 31,3$ mm) olduğu kabul edilmiştir. Ayrıca, ısı transferi yüzey alanı dairesel ve elips şekiller için sabit tutulmuş ve bu durumda eşdeğer çap $D_e = 16,4$ mm olarak belirlenmiştir.

Korunum Denklemleri

Akışın, kararlı, sıkıştırılmaz, iki boyutlu ve türbülanslı olduğu kabul edilmiştir. Türbülans modeli olarak RNG k-ε kullanılmıştır. Korunum ve türbülans denklemleri aşağıda verilmiştir (Ansys, 2021, Mangrulkar vd., 2016):

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_j) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_i T) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{\mu}{Pr} \frac{\partial T}{\partial x_j} + \frac{\mu}{Pr_t} \left(\frac{\partial T}{\partial x_j} \right) \right] \quad (3)$$

İlgili türbülans modeli için denklemler aşağıda verilmektedir (Ansys, 2021, Mangrulkar vd., 2016):

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho k u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\alpha_k \mu_{eff} \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \epsilon \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \epsilon u_j) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\alpha_\epsilon \mu_{eff} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} G_k - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (5)$$

k ve ε 'un ters efektif Prandtl sayıları α_k ve α_ε ile gösterilmiştir. G_k ise türbülans kinetik enerjisinin oluşumunu tanımlamakta olup; şu şekilde tanımlanır (Ansys, 2021, Mangrulkar vd., (2016)).

$$G_k = -\mu_t \left[2 \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right)^2 + \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right)^2 \right] \quad (6)$$

μ_{eff} , efektif türbülans vizkoziteyi temsil etmektedir (Ansys, 2021, Mangrulkar vd., (2016)).

$$\mu_{\text{eff}} = \mu + \mu_t \quad (7)$$

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (8)$$

Eşit. (8)'de, $C_\mu = 0,0845$ olarak alınmıştır (Ansys, 2021). $C_{1\varepsilon}$ ve $C_{2\varepsilon}$ sabitleri sırasıyla 1,42 ve 1,68'dir.

Veri Analizi

Giriş Reynolds sayısı (Re_g), hava giriş ortalama hızına (V_g) bağlı olarak

$$Re_g = \frac{V_g D_e}{\nu} \quad (9)$$

şeklinde tanımlanır. Akış yönünde minimum kesit alanında maksimum ortalama hız (V_{max}), $2(S_D - D_e) > (S_T - D_e)$ olduğundan;

$$V_{\text{max}} = \frac{S_T}{S_T - D_e} V_g \quad (10)$$

ifadesinden belirlenir. Ortalama Nusselt sayısı (\overline{Nu}),

$$\overline{Nu} = \frac{q'' D_e}{k_{\text{hava}} \Delta T_{\text{LM}}} \quad (11)$$

ifadesinden hesaplanır. Burada, q'' , boru yüzeyindeki ısı akısı [W/m^2]; k_{hava} , havanın ısı iletim katsayısı [$W/m.K$] ve ΔT_{LM} , logaritmik sıcaklık farkıdır [K]. Logaritmik ortalama sıcaklık farkı,

$$\Delta T_{\text{LM}} = \frac{(T_{\text{duvar}} - T_{\text{giriş}}) - (T_{\text{duvar}} - T_{\text{çıkış}})}{\ln \frac{T_{\text{duvar}} - T_{\text{giriş}}}{T_{\text{duvar}} - T_{\text{çıkış}}}} \quad (12)$$

Burada; T_{duvar} [K], boru yüzey sıcaklığını; $T_{\text{giriş}}$ [K], giriş hava sıcaklığını ve $T_{\text{çıkış}}$ [K] ise çıkış hava sıcaklığını temsil etmektedir.

Sürtünme faktörü (f),

$$f = \frac{2 \Delta P}{N_L k_{\text{hava}} V_g^2} \quad (13)$$

ifadesinden hesaplanır. Burada; N_L , akış yönüne boru sayısını ifade etmektedir. Isıl verim, aşağıdaki şekilde tanımlanmıştır (Mangrulkar vd., 2016):

$$\text{Isıl Verim} = \frac{\overline{Nu}}{f} \quad (14)$$

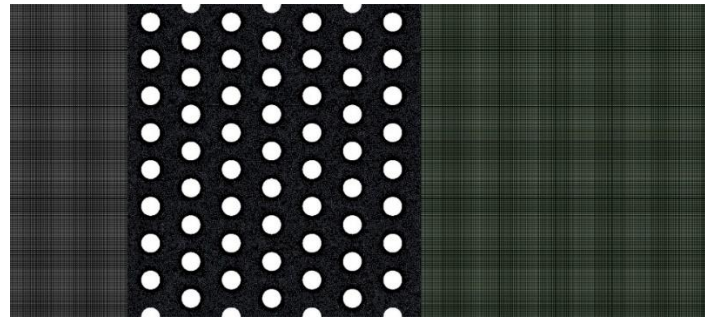
Sayısal Yöntem

Momentum ve türbülanslı kinetik enerjinin ana denklemleri, ikinci mertebeden ayrıklaştırma şeması kullanılarak çözülmüş olup hız-basınç bağlantısı için COUPLED algoritması kullanılmıştır. Yakınsama kriteri enerji denklemleri için 10^{-8} , akış denklemleri için ise 10^{-5} olarak belirlenmiştir. Şekil 2a'da gösterilen ağ yapısı için üçgenel elemanlar kullanılmıştır. Isı transfer yüzeylerine komşu ağ noktaları dörtgenel elemanlar kullanılarak sıklaştırılmış (Şekil 2b) ve maksimum y^+ değerleri 1 civarında tutulmuştur. Boru demetlerine ait sınır yüzeyleri temsilen dairesel şekilli boru demeti üzerinde Şekil 2c'de gösterilmektedir. Tablo 1'de belirtildiği gibi, sınır koşulu olarak, girişte hız, çıkışta ise basınç değeri verilmiş olup; yan yüzeylerin tamamen yalıtıldığı ve bunun yanı sıra boru yüzeyi için sabit duvar sıcaklığı olduğu kabul edilmiştir.

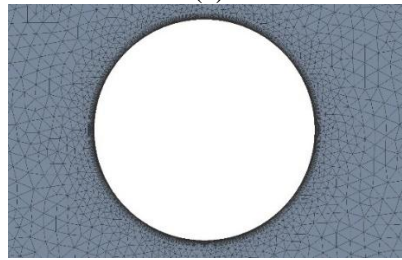
Tablo 1. Sınır Koşulları

Yüzey	Sınır Koşulu	Açıklama
Giriş	hız-girişi	Hız ve sıcaklık dağılımları düzenli ve sabittir. $T_{giris} = 15^{\circ}\text{C}$
Çıkış	basınç-çıkışı	Çıkış basıncı atmosfer basıncına, akış yönündeki hız ve sıcaklık gradyanları sıfıra eşittir.
Yalıtımlı Yüzey	duvar	Kaymama sınır şartı uygulanmıştır. Yüzeylerin iyi yalıtıldığı ve dışarıya ısı kaybı olmadığı kabul edilmiştir.
Boru Yüzeyi	duvar	Kaymama sınır şartı ve sabit duvar sıcaklığı uygulanmıştır. $T_{duvar} = 70^{\circ}\text{C}$

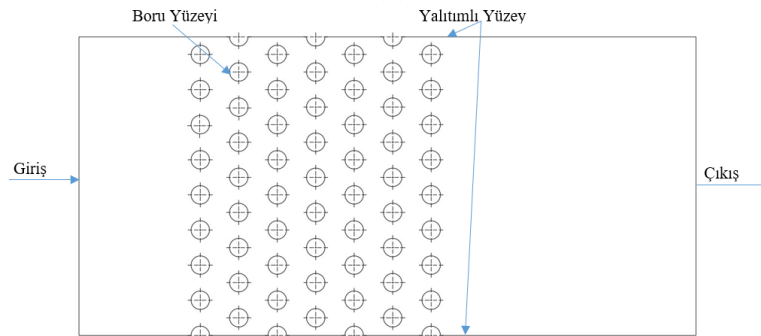
Ağdan bağımsızlık çalışması, $V_g = 6 \text{ m/s}$ için yapılmıştır. Altı farklı eleman sayısı için sonuçlar Tablo 2'de verilmiştir. Tablo 2'de 5 numaralı ağ yapısı ile 6 numaralı ağ yapısının arasındaki fark ortalama Nusselt sayısı için %0,47'dir. Hesaplama süresinden kazanç sağlamak için 5 numaralı ağ kullanılmıştır.



(a)



(b)



(c)

Şekil 2. Kaydırılmış Sıralı Dizilişe Sahip Boru Demeti İçin a. Ağ Yapısı b. Tek Bir Boru Etrafındaki Ağ Yapısı c. Sınır Koşulları

Tablo 2. Farklı Eleman Sayıları İçin $V_g = 6 \text{ m/s}$ 'de Ağdan Bağımsızlık Çalışması

No	Eleman Sayısı	\bar{Nu}
1	982	32,2138
2	2419	43,1081
3	6726	55,5760
4	149995	74,1215
5	436208	77,4535
6	1009009	77,8140

Doğrulama

Sayısal çalışmaların doğruluğu için, elde edilen sonuçlar deneysel veriler/analitik sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Bu sayısal çalışmanın doğrulamasında, Incropera ve DeWitt (2002) tarafından hesaplanan analitik sonuçlar ve Mangrulkar vd. (2016) tarafından kaydırılmış sıralı dizilişe sahip boru demetleri için sunulan deneysel veriler kullanılmıştır. Doğrulama çalışmalarında, akışkan olarak hava kullanılmış ve havanın termofiziksel özellikleri Tablo 3'te sunulmuştur.

Tablo 3. Doğrulama Çalışmalarında Kullanılan Havanın Termofiziksel Özellikleri

Özellik	Değer
Isıl iletim katsayısı (W/m K)	0,0253
Yoğunluk (kg/m^3)	1,217
Özgül ısı (J/kg K)	1007
Kinematik viskozite (m^2/s)	$14,82 \times 10^{-6}$
Prandtl sayısı	0,701

Doğrulama çalışmasının ilk kısmında; akışa dik boru adımı (S_T) 31,3 mm, akış boyuna boru adımı (S_L) 34,3 mm, boru çapı (D) 16,4 mm alınarak kaydırılmış sıralı 56 borulu boru demeti (8x7) için ortalama Nusselt sayısı (\bar{Nu}), birim boru uzunluğunda gerçekleşen ısı transferi (q'), ısı taşınım katsayısı (h) ve çıkış sıcaklığı (T_c) hesaplanmıştır. Belirtilen parametrelerin hesaplanmasında giriş hızı 6 m/s, dış sıcaklık 15 °C, boru yüzey sıcaklığı 70°C olarak alınmıştır.

Maksimum Reynolds sayısı, Re_{\max} akış kesitinin minimum olduğu alandaki maksimum ortalama hıza V_{\max} bağlı olarak,

$$Re_{\max} = \frac{V_{\max} D}{\nu} \quad (15)$$

tanımlanır. Reynolds sayısı $10 - 2 \times 10^5$ aralığı için Zukauskas (1972) tarafından aşağıdaki bağıntı sunulmuştur.

$$\bar{Nu} = C_1 Re_{\max}^m Pr^{0,36} \left(\frac{Pr}{Pr_{\text{duvar}}} \right)^{0,25} \quad (16)$$

Bu denklemde akış doğrultusundaki boru sayısının (N_L) 20'den fazla olduğu kabul edilmiştir. Çalışmamızda, $N_L=7$ olması nedeniyle, Zukauskas (1972) tarafından sunulan düzeltme katsayısı olarak 0,95 değeri kullanılmıştır. Ayrıca C_1 ve m katsayıları için sırasıyla 0,34 ve 0,60 değerleri kullanılmıştır. Isı transferinin göstergesi olan ortalama Nusselt sayılarının hesaplanmasında aşağıdaki bağıntı kullanılmıştır.

$$\bar{Nu} = 0,95 \cdot 0,34 \cdot Re_{\max}^{0,60} Pr^{0,36} \left(\frac{Pr}{Pr_{\text{duvar}}} \right)^{0,25} \quad (17)$$

Ortalama ısı taşınım katsayısı aşağıdaki formülle hesaplanır.

$$\bar{h} = \frac{\bar{Nu} k}{D} \quad (18)$$

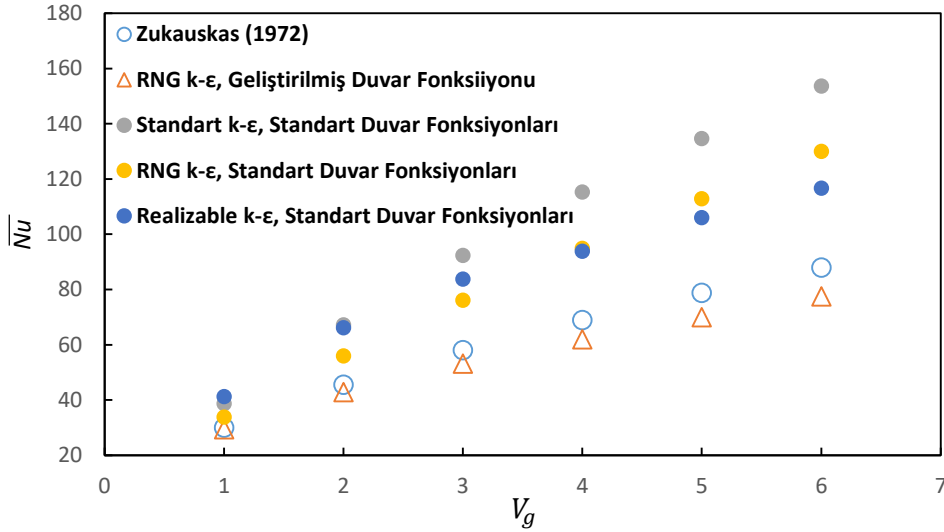
Birim boru uzunluğunda gerçekleşen ısı transferi miktarı aşağıdaki eşitlik ile hesaplanır.

$$q' = N(\bar{h}\pi D\Delta T_{lm}) \quad (19)$$

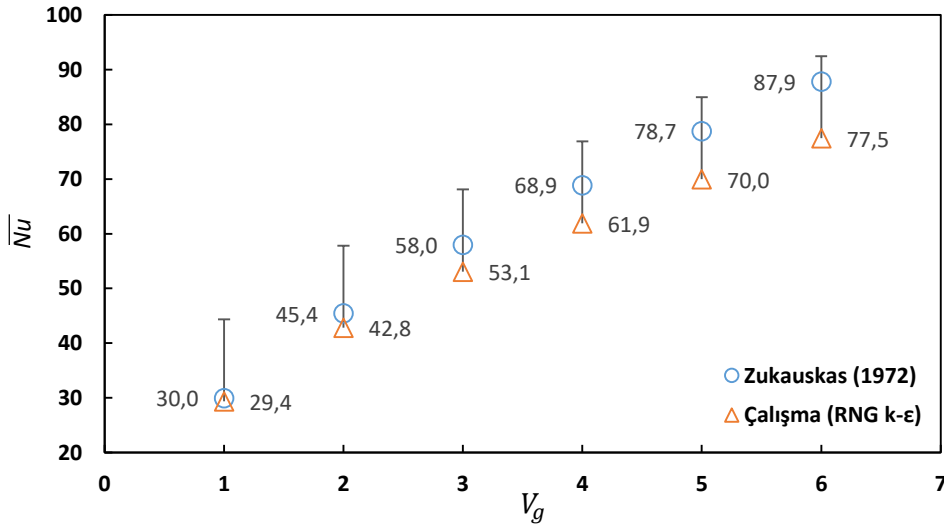
N toplam boru, N_T akış yönüne dik boru sayısıdır. Çıkış sıcaklığı ise aşağıdaki formül ile hesaplanır.

$$T_{\text{duvar}} - T_{\text{çıkış}} = (T_{\text{duvar}} - T_{\text{giriş}}) \exp\left(\frac{\pi D N \bar{h}}{\rho V_g N_T S_T C_P}\right) \quad (20)$$

Ortalama Nusselt sayısının (\bar{Nu}) giriş hızına göre değişimi dört farklı türbülans modeline göre incelenmiştir ve sonuçlar Şekil 3a'da sunulmuştur. Zukauskas (1972) sonuçları ile farklı türbülans modelleri kullanılarak elde edilen sonuçlar kıyaslandığında, en uyumlu sonuçların RNG k- ϵ Geliştirilmiş Duvar Fonksiyonu ile elde edildiği görülmüştür ve bu model kullanılmıştır. Farklı türbülans modelleri için, ortalama Nusselt sayısının (\bar{Nu}) giriş hızına göre değişimi, Şekil 3b'de gösterilmiştir. Seçilen model için, $V_g = 6$ m/s'de hata oranı %13,4 iken $V_g = 5$ m/s'de hata oranı %12,4 olarak gerçekleşmiştir.



(a)



(b)

Şekil 3. Ortalama Nusselt sayısının giriş hızı ile değişimi a) dört farklı türbülans modele göre b) en uyumlu türbülans modele göre

Incropera ve DeWitt (2002) tarafından verilen problem ile RNG k- ϵ modelinin sonuçlarının uyumlu olduğu Tablo 4'ten görülmektedir.

Doğrulama çalışmasının ikinci aşamasında Mangrulkar vd. (2016) tarafından incelenen değerleri Tablo 5'te sunulan kaydırılmış sıralı boru demeti üzerinde ortalama Nusselt sayıları (\bar{Nu}) ve basınç düşümü (ΔP) için sayısal olarak

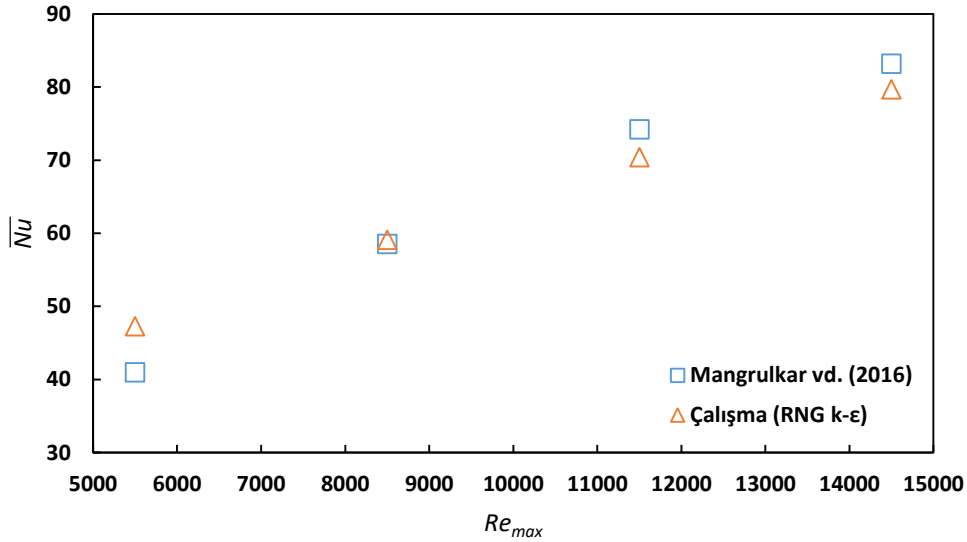
çalışılmıştır. Ortalama Nusselt sayısının (\overline{Nu}) Reynolds sayısına göre değişimi, Şekil 4'te gösterilmiştir. Basınç düşümünün (ΔP) Reynolds sayısına göre değişimi, Şekil 5'te gösterilmiştir.

Tablo 4. $V_g = 6 \text{ m/s}$ 'de Gerçekleştirilen Doğrulama Çalışmasının Analitik Sonuçlar ile Karşılaştırması

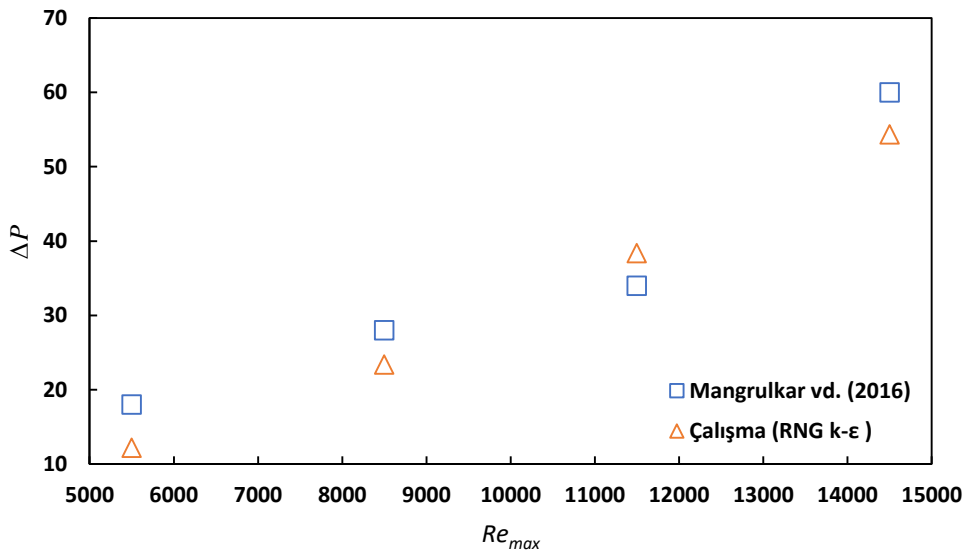
	\overline{Nu}	\overline{h} (W/m ² K)	$T_{\text{Çıkış}}$ (°C)	q' (kW/m)
Incropera ve DeWitt (2002)	87,9	135,6	25,5	19,4
Bu çalışma	77,5	109,6	23,9	15,9
Hata %	11,83	19,17	6,27	18,04

Tablo 5. Mangrulkar vd. (2016) Tarafından İncelenen Boru Demetine Ait Veriler

Özellik	Değer
Boru çapı (mm)	25
Akış yönü boyuna boyutsuz adım	2
Akış yönüne dik boyutsuz adım	1,75
Boru sayısı	3x5
Dış sıcaklık (K)	300
Boru yüzey sıcaklığı (K)	363
Reynolds sayısı	5500 - 14500



Şekil 4. Ortalama Nusselt Sayısının Reynolds Sayısı ile Değişimi



Şekil 5. Basınç Düşümünün Reynolds Sayısı ile Değişimi

Bu çalışmada elde edilen sonuçlar ile deneysel veriler arasındaki fark Tablo 6'da sunulmuştur. RNG k-ε modelinin sonuçlarının deneysel veriler ile uyumlu olması bu çalışmada da gözlemlenmiştir. Kullanılan model ile düşük

Reynolds sayılarında Nusselt sayısı ve basınç düşümü bakımından daha büyük hata oranları elde edilirken yüksek Reynolds sayılarında daha düşük hata oranları elde edilmiştir.

Tablo 6. Doğrulama Çalışmasının Deneysel Sonuçlara Göre Farkı

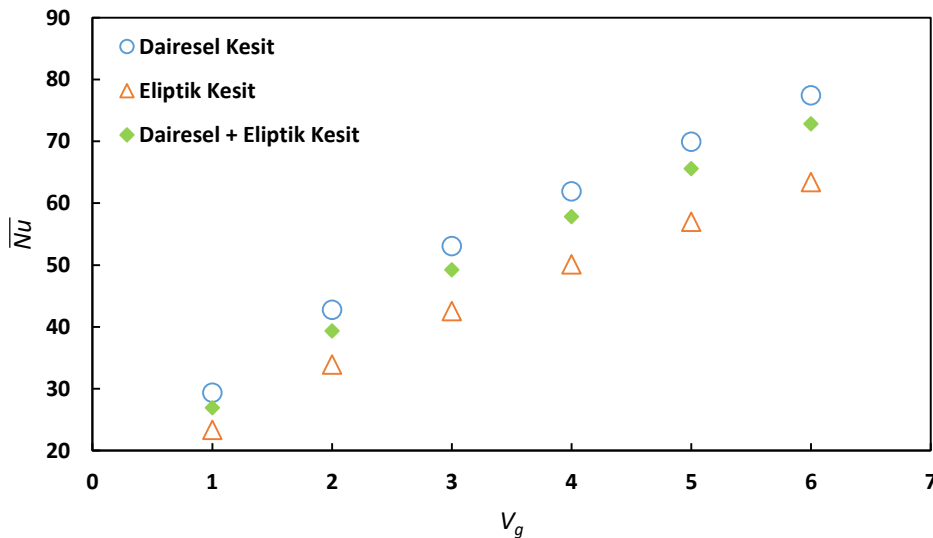
Re	\overline{Nu}	ΔP Fark (%)
5500	15,3	-32,2
8500	1	-16,4
11500	-5,2	12,9
14500	-4,2	-9,4

BULGULAR VE TARTIŞMA

Kaydırılmış sıralı dizilişe sahip boru demetinde dairesel, elips ve dairesel ile elips şekilli boruların birlikte kullanıldığı üç farklı geometrik boru demeti düzeni için sayısal çalışmalar yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar, ortalama Nusselt sayısı, sürtünme faktörü ve ısı verim açısından karşılaştırılmıştır. En düşük (1 m/s) ve en yüksek (6 m/s) hız değerlerinde, çalışılan durumlar için hız, basınç ve sıcaklık konturları karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

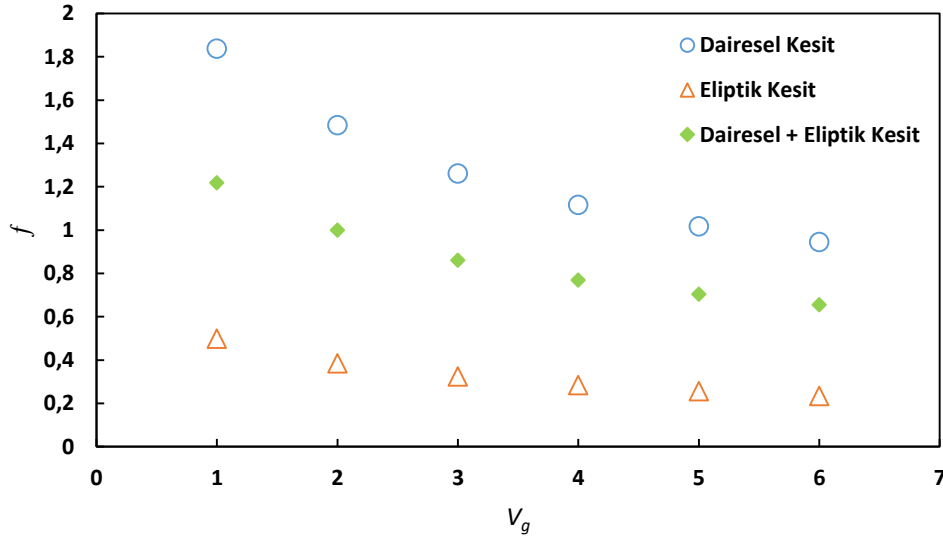
Şekiller 6, 7, ve 8'de giriş hızının (V_g) sırasıyla ortalama Nusselt sayısı, sürtünme faktörünün (f) ve ısı verim üzerindeki etkisi verilmiştir. Beklenildiği gibi ele alınan her bir durum için artan giriş hızıyla ortalama Nusselt sayısı artmaktadır. İncelenen üç farklı geometrik boru demeti düzeni için en düşük ısı transferi performansının elips şekilli boruların kullanıldığı durum için elde edildiği görülmektedir. $V_g = 6$ m/s'de, \overline{Nu} değeri en yüksek dairesel şekil için 77,45 iken en düşük elips şekil için 63,42'dir. Bu durumda elips şekilli boru kullanımı ile \overline{Nu} %18,11 azalmaktadır. $V_g = 1$ m/s'de, \overline{Nu} değeri yine en yüksek dairesel olanda 29,37 olarak elde edilirken, en düşük elips şekilli olanda 23,37'dir. Bu durumda, \overline{Nu} %20,43 azalmaktadır.

Boru demetinde elips şekil kullanımı ile sürtünme faktörü değerleri azaltılmıştır. En düşük f değerleri tüm boruların elips şekilli olduğu durum için elde edilirken, dairesel şekilli boru demetinde f değerleri en yüksektir. Dairesel ile elips şekilli borunun birlikte kullanıldığı durumda ise f değerleri bu iki durumun ortasındadır. Bu durumun etkisi, ısı verim giriş hızı ile değişimini gösteren Şekil 8'de görülebilir. $V_g = 6$ m/s'de elips şekilli boru demetinde sürtünme faktörü 0,235 iken, dairesel olanda 0,945'dir. Isı verim ise elips şekillide, 270,44 iken dairesel olanda 81,93'tür. Bu durumda elips şekilli boru demetinin ısı veriminin dairesel şekilli boru demetine göre %230,08 arttığı sonucu elde edilmiştir. Bu artış oranı V_g azaldıkça azalmaktadır.

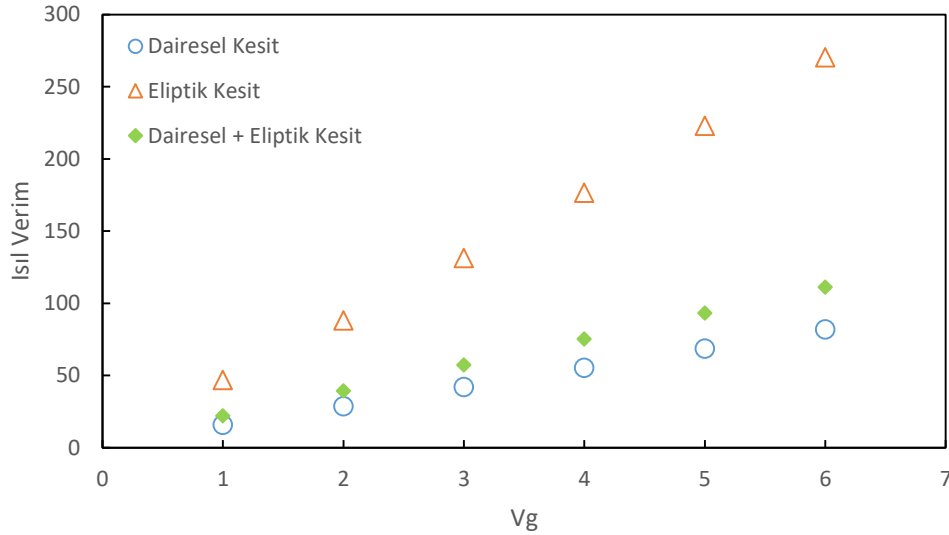


Şekil 6. Ortalama Nusselt Sayısının Giriş Hızı ile Değişimi

Hız konturlarının dairesel, elips, dairesel ile elips şekilli boru demeti için $V_g = 1$ m/s'de ve $V_g = 6$ m/s karşılaştırmaları sırasıyla Şekil 9 ve 10'da gösterilmektedir. Akış art iz bölgesinde dairesel şekilli boru demetinde hız değerleri geniş alanda neredeyse durma noktasına gelmektedir. Bu durum, akım çizgisi şeklinde geometriye sahip olan elips şekilli boru demetinde daha küçük olmaktadır. Hız değerinin artması ile bu bölgeler genişlemektedir.



Şekil 7. Sürtünme Faktörünün Giriş Hızı ile Değişimi

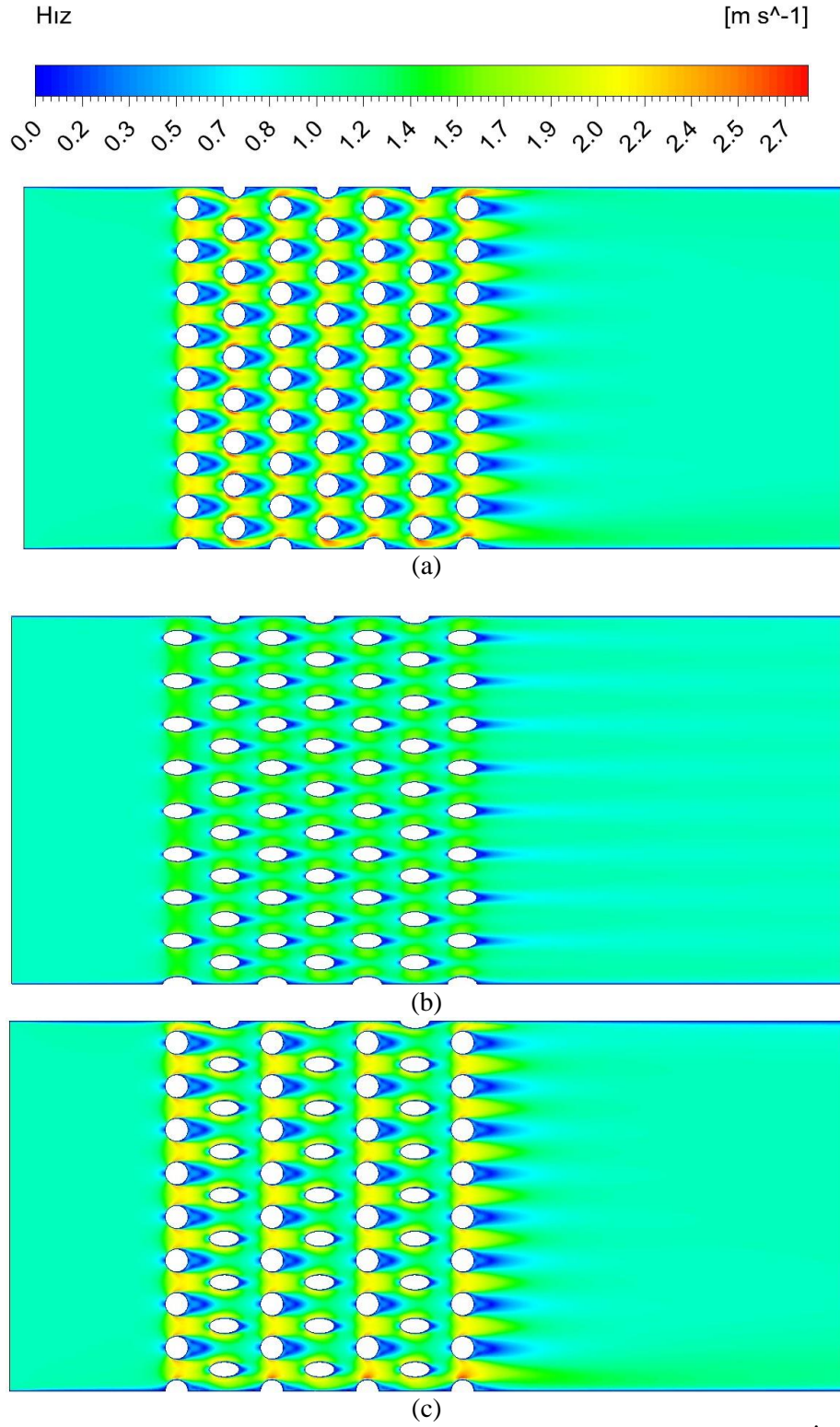


Şekil 8. Isıl Verimin Giriş Hızı ile Değişimi

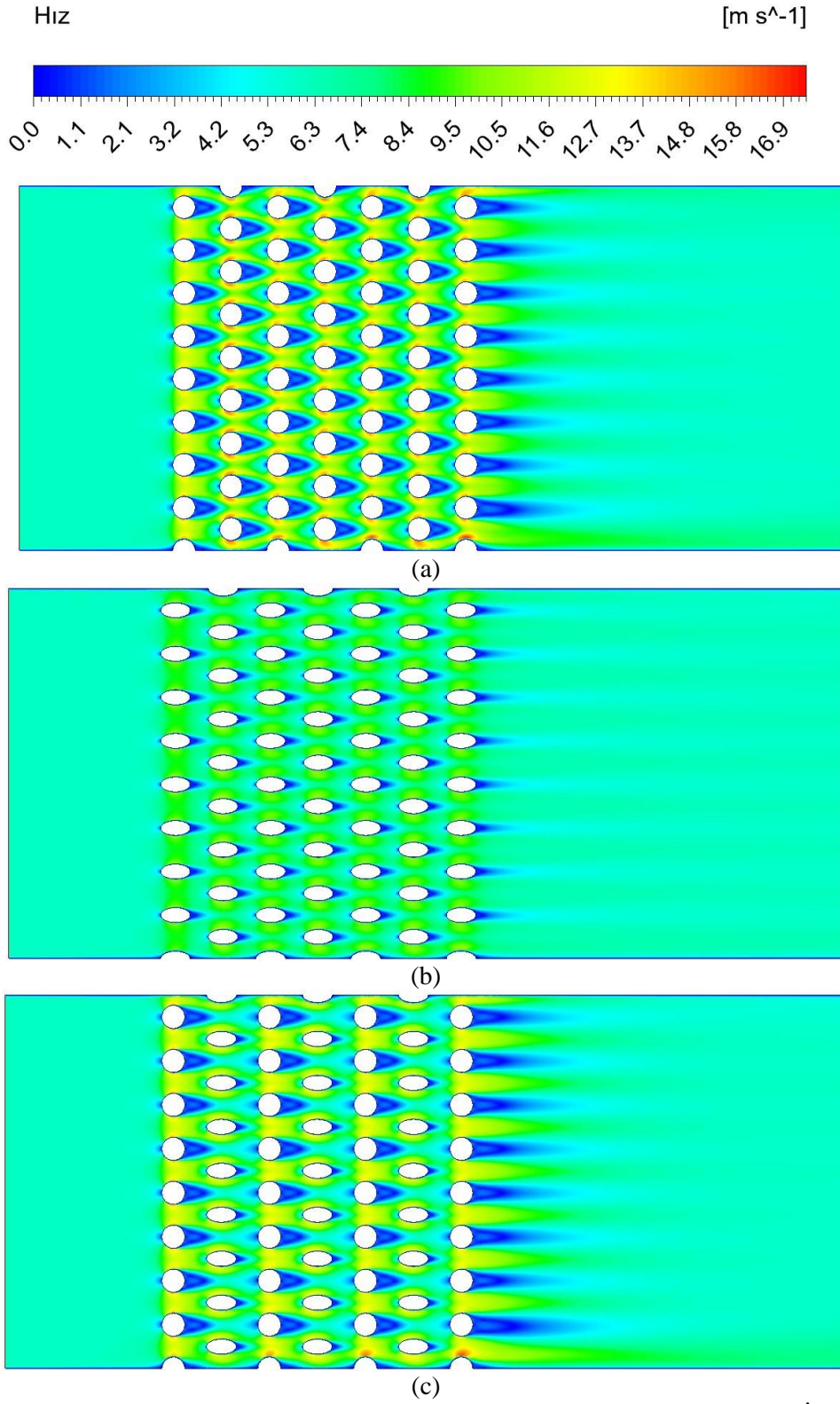
Basınç konturlarının dairesel, elips, dairesel ile elips şekilli boru demeti için $V_g = 1$ m/s'de ve $V_g = 6$ m/s karşılaştırmaları sırasıyla Şekil 11 ve 12'de gösterilmektedir. Elips şekilli boru demeti kullanımı ile akışa engel olan alanın azalması ile önemli ölçüde basınç kaybı azalmaktadır. Bu durum ısı verimindeki artışın temel nedenidir.

Sıcaklık konturlarının dairesel, elips, dairesel ile elips şekilli boru demeti için $V_g = 1$ m/s'de ve $V_g = 6$ m/s karşılaştırmaları sırasıyla Şekil 13 ve 14'te gösterilmektedir. Elips şekilli boru akım çizgili yapıya sahip olması nedeniyle ısı sınır tabaka kalınlığı dairesel şekilli boru ile kıyaslandığında artmıştır. Böylece toplam ısı transferi elips şekilli boru demetinde daha düşük gerçekleşmiştir.

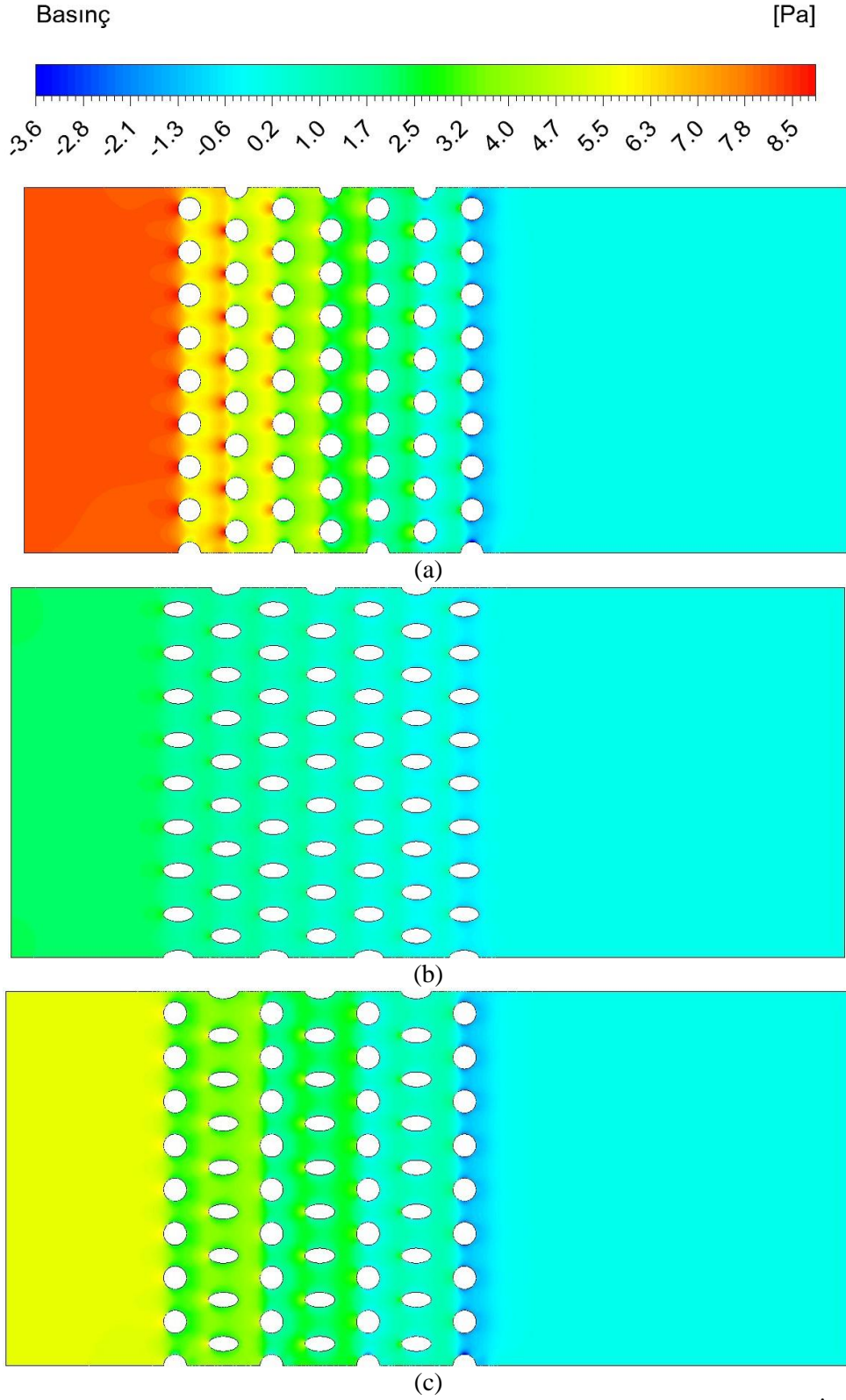
Hız konturları incelendiğinde tüm boruların elips şekil olduğu durumda basınç düşümünün diğer durumlara nazaran daha az olduğu gözlemlenmiştir. Bunun sebebi elips şeklin dairesele göre daha akım çizgili yapıya sahip olmasından kaynaklanmakta, arkasında daha küçük ölü akış bölgesi oluşturmaktadır. Şekil 9 ve 10'da bu durum açık şekilde görülmektedir. Akış yapısı ile ısı transferi parametreleri incelendiğinde dairesel şeklin elips şekle göre daha fazla ısı transferinin gerçekleştirilmiş olması, daire etrafında oluşan daha yüksek türbülanslı akıştan kaynaklanmaktadır. Daha büyük türbülanslı bölgede momentum ve ısı transferinin daha yüksek olması beklenmektedir. Daha yüksek momentum transferi hem basınç düşümü değerini hem de ısı transferi değerinin artırılmasında rol oynamaktadır.



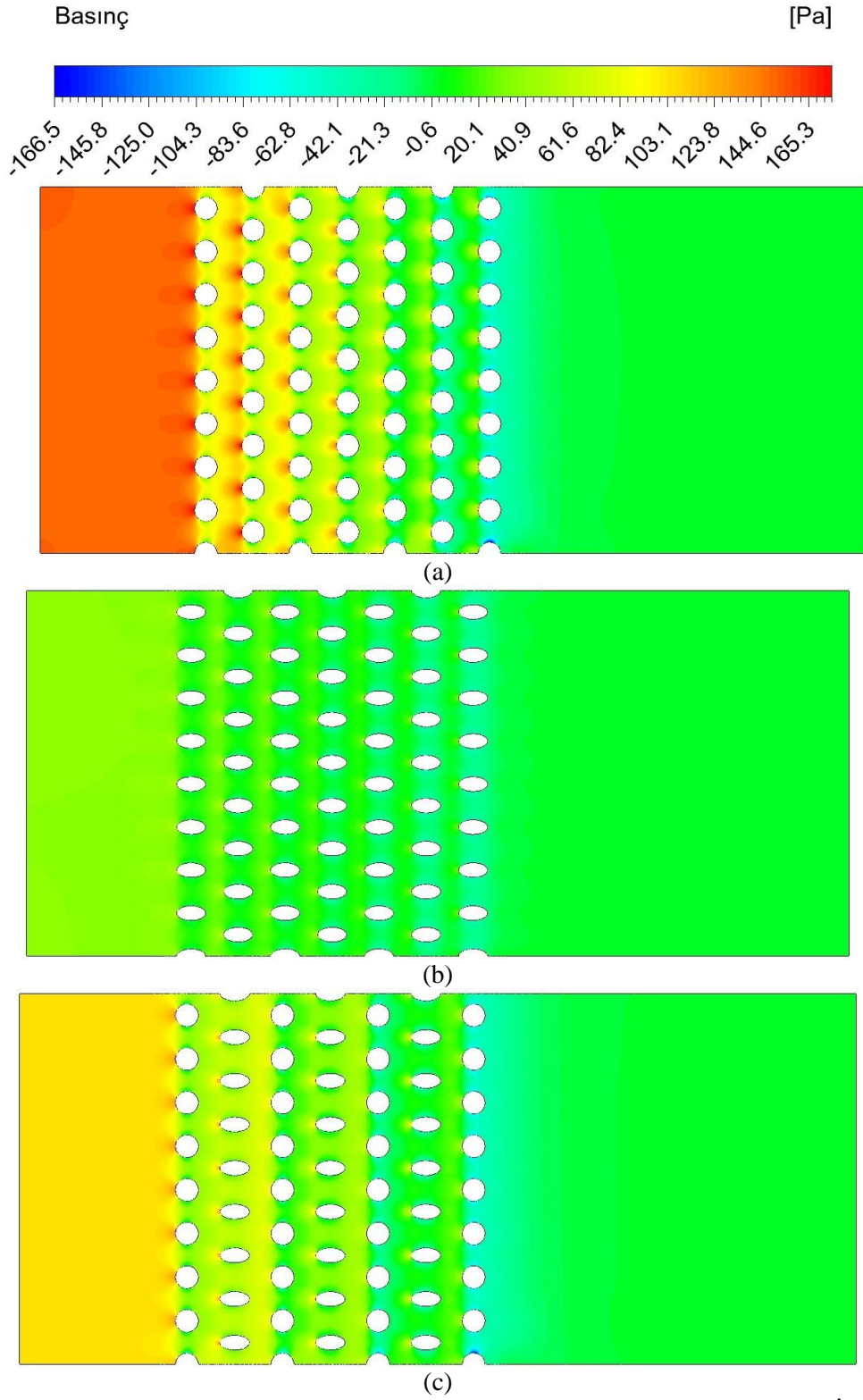
Şekil 9. Hız Konturlarının a. Dairesel b. Elips c. Dairesel ile Elips Şekilli Boru Demeti İçin $V=1$ m/s'de Karşılaştırılması



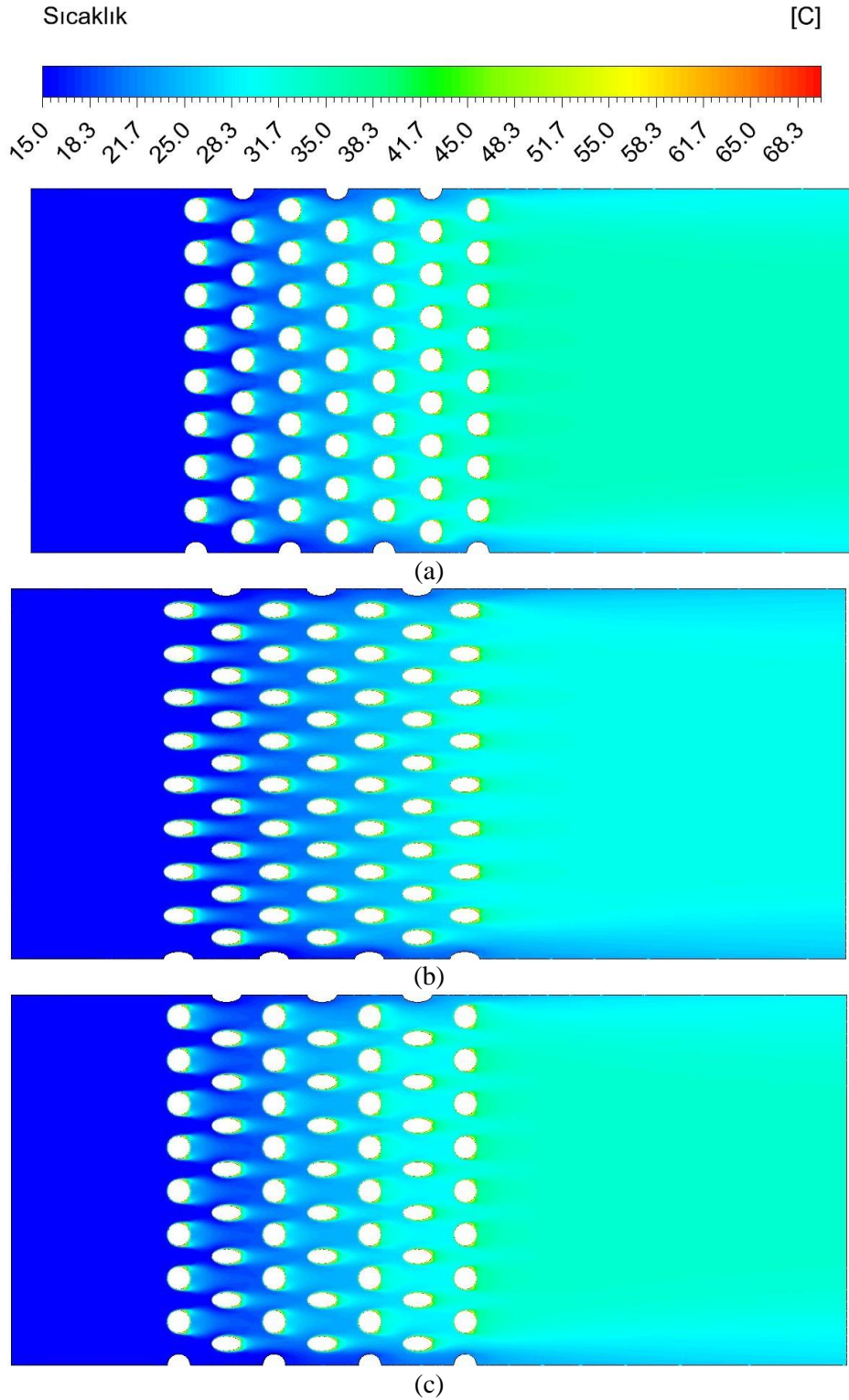
Şekil 10. Hız Konturlarının a. Dairesel b. Elips c. Dairesel ile Elips Şekli Boru Demeti İçin $V=6$ m/s'de Karşılaştırılması



Şekil 11. Basınç Konturlarının a. Dairesel b. Elips c. Dairesel ile Elips Şekilli Boru Demeti İçin $V=1$ m/s'de Karşılaştırılması



Şekil 12. Basınç Konturlarının a. Dairesel b. Elips c. Dairesel ile Elips Şekilli Boru Demeti İçin $V=6$ m/s'de Karşılaştırılması



Şekil 13. Sıcaklık Konturlarının a. Dairesel b. Elips c. Dairesel ile Elips Şekilli Boru Demeti İçin $V=1$ m/s'de Karşılaştırılması

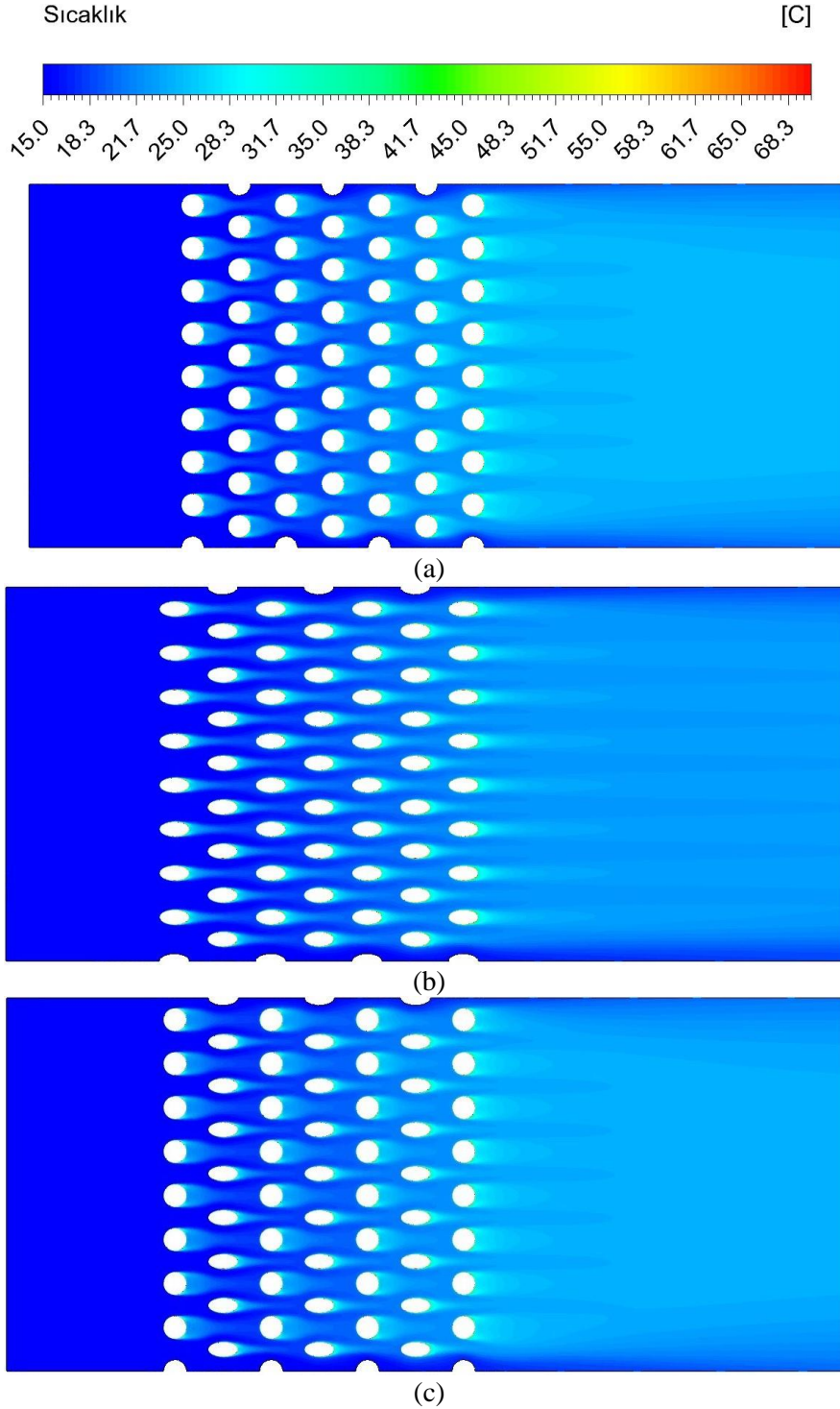
SONUÇLAR

Bu çalışmada, kaydırılmış sıralı dizilişe sahip boru demetinde dairesel, elips ve dairesel ile elips şekilli boruların beraber kullanıldığı durumlar sayısal olarak çalışılmıştır. Böylece, elips şekilli boru kullanımının çapraz akışta ısı transferi, basınç düşümü ve ısı verime olan etkileri detaylıca tartışılmıştır. Yapılan çalışmada elde edilen sonuçlar aşağıda sunulmuştur:

- Çalışılan hız değerlerinde ve geometrik parametrelerde, elips şekilli boru kullanımı ile ortalama Nusselt sayısı dairesel olana göre daha düşüktür. Örneğin, $V_g = 1$ m/s'de, dairesel şekilli boru demetinde \overline{Nu} değeri

en yüksek 29,37 iken, en düşük \overline{Nu} değeri elips şekilli olanda 23,37 olarak elde edilmiştir. Bu durumda, \overline{Nu} %20,43 azalmıştır.

- Elips şekilli ve dairesel şekilli boruların birlikte kullanıldığı boru demetinde en yüksek \overline{Nu} değeri 72,88, en düşük f değeri 0,65 olarak $V_g = 6$ m/s'de gerçekleşmiştir.
- Elips şeklin dairesel göre daha akım çizgili yapılı olmasından dolayı arkasında daha küçük ölü akış bölgesi oluşmaktadır, böylece basınç düşümü değeri diğer durumlara göre daha azdır.
- Elips şekilli boru demetinin ısı veriminin dairesel şekilli boru demetine göre %230,08 arttığı tespit edilmiştir.



Şekil 14. Sıcaklık Konturlarının a. Dairesel b. Elips c. Dairesel ile Elips Şekilli Boru Demeti İçin $V=6$ m/s'de Karşılaştırılması

SEMBOLLER

c_p	özgül ısı, $kJ/kg.K$
D	boru çapı, mm
D_e	eş değer boru çapı, mm
f	sürtünme katsayısı
k_{hava}	havanın ısı iletim katsayısı, $W/m.K$
N_L	akış doğrultusundaki boru sayısı
N_T	akışa dik doğrultudaki boru sayısı
\overline{Nu}	ortalama Nusselt sayısı
Pr	hava giriş Prandtl sayısı
Pr_{duvar}	boru yüzey Prandtl sayısı
q''	boru yüzeyindeki ısı akısı, W/m^2
s_L	enine uzunluk, mm
s_T	boyuna uzunluk, mm
T_{duvar}	boru yüzey sıcaklığı, K
T_{giris}	giriş sıcaklığı, K
$T_{çıkış}$	çıkış sıcaklığı, K
Re_{max}	maksimum Reynolds sayısı
Re_g	giriş Reynolds sayısı
V_{max}	akış kesitinin akış yönüne dik boru sütunundaki minimum olduğu alandaki maksimum ortalama hız, m/s
V_g	ortalama giriş hızı, m/s

Greek Symbols

ρ	yoğunluk, kg/m^3
χ	düzeltilme katsayısı
ν	kinematik viskozite, $N.s / m^2$
ΔP	basınç düşümü, Pa
ΔT_{LM}	logaritmik ortalama sıcaklık farkı, K

TEŞEKKÜR

Bu çalışma, TÜBİTAK BİDEB 2218 Yurtiçi Doktora Sonrası Araştırma Burs Programı tarafından 121C377 proje numarası ile ve TÜBİTAK ARDEB 1001 Araştırma Programı tarafından 123M484 proje numarası ile desteklenmektedir.

KAYNAKLAR

- Akçay, S., Akdağ, Ü., Hacıhafizoğlu, O., & Demiral, D. (2019). Boru demeti üzerinden geçen Al₂O₃- su nanoakışkanın pulsatif akışının ısı transferine etkisi. *DÜMF Mühendislik Dergisi*, 10(2), 621–631. <https://doi.org/10.24012/dumf.435490>
- Aslan, E., Taymaz, I., Cakir, K., & Eker Kahveci, E. (2023). Numerical and experimental investigation of tube bundle heat exchanger arrangement effect on heat transfer performance in turbulent flows. *Isı Bilimi ve Tekniği Dergisi*, 43(2), 175–190. <https://doi.org/10.47480/isibted.1391408>
- Bahaidarah, H. M. S., Anand, N. K., & Chen, H. C. (2005). A numerical study of fluid flow and heat transfer over a bank of flat tubes. *Numerical Heat Transfer; Part A: Applications*, 48(4), 359–385. <https://doi.org/10.1080/10407780590957134>
- Bayat, H., Lavasani, A. M., & Maarefdoost, T. (2014). Experimental study of thermal-hydraulic performance of cam-shaped tube bundle with staggered arrangement. *Energy Conversion and Management*, 85, 470–476. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.06.009>
- Buyruk, E., & Fertelli, A. (2001). Theoretical study for determination of the heat transfer and flow characteristics in the staggered tube bundle. *DEÜ Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 3(2), 59–69.
- El-Shaboury, A. M. F., & Ormiston, S. J. (2005). Analysis of laminar forced convection of air crossflow in in-line

- tube banks with nonsquare arrangements. *Numerical Heat Transfer; Part A: Applications*, 48(2), 99–126. <https://doi.org/10.1080/10407780590945452>
- Erguvan, M., & MacPhee, D. W. (2019). Second law optimization of heat exchangers in waste heat recovery. *International Journal of Energy Research*, 43(11), 5714–5734. <https://doi.org/10.1002/er.4664>
- Fluent, A. (2021). ANSYS Fluent theory guide. In ANSYS Inc., USA.
- Horvat, A., Leskovic, M., & Mavko, B. (2006). Comparison of heat transfer conditions in tube bundle cross-flow for different tube shapes. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 49(5–6), 1027–1038. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2005.09.030>
- Ibrahim, T. A., & Gomma, A. (2009). Thermal performance criteria of elliptic tube bundle in crossflow. *International Journal of Thermal Sciences*, 48(11), 2148–2158. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2009.03.011>
- Incropera, F.P., DeWitt, D.P. (2002). Introduction to Heat Transfer. In John Wiley and Sons Inc, New York.
- Khan, W. A., Culham, J. R., & Yovanovich, M. M. (2004). Fluid flow and heat transfer from elliptical cylinders: Analytical approach. *37th AIAA Thermophysics Conference*, 19(2). <https://doi.org/10.2514/6.2004-2272>
- Khan, W. A., Culham, J. R., & Yovanovich, M. M. (2006). Convection heat transfer from tube banks in crossflow: Analytical approach. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 49(25–26), 4831–4838. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2006.05.042>
- Lavasani, A. M., & Bayat, H. (2016). Numerical study of pressure drop and heat transfer from circular and cam-shaped tube bank in cross-flow of nanofluid. *Energy Conversion and Management*, 129, 319–328. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.10.029>
- Mangrulkar, C. K., Dhoble, A. S., Chakrabarty, S. G., and Wankhede U. S. (2016). “Experimental and CFD prediction of heat transfer and friction factor characteristics in cross flow tube bank with integral splitter plate,” *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 104, 964–978. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.09.013>
- Mangrulkar, C. K., Dhoble, A. S., Deshmukh, A. R., & Mandavgane, S. A. (2017). Numerical investigation of heat transfer and friction factor characteristics from in-line cam shaped tube bank in crossflow. *Applied Thermal Engineering*, 110, 521–538. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2016.08.174>
- Mangrulkar, C. K., Dhoble, A. S., Pant, P. K., Kumar, N., Gupta, A., & Chamoli, S. (2020). Thermal performance escalation of cross flow heat exchanger using in-line elliptical tubes. *Experimental Heat Transfer*, 33(7), 587–600. <https://doi.org/10.1080/08916152.2019.1704946>
- Yilmaz, A., Yilmaz, T., (2016). Çapraz akışlı paralel borulu boru demetinde entropi üretiminin analitik ve deneysel olarak incelenmesi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 31(1), 223–230.
- Žukauskas, A. (1972). Heat transfer from tubes in crossflow. *Advances in Heat Transfer*, 8(C), 93–160. [https://doi.org/10.1016/S0065-2717\(08\)70038-8](https://doi.org/10.1016/S0065-2717(08)70038-8)



Kahramanmaraş Sütçü İmam University

Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 24.05.2024
Kabul Tarihi : 01.08.2024

Received Date : 24.05.2024
Accepted Date : 01.08.2024

HARDOX 450, ALUMİNYUM BALPETEĞİ VE ARAMİD/EPOKSİ TABAKALI HİBRİT ZIRH PLAKALARININ BALİSTİK DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

INVESTIGATION OF BALLISTIC BEHAVIOR OF HARDOX 450, ALUMINIUM HONEYCOMB AND ARAMID/EPOXY LAYER HYBRID ARMOUR PLATES

Mehmet ÖZER¹ (ORCID: 0000-0002-6212-1217)

Kaan FERİKEL² (ORCID: 0000-0009-0006-1616-0174)

İbrahim Kutay YILMAZÇOBAN² (ORCID: 0000-0000-0002-9886-5533)

Tayfur Kerem DEMİRCİOĞLU^{3*} (ORCID: 0000-0002-0518-0739)

Fatih BALIKOĞLU³ (ORCID: 0000-0000-0003-3836-5569)

Can ÇİVİ⁴ (ORCID: 0000-0002-5302-9072)

¹ Balıkesir Üniversitesi, Bigadiç Meslek Yüksekokulu, Ulaştırma Hizmetleri Bölümü, Balıkesir, Türkiye

² Sakarya Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Sakarya, Türkiye

³ Balıkesir Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Balıkesir, Türkiye

⁴ Manisa Celal Bayar Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Manisa, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Tayfur Kerem DEMİRCİOĞLU, tkerem@balikesir.edu.tr

ÖZET

Bu çalışmada, Hardox 450 çeliği, Aramid /epoksi laminat kompozit ve Alüminyum bal peteği malzemelerinden oluşan tekli ve çoklu hibrit zırh yapılarının balistik performansı araştırılmıştır. Test levhalarına 833 ± 15 m/s namli çıkış hızına sahip 7.62 tam metal kaplama mermi ile deneysel balistik testler gerçekleştirilmiştir. Balistik test uygulanacak levhalar 250×250 mm boyutlarına sahip olup kalınlıkları ise malzeme konfigürasyonuna göre farklılık göstermiştir. Test levhaları dört kenarından sabitlenmiştir. Balistik darbe levhanın vurma yüzeyine dik gelecek şekilde atış yapılarak gerçekleştirilmiştir. Deneysel çalışmalarda, vurma yüzeyine göre sırasıyla 4 mm Hardox 450, 24 kat Aramid /epoksi laminat kompozit ve 10 mm Alüminyum bal peteğinden oluşan hibrit zırh yapısı darbe enerjisine balistik direnç gösterememiştir. Öte yandan tekli yapı olarak kullanılan 6 mm Hardox 450 zırh plakası darbe enerjisine balistik direnç sergilemiştir. Sonlu elemanlar analizi LS-Dyna programında açık zaman entegrasyonu yöntemi ile yapılmış; arka yüzey çöküntü miktarı ve sönmülenen enerji miktarları karşılaştırmalı olarak verilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Balistik darbe, ls-dyna, hardox, alüminyum bal peteği, aramid

ABSTRACT

In this research, the ballistic performance of single and multiple hybrid armour systems made of Hardox 450 steel, Aramid/epoxy laminate composite, and aluminium honeycomb materials was studied. Ballistic testing was conducted on test plates using 7.62 full metal jacket bullets at a muzzle velocity of 833 ± 15 m/s. The sheets for ballistic testing are 250×250 mm and vary in thickness based on material configuration. Test plates have been fixed on four sides. The ballistic impact was achieved by firing perpendicular to the plate's striking surface. In experimental experiments, the hybrid armour design consisting of 4 mm Hardox 450, 24 layers of Aramid/epoxy laminate composite, and 10 mm Aluminium honeycomb, depending on the impacting surface, could not demonstrate ballistic resistance to impact energy. On the other hand, the 6 mm Hardox 450 armour plate used in a single structure showed ballistic resistance to impact energy. Finite element analysis was carried out using the open-time integration method in LS-Dyna software; the amount of back face signature and absorbed energy values were compared.

Keywords: Ballistic impact, ls-dyna, hardox, aluminium honeycomb, aramid

ToCite: ÖZER, M., FERİKEL, K., YILMAZÇOBAN, İ.K., DEMİRCİOĞLU, T.K., BALIKOĞLU, F., & ÇİVİ, C., (2024). HARDOX 450, ALUMİNYUM BALPETEĞİ VE ARAMİD/EPOKSİ TABAKALI HİBRİT ZIRH PLAKALARININ BALİSTİK DAVRANIŞININ İNCELENMESİ. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 27(4), 1621-1632.

GİRİŞ

Askeri araçların savaş ortamında görevlerini icra etmeleri sırasında çok çeşitli tehditlere maruz kalırlar. Araç içindeki personelin tehlikeye karşı korunması balistik sınırlama malzemeleri (zırhlar) ile sağlanabilir. Bu koruma niteliği, aracın cinsine, görev özelliğine ve içinde bulunan personel ve faydalı ekipmana göre değişir. Askeri araç koruma amacıyla çok çeşitli malzemelerin kullanıldığı bilinmektedir. Bu malzemeler genellikle çelik, kompozit, kumaş, seramik malzemeler ve bunların kombinasyonlarından oluşan hibrit zırh yapılarıdır. Aracın manevra kabiliyeti için koruyucu malzemenin ağırlığı ve kalınlığı büyük önem taşımaktadır. Aracın toplam ağırlığının artması, motor performansını ve taşınacak faydalı yük miktarını azaltacaktır. Patlama etkisi ve darbelere karşı korunmada zırh çeliklerinin, kritik öneme sahip malzemelerdir ve bu alanda lider konuma sahip oldukları bilinmektedir (Hazell, 2022; Poplawski vd., 2020; Lenihan vd., 2019)

Literatürde çelik zırhların balistik performansları detaylı şekilde incelenmiştir. Hub ve Kneys (2013), Hardox 450 çeliği, alüminyum alaşımı Al 7039 ve titanyum alaşımı Ti-6Al-4V plakalarının 7.62×54R mermisine karşı balistik direncini, Ansys Autodyn programında sayısal simülasyonlar yoluyla incelemiştir. Analizi, hedefin tamamen delinmesini önlemek için balistik sınır kalınlığını tahmin etmek için kullandığını belirtmiştir. HARDOX 450 ve Ti-6Al-4V kalınlık açısından birbirine çok benzer çıkmıştır; fakat alüminyum alaşımı Al 7039 levhalarda ise HARDOX 450 ve Ti-6Al-4V malzemelerine kıyasla sırasıyla 2.5 ve 2.9 daha fazla kalınlığa gereksinim duyulmuştur. Hardox 450 malzemesinin alan ağırlığı Ti-6Al-4V malzemesine göre 2 kat, Al 7039 malzemesine göre ise 1.8 kat daha yüksek olduğunu vurgulamıştır. En düşük alan ağırlığına sahip olan Ti-6Al-4V malzemesinin aynı zamanda en düşük kalınlığa da sahip olduğu belirlenmiştir. Bu koruyucu malzemenin uçak kokpit alanına ilave edilmesinin kokpitin iç alanının azaltılmasında olumlu etki yapacağını ifade etmiştir. Hub ve Komenda (2009), 10 mm kalınlığındaki Hardox 450 sac levhasının, 6500 J darbe enerjisine sahip mermilerin dik ve hafif eğimli doğrultudaki darbesine karşı balistik direncini araştırmıştır. Ayrıca Hardox 450 sacının balistik darbe davranışını Ansys Autodyn v11.0 yazılımında iki boyutlu simetrik yarı-modelin neticeleri ile karşılaştırmıştır. 10 mm kalınlıktaki plakanın, 3000 J ile 4000 J (kalibreye bağlı olarak) darbe enerjisine sahip dik gelen mermiler ile 6500 J'e kadar eğimli gelen mermilere karşı balistik koruma sağlamıştır. Børvik vd. (2009), çalışmada farklı yüksek mukavemetli çeliklerin delinme direncini belirlemiş ve birbirleriyle karşılaştırmıştır. Kullanılan alaşımlar Weldox 500E, Weldox 700E, Hardox 400, Domex 500 ve Armox 560T çelikleridir. Zırh plakalarının delinme direncini belgelemede Avrupa normu EN1063'e göre iki farklı balistik koruma sınıfını dikkate aldıklarını ifade etmişlerdir. Bunlar BR6 (7.62 mm bilyeli mermilere karşı koruma için) ve BR7'dir (7.62 mm AP mermilere karşı koruma için), burada mermilerin çarpma hızı her iki durumda da yaklaşık 830 m/s'dir. Ayrıca, her iki koruma sınıfına ait gereklilikleri karşılayan çeliklerin 2×6 mm kalınlığında zırh çelikleri Domex Koruma 500 ve Armox 560T olduğu bulunmuştur. 6 mm ve 2×6 mm kalınlığa sahip Weldox 500E, Weldox 700E ve Hardox 400 yapısal çelikleri ise, BR6 veya BR7 için şartları sağlayamamış ve EN1063 spesifikasyonlarını karşılamak için kalınlıklarının artırılması gerektiği vurgulanmıştır. Farklı mermilerin ayrıntılı modellerini içeren doğrusal olmayan 2 boyutlu aksel simetrik sonlu eleman modelleri hazırlanmıştır. Mermilere ilişkin malzeme verileri literatürden alınmış, Johnson-Cook ve Cockcroft-Latham kırılma kriterleri kullanılmıştır. Sert çekirdekli zırh delici mermiler için Ls-dyna Lagrangian formülasyonu kullanıldığında simülasyonlar ile deneysel veriler arasında genel olarak iyi bir uyum elde edildiği sonucuna ulaşmışlardır. Bekci vd. (2021), Ramor 500 ve Ramor 550 zırh çeliği plakalarının balistik performanslarını 7.62 mm' lik mermiye karşı çeşitli koşullarda deneysel ve sayısal olarak incelemiştir. Yekpare levha, çift katmanlı levha ve eğik levha olmak üzere deneysel çalışmada üç farklı konfigürasyon kullanılmıştır. 6.7 mm kalınlığında Ramor 500 ve 6.2 mm kalınlığında Ramor 550 monolitik plakalar testlerde başarısız olmuştur. Çift katmanlı test levhalarında ise yüz plakası olarak Ramor 550 olan yapı daha iyi balistik direnç göstermiştir. Çarpma açısı arttıkça plakaların balistik direncinin arttığı sonucu raporlanmıştır. Mohotti vd. (2011) çalışmada BR7 EN 1063 Avrupa normuna göre farklı şekilli mermilerin kalın çelik plakalarda neden olduğu penetrasyon değerlerini araştırmışlardır. Sayısal simülasyonlar için LS-Dyna da bulunan Johnson-Cook malzeme model kartı ile Lagrangian yöntemlerini kullanmıştır. APM2 mermisi ile delinen 6 mm kalınlığında Weldox 460E plakası için balistik sınır eğrisi elde ettiğini belirtmiş, aynı zamanda sayısal ve deneysel testlerde elde ettiği bulguları karşılaştırmıştır. Abdullah vd. (2020), zırhlı araç uygulaması için yüksek mukavemetli çelik ve alüminyum alaşımından oluşan birleştirici hafif metal lamine panelin balistik performansını araştırmışlardır. Ar500 ve Al7075-T6 malzemeleri, %20-30 ağırlık azalmasını sağlamak için lamine panel tasarımı için seçilmiştir. Malzemelerin birleştirilmesi için hem lehim yöntemi hem de yapıştırma yöntemi kullanılmıştır. Poliüretanla yapıştırıcı uygulaması lamine panelin balistik performansını ve lamine panelin mermiyi durdurması için gereken sürenin artmasını sağlamıştır. Senthil ve Iqbal (2021), Armox 500T, yumuşak çelik ve Al 7075-T651 levhaların tabakalı konfigürasyonlarının 7.62 AP mermilerine karşı normal ve eğik atışlarda balistik performansını

incelemiştir. En iyi konfigürasyon olarak, üst katmanda düşük süneklik- yüksek mukavemetli ArmoX 500T, orta katman ve alt katmanda ise yüksek süneklik-düşük mukavemetli Al 7075-T651 veya orta mukavemet-orta sünek yumuşak çelik kullanılması önerilmiştir.

Araştırmacılar çelik zırh malzemeleri, seramik (SiC, B₄C, Al₂O₃), ultra yüksek molekül ağırlıklı polietilen (Dyneema®) ve aramid (Kevlar®) gibi farklı malzemeler ile oluşturulan çok katmanlı tabakalı malzemelerin balistik darbe dirençlerini de incelemiştir. Peng vd. (2022), SiC, B₄C seramik katmanları, Dyneema®, aramid (Kevlar®) ve sıkıştırılmış ahşap malzemeler ile geliştirilen hibrit tabakaların 7.62 mm mermi tehdidi karşısında balistik dirençlerini karşılaştırmışlardır. Test numuneleri 806 ile 887.5 m/s hız aralığında 7.62 mm (×39 mm) mermilerle saha balistik testlerine tabi tutulmuştur. Balistik sonuçlara göre, B₄C-Dyneema kompozit panel en düşük alan yoğunluğu ve kalınlığıyla en iyi balistik performansı sağlamıştır. Sıkıştırılmış ahşap malzemenin ise hafif malzemelerden biri olmasına rağmen balistik performansı ve enerji emilimi zayıf olduğu gözlemlenmiştir. Palta vd. (2018) çalışmasında, Weldox 700E çeliği ve Kevlar 129/epoksi plakalarının doğrusal olmayan sonlu eleman (Fe) modellerini oluşturmuş aynı zamanda sayısal verileri deneysel verilere karşılaştırmıştır. NATO Seviye I veya EN1063 BR5 standartlarına uygun şekilde, monolitik çelik plakaların, çok katmanlı çelik plakaların ve çelik ve Kevlar hibrid plakaların balistik performansını araştırmak için sayısal modellerin kullanıldığı parametrik çalışma hazırlanmıştır. Çift katmanlı çelik plakalar için, arka katmanı daha kalın olanın, daha ince arka katmanı olanlara göre daha fazla balistik dirence sahip olduğu görülmüştür. Aynı çelik katman kalınlığına sahip çift katmanlı hibrit plakalar için, arka katmanda Kevlar kullanılan plakanın daha iyi korumaya sahip olduğu ve daha verimli olduğu raporlanmıştır. Üç ve dört katmanlı plakalar için çelik-Kevlar-çelik konfigürasyonu, tüm çok katmanlı hibrit plakalar arasında en başarılısı olmuştur. Tek Kevlar katmanı kullanılmasının, iki Kevlar katmanının kullanılmasından daha iyi balistik koruma sağladığı gözlemlenmiştir. Kraus vd. (2019), çalışmasında Kevlar cep içerisinde çelik ve seramik plakaları yerleştirerek oluşturdukları heterojen yapının balistik darbe karşısında etkileşimini sayısal olarak incelemişlerdir. Ulaştıkları sonucu, doğrudan sayısal simülasyon temelinde, çelik+B₄C zırh plakasının en iyi ağırlık ve boyut parametrelerine sahip olduğunu belirtmişlerdir. Kartikeya vd. (2022), çelik/ultra yüksek molekül ağırlıklı polietilen (UHMWPE) kompozit zırh sistemini, 7.62 × 39 mm sertleştirilmiş çelik çekirdek (HSC) mermisine karşı balistik olarak test etmiştir. 3 mm kalınlığında yüksek sertlikteki çelik (HHS) levhaya sahip çelik/UHMWPE kompozit yapı, 700 m/s hızla ateşlenen 7.62×39 mm HSC mermilerine karşı koruma sağlamıştır. Daha düşük kalınlıktaki HHS levhalara sahip hibrit sistem tutarlı sonuçlar sağlayamamıştır. Literatürde, bal peteği yapıları kullanımı artık hızı, kinetik enerjiyi ve hasar alanını azaltarak sandviç yapının balistik darbe tepkisine önemli bir katkı sağlamıştır. Alüminyum bal peteği yapılarının balistik performansları sandviç kompozit yapılarda araştırılmıştır (Khaire vd., 2023; Rathod vd., 2022; Gunes vd., 2019; Zhang vd., 2018; Arslan vd., 2017). Bu çalışmada ise, bal peteği malzemesi zırh çeliği ve kompozit laminat tabakalar ile kullanılmasının enerji sönmeme kabiliyetine katkısı incelenmiştir.

Bu çalışmada, 7.62x51 mm ful metal ceket (FMJ) mermisine karşı koruma sağlayan tek bileşenli 4 mm ve 6mm kalınlığında Hardox 450 zırh çeliği plakaları ile bunun yanında 4 mm Hardox 450 zırh çeliği plakasının aramid-epoksi kompozit ve alüminyum bal peteği malzemeler ile hibritleşmesi sağlanmıştır. Çalışmanın amacı 6 mm Hardox 450 çelik plakasının ağırlığından daha hafif, 4 mm Hardox 450 çeliği içeren ikili hibrit (yani, 4 mm Hardox 450 ve aramid-epoksi kompozit) ve üçlü hibrit (4 mm Hardox 450 ve aramid-epoksi kompoziti ve Alüminyum bal peteği) zırh yapılarını üretmek ve balistik davranışlarını belirlemektir. Zırh yapılarının ayrı ayrı balistik performansları araştırılmıştır. Bu bağlamda çalışmanın deneysel ve sayısal açıdan uyumlu olduklarının doğrulanması ve kalınlık artışına bağlı olarak delinme/sehim ve artık hız değişimi sunulmuştur.

MATERYAL VE METOT

Malzeme

Balistik teste tabi tutulan zırh çeliği malzemesi İsveç- SSAB firmasından temin edilmiştir (SSAB, 2024). SSAB firmasının ürün kataloğunda Hardox 450' nin mekanik özellikleri 420 – 475 HBW sertlik değeri, 1200 MPa akma dayanımı, 1400 MPa çekme dayanımı ve 35J /- 40°C darbe enerjisine sahip olduğu belirtilmiştir. Balistik teste tabi tutulan zırh çeliği plaka 250×250×4 mm ve 250×250×6 mm boyutlarındadır. Tablo 1' de Hardox 450' nin kimyasal kompozisyonu, Tablo 2' de ise temel mekanik özellikleri verilmiştir.

Tablo 1. Hardox 450' deki Maksimum Alaşım Elementi İçeriği (SSAB, 2024)

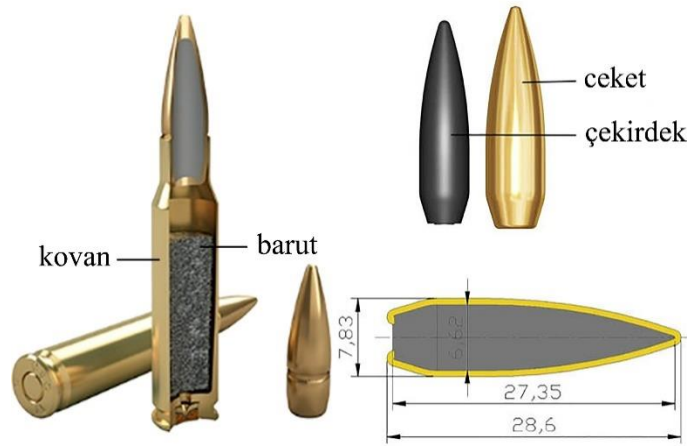
C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	B
0.26%	0.70%	1.60%	0.025%	0.010%	1.40%	1.50%	0.60%	0.005%

Tablo 2. Hardox 450 Temel Mekanik Özellikleri (Hub ve Komenda, 2009)

Özellikler	Sembol	Birim	Değer
Sertlik	HBW	-	420-475
Darbe tokluk at -40 °C (Charpy)	KV	J	35
Akma dayanımı	$R_{p0,2}$	MPa	1200
Çekme dayanımı	R_m	MPa	1400
Uzama	A_5	%	10

Not: A_5 (ekstansometre aralığı 5 mm)

Yapılan çalışmada, NIJ STD-0108.01 Seviye III (Stewart, 1985) testlerinde tercih edilen 7.62x51 mm FMJ (ful metal ceket) mermisi kullanılmıştır. Bu nedenle testler öncesinde mermi hızı, kovan içindeki barut miktarı ile ayarlanmış 7.62x51 mm NATO FMJ mermisi için 833 ± 15 m/s hız aralığında tutulmuştur. Şekil 1' de testlerde ve analizde kullanılan 7.62x51 mm FMJ mermisinin resmi verilmiştir. 7.62x51 mm tam metal kaplamalı merminin özellikleri Tablo 3'te gösterilmiştir.

**Şekil 1.** 7.62x51 mm FMJ Mermi ve Boyutları**Tablo 3.** 7.62x51 mm Tam Metal Kaplama (FMJ) Mermisinin Teknik Özellikleri

Kullanılan Mermi	7.62 mm FMJ
Mermi Çekirdek Çapı	7.83 mm
Mermi Çekirdek Ağırlığı	9.60 g
Mermi Kovan Ağırlığı	11.84 g
Mermi Uzunluğu	28.6 mm
Barut Miktarı	2.768±0.005 g

Kevlar 29 veya muadili para-aramid liflerinden dokunmuş kumaş (Twaron CT709), alan ağırlığı 200 g/m^2 olan, balistik kurşungeçirmez yelek imalatında kullanılan, yüksek performanslı, hafif, su-tutmaz aramid elyaf kumaştır. Alüminyum bal peteği panel, alan ağırlığı 5.0 kg/m^2 olan, hücre çapı yaklaşık 9 mm, folyo kalınlığı yaklaşık 50 -70 μm , eğilme değeri $21.900 \text{ kNm}^2/\text{m}$, hafif paneldir. Deneysel çalışmada kullanılacak olan zırh plakalarını tanımlayan kodlama, toplam kalınlık ve toplam ağırlık bilgileri Tablo 4' te sunulmuştur. Bu zırh yapılarından 4H24K plakası 6H' ya göre 4.96 kg/m^2 ağırlık avantajı sunmakta öte yandan 4H24K10B plakası 6H' ya göre 1.28 kg/m^2 dezavantaj göstermektedir. Zira elde ettiğimiz bu sonuçlar bizden sonraki araştırmacılara bu konuda fikir vereceğinden literatürde yer alması bizim açımızdan kıymet arz etmektedir.

Tablo 4. Balistik Test Plaka Detayları

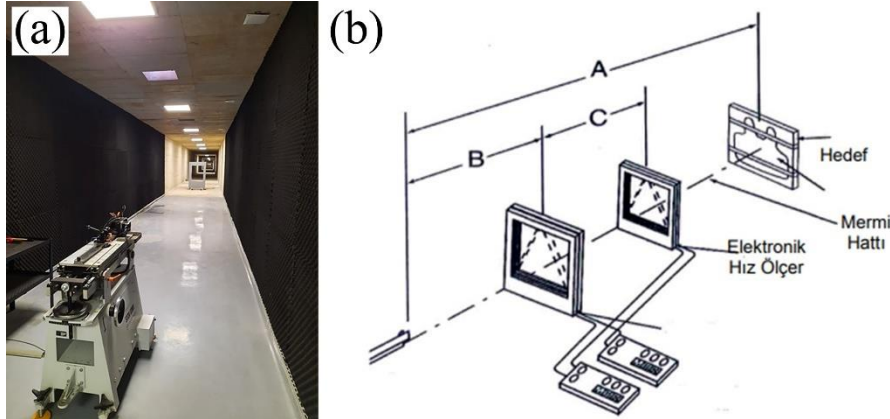
Zırh Plakası	Kod	Toplam Kalınlık (mm)	Toplam Ağırlık (kg/m^2)	Ağırlık Artışı (%)
4 mm Çelik	4H	4	31.20	-
4 mm Çelik+ 24 kat Aramid fiber	4H24K	14.75	41.92	34.3
6 mm Çelik	6H	6	46.88	50.25
4 mm Çelik+ 24 kat Aramid fiber +10 mm Alüminyum bal peteği	4H24K10B	24.75	48.16	54.35

Literatürden elde edilen bilgiler doğrultusunda yüksek sertliğe sahip malzemenin ön tarafa konumlandırılması gerektiği çünkü mermi çekirdeğinin uç geometrisini bozarak mermiyi mümkün olduğu kadar fazla deformasyona uğratarak delme gücünü azaltması şeklinde anlatılmıştır. Öte yandan ikincil zırh olarak ise balistik kompozit malzeme kullanılmasıdır ki bu durum literatürde merminin kinetik enerjisinin mümkün olduğu kadar geniş alana yayılmasını sağlayıp enerjinin absorbe edilmesi amaçlanmaktadır. Zira zırh yapısı içerisinde merminin daha fazla mesafe kat etmesi enerji yayılımı için yüzey temas alanını artırır böylece daha yüksek balistik limite çıkılması sağlanır şeklinde anlatılmıştır. Son olarak arka tarafta nispeten daha güncel malzeme olan Alüminyum bal peteği kullanılmıştır. Bu durum ise merminin öndeki katmanlardan geçmesi halinde kalan enerjisini absorbe etmek maksadıyla kullanılmıştır.

Hibrit hale getirme işlemi için herhangi bir yapıştırıcı kullanılmamıştır. Uygun ölçülerde hazırlanmış olan plakalar daha önce belirtilmiş olan sırayla zırh plakası tutucusu içine sırayla dizilmiş ve plaka tutucu 4 kenarından rijit bir şekilde sabitlenerek balistik test için mermi atışına hazır hale getirilmiştir. Ayrıca aramid-epoksi kompozit plaka üretimi el yatırma yöntemi ile yapılmıştır. Dost Kimya firmasından temin edilen 200 g/m² düz dokuma Kevlar® 29 elyaflar 250×250 mm boyutlarında kesilmiştir. Kompozit plakalar %45.7 elyaf kütle oran değerine sahiptir. MGS Laminasyon Epoksi Setinden (Reçine: L285/Sertleştirici: H285) reçine ve sertleştirici oranı 100:40 olacak şekilde hazırlanan karışım fırça yardımıyla elyaflara kat kat emdirilmiştir. Her kat laminasyonun alüminyum rulo yardımıyla ıslanması ve hava boşluklarının tahliyesi edilmesi sağlanmıştır. Laminat kompozitler kürleşme sonrası 24 saat oda sıcaklığı koşullarında bekletilmiştir.

Balistik Testler

Hardox 450 çeliği zırh plakası balistik testi, Balıkesir ilindeki ZSR A.Ş. firmasında bulunan kapalı atış poligonunda gerçekleştirilmiştir. Hedef plakanın kapalı poligon içerisine yerleşimi NIJ STD-0108.01 Seviye III standardına (Stewart, 1985) uygun olarak Şekil 2b’de belirtildiği gibi konumlandırılmıştır. Ayrıca, 7.62x51 mm M80 FMJ mermisi Prototypa marka atış düzeneğinden atılmıştır. Prototypa marka atış düzeneği Şekil 2a’da verilmiştir. Bunun yanında, hedef plaka, hız ölçerler ve silah arasındaki mesafe durumu ve mermi hızı standart doğrultusunda düzenlenmiştir. Test plakası ve namlu arası mesafe 15 metre olarak belirtilmiştir. Test numunesi, çarpma noktasında merminin uçuş hattına dik olacak şekilde konumunun ve tutumunun kolaylıkla ayarlanmasına olanak tanıyan çelik çerçeve ile desteklenerek dört kenarından sabitlenmiştir. Tam delinme hasar modu oluşmayan numunede arka yüzey deformasyonu derinlik kumpası ile belirlenmiştir.



Şekil 2. a. ZSR A.Ş. Firmasında Kapalı Poligonda Bulunan Prototypa Marka Atış Düzeneği b. Şematik Test Standardı (NIJ-0108.01) (Stewart, 1985)

SONLU ELEMENLAR ANALİZİ

Çözüm Metodu

Sonlu elemanlar analizi LS-Dyna programında gerçekleştirilmiştir. Numerik Analizin tamamı LS-Prepost programında hazırlanmıştır. Açık (explicit) zaman entegrasyonu sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak çözümler yapılmıştır. 7.62x51 mm FMJ M80 mermi, 4 mm Hardox 450 zırh çeliği, 24 kat aramid /epoksi laminat kompozit ve 10 mm Alüminyum bal peteği katmanlarından oluşmuş hibrit kompozit zırh plakası sonlu elemanlar modeli görüntüsü Şekil 3b’ de verilmiştir. Programın yaptığı “Adım-Süresi” hesabı, temas ilişkisinin daha iyi çalışması için 0.85 faktörü ile CONTROL_TIMESTEP kartı ile küçültülmüştür. Ayrıca “HOURGLASS” enerjileri ve CONTROL_ENERGY kartı eklenerek hesaba katılmıştır.

Temas İlişkisi

Penetrasyon sırasında mermi bileşenleri ve hedefler arasındaki teması programa tanımlamak için ERODING_SURFACE_TO_SURFACE seçilmiştir. Hedeflerin ve mermilerin kendi içlerindeki temas ilişkisi ile ERODING_SINGLE_SURFACE temas algoritmaları kullanılmıştır. "ERODING" temas algoritmasının seçilmesinin sebebi, temasta bulunan yüzeyler deforme oldukça veya aşındıkça, temas yüzeylerinin algoritma içinde güncellenmesidir. Ayrıca temas kartları içerisinde, opsiyonel olan SOFT seçeneği 2 (Pinball teması segmentlere dayalı tepki formülü) olarak seçilmiştir. Doğruluğu arttırmak için, temasa giren her bir parça arasındaki, seçilen temas ilişkisinde kullanılması gereken "adım-süresi" ve "temas-rijitliği" elle hesaplanıp programa tanımlanmıştır. Deneysel çalışmaların sonucunda, kevlar katlar arasında delaminasyon oluşmadığı göz önünde bulundurularak, katlar arasındaki laminasyon ilişkisinin tanımlanması için TIED_SURFACE_TO_SURFACE temas algoritması kullanılmıştır. Laminasyon temas ilişkilerinde SOFT seçeneği varsayılan (0) olarak seçilmiştir.

Eleman Ağı Yapısı (Mesh)

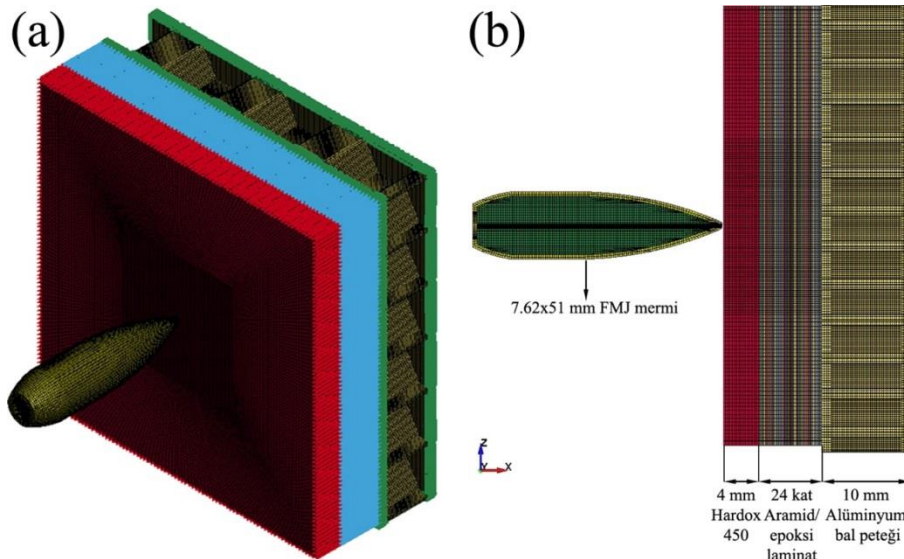
Eleman ağı (Mesh) bahsedildiği üzere LS-Prepost programında hazırlanmıştır. Sayısal modellerin ağ yapısı detayları Tablo 5'te verilmiştir. Hedef plakaların (Hardox 450 ve Kevlar) deformasyonunun asıl gerçekleştiği alanda daha sıkı bir ağ yapısı kullanılmış ve asıl deformasyon bölgesinden uzaklaştıkça eleman boyutu büyütülmüştür. Bu sayede işlem gücü ihtiyacı, sistem gereksinimleri ve işlem süresi ihtiyaçları düşürülmüştür. Diğer tüm parçalar gibi kevlar da katı olarak modellenmiş ve malzeme modeli detayından 0-90 açıları tanımlanmıştır. Bal peteği yapısında, yapının iç kısmında duvar genişliği 0.2 mm olduğu ve düzgün altı yüzlü eleman yapısı (Hexahedral) korunmak istediği için, tamamen 0.2 mm eleman boyutu sabit olacak şekilde ağ yapısı oluşturulmuştur. Mermi bileşenlerinin ağ yapısında, son derece yüksek oranda tamamen düzgün altı yüzlü eleman yapısı kullanılmıştır.

Tablo 5. Sonlu Elemanlar Analiz Detayları

Katman	Eleman Boyutu	Eleman Sayısı	Düğüm Noktası Sayısı
Hardox 450	0.25-0.625	276480	296497
Kevlar Tek Kat	0.25-0.625	17280	34882
Kevlar 24 Kat	0.25-0.625	829440	1674336
Bal Peteği	0.2	802730	1073217
Kurşun Çekirdek	0.25-0.07 (Köşelerde)	75075	75441
Bakır Ceket	0.25	14560	21843

Sınır Koşulları

Deneysel çalışmalarda kullanılan plaka tutucu düzeneğine uygun olacak şekilde her hedef plakanın dört (4) kenar yüzeyleri, her serbestlik derecesinden tutulup tamamen sabitlenmiştir (Şekil 3a). Merminin çarpma doğrultusundaki hibrit plaka dizilimine ait sayısal model kesiti Şekil 3b'de verilmiştir. Sonlu elemanlar modelinde mermi ağırlığı 9.60 gramdır.



Şekil 3. Sayısal Modelin Ayrıntıları a. Serbestlik Derecesi Sıfırlanan Noktalar b. Kesit Görüntüsü

Malzeme Modelleri

Hardox 450 çelik plaka modeli olarak, şekil değiştirme hızının dinamik olarak değiştiği durumlarda (Hyper-Velocity çarpışmalar gibi) şekil değiştirme hızından etkilenmeden yüksek doğruluk sağlayabilmesi ve koruyabilmesi için MAT_015_JOHNSON_COOK materyal modeli kullanılmıştır. Öte yandan bir başka sunduğu avantaj ise, yaygın olarak ulaşılabilen seviyedeki deneyler üzerine yapılan, standart haline gelmiş belirli sayısal analizler ile materyal modeli parametrelerinin tamamen belirlenebilmesinin yanında, hasara uğrama mekanizmasının son derece detaylı olup birden fazla kriteri aynı anda uygulatabilmesidir. Bu durum, malzemeye ait parametrelerin girilmesi ardından, kuvvetler sonucu doğacak akma gibi mekanik özelliklerin etki ettiği ve farklı türdeki gerilmelerin neden olduğu kırılma ve şekil değiştirme hasarlarının belirlenebilmesini sağlamaktadır. Literatür de ve kılavuzlarda görüldüğü üzere ikisi de ayrı ayrı hesaplanıp, sonuç gerilmelerin birleşimi ile hasar meydana gelir. Bu sayede, materyalde kırılma gerçekleşmese bile çatlaklar oluşur.

MAT_015_JOHNSON_COOK Katı modeller için kullanıldığında, durum denkleminde (Equation of state (EOS)) ihtiyaç duymaktadır (Hub ve Komenda, 2009). MAT_015_JOHNSON_COOK materyal modeline uygun Hardox 450 materyal parametreleri literatürde bulunamamıştır. Bu sebeple literatürde bulunan deneyler baz alınarak malzeme modelinin parametreleri hesaplanmıştır.

Mermi bileşenlerinin modellenmesi için ve bal peteği yüzleri için, işlem gücünden ve çözüm süresinden tasarruf sağlamak amacıyla, balistik konusunda materyal davranışının doğruluğunun, çatlak gelişmesi ve kırılma mekanizması dışında, MAT_015_JOHNSON_COOK ile aynı olması ve işlem gücü gerekliliği arasında optimum seviyeyi sunan MAT_098_SIMPLIFIED_JOHNSON_COOK malzeme modeli olarak seçilmiştir.

Bal peteği yapısı için, MAT_024_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY seçilmiştir. İşlem gücü ihtiyacının düşük olması, bükülme ve ezilme gibi durumlar için kullanılan bu kart, bal peteği yapısının sergileyeceği davranış göz önünde bulundurulunca en uygunu olarak bulunmuştur (Gunes vd., 2019). Tablo 6'da izotropik malzeme özellikleri verilmiştir.

Tablo 6. Sayısal Modellemede Kullanılan İzotropik Malzemelerin Fiziksel ve Mekanik Özellikleri

Malzeme	Yoğunluk (kg/m ³)	Elastisite Modülü (GPa)	Poisson Oranı
Hardox 450	8129	200	0.30
Kurşun	11350	13.8	0.42
Bakır	8912	172.1	0.33
Bal Peteği	2730	70	0.33
Alüminyum 3003 H-19			
Bal Peteği Yüzü	2713	68.9	0.33
Alüminyum 1100 H-14			

Lamine edilmiş Kevlar Plakaların malzeme modeli için mikro-mekanik tabanlı, MAT_058_SOLID_LAMINATED_COMPOSITE_FABRIC malzeme modeli kullanılmıştır. Bu materyal modeli, malzemenin üç eksenindeki özelliklerini ve hasar için dayanım kriterlerini kullanmaktadır ve aynı zamanda hasarı belirlerken bu kriterlerin her birini kontrol edebilmektedir. Literatürde (Tepedüzü ve Karakuzu, 2019) bulunan malzeme özelliklerine ilave olarak yarı statik batma deneyi gerçekleştirilip, normal ekseninde batma direnci ve basınca bağlı kırılma değerleri hesaplanmıştır. Kevlar 29/epoksi ortotropik malzeme özellikleri Tablo 7'de verilmiştir.

Tablo 7. Kompozit Laminat Sayısal Modele Ait Ortotropik Malzeme Sabitleri

Elastisite Modülü X (GPa)	Elastisite Modülü Y (GPa)	Elastisite Modülü Z (GPa)
17.20	17.20	10.40
Kayma Modülü XY (GPa)	Kayma Modülü YZ (GPa)	Kayma Modülü ZX (GPa)
5.50	3.30	3.30
Poisson Oranı XY	Poisson Oranı XZ	Poisson Oranı YZ
0.20	0.12	0.12

BULGULAR

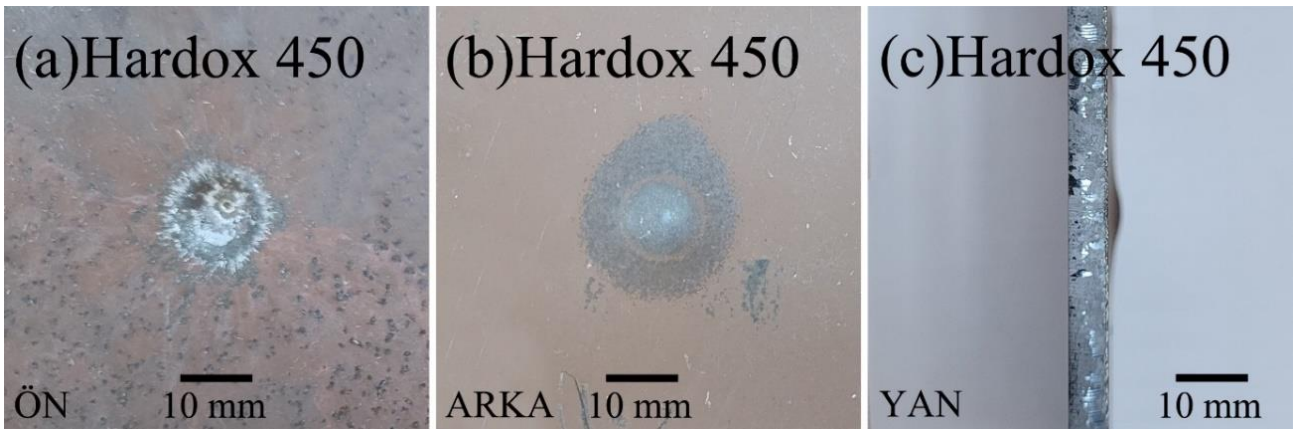
Deneyel ve Sayısal Sonuçların Karşılaştırılması

4H kodu verilmiş, kalınlığı 4 mm ve bir metre karesinin ağırlığı 31.20 kg/m² olan 250×250 mm'lik Hardox 450 çeliği zırh plakasının balistik test sonucu Şekil 4' de verilmiştir. Sonlu elamalar analiz sonucu ise Şekil 8a' da verilmiştir. Analiz neticesinde merminin artık hızı 716 m/s olarak belirlenmiştir (Şekil 9). Test Sonuçlardan görüldüğü üzere 4 mm kalınlığındaki Hardox 450 çeliğinden oluşan tek katmanlı zırh plakası 7.62 tam metal kaplama mermisine karşı balistik dayanım gösterememiş test tam delinme olarak sonuçlanmıştır (Şekil 4a, b, c). Plakanın arka yüzeyinde ise taç yaprak oluşumunun görüldüğü tam penetrasyon gerçekleşmiştir (Şekil 4c).



Şekil 4. 4H Monolitik Zırh Yapısının Balistik Test Sonucu **a.** 4 mm Hardox 450 Zırh Plakasının Ön Yüzü **b.** 4 mm Hardox 450 Zırh Plakasının Arka Yüzü **c.** 4 mm Hardox 450 Zırh Plakasının Yan Yüzü Görselleri

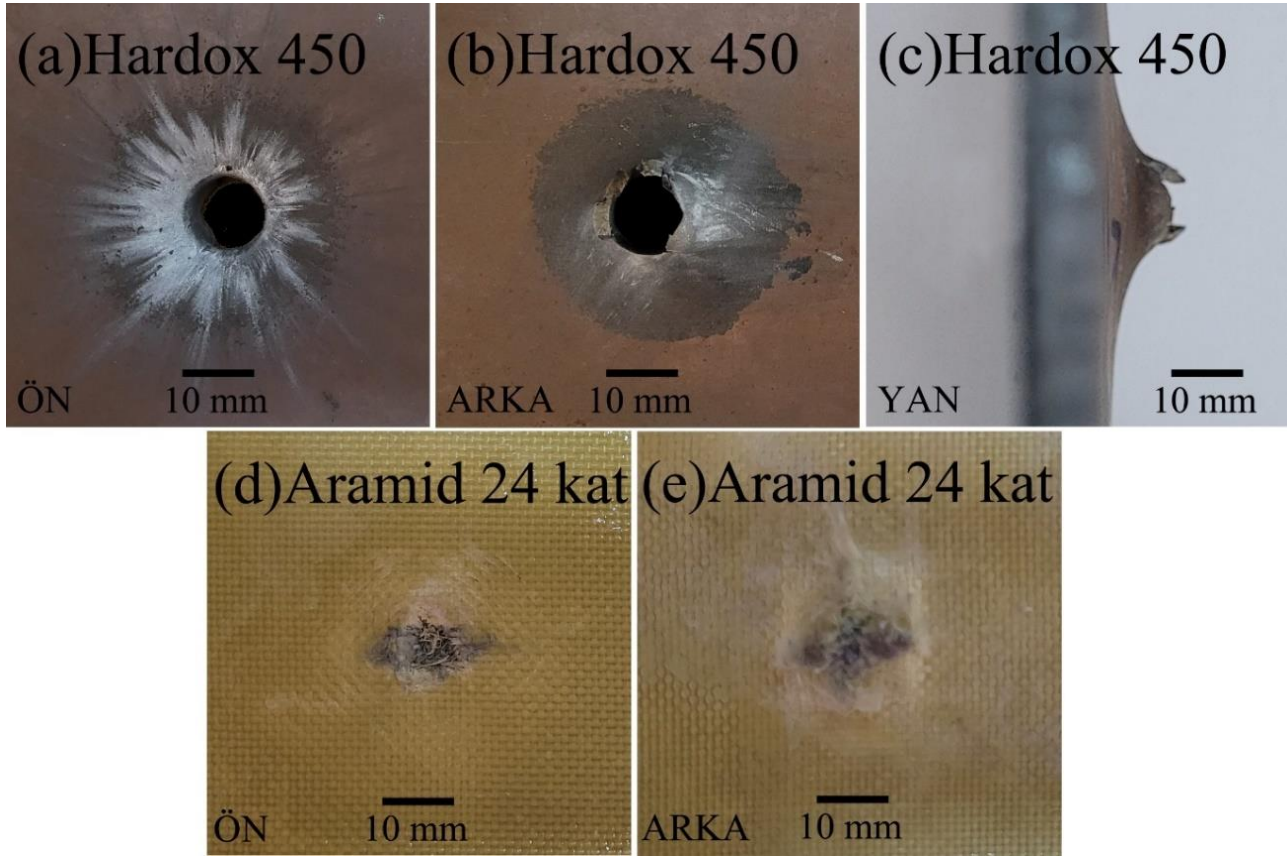
6H kodu verilmiş, kalınlığı 6 mm ve bir metre karesinin ağırlığı 46.88 kg/m² olan 250×250 mm'lik Hardox 450 çeliği zırh plakasının balistik test sonucu Şekil 5'te verilmiştir. 4H plakası ile karşılaştırıldığında ağırlık artışı %50.25'dir. Sonuçlardan görüldüğü üzere 6 mm kalınlığındaki Hardox 450 çeliği zırh plakası 7.62 tam metal kaplama mermisinin çarpmasına balistik direnç göstermiştir (Şekil 5a, b, c). Zırh plakası arka yüzeyinden çıkıntı geometrisinin tepe noktasına kadar 1.9 mm yüksekliğin ölçüldüğü çöküntü hasar modu oluşmuştur (Şekil 5c). Sonlu elemanlar analizi neticesi test verilerini doğrulamıştır (Şekil 8b). Bu kombinasyon balistik dayanım göstererek merminin kinetik enerjisinin tamamını sönmüştür (Şekil 9).



Şekil 5. 6H Monolitik Zırh Yapısının Balistik Test Sonucu **a.** 6 mm Hardox 450 Zırh Plakasının Ön Yüzü **b.** 6 mm Hardox 450 Zırh Plakasının Arka Yüzü **c.** 6 mm Hardox 450 Zırh Plakasının Yan Yüzü Görselleri

4H24K kodu verilmiş, toplam kalınlığı 14.75 mm ve bir metre karesinin ağırlığı 41.92 kg/m² olan 250×250 mm'lik Hardox 450 çeliği ve 24 kat Aramid /epoksi laminat kompozit plakalarından oluşan zırh yapısının balistik test sonucu Şekil 6'da verilmiştir. Bu yapıdaki ağırlık artışı 4H ile kıyaslandığında %34.3'tür. Sonlu elemanlar analizinde test verilerinin doğrulandığı görülmüştür (Şekil 8c). Analiz neticesinde merminin artık hızı 674 m/s olarak belirlenmiştir (Şekil 9). Test sonuçlarından görüldüğü üzere 4 mm kalınlığındaki Hardox 450 ve 24 kat Aramid /epoksi laminat kompozit plakalarından oluşan iki katmanlı zırh plakası 7.62 tam metal kaplama

mermisinin çarpmasına karşı balistik direnç gösterememiş ve test tam delinme olarak sonuçlanmıştır. 4H numunesi ile kıyaslandığında enerji sönümleme oranında artış sağlanmıştır (Tablo 8). Literatürde benzer neticeler elde edilmiştir. Kompozit levhaların, zırh çeliği malzemelerinin arka yüzeyinde kullanılması balistik artık hızların düşmesine ve neticesinde absorbe edilen enerji miktarlarının artışına neden olmuştur (Palta vd., 2018).

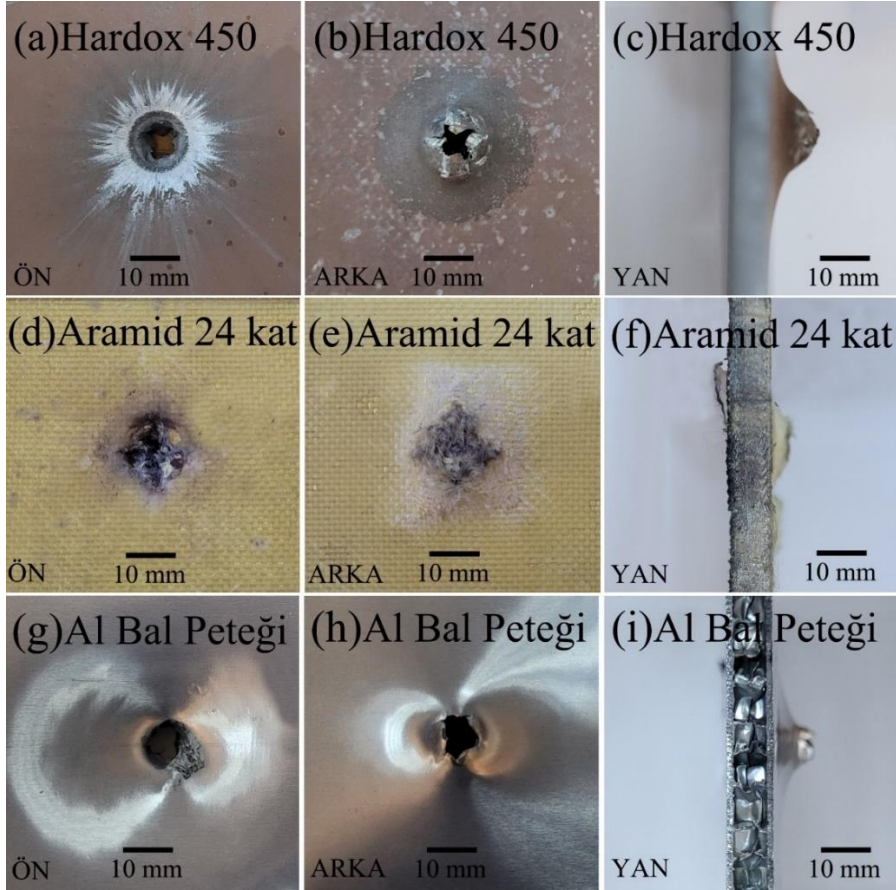


Şekil 6. 4H24K Hibrit Zırh Yapısının Balistik Test Sonucu **a.** 4 mm Hardox 450 Zırh Plakasının Ön Yüzü **b.** 4 mm Hardox 450 Zırh Plakasının Arka Yüzü **c.** 4 mm Hardox 450 Zırh Plakasının Yan Yüzü **d.** 24 kat Aramid /Epoksi Laminat Kompoziti Plakasının Ön Yüzü **e.** 24 kat Aramid /Epoksi Laminat Kompoziti Plakasının Arka Yüzü Görselleri

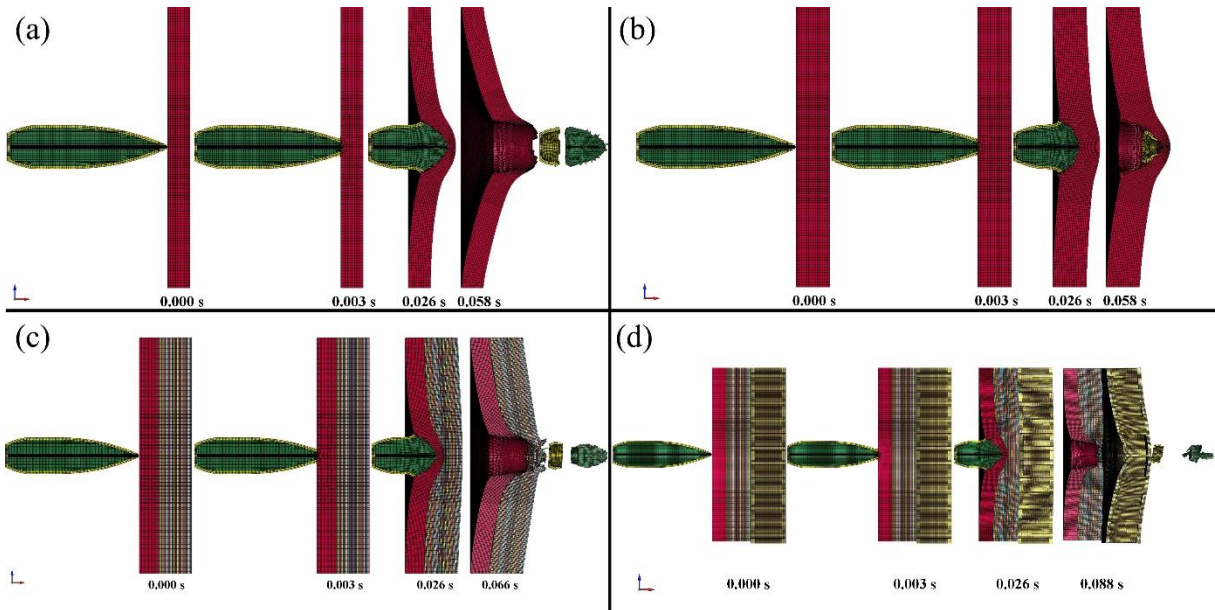
4H24K10B kodu verilmiş, toplam kalınlığı 24.75 mm ve bir metre karesinin ağırlığı 48.16 kg/m² olan 250×250 mm'lik Hardox 450 çeliği, 24 kat Aramid /epoksi laminat kompoziti ve 10 mm Alüminyum bal peteğinden oluşan hibrit zırh yapısının balistik test sonucu Şekil 7'de verilmiştir. Bu hibrit zırh plakasının ağırlık artışı ise 4H ile mukayese edildiğinde %54.35 olmuştur. Sonlu elemanlar analizinde test verilerinin doğrulandığı görülmüştür (Şekil 8d). Analiz neticesinde merminin artık hızı 655 m/s olarak belirlenmiştir (Şekil 9). Test sonuçlardan görüldüğü üzere 4 mm kalınlığındaki Hardox 450, 24 kat Aramid /epoksi laminat kompoziti ve 10 mm Alüminyum bal peteği içeren hibrit zırh plakası 7.62 tam metal kaplama mermisinin çarpmasına karşı balistik direnç gösterememiş ve test tam delinme olarak sonuçlanmıştır. Bal peteğinin hibrit yapıya eklenmesi ile monolitik (4H) ve ikili hibrit (4H24K) yapıya nazaran sönümlenene enerji miktarında artış sağlanmıştır (Tablo 8). Literatürde alüminyum bal peteği yapıların balistik darbe enerji sönümlemede olumlu etkiye sahip olduğu raporlanmıştır (Rathod vd., 2022).

Tablo 8. Balistik Test Plakalarının Deneysel ve Sayısal Sonuç Detayları

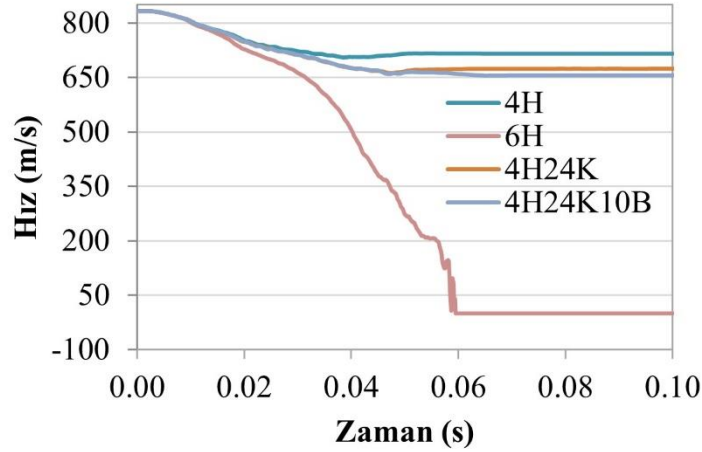
Kod	Namlu Çıkış Hızı (m/s)	Artık Hız (m/s)		Sönümlenen Enerji Oranı (%)		Arka Yüzey Çöküntü Miktarı (mm)
		Deneysel	Sayısal	Deneysel	Sayısal	
4H		679	716	33.56	26.12	-
6H		-	-	-	-	1.9
4H24K	833±15	638	674	41.34	34.53	-
4H24K10B		620	655	44.61	38.17	-



Şekil 7. 4H24K10B Hibrit Zırh Yapısının Balistik Test Sonucu **a.** 4 mm Hardox 450 Zırh Plakasının Ön Yüzü **b.** 4 mm Hardox 450 Zırh Plakasının Arka Yüzü **c.** 4 mm Hardox 450 Zırh Plakasının Yan Yüzü **d.** 24 kat Aramid /Epoksi Laminat Kompoziti Plakasının Ön Yüzü **e.** 24 kat Aramid /Epoksi Laminat Kompoziti Plakasının Arka Yüzü **f.** 24 kat Aramid /Epoksi Laminat Kompoziti Plakasının Yan Yüzü **g.** 10 mm Alüminyum Bal Peteği Plakasının Ön Yüzü **h.** 10 mm Alüminyum Bal Peteği Plakasının Arka Yüzü **i.** 10 mm Alüminyum Bal Peteği Plakasının Yan Yüzü Görselleri



Şekil 8. Sonlu Elemanlar Analizi Neticeleri **a.** 4 mm Hardox 450 Çeliği Zırh Plakası **b.** 6 mm Hardox 450 Çeliği Zırh Plakası, **c.** 4 mm Hardox 450, 24 kat Aramid /Epoksi Laminattan Oluşan İkili Zırh Yapısı **d.** 4 mm Hardox 450, 24 kat Aramid /Epoksi Laminat Kompoziti ve 10 mm Alüminyum Bal Peteğinden Oluşan Hibrit Zırh Yapısı



Şekil 9. Mermi Başlangıç ve Artık Hız-Zaman Grafiği

SONUÇLAR

Hardox 450 zırh çeliği, Aramid /epoksi laminat kompoziti ve Alüminyum bal peteği malzemelerinin bir araya getirilmesiyle elde edilen tekli, çoklu ve hibrit zırh yapılarının balistik darbe yüklerine karşı hasar dirençlerinin araştırılması çalışmanın konusu olarak belirlenmiştir. Bu bağlamda zırh plakalarının yüksek hızlı darbe yükleri altındaki davranışları araştırmacılar açısından oldukça önem arz eden bir konudur. 4H kodu ile tanımlanan (4 mm Hardox 450) monolitik çelik plakası, 4H24K kodu ile tanımlanan (4 mm Hardox 450, 24 kat Aramid /epoksi laminat kompoziti) ikili zırh plakası ve 4H24K10B kodu ile tanımlanan (4 mm Hardox 450, 24 kat Aramid /epoksi laminat kompoziti ve 10 mm Alüminyum bal peteği) üçlü hibrit zırh plakaları balistik darbe karşısında koruma sağlamamıştır. Öte yandan 6H kodu ile tanımlanan 6 mm Hardox 450 monolitik çelik plakası balistik darbe karşısında koruma sağlamıştır.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma Manisa Celal Bayar Üniversitesi Bilimsel Araştırma Proje Birimi 2023-020 numaralı proje kapsamında desteklenmiştir. ZSR Patlayıcı San. A.Ş. firmasına poligonlarını kullandığı ve iş birliği yaptığı için teşekkürlerimizi sunarız.

Yazarlar, Ansys ve LS-DYNA desteğini dikkate alarak Dr. Yılmazçoban'ın "İKY Araştırma Grubu"nun çözüm ortağı olan "Numesys, Türkiye"ye teşekkür ederler.

KAYNAKÇA

Abdullah, S., Abdullah, M., & Jamil, W. M. (2020). Ballistic performance of the steel-aluminium metal laminate panel for armoured vehicle. *Journal of Mechanical Engineering Sciences*, 14(1), 6452-6460. doi:https://doi.org/10.15282/jmes.14.1.2020.20.0505

Arslan, K., Gunes, R., Apalak, M. K., & Reddy, J. N. (2017). Experimental tests and numerical modeling of ballistic impact on honeycomb sandwich structures reinforced by functionally graded plates. *Journal of Composite Materials*, 51(29), 4009-4028. doi: https://doi.org/10.1177/0021998317695423

Bekci, M. L., Canpolat, B. H., Usta, E., Güler, M. S., & Cora, Ö. N. (2021). Ballistic performances of Ramor 500 and Ramor 550 armor steels at mono and bilayered plate configurations. *Engineering Science Technology, an International Journal*, 24(4), 990-995. doi:https://doi.org/10.1016/j.jestch.2021.01.001

Børvik, T., Dey, S., & Clausen, A. (2009). Perforation resistance of five different high-strength steel plates subjected to small-arms projectiles. *International Journal of Impact Engineering*, 36(7), 948-964. doi:https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2008.12.003

Gunes, R., Arslan, K., Apalak, M. K., & Reddy, J. N. (2019). Ballistic performance of honeycomb sandwich structures reinforced by functionally graded face plates. *Journal of Sandwich Structures & Materials*, 21(1), 211-229. doi: https://doi.org/10.1177/109963621668946

- Hazell, P. J. (2022). *Armour: materials, theory, and design*: CRC press.
- Hub, J., & Kneys, P. (2013). 3D Simulation Analysis of Aircraft of Aircraft Protection Material Impacting by 7.62 mm Ammunition. *University Review*, 7(3).
- Hub, J., & Komenda, J. (2009). Ballistic's Resistance of Steel Plate Hardox upon Impact of Non Penetrating Projectiles. *Advances in Military Technology*, 4(2), 79-91.
- Kartikeya, K., Chouhan, H., Ram, K., Prasad, S., & Bhatnagar, N. (2022). Ballistic evaluation of steel/UHMWPE composite armor system against hardened steel core projectiles. *International Journal of Impact Engineering*, 164, 104211. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2022.104211>
- Khaire, N., Tiwari, G., Patel, V., & Iqbal, M. A. (2023). Assessment of the ballistic response of honeycomb sandwich structures subjected to offset and normal impact. *Defence Technology*, 28, 56-73. doi:<https://doi.org/10.1016/j.dt.2022.12.018>
- Kraus, A., Kraus, E., & Shabalin, I. (2019). *Modelling of the processes of impact of a projectile with elements of individual defence*. Paper presented at the EPJ Web of Conferences.
- Lenihan, D., Ronan, W., O'Donoghue, P. E., & Leen, S. B. (2019). A review of the integrity of metallic vehicle armour to projectile attack. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design Applications*, 233(1), 73-94. doi:<https://doi.org/10.1177/1464420718759704>
- Mohotti, D., Ngo, T., & Mendis, P. (2011). Numerical simulation of impact and penetration of ogival shaped projectiles through steel plate structures.
- Palta, E., Gutowski, M., & Fang, H. (2018). A numerical study of steel and hybrid armor plates under ballistic impacts. *International Journal of Solids Structures*, 136, 279-294. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2017.12.021>
- Peng, L., Tan, M., Zhang, X., Han, G., Xiong, W., Al Teneiji, M., & Guan, Z. (2022). Investigations of the ballistic response of hybrid composite laminated structures. *Composite Structures*, 282, 115019. doi:<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.115019>
- Popławski, A., Kędzierski, P., & Morka, A. (2020). Identification of ArmoX 500T steel failure properties in the modeling of perforation problems. *Materials Design*, 190, 108536. doi:<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.108536>
- Rathod, S., Khaire, N., & Tiwari, G. (2022). A comparative study on the ballistic performance of aramid and aluminum honeycomb sandwich structures. *Composite Structures*, 299, 116048. doi:<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2022.116048>
- Senthil, K., & Iqbal, M. A. (2021). *Prediction of superior target layer configuration of armour steel, mild steel and aluminium 7075-T651 alloy against 7.62 AP projectile*. Paper presented at the Structures. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2020.06.010>
- SSAB. (2024). https://www.ssab.com/api/sitecore/Datasheet/Get?key=e95fe73946d64960a9c462504235f6bd_tr-tr/ Accessed 24.05.24.
- Stewart, J. K. (1985). Ballistic resistant protective materials—NIJ standard 0108.01. Washington: National Institute of Justice.
- Tepeduzu, B., & Karakuzu, R. (2019). Ballistic performance of ceramic/composite structures. *Ceramics International*, 45(2), 1651-1660. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.10.042>
- Zhang, Q. N., Zhang, X. W., Lu, G. X., & Ruan, D. (2018). Ballistic impact behaviors of aluminum alloy sandwich panels with honeycomb cores: An experimental study. *Journal of Sandwich Structures & Materials*, 20(7), 861-884. doi: <https://doi.org/10.1177/1099636216682166>



Kahramanmaraş Sutcu Imam University

Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 13.06.2024
Kabul Tarihi : 19.07.2024

Received Date : 13.06.2024
Accepted Date : 19.07.2024

ENHANCING THERMAL PROPERTIES OF FIBER-REINFORCED POLYMER COMPOSITES TO BE USED IN BATTERY CASINGS: A REVIEW

BATARYA MUHAFAZLARINDA KULLANILABİLEN ELYAF TAKVİYELİ POLİMER KOMPOZİTLERİN ISIL ÖZELLİKLERİNİN İYİLEŞTİRİLMESİ HAKKINDA BİR DERLEME

Orhun Cem GÖKCİLER¹ (ORCID: 0009-0005-9281-2077)
Necdet GEREN¹ (ORCID: 0000-0002-9645-0852)

¹ Çukurova University, Mechanical Engineering Department, Adana, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Orhun Cem GÖKCİLER ocgokciler@cu.edu.tr

ABSTRACT

Fiber-reinforced polymer composites, particularly those reinforced with carbon fiber, hold significant promise for use in battery casings. Since the performance of the batteries of electric and hybrid vehicles is highly dependent on the operating temperature, the thermal management system of the battery pack is essential. For this thermal management to be efficient, the battery enclosure must have sufficient thermal conductivity and thermal diffusivity values. However, most of the fiber-reinforced polymer composite materials have poor thermal properties. Thus, it is necessary to increase the thermal conductivity and thermal diffusivity values of such materials. In this paper, studies that have succeeded in increasing the thermal properties of fiber-reinforced polymer composites by applying different methods have been examined. The methods and obtained results are reviewed and discussed. Also, some suggestions are given to the potential applicators. Therefore, the most applicable methods, to enhance the thermal properties of the composite battery cases, can be determined and compared with one another.

Keywords: Composites, thermal conductivity, thermal diffusivity, battery case

ÖZET

Fiber takviyeli polimer kompozitler, özellikle karbon fiber ile güçlendirilmiş olanlar, batarya muhafazalarında kullanım için umut vaat etmektedir. Elektrikli ve hibrit araçların bataryalarının performansı büyük ölçüde çalışma sıcaklığına bağlı olduğundan, batarya paketinin termal olarak yönetilmesi zorunludur. Bu termal yönetimin verimli olabilmesi için batarya muhafazasının yeterli termal iletkenlik ve termal difüzyon hızı değerlerine sahip olması gerekir. Ancak, elyaf takviyeli polimer kompozit malzemelerin çoğu zayıf termal özelliklere sahiptir. Bu nedenle, bu tür malzemelerin ısı iletkenlik ve ısı yayılım değerlerinin artırılması gerekmektedir. Bu makalede, farklı yöntemler uygulayarak elyaf takviyeli polimer kompozitlerin ısı özelliklerini artırmayı başaran çalışmalar incelenmiştir. Yöntemler ve elde edilen sonuçlar gözden geçirilmiş ve tartışılmıştır. Ayrıca, potansiyel uygulayıcılara bazı önerilerde bulunulmuştur. Böylece, batarya kutularının ısı özelliklerini geliştirmek için en uygulanabilir yöntemler belirlenip birbiriyle karşılaştırılabilecektir.

Anahtar Kelimeler: Kompozitler, ısı iletkenlik, ısı yayılım, batarya kutusu

INTRODUCTION

The use of fiber-reinforced polymer composites (FRPC) is increasing, almost in every sector. Due to, their high strength and high elastic modulus combined with their low weight, FRPCs are widely used in the automotive, marine, aircraft, defence, energy industries, and sports equipment (Şen et al., 2010). In particular, carbon fiber reinforced polymer (CFRP) composites have been increasingly used in recent years due to their high modulus of elasticity (E) / density (ρ) and strength (σ) / density (ρ) ratios. In order to better understand the advantages of such materials over conventional materials, the material selection chart that is prepared by Michael F. Ashby is given in Figure 1. The high specific strength and high specific modulus of the CFRP composites can be observed in the next figure.

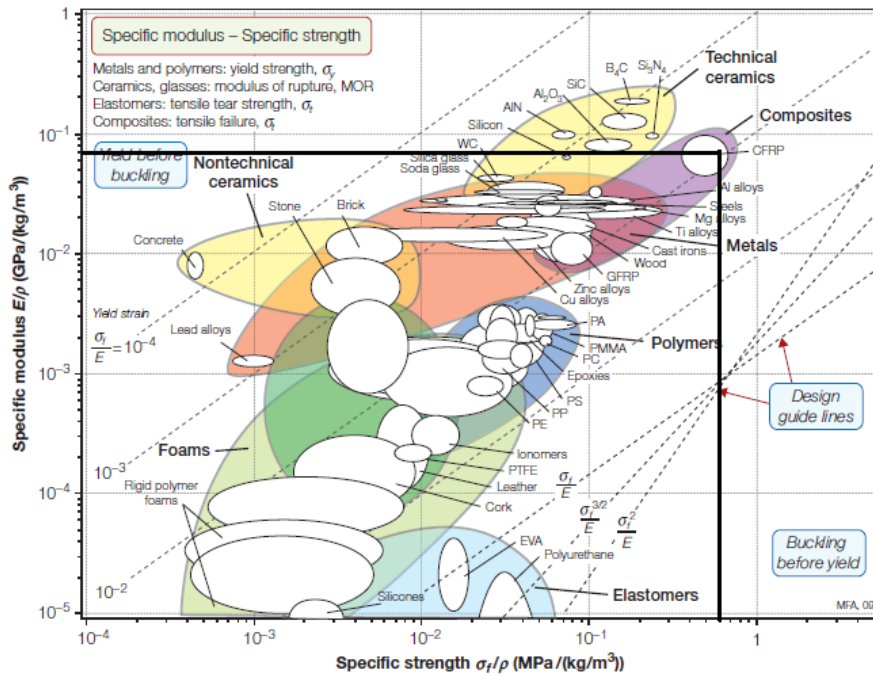


Figure 1. Specific Modulus-Specific Strength Chart (Ashby, 2011)

In addition to the above-mentioned areas of use, another area where CFRP materials can be used is in the battery case of electric vehicles (EVs) and hybrid vehicles (HVs). In terms of specific energy absorption (amount of energy per unit mass), CFRP composites have superior collision energy absorption capability as well as low weight compared to metallic materials such as steel and aluminium. Due to these advantageous properties, CFRP materials have become the preferred choice for battery cases in the past decade, such as in the BMW i3 electric vehicle (Pety et al., 2017).

Another advantage of forming the battery case of an EV or HV from CFRP is the property of electromagnetic interference (EMI) (Luo & Chung, 1999). Since the battery pack is located under the driver and the passengers, it is very advantageous if the battery housing has electromagnetic interference properties, such as CFRP composite. Also, the danger of the thermal runaway fire is another issue that cannot be ignored in battery package technology. When this issue is considered, the superior thermal runaway performance of such composites, than aluminium and steel, makes them a greater candidate as the battery casing material (E-mobility, 2024).

Besides the highly advantageous properties mentioned above, the thermal conductivity and thermal diffusivity of CFRP composites are very low. In order to use CFRP composites efficiently in battery casing, it is necessary to increase these unfavourable thermal values by making various modifications to the CPRP material. Because, despite the advantages of lithium-ion (Li-ion) batteries, which are widely used in electric vehicles, such as long life, reliability, high energy density, wide voltage window, fast charge/discharge rates, relatively wide operating temperature range, and practical battery pack design, the optimum operating temperature energy efficiency is between 10 °C and 40 °C (Biswas et al., 2022; H. Lee et al., 2019; F. Zheng, et al., 2017). In addition, when electric vehicles are operated in very cold or very hot climatic conditions, or when one or more of the batteries in the battery pack are damaged, the pack must be thermally managed.

In order to increase the thermal conductivity of the CFRP battery case, Chan et al. produced CFRP composites to be used as high-energy storage devices and improved the conductivity of the polymer structure by mixing nanoparticles such as gold and graphene oxide into the epoxy matrix material at a rate of 1 wt% (Chan et al., 2019). The high cost of this study should be emphasized. Because the materials such as, gold and graphene oxide are used as the nano-filler material. The superior thermal conductivity of these two filler materials cannot be discussed. However, their high costs make this approach less attractive. As a different approach that aims to improve the thermal management of the battery pack, Pety et al. designed a sandwich structure by placing the battery cells between micro-vascular carbon/epoxy plates and thus achieved both volume and weight gain (Pety et al., 2017). In this study, the coolant fluid flows within the micro-vascular channels that are embedded within the CFRP composite layers without any additional piping. Thus, the handicaps that are related with additional piping systems such as; extra weight, extra maintenance cost, increased failure possibility, and more material consumption can be ignored.

As mentioned above, the usage of FRPC materials, including battery case technology, is increasing, but their low thermal conductivity and low thermal diffusivity values limit their usage. For example, the thermal conductivity of glass fiber-reinforced polymer composites, which are widely used in almost every sector, is 0.20-0.25 W/mK (AYGÜN, 2020). Also, the thermal conductivity of CFRP composites measured at room temperature is approximately 0.630 W/mK, and the thermal diffusivity is 0.485 mm²/s (Thermtest Instruments, 2020). As can be seen, even though carbon fiber is used as fiber reinforcement material with a thermal conductivity value of up to 800 W/mK, the composite material has shown almost insulating properties (X. Zhang et al., 2000).

This low thermal conductivity and thermal diffusivity of CFRP composites is mainly due to the insulating properties of the polymers used as matrix material. It is seen in Table 1, how low the thermal conductivity and thermal diffusivity of the polymers used as matrix materials in FRPCs are when they are used in pure form. For this reason, the majority of the studies carried out to increase the thermal conductivity are studies aimed at increasing the thermal conductivity of the matrix material.

Table 1. Thermal Conductivity And Thermal Diffusivity Values Of Some Matrix Polymers (Takezawa et al., 2003; Tavman, 2015)

Polymer Matrix	Thermal Conductivity (W/mK)	Thermal Diffusivity (mm ² /s)
Low density polythene	0.28-0.32	1.70 x 10 ⁻⁷
High density polythene	0.38-0.58	2.73 x 10 ⁻⁷
Epoxy resin	0.17-0.21	1.57 x 10 ⁻⁷
Polypropylene	0.18-0.24	0.96 x 10 ⁻⁷
Poly Vinyl Chloride	0.16-0.20	1.225 x 10 ⁻⁷

In order to increase the thermal conductivity and thermal diffusivity of the polymer matrix, the nano and micro-sized fillers are added within the polymer matrix. These conductive fillers, used in various studies, can be graphene, carbon-fiber, ceramic or metal alloys (Han & Fina, 2011). Each type of filler has its advantages and disadvantages. For example, metals such as, gold and copper have very high thermal conductivity. However, most of the metals significantly, increase the weight of the polymer matrix material.

There are many studies on FRPC materials containing metal fillers, but such fillers are generally not preferred, because they increase the weight of the material even though their electrical conductivity is high (Kumlucaş et al., 2002). On the other hand, ceramics such as aluminium nitride (AlN), boron nitride (BN), and silicon carbide (SiC) have a wide range of applications due to their high thermal conductivity, low weight, and electrical resistance (Ishida et al., 2005).

The most common and advantageous filler types are carbon-based fillings which show high thermal conductivity and low weight. In particular, graphene fillers are highly favoured due to their high thermal conductivity, accessibility, and relatively low price (Tu & Ye, 2009). Thermal conductivity and thermal diffusivity values of widely used conductive filling types are given in Table 2.

The direction in which thermal conductivity and thermal diffusivity are improved is very important in terms of using the material in the correct application. In most of the studies, thermal conductivity and thermal diffusivity have been investigated in two directions, through the thickness direction (Zhang et al., 2019) and the in-plane direction (Yu et al., 2017). The direction, in which the thermal improvement will be made, depends on the field of

use. While some studies focus on improving thermal properties in one direction only, there are also studies in the literature that provide thermal improvement in both directions.

Table 2. Thermal Conductivity And Thermal Diffusivity Values Of Some Filling Materials Used In FRPC At 25 °C (Martin-Gallego et al., 2011; Tavman, 2015)

Filler Type	Thermal Conductivity (W/mK)	Thermal Diffusivity(mm ² /s)
Carbon (amorphous)	6 - 174	216.5 x10 ⁻⁶
Carbon nano-tube	2000-5000	30 x 10 ⁻²
Graphene	5300	80-90
Gold	345	1.27 x 10 ⁻⁴
Copper	483	1.11 x 10 ⁻⁴
Aluminium	204	8.42 x 10 ⁻⁵
Zinc	116	4 x 10 ⁻⁵

This paper presents the methods and results of various studies that aim to increase the thermal conductivity and thermal diffusivity of FRPC materials to be used in battery packs of EVs and HVs. Studies with similar approaches are examined under the same topic and the results, advantages, and disadvantages of the studies are presented. The discussions and comparisons of these studies are given in the following sections. Comparisons and proper selections can be made due to this paper with respect to the application and availability of the materials.

THE USE NANO AND MICRO PARTICLE FILLERS

The most widely used method to increase thermal conductivity and thermal diffusivity in FRPC materials is to apply high thermal conductivity fillers in nano-micro sizes into the matrix material or on the surface of the fabric. These fillers are applied randomly regardless of their positions. By applying the fillers into the polymer matrix material or on the fabric surface, a heat transfer path is created in which heat transfer can take place quickly and efficiently. Thus, the thermal properties of the material are improved. These studies differ according to the type, geometry, size, and application method of the filling material. For example; Zheng et al. (2019) aimed to increase the thermal conductivity of FRPC material by applying copper (Cu) and hexagonal-boron nitride (hBN) particles to the surface of carbon fiber fabric by using the electrophoretic deposition method (Figure 2). Some copper-coated carbon fabric samples used in this study were subjected to heat treatment in an electric furnace at temperatures of 300 °C, 400 °C, and 500 °C to remove the oxidation risk and any impurities in the coating. In order to make comparisons, thermal measurements of carbon fiber epoxy composite (CFEC) materials that have undergone different treatments, as well as an untreated CFEC sample used as a reference sample, were also performed. In addition, a tensile test was applied to the treated samples and the reference sample to observe whether the electrophoretic deposition method has an effect on the mechanical properties of the material. As a result; it is reported that this method increases the thermal conductivity and thermal diffusivity of CFECs, the thermal conductivity increases as the deposition process increases, and the heat treatment applied before the deposition process and the increase in the heat treatment temperature, positively affect the thermal conductivity of the material. However, a decrease in the tensile strength of the samples subjected to electrophoretic deposition was detected. Table 3 and Table 4 were prepared in order to observe the results more clearly.

As can be seen from Table 4, a higher amount of filler provides greater thermal conductivity in both directions. However, it must be remembered that the metal fillers such as Cu and BN greatly increase the weight of the structure. Therefore the optimum amount of filler material should be applied to the structure. Also, the time of the electrophoretic deposition and the temperature of the heat treatment process positively affect the thermal conductivity in both directions.

In another study by Lee et al. (2019), it was aimed to increase the thermal conductivity in the thickness direction by placing inorganic crystals between the layers of FRPC. For this purpose, aluminium (Al), magnesium (Mg), and copper (Cu) crystals were used to create a heat transfer path between the FRPC layers (Figure 3). The thermal conductivity increased as a result of placing inorganic crystals in different ratios between the layers. The highest thermal conductivity value measured throughout the thickness was obtained with the use of magnesium with a weight ratio of 0.01 wt% with an increase of 87%. In addition, the effect of inorganic crystals on the flexural

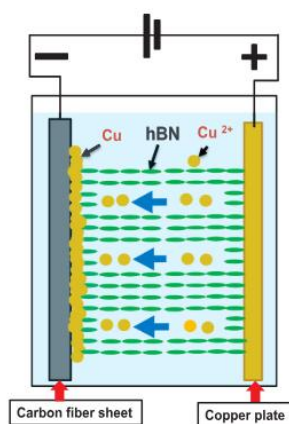
strength of the material was measured by a three-point bending test and it was observed that the presence of these crystals increased the flexural strength. Although this method does not increase the thermal conductivity at a high rate, it is an important candidate in the literature with its easy applicability and positive effect on flexural strength. In addition, these types of metal fillers such as Al, Mg and Cu have relatively lower price than other fillers like graphene or gold. This feature can be emphasized as another important advantage of this method, particularly for the appliers who are searching for a cheap solution.

Table 3. Sample Names And Characteristics (Zheng et al., 2019)

Sample Names	Time of the Electrophoretic Deposition (h)	Temperature of the Heat Treatment Process (°C)
CF	-	-
BCC1	1	-
BCC1.5	1.5	-
BCC2	2	-
BCC3	3	-
BCC_300	3	300
BCC_400	3	400
BCC_500	3	500

Table 4. Thermal Conductivity Of The Specimens (Zheng et al., 2019)

Specimen	hBN/Cu Coating(vol %)	Through Plane Thermal Conductivity (W/m.K)	In-plane Thermal Conductivity(W/m.K)
Epoxy/CF	-	0.68 ± 0.01	4.18 ± 0.03
Epoxy /BCC1	9.59	1.24 ± 0.01	4.90 ± 0.02
Epoxy /BCC1.5	12.42	1.44 ± 0.01	5.02 ± 0.03
Epoxy /BCC2	14.09	1.68 ± 0.02	5.15 ± 0.03
Epoxy /BCC3	18.34	1.95 ± 0.03	5.48 ± 0.03
Epoxy /BCC_300	18.32	1.98 ± 0.02	5.61 ± 0.03
Epoxy /BCC_400	15.56	2.14 ± 0.03	5.77 ± 0.03
Epoxy /BCC_500	11.86	2.16 ± 0.03	6.14 ± 0.03

**Figure 2.** Schematic View Of The Electrophoretic Deposition Method (Zheng et al., 2019)

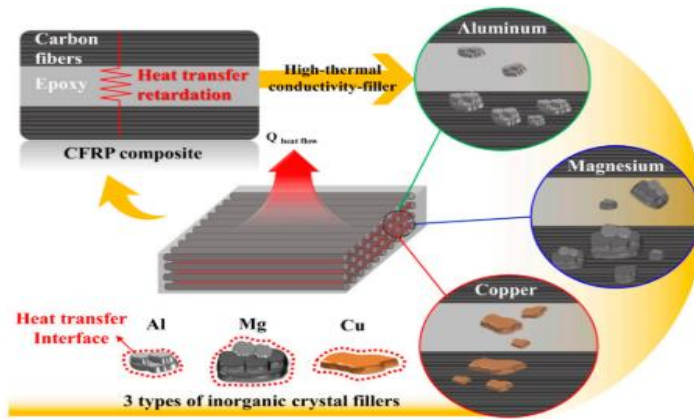


Figure 3. Schematic Representation Of The Study By Lee et al. (2019)

Another study, by Barani et al. (2020), aimed to increase the thermal conductivity and thermal diffusivity of epoxy, directly, by adding graphene and copper nano-particle fillers to epoxy at different ratios. This type of filling is called binary filler, and a relatively high thermal conductivity value of $13.5 \pm 1.6 \text{ W / mK}$ can be obtained when using 40% graphene and 35% copper in weight ratio. In addition to the successfully increased thermal conductivity, the thermal diffusivity of the FRPC material has also increased significantly. This study stands out in the literature, with its high thermal conductivity value, its positive effect on thermal diffusivity, and its relatively easy applicability.

In another research, Yan et al. (2019), aimed to increase thermal conductivity by mixing micro- Al_2O_3 , silicon-based nano-particles (SiO_2), and carbon nano-tube fillers into epoxy resin at different ratios.

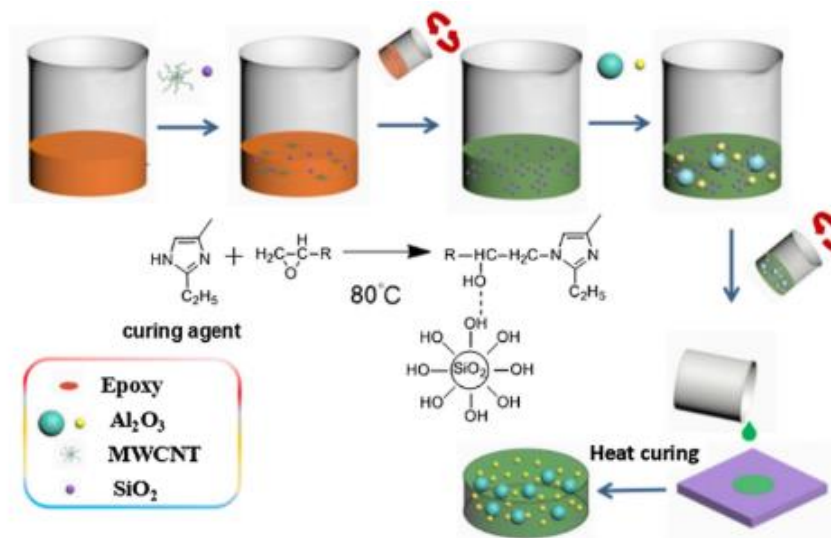


Figure 4. Schematic Representation Of The Mixing Process In The Study By Yan et al. (2019)

Enhanced Thermal Stability by using Nano /Micro Fillers

In some studies, micro/nano particle fillers directly mixed into epoxy. It has been observed that in addition to thermal conductivity and thermal diffusivity, thermal stability has also been improved. For example; In a study carried out by Uzay (2022a), cubic boron-nitride (c-BN) nano-particles were dispersed into epoxy at different ratios to increase the tensile and impact strength of the composite structure. During this study, it was found that the presence of c-BN particle fillers increased the glass transition temperature by 16.09% to 21.14% and accordingly improved the thermal stability of the composite material. Another study performed by Uzay et al. (2022) aimed to reinforce the epoxy polymer matrix by adding carbon nano-tubes (CNTs) doped with graphene nano-platelets (Gr) to epoxy polymers. In addition to ascension in the micro-hardness of the structure increased thermal stability and high enthalpy values were obtained according to thermal analyses. The effects of nano-fillers on the thermal

properties of epoxy composites with micro- Al_2O_3 particles are investigated by Gao & Zhao (2014). In this study, specially synthesized nano-fillers and micro- Al_2O_3 particles were utilized as thermally conductive fillers in the epoxy composite to achieve improved thermal properties. In addition to improved thermal conductivity, the density of epoxy composites with the synthesized nano-fillers was decreased and the corresponding thermal stability was enhanced.

In the last article to be analysed under this sub-topic; the effects of magnesium oxide (MgO) micro-particles on the mechanical and thermal properties of laminated carbon fiber-reinforced polymer composites are investigated by Uzay (2022b). In this study, the polymer epoxy matrix was modified with 0% (pure), 2 wt%, and 4 wt% Magnesium oxide (MgO) fillers. Then the laminar composites were manufactured with the vacuum bag method. The entire manufacturing scheme is given in Figure 5. The thermal performance of the polymer composites with and without MgO additives was analysed comparatively by performing the thermo-gravimetric analysis (TGA) and differential scanning calorimeter (DSC). The TGA and DSC instruments revealed that the decomposition temperatures increased and curing behaviours improved depending on the MgO content. As can be seen from all these studies under this sub-topic, not only thermal conductivity and thermal diffusivity but also the thermal stability of the FRPCs can be improved by using micro/nano-sized fillers. This enhanced thermal stability emphasized the positive effects of the micro/nano-fillers on the thermal properties of the FRPCs.

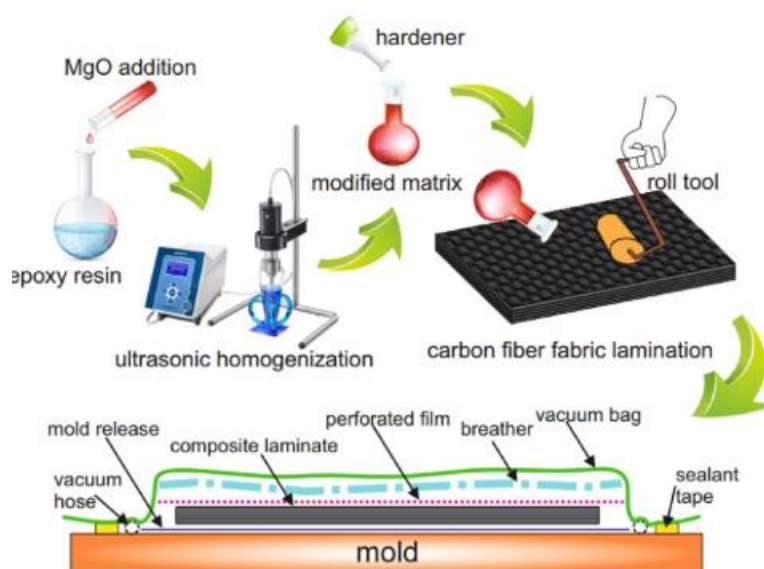


Figure 5. Schematic View Of The MgO Filled Laminar Fiber Reinforced Polymer Composite Manufacturing (Uzay, 2022b)

THE USE OF 3D STRUCTURES

In many studies to increase the thermal conductivity of FRPC materials, structures where heat transfer can take place efficiently are added to the composite material. These structures are usually created in the through-thickness direction. These three-dimensional structures are formed from materials with high thermal conductivity, then added to the matrix material or woven between the fibers in different forms.

For example; Ouyang et al. aimed to increase the thermal conductivity both through the thickness and through the plane by weaving high conductivity Cu and graphene films (HOGF) into the material (Figure-6) (Ouyang et al., 2022). AF represents the adhesive film in the next figure. In addition, the effect of these thermal films on the interlayer shear strength was also investigated. The results of 49.19 W/mK using graphene film with a volume fraction of 1.97% and 21.45 W/mK using copper film with a volume fraction of 1.74% are the highest values obtained in this study. These thermal conductivity values are 11029% and 4753% higher than the thermal conductivity of a standard CFRP material, respectively, and these results demonstrate the success of the study. However, the presence of these thermal films reduced the interlayer shear strength by 13-19%.

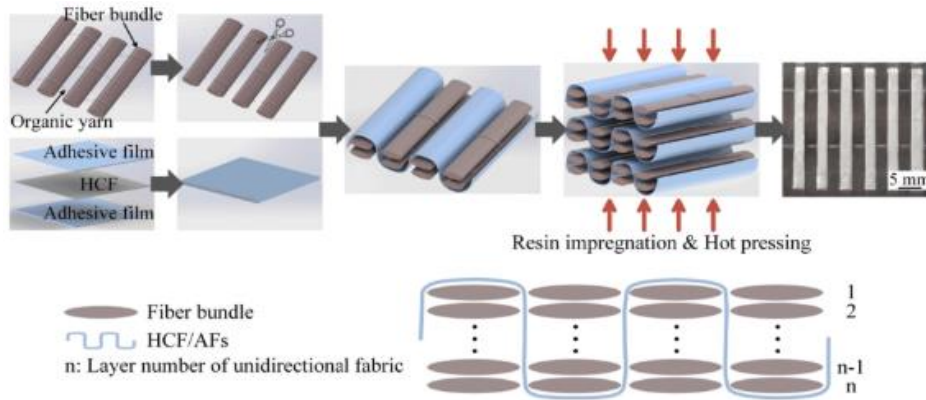


Figure 6. Schematic Representation Of The Study By Ouyang et al. (2022)

In another finding obtained in this study, it was determined that the thermal conductivity increased along the thickness but decreased along the plane as the number of curls (waves) of the thermal film between the fibers increased. Thermal conductivity graphs obtained for different samples are shown in Figure 7 for a better explanation of the obtained results. When these results are examined; CFRP is carbon fiber reinforced polymer, HCF is Highly Conductive Film and CF is the carbon fiber fabric, and the expression HCF/KF_n, n, represents the number of layers of carbon fiber woven with each film. Therefore, a higher 'n' indicates that the thermal film has more curl. As can be seen from the results, the thermal conductivity of the material increases, significantly, as the 'n' value increases. However, it should be emphasized that the construction of such a composite is very hard to apply and requires skilled operators and sensible manufacturing machines. Although the thermal conductivity is considerably improved, the applicator should consider this disadvantage.

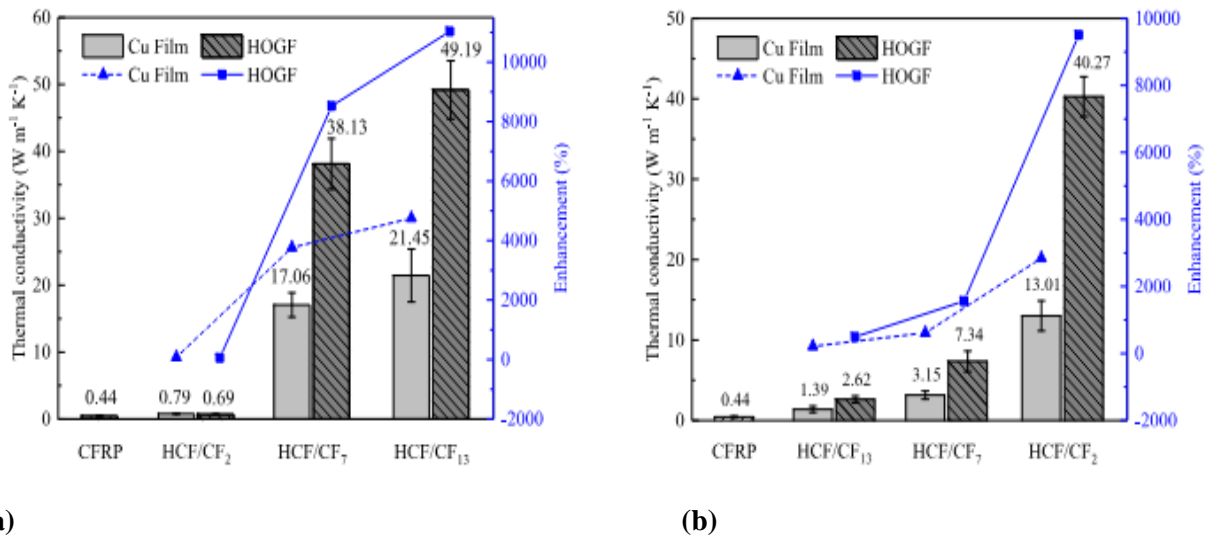


Figure 7. Results Of The Study By Ouyang et al. (2022) **a.** Thermal Conductivity Values Measured Through-Thickness **b.** In-plane Directions

As another example, in the study performed by Yu et al. (2016) a three-dimensional structure was created to increase the thermal conductivity of FRPC material through the thickness, where heat conduction can efficiently take place. Copper z-fillers and aluminium foil materials were used for this process (Figure 8). Due to this process, the thermal conductivity value in the thickness direction increased by 12 times. The diameters of the copper z-fillers were selected as 2, 4, and 6 mm and the highest thermal conductivity value of 7.6 W/mK was obtained when z-fillers with a diameter of 2 mm were used. In addition, a tensile test was applied to the specimens to understand the effect of copper z-fillers on the mechanical properties of the composite material. It was observed that the z-fillers negatively affected the tensile strength and Modulus of Elasticity of the material. The main reason for this is that the copper fillers added to the structure cause twisting of the adjacent fibers. Although the thermal conductivity is considerably improved, the noticeable decrease in mechanical properties is a major handicap of this study.

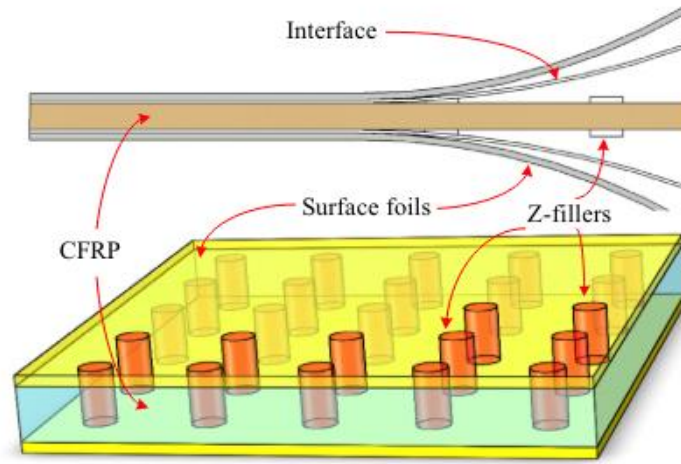


Figure 8. Schematic Representation Of Specimens Produced In The Study By Yu et al. (2016)

In another study examined under this topic, Schuster et al. (2008), aimed to increase the thermal conductivity of FRPC material both analytically and experimentally. It was aimed to increase the thermal conductivity of FRPC material with fibers with high thermal conductivity value, especially copper, weaved through the thickness. During this study, it was observed that the thermal conductivity increased as the number of conductive fibers increased, up to a value of 6.7 W/mK. Although a significant increase in thermal conductivity is achieved, it is quite difficult to construct such a composite, which is schematically shown in Figure 9.

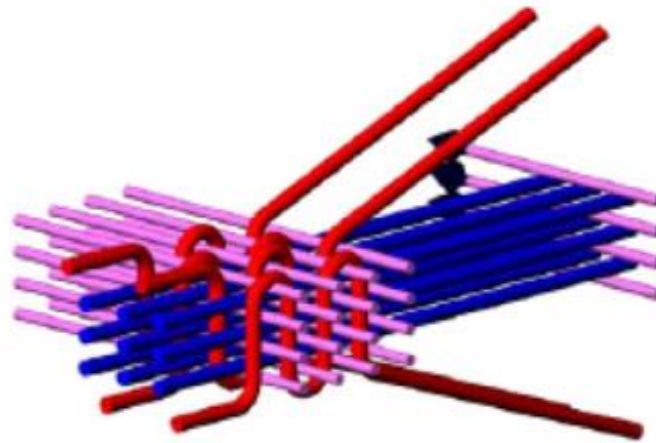


Figure 9. Schematic Representation Of The Composite Structure (Schuster et al., 2008)

In addition to the three-dimensional structures created to increase the thermal conductivity of the FRPC material described above, some studies in the literature have focused on increasing the thermal conductivity of the polymer matrix material directly by creating three-dimensional structures in the polymer. In a study conducted for this purpose, a continuous structure was formed in the polymer matrix by using materials with high thermal conductivity such as graphene, carbon nano-tubes, boron nitride, or metal (Zhang et al., 2020).

As another example; In the study by Ye et al. (2018), it was reported that the thermal conductivity of epoxy increased by 891% by forming a three-dimensional diamond structure into the epoxy matrix. As a result of this study, the thermal conductivity value of epoxy increased up to 2.28 W/mK when the three-dimensional structure was used at 1.2 wt%. Significant improvement has been achieved in this study. However, the high cost of diamonds creates a major disadvantage to the application of this approach. In another study by An et al. (2018), aiming to increase the thermal conductivity of epoxy polymer by using a three-dimensional structure, the thermal conductivity was increased to a very high value of 35.5 W/mK by using 35 wt% of three-dimensional graphene structure. This high increase of 16805% in thermal conductivity makes this study one of the highlights. The same graphene structure, when used at 0.92% by volume, Lian et al. (2016), obtained a thermal conductivity increase of

1231%. It is also possible to create these three-dimensional structures by combining two different materials. For example; An et al. (2018), succeeded in increasing the thermal conductivity value of epoxy polymer material up to 11.01 W / mK with the three-dimensional structure formed by using graphene and boron nitride (BN) at 44 wt%. In another study by Tian et al. (2018), using only a three-dimensional BN structure, it was reported that the thermal conductivity of epoxy polymer material increased by 2780%. A thermal conductivity value of 5.19 W/mK was obtained with 24.4 wt% BN.

As can be seen, when graphene is used in the formation of a three-dimensional structure, the thermal conductivity increases at a high rate. Although so far, only studies using epoxy as the matrix material have been mentioned, significant increases in thermal conductivity and thermal diffusivity values have been observed in studies where three-dimensional graphene structure is formed in polyamide material or in the phase change materials (PCM) (Loeblein et al., 2015; Yang et al., 2018; Yang et al., 2016).

Different types of materials have been considered and reviewed, in several studies that are used to improve the thermal properties of the FRPCs. When all of the studies are considered, graphene shows higher improvements than other candidates.

THE USE OF CHEMICAL METHODS

Other types of methods of increasing the thermal conductivity of FRPC materials that can be used in the battery case of the EVs and HVs are examined under the main topic of 'chemical methods'. When other methods are considered, chemical methods, which are more difficult to apply and have relatively lower efficiency, are not preferred as much as other methods due to these disadvantages. Although such methods are not used as frequently as nano-micro fillers and three-dimensional structures, they are encountered in some studies of the literature.

For example, in a study by Liang et al. (2013), it was aimed to increase thermal conductivity by forming carbon nano-fibers (CNF) directly on the carbon-fiber fabric, using the chemical vapour deposition method (Çoşğun et al., 2021). In addition, as another approach in this study, the thermal conductivity value was measured by mixing CNF fillers directly into epoxy resin. According to the maximum results obtained, an increase of 30% in the thermal conductivity in the thickness direction was obtained when CNFs formed directly on the carbon-fiber fabric were used, and an increase of 10% in the thickness direction was obtained when CNF fillers were mixed into the epoxy resin. In addition, the presence of CNF fillers did not show an improvement in thermal conductivity along the plane, while CNFs formed directly on the carbon-fiber fabric caused an increase in thermal conductivity both in-thickness and along the plane. However, the increase in thermal conductivity is lower than both the studies conducted with nano-micro fillers and the studies conducted by forming three-dimensional structures. The image of the CNF structures on the fibers was imaged by scanning electron microscopy (SEM) and the detailed image of the CNF was imaged by transmission electron microscopy (TEM) (Figure 10).

In the second and final study to be analysed under this main topic is the one presented by Yu et al. (2021). They presented an environmentally friendly, low-cost, and highly efficient method to improve the thermal conductivity of carboxylated acrylonitrile-butadiene rubber (XNBR) matrix by non-covalent-modification-of-boron-nitride (BN) using tannic acid (TA) chemistry. The best result obtained as a result of the study was the value of 0.42 W/mK obtained by using 30% BN-TA-XNBR by volume. This value corresponds to 260% of the thermal conductivity value of pure XNBR with a thermal conductivity of 0.16 W/mK. The fact that this study is environmentally friendly and cost-effective compared to others, has enabled it to be included in this paper.

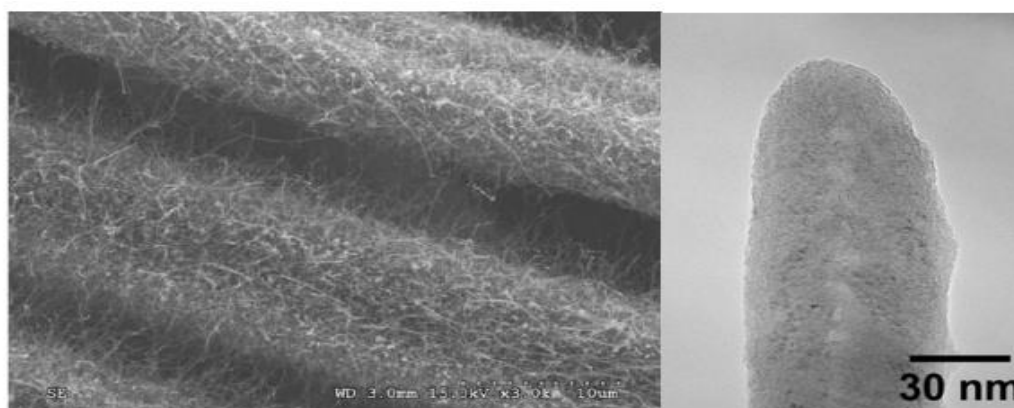


Figure 10. a. SEM Image Of CNF Structures On Fibres b. TEM Image Of CNF Structures (Liang et al., 2013)

DISCUSSION

The methods for enhancing the thermal properties of FRPCs that can be integrated into the battery enclosures of the EVs/HVs are reviewed and proposed in this paper. The methods that are based on similar approaches are categorized under the same topic. In this section all methods will be generally discussed and compared with each other.

Nano-micro fillers found to stand out with their superior features. Due to their properties of; relatively low cost, easy applicability, and the availability of the filler materials. Such fillers also provided a significant increase in the thermal conductivity of the composites. These studies, which do not require an advanced production method and high cost, are the first methods that come to mind in many studies aiming to increase thermal conductivity. In addition, nano and micro fillers are suggested to the applicators who are willing to increase the thermal properties of the FRPC materials easily, quickly, and without any high cost. A study that is examined under the topic of nano/micro fillers, stands out due to obtained high thermal conductivity (Barani et al., 2020). They used copper-graphene filler materials called binary fillers and obtained significant thermal conductivity improvement. The value of 13.5 ± 1.6 W/mK obtained in this study is considerably higher than other studies involving nano-micro particle fillers. This study emphasizes the importance of the usage of binary filler structures to enhance the thermal properties of the FRPCs.

In the studies aiming to increase thermal conductivity, many of the studies with the best results were grouped under the title of three-dimensional structures. In all of the studies that are examined under the title of nano-micro fillers, the fillers were applied randomly into the matrix material or on the fabric surface, regardless of their position. On the other hand, since the three-dimensional structures are not applied randomly, but to create a path where heat transfer can take place efficiently, the thermal conductivity values obtained are higher than the studies under the other topics. The construction of the 3D structures creates a heat transfer path within the composite. Due to this pathway, the heat can flow efficiently within the composite layers and the insulation property of the polymer matrix is no longer a problem for thermal applications. Since the created heat transfer path is not random, such methods can be used in special applications. For instance, the thermal properties of only one part of the composite material can be improved while the rest can be kept. In recent years, three-dimensional conductive structures have been formed using graphene fibers. In addition to the thermal conductivity of graphene of 5300 W/mK, their low-density values of 230 kg/m³ when used in fiber form, make these materials the first candidate that comes to mind in the creation of conductive three-dimensional structures (Martin-Gallego et al., 2011; Venkateshalu & Grace, 2020). In particular, the study by An et al. (2018), which succeeded in increasing the thermal conductivity by 16805% by using the three-dimensional graphene structure by 35% by weight of the matrix, shows how much such three-dimensional structures can increase the thermal conductivity.

The studies analysed under the chemical methods are the least preferred methods to increase the thermal properties of the composites. Because they require advanced chemical technology, are difficult to apply, and have relatively less effect on thermal conductivity. However, they offer a more environmentally friendly perspective compared to other methods.

As can be seen from most of the studies, graphene is the first candidate that comes to mind when the enhancement of the thermal properties of the FRPCs is the issue. If the cost matters and the very high thermal conductivity values are not necessary, metal fillers such as Cu, Al, and Mg, should be used. However, this paper is focused on the FRPCs that have the potential to be used in the battery enclosures the weight of the filler material becomes a very important aspect. Because the increase in any weight of the EV/HV increases power consumption and reduces the range and performance of the batteries. Thus, metal fillers are not the right answer for increasing the thermal properties of the FRPCs that are used in the battery case. The applicator or the manufacturer should consider every aspect from cost, weight, availability, and applicability while selecting the proper method to improve the thermal properties of such composites

CONCLUSION

The use of EVs and HVs is increasing day by day. Due to this increase, efficient use of vehicle batteries is very important. In this article, the advantages of using FRPC materials in battery case designs are discussed. In addition, the low thermal conductivity and thermal diffusivity properties of FRPCs, which are a major disadvantage of FRPCs, are mentioned. It is stated that these thermal properties limit the use of such materials and these properties should be improved in order to use such composites in the battery casings of EVs and HVs.

The studies under the same main topics in this article are based on similar methods. Each study has its own advantages and disadvantages. Which method to choose may differ according to the field application.

The main purpose of this article is to present the promising studies that have succeeded in increasing the thermal properties (thermal conductivity, thermal diffusivity and thermal stability) of FRPC materials with different methods and to provide a comparison with each other by gathering the numerical data they have obtained under a single framework.

REFERENCES

- An, F., Li, X., Min, P., Li, H., Dai, Z., & Yu, Z.-Z. (2018). Highly anisotropic graphene/boron nitride hybrid aerogels with long-range ordered architecture and moderate density for highly thermally conductive composites. *Carbon*, 126, 119-127. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2017.10.011>
- An, F., Li, X., Min, P., Liu, P., Jiang, Z.-G., & Yu, Z.-Z. (2018). Vertically aligned high-quality graphene foams for anisotropically conductive polymer composites with ultrahigh through-plane thermal conductivities. *ACS applied materials & interfaces*, 10(20), 17383-17392. DOI: 10.1021/acsami.8b04230.
- Ashby, M. F. (2011). *Materials Selection in Mechanical Design* (4th ed.). ISBN 978-1-85617-663-7
- AYGÜN, H. H. (2020). Lif Açma İşleminin Cam Elyaf Takviyeli Epoksi Kompozitlerin Mekanik ve Yalıtım Özellikleri Üzerindeki Etkisi. *Tekstil ve Mühendis*, 27(118), 75-83. <https://doi.org/10.7216/1300759920202711803>
- Barani, Z., Mohammadzadeh, A., Geremew, A., Huang, C. Y., Coleman, D., Mangolini, L., Balandin, A. A. (2020). Thermal properties of the binary-filler hybrid composites with graphene and copper nanoparticles. *Advanced Functional Materials*, 30(8), 1904008. <https://doi.org/10.1002/adfm.201904008>
- Biswas, P. K., Liyanage, A. A. H., Jadhav, M., Agarwal, M., & Dalir, H. (2022). Higher strength carbon fiber lithium-ion polymer battery embedded multifunctional composites for structural applications. *Polymer Composites*, 43(5), 2952-2962. <https://doi.org/10.1002/pc.26589>
- Chan, K.-Y., Yang, D., Demir, B., Mouritz, A. P., Lin, H., Jia, B., & Lau, K.-T. (2019). Boosting the electrical and mechanical properties of structural dielectric capacitor composites via gold nanoparticle doping. *Composites Part B: Engineering*, 178, 107480. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107480>
- Çoşğun, A., Taşcıoğlu, A., & Yılmaz, G. (2021). İnce Film Üretiminde Kimyasal Buhar Biriktirme Yöntemi ve Çeşitleri. *Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 12(2), 351-363. <https://doi.org/10.29048/makufebd.861301>
- E-mobility, Batter Case Materials, (2024). <https://www.emobility-engineering.com/battery-case-materials/> Accessed 01.06.24.
- Gao, Z., & Zhao, L. (2015). Effect of nano-fillers on the thermal conductivity of epoxy composites with micro-Al₂O₃ particles. *Materials & Design (1980-2015)*, 66, 176-182. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.10.052>
- Han, Z., & Fina, A. (2011). Thermal conductivity of carbon nanotubes and their polymer nanocomposites: A review. *Progress in polymer science*, 36(7), 914-944. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2010.11.004>
- Thermtest Instruments, Discovering the Thermal Conductivity of Carbon Fiber, (2020). <https://thermtest.com/application/thermal-conductivity-of-carbon-fiber/> Accessed 01.06.24.
- Ishida, H., & Rimdusit, S. (1998). Very high thermal conductivity obtained by boron nitride-filled polybenzoxazine. *Thermochimica acta*, 320(1-2), 177-186. [https://doi.org/10.1016/S0040-6031\(98\)00463-8](https://doi.org/10.1016/S0040-6031(98)00463-8)
- Kumlutaş, D., Tavman, I. H., & Çoban, M. T. (2003). Thermal conductivity of particle filled polyethylene composite materials. *Composites science and technology*, 63(1), 113-117. [https://doi.org/10.1016/S0266-3538\(02\)00194-X](https://doi.org/10.1016/S0266-3538(02)00194-X)
- Lee, E., Cho, C. H., Hwang, S. H., Kim, M.-G., Han, J. W., Lee, H., & Lee, J. H. (2019). Improving the vertical thermal conductivity of carbon fiber-reinforced epoxy composites by forming layer-by-layer contact of inorganic crystals. *Materials*, 12(19), 3092. <https://doi.org/10.3390/ma12193092>

- Lee, H., Oh, P., Kim, J., Cha, H., Chae, S., Lee, S., & Cho, J. (2019). Advances and prospects of sulfide all-solid-state lithium batteries via one-to-one comparison with conventional liquid lithium ion batteries. *Advanced Materials*, 31(29), 1900376. <https://doi.org/10.1002/adma.201900376>
- Lian, G., Tuan, C.-C., Li, L., Jiao, S., Wang, Q., Moon, K.-S., Wong, C., P., (2016). Vertically aligned and interconnected graphene networks for high thermal conductivity of epoxy composites with ultralow loading. *Chemistry of Materials*, 28(17), 6096-6104. DOI: 10.1021/acs.chemmater.6b01595
- Liang, J., Saha, M. C., & Altan, M. C. (2013). Effect of carbon nanofibers on thermal conductivity of carbon fiber reinforced composites. *Procedia Engineering*, 56, 814-820. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.03.201>
- Loeblein, M., Bolker, A., Tsang, S. H., Atar, N., Uzan-Saguy, C., Verker, R., Teo, E. H. T. (2015). 3D graphene-infused polyimide with enhanced electrothermal performance for long-term flexible space applications. *Small*, 11(48), 6425-6434. <https://doi.org/10.1002/smll.201502670>
- Luo, X., & Chung, D. (1999). Electromagnetic interference shielding using continuous carbon-fiber carbon-matrix and polymer-matrix composites. *Composites Part B: Engineering*, 30(3), 227-231. [https://doi.org/10.1016/S1359-8368\(98\)00065-1](https://doi.org/10.1016/S1359-8368(98)00065-1)
- Mamunya, Y. P., Davydenko, V., Pissis, P., & Lebedev, E. (2002). Electrical and thermal conductivity of polymers filled with metal powders. *European polymer journal*, 38(9), 1887-1897. [https://doi.org/10.1016/S0014-3057\(02\)00064-2](https://doi.org/10.1016/S0014-3057(02)00064-2)
- Martin-Gallego, M., Verdejo, R., Khayet, M., de Zarate, J. M. O., Essalhi, M., & Lopez-Manchado, M. A. (2011). Thermal conductivity of carbon nanotubes and graphene in epoxy nanofluids and nanocomposites. *Nanoscale research letters*, 6, 1-7. <https://doi.org/10.1186/1556-276X-6-610>
- Ouyang, Z., Rao, Q., & Peng, X. (2022). Significantly improving thermal conductivity of carbon fiber polymer composite by weaving highly conductive films. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 163, 107183. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2022.107183>
- Pety, S. J., Chia, P. X., Carrington, S. M., & White, S. R. (2017). Active cooling of microvascular composites for battery packaging. *Smart Materials and Structures*, 26(10), 105004. DOI 10.1088/1361-665X/aa84e7
- Roy, M., Nelson, J., MacCrone, R., Schadler, L. S., Reed, C., & Keefe, R. (2005). Polymer nanocomposite dielectrics-the role of the interface. *IEEE transactions on dielectrics and electrical insulation*, 12(4), 629-643. DOI: 10.1109/TDEI.2005.1511089
- Schuster, J., Heider, D., Sharp, K., & Glowania, M. (2008). Thermal conductivities of three-dimensionally woven fabric composites. *Composites science and technology*, 68(9), 2085-2091. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2008.03.024>
- Şen, F., Palancıoğlu, H., & Aldaş, K. (2010). Polimerik nanokompozitler ve kullanım alanları. <https://hdl.handle.net/20.500.12451/6814>
- Takezawa, Y., Akatsuka, M., & Farren, C. (2003). High thermal conductive epoxy resins with controlled high order structure. Paper presented at the Proceedings of the 7th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials (Cat. No. 03CH37417). DOI: 10.1109/ICPADM.2003.1218626
- Tavman, I. H. (2015). Preparation and characterization of conductive polymer nanocomposites based on ethylene-vinylacetate copolymer (EVA) reinforced with expanded and unexpanded graphite. *Advanced Materials Research*, 1114, 92-99. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.1114.92>
- Tian, Z., Sun, J., Wang, S., Zeng, X., Zhou, S., Bai, S., . . . Wong, C.-P. (2018). A thermal interface material based on foam-templated three-dimensional hierarchical porous boron nitride. *Journal of Materials Chemistry A*, 6(36), 17540-17547. <https://doi.org/10.1039/C8TA05638B>
- Tu, H., & Ye, L. (2009). Thermal conductive PS/graphite composites. *Polymers for advanced technologies*, 20(1), 21-27. <https://doi.org/10.1002/pat.1236>
- Uzay, Ç. (2022a). Mechanical and thermal characterization of laminar carbon/epoxy composites modified with magnesium oxide microparticles. *Polymer Composites*, 43(1), 299-310. <https://doi.org/10.1002/pc.26374>

- Uzay, Ç. (2022b). Studies on mechanical and thermal properties of cubic boron nitride (c-BN) nanoparticle filled carbon fiber reinforced polymer composites. *Polymer-Plastics Technology and Materials*, 61(13), 1439-1455. <https://doi.org/10.1080/25740881.2022.2069037>
- Uzay, Ç., Yaykaşlı, H., & Acer, D. C. (2022). Microhardness and Thermal Resistance of Epoxy Composites Reinforced with Graphene Nanoparticle doped Carbon Nanotubes. *Journal of NanoScience in Advanced Materials*, 1(1), 6-11. <https://doi.org/10.5281/zenodo.7464972>
- Venkateshalu, S., & Grace, A. N. (2020). Heterogeneous 3D graphene derivatives for supercapacitors. *Journal of The Electrochemical Society*, 167(5), 050509. DOI 10.1149/1945-7111/ab6bc5
- Yan, R., Su, F., Zhang, L., & Li, C. (2019). Highly enhanced thermal conductivity of epoxy composites by constructing dense thermal conductive network with combination of alumina and carbon nanotubes. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 125, 105496. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2019.105496>
- Yang, J., Li, X., Han, S., Zhang, Y., Min, P., Koratkar, N., & Yu, Z.-Z. (2016). Air-dried, high-density graphene hybrid aerogels for phase change composites with exceptional thermal conductivity and shape stability. *Journal of Materials Chemistry A*, 4(46), 18067-18074. <https://doi.org/10.1039/C6TA07869A>
- Yang, J., Li, X., Han, S., Yang, R., Min, P., & Yu, Z.-Z. (2018). High-quality graphene aerogels for thermally conductive phase change composites with excellent shape stability. *Journal of Materials Chemistry A*, 6(14), 5880-5886. <https://doi.org/10.1039/C8TA00078F>
- Ye, W., Wei, Q., Zhang, L., Li, H., Luo, J., Ma, L., Zhou, K. (2018). Macroporous diamond foam: a novel design of 3D interconnected heat conduction network for thermal management. *Materials & Design*, 156, 32-41. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.06.017>
- Yu, C., Zhang, J., Li, Z., Tian, W., Wang, L., Luo, J., Yao, Y. (2017). Enhanced through-plane thermal conductivity of boron nitride/epoxy composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 98, 25-31. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2017.03.012>
- Yu, G.-C., Wu, L.-Z., Feng, L.-J., & Yang, W. (2016). Thermal and mechanical properties of carbon fiber polymer-matrix composites with a 3D thermal conductive pathway. *Composite Structures*, 149, 213-219. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.04.010>
- Yu, L., Gao, S., Yang, D., Wei, Q., & Zhang, L. (2021). Improved thermal conductivity of polymer composites by noncovalent modification of boron nitride via tannic acid chemistry. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 60(34), 12570-12578. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.1c02217>
- Zhang, F., Feng, Y., & Feng, W. (2020). Three-dimensional interconnected networks for thermally conductive polymer composites: Design, preparation, properties, and mechanisms. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 142, 100580. <https://doi.org/10.1016/j.mser.2020.100580>
- Zhang, S., Gao, L., Han, J., Li, Z., Zu, G., Ran, X., & Sun, Y. (2019). Through-thickness thermal conductivity enhancement and tensile response of carbon fiber-reinforced polymer composites. *Composites Part B: Engineering*, 165, 183-192. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.11.114>
- Zhang, X., Fujiwara, S., & Fujii, M. (2000). Measurements of thermal conductivity and electrical conductivity of a single carbon fiber. *International Journal of Thermophysics*, 21, 965-980. <https://doi.org/10.1023/A:1006674510648>
- Zheng, F., Yin, Z., Xia, H., Bai, G., & Zhang, Y. (2017). Porous MnO@ C nanocomposite derived from metal-organic frameworks as anode materials for long-life lithium-ion batteries. *Chemical Engineering Journal*, 327, 474-480. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2017.06.097>
- Zheng, X., Kim, S., & Park, C. W. (2019). Enhancement of thermal conductivity of carbon fiber-reinforced polymer composite with copper and boron nitride particles. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 121, 449-456. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2019.03.030>



Kahramanmaraş Sütçü İmam University

Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 04.06.2024
Kabul Tarihi : 18.09.2024

Received Date : 04.06.2024
Accepted Date : 18.09.2024

KOCAELİ KANDIRA BABAKÖY BAZALTININ ASFALT AGREGASI OLARAK KULLANILABİLİRLİLİĞİ ve ÇORLU KARATEPE BAZALTI İLE KARŞILAŞTIRILMASI

THE USABILITY OF KOCAELİ KANDIRA BABAKÖY BASALT AS ASPHALT AGGREGATE AND COMPARISON WITH ÇORLU KARATEPE BASALT

Cansu Beren KUZLU^{1*} (ORCID: 0009-0006-8802-0234)
Ahmet KARAKAŞ² (ORCID: 0000-0002-4672-2063)

¹ Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, 41380 Kocaeli, İzmit
² Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü, 41380 Kocaeli, İzmit

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Cansu Beren KUZLU, kuzluberen94@gmail.com

ÖZET

Bu çalışmada Kocaeli ili Kandıra ilçesinin kuzeydoğusunda yüzeyleyen Babaköy bazaltının jeolojik, fiziksel ve mekanik özellikleri asfalt agregası olarak kullanılabilirliği açısından araştırılmış ve Çorlu- Karatepe bazaltı ile karşılaştırılmıştır. Babaköy bazaltı Kuzey Marmara Otoyolu projesinde asfalt agregası olarak kullanılmıştır. Agregalar asfaltların ana bileşenlerini oluşturduğu için asfaltın yapısına katılan agreganın önemi büyüktür ve asfalt karışımlarının dayanımına etki etmektedir. Arazi çalışmaları esnasında inceleme alanının üç farklı noktasındaki bazalt mostralarından ve Kuzey Marmara Otoyolu'nun Sakarya'da bulunan şantiye sahasından kırma taş numuneleri alınmıştır. Alınan numuneler üzerinde fiziko-mekanik özellikleri belirlemek için kaya ve agrega deneyleri yapılmıştır. Bu deneyler birim hacim ağırlık, özgül ağırlık, su emme oranı, Los Angeles aşınma, Mikro-Deval, dona dayanıklılık (MgSO₄), metilen mavisi, nokta yük dayanımı, tek eksenli basınç dayanımı, kil toprakları ve soyulma mukavemetidir. Deneylerden elde edilen sonuçların ortalaması alınmıştır ve Karayolu Teknik Şartnamesi (2013)'nin Kısım 407'de belirtilen kaba ve ince agregaların fiziksel ve mekanik özelliklerine göre asfalt agregası olarak kullanılabilirliği uygun olarak belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Asfalt, Agregası, Bazalt, Babaköy, Kandıra

ABSTRACT

In this study, the geological, physical and mechanical properties of Babaköy basalt outcropped in the northeast of Kandıra district of Kocaeli province were investigated in terms of its usability as asphalt aggregate and compared with Çorlu- Karatepe basalt. Babaköy basalt was used as asphalt aggregate in the Kuzey Marmara Highway project. Since aggregates constitute the main components of asphalt, the aggregate added to the structure of asphalt is of great importance and affects the strength of asphalt mixtures. During the field studies, crushed stone samples were taken from basalt outcrops at three different points of the study area and from the construction site of the Kuzey Marmara Highway in Sakarya. Rock and aggregate tests were performed on the samples to determine the physico-mechanical properties. These tests were unit weight, specific gravity, water absorption rate, Los Angeles abrasion, Micro-Deval, frost resistance (MgSO₄), methylene blue, point load strength, uniaxial compressive strength, clay lumps and peel strength. The results obtained from the tests were averaged and determined to be suitable for use as asphalt aggregate according to the physical and mechanical properties of coarse and fine aggregates specified in Section 407 of the Highway Technical Specification (2013).

Keywords: Asphalt, Aggregate, Basalt, Babaköy, Kandıra

GİRİŞ

Doğal yapı taşları insanların var olduğu günden bu zamana kadar birçok alanda kullanılmaktadır. Doğal yapı taşları doğada bulunan magmatik, metamorfik ve sedimanter kayalardan çıkarılan atmosfer etkilerine dayanıklı yapı işlerinde kullanıma uygun taşlardır. Genellikle yol, köprü gibi yapı işlerinde kullanılacak doğal yapı taşları homojen, sert, yoğun, damarsız, çatlaksız, hava etkilerine dayanıklı olmalıdır (Taşlıgil & Şahin, 2016). Türkiye'nin birçok yerinde yaygın olarak kullanılan ve üretilen ağırlıklı olarak İç Anadolu Bölgesi'nde bulunan tanınmış doğal yapı taşlarından birisi de volkanik kökenli Bazalt taşıdır. Bazalt taşı her biriminde aynı özellikleri barındıran homojen bir taş olması sebebiyle düzgün yüzeyler halinde bulunmaktadır (Karışmaz & Morova, 2022). Doğal koşullarından etkilenmeyen, sert, su emme oranı düşük, ince taneli, yoğun yapılı, dışarıdan gelecek etkilere karşı dayanıklı ve aşınması oldukça güç olan bazalt taşı, doğada siyah, gri ve füme renklerinde görülmektedir. Sert yapıya sahip bazalt taşı yol yapımlarında, köprü yapımında, kaplamalarda, demiryollarında kullanılmaktadır. Tek başına veya organik ve inorganik temelli bağlayıcılar ile birleşerek harç, beton, asfalt vb. yapılarda kullanılan doğal taşların çeşitli atmosfer basıncı etkileri sonucunda belirli boyutlarda ufalanmış kaya parçalarına agrega denir. Yol yapımında kullanılan sıcak asfalt karışımlarının içerisinde bulunan agreganın önemi çok büyük olup, agregalar asfalt karışımlarının hacimce %85'lik kısmını oluştururken, ağırlıkça %95'lik kısmını oluşturmaktadır. Agregalar asfaltın dayanımına ve sağlamlığına etki etmektedir (Karışmaz & Morova, 2022).

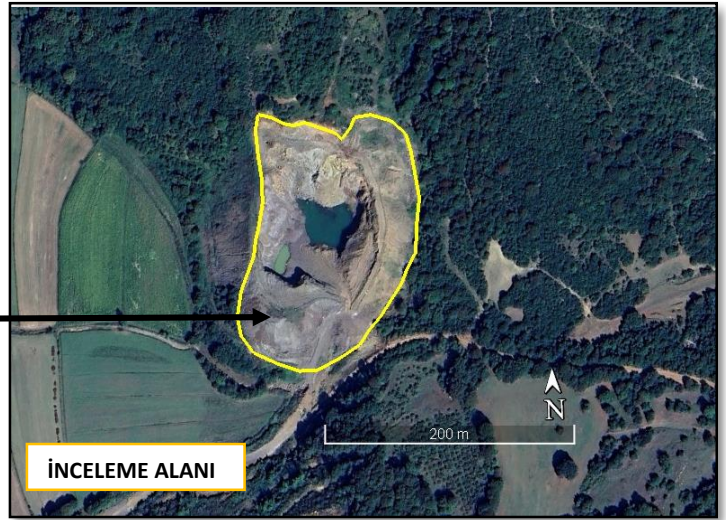
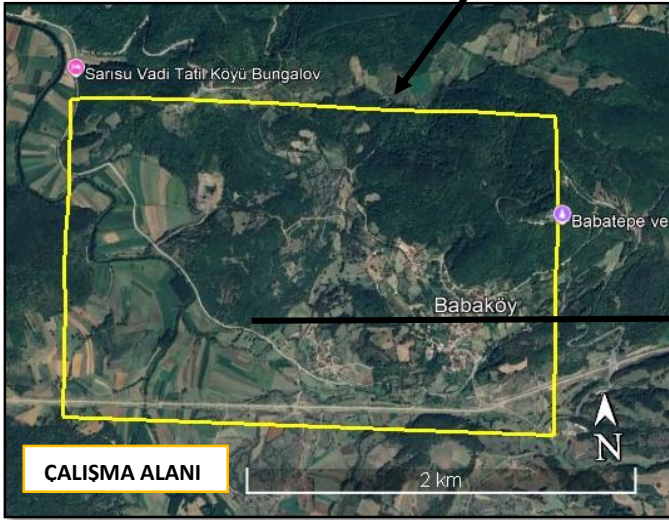
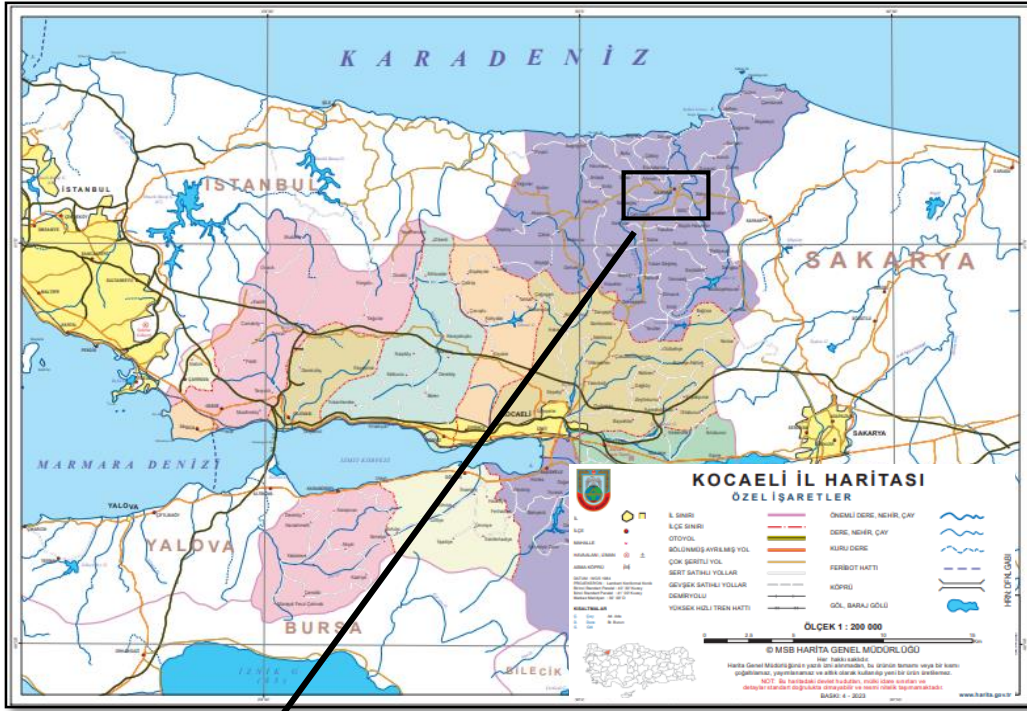
Aslan (2019) Diyarbakır yöresinde bitümlü sıcak karışımlarda kullanılan bazalt, kalker, dere malzemelerinin karakteristik özelliklerinin karşılaştırılması ile ilgili yaptığı çalışmada her agrega türü farklı ocaklardan temin edilmiş ve kendi aralarında mukayese yapılmıştır. Ocaklardan alınan numunelerin standartlara uygunlukları laboratuvar deneyleri ile araştırılmıştır. Yapılan deney sonuçları ile karışım içerisinde kullanılacak agregalar seçilmiş ve üç tip malzeme arasında standartları sağlayan agrega numuneleri ile bitümlü sıcak karışım hazırlanmıştır. Hazırlanan karışımlar içerisinde dayanım ve dayanıklılığı en iyi şekilde etkileyen, şartname limitlerini sağlayan agrega numunesinin bazalt agregası olduğu tespit edilmiştir. Eker (2019) bazalt ve gabroların bitümlü sıcak karışımlarda agrega olarak kullanılabilirliğinin değerlendirilmesi çalışmasında Ordu ve Giresun illerinde yer alan ve bölgenin karakteristik özelliklerine sahip bu kayalardan numuneler alınarak laboratuvar ortamında ilgili deneylere tabi tutulmuştur. Elde edilen veriler doğrultusunda sıcak karışım imalatlarında karşılaşılabilecek sorunlar ile bunların çözüm önerileri değerlendirilip birçok sonuca varılmıştır. Namlı ve Görgülü (2021) değişik tipteki agrega ve bağlayıcının sıcak karışım asfaltın mekanik özelliklerine etkisini deneysel olarak ele almışlardır. Çalışmada kalker, bazalt ve dere malzemesi olarak 3 tip agrega, bağlayıcı olarak ise Batman Rafinerisi'nden temin edilen 2 tip bitümlü bağlayıcı (B 50/70 ve B 160/220) kullanılmıştır. Agrega ve bağlayıcı karıştırılarak asfalt karışımları hazırlanmıştır. Hazırlanan karışımların mekanik özellikleri belirlenmiştir. Çalışma sonucunda elde edilen bulgulardan, bitüm ihtiyacının az olması, ekonomi ve stabilite bakımından diğer karışımlardan avantajlı olması sebebiyle agrega grubu kalker ve bitümlü bağlayıcısı B 160/220 olan karışımın daha iyi sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Yıldız vd., (2022) bazaltların endüstriyel kullanım alanları ile ilgili yaptıkları çalışmada, bazaltlar, sert, dayanıklı, bünyesinde serbest silis içermemesi ve kir götüren özelliklerine dayalı olarak doğal taş amaçlı, 2(b) maden grubu kapsamında hakiki mermer ile diğer doğal taşların kullanıldığı alanlarda değerlendirilmiştir. Bazaltın doğal taş olarak kullanılabilmesindeki en önemli özelliğinin akma yapısına dayalı olarak blok verebilmesi ve çok kırıklı, fay zonlarında bulunan bazaltların daha çok agrega/mıcır için uygun olduğu söylenmiştir. Bunula birlikte bazaltların (kaya yünü gibi) bir endüstriyel hammadde veya (mermer, agrega gibi) yapı malzemesi olarak da kullanım alanlarının geniş olduğu ve bazaltın kaya yünü üretiminde kullanılan kayalar içinde en önemlisi olduğu saptanmıştır.

Bu çalışmanın amacı Kocaeli Kandıra ilçesinde yüzeylenen Babaköy bazaltının jeolojik, fiziksel ve mekanik özellikleri yönünden asfalt agregası olarak kullanılabilirliği açısından araştırılmasıdır. Çalışmalar büro, arazi ve laboratuvar safhaları olmak üzere üç aşamada gerçekleştirilmiştir. Büro safhasında daha önce yapılan çalışmalar, haritalar ve raporlar değerlendirilmiştir. Arazi çalışmaları jeolojik formasyon ve birimlerin tanınması, inceleme alanında yer alan bazalt taşının ayrıntılı jeolojik incelenmesi ve numune alınması aşamalarından oluşmuştur. Laboratuvar çalışmalarında ise inceleme alanından alınan kaya ve kırmataş numuneleri üzerinde laboratuvar fiziko-mekanik özellikleri belirlemek için TS EN standartlarına uygun şekilde kaya ve agrega deneyleri yapılmıştır. Deney sonuçları KTŞ (2013) Kısım 407 şartname limitlerine ve bazalt taşının özelliklerine göre değerlendirilmiş olup asfalt agregası olarak kullanılabilirliği ortaya konmuştur.

İNCELEME ALANI

Marmara Bölgesinin kuzeydoğusunda bulunan Kocaeli ilinin Kandıra ilçe merkezine 5,30 km mesafede olan inceleme alanı 1/25000 ölçekli F24d2 ve F24d3 jeoloji paftaları arasında yer almaktadır. Doğuda Kınıcılı batıda

Doğancılı köyleri arasında 13,602,673 m²'lik alana sahip Babaköy Bazaltı inceleme alanını oluşturmaktadır (Şekil 1). İnceleme alanı Kocaeli penepleni morfolojisine uygun bir topografyada yer almaktadır.



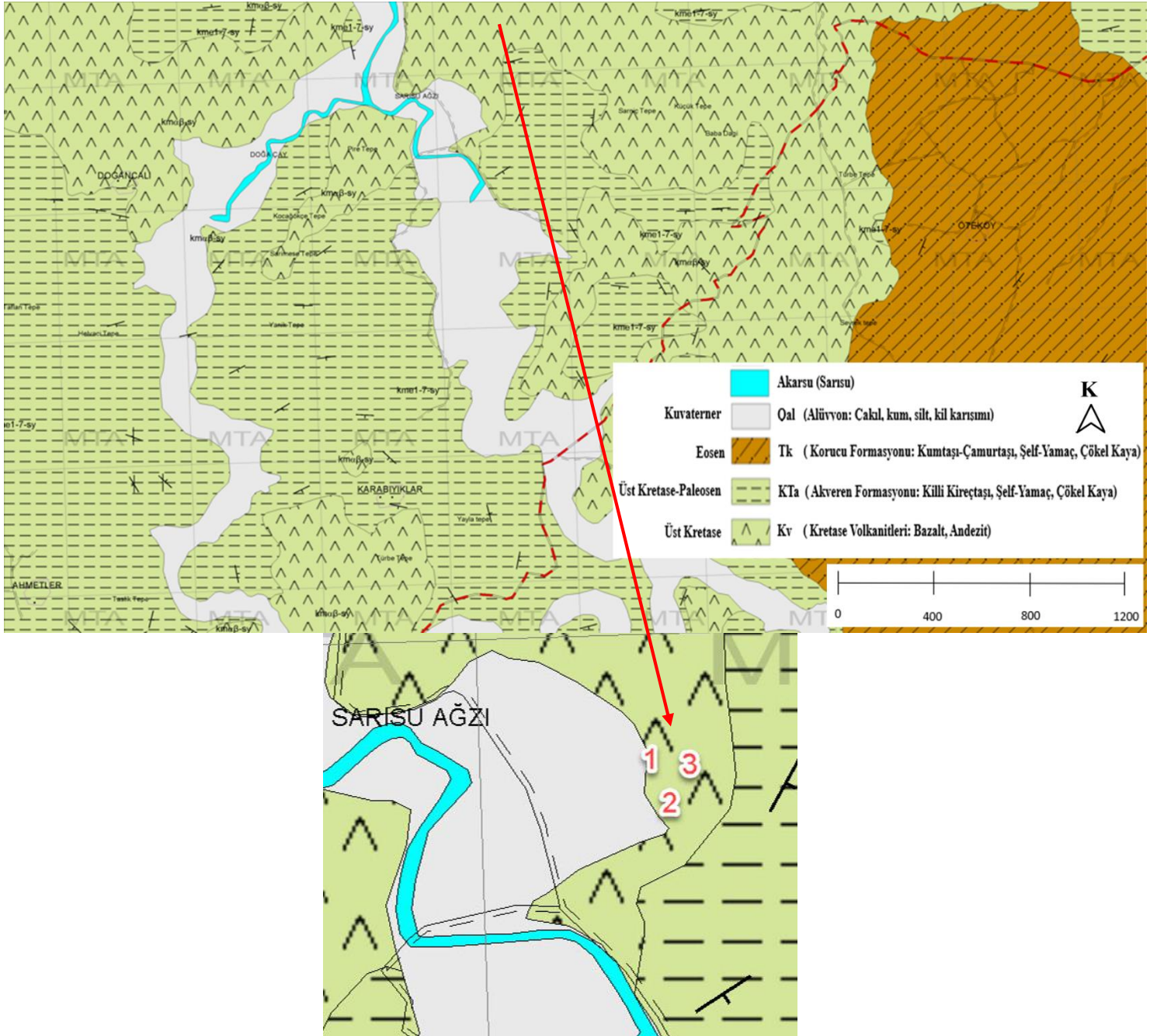
Şekil 1. İnceleme Alanı Yer Bulduru Haritası (Kocaeli fiziki il haritası www.harita.gov.tr/urun/kocaeli-fiziki-il-haritasi/368 kaynağından alınmıştır.)

BÖLGESEL VE İNCELEME ALANI JEOLJİSİ

Kocaeli bölgesinde, jeolojik açıdan iki önemli tektonik ve yapısal birlik bir arada bulunmaktadır. Bunlardan biri İzmit körfezinin kuzeyinde yer alan Kocaeli Yarımadası, diğeri ise İzmit Körfezi'nin güneyinde yer alan ve Sakarya zonunun bir bölümü olan Armutlu Yarımadası'dır (Gedik vd., 2005).

İnceleme alanı İstanbul Boğazından başlayıp Zonguldak'a kadar devam eden Paleozoyik istifin bulunduğu Kocaeli yarımadasının kuzeydoğusunda yer almaktadır. Paleozoyik istif Ordovisyan'dan başlayıp Karbonifere kadar devam eden kumtaşı, kireçtaşı, şeyl, kuvarsit, siltaşı ve kiltası gibi sedimanter birimlerden oluşan bir istif olarak tanımlanabilir. Bu istifin üzerine Triyas yaşlı karbonatlı çökeller gelmiştir. Üst Kretase de volkanizma etkisiyle sedimanter çökellere volkanik birimlerde eşlik etmiştir.

İnceleme alanının temelini Kocaeli Yarımadasından Sinop'a kadar kıyılarına yakın yüzeylenen alt kısımlarında kumlu karbonatlar üste doğru kireçtaşları, çamurtaşları, marnlı türbiditlerden oluşan Geç Kratase-Paleosen (KTa) yaşlı Akveren Formasyonu oluşturmaktadır (Ketin & Gümüş, 1963). Çalışma sahası içerisinde araştırma konusu olan Babaköy Bazaltlı Akveren Formasyonunu keserek veya üzerine akarak Kandıra ve civarında yüzeylenen Kretase Volkanitleri (Kv) içerisinde yer alır (Şekil 2). Birim yeşilimsi siyah renkli masif bir kayadır (Şekil 3). Yer yer yastık yapıları oluşturan bazalt biriminin aralarında kireçtaşları görülmektedir (Timur & Aksay, 2002). Bölgede Akveren Formasyonu üzerinde uyumlu bir şekilde kumtaşı-çamurtaşı ardalanması şeklinde yer alan Korucu Formasyonu (Tk) geniş alanlarda görülmektedir. Bölgenin ve inceleme alanın en genç birimi Kuvaterner yaşlı alüvyon (Qal) dere yataklarında sınırlı kalınlıklarda çakıl, kum, silt ve kil karışımları olarak yer almaktadır.



Şekil 2. İnceleme Alanı Jeoloji Haritası ve Numune Alınan Noktalar (MTA Genel Müdürlüğü 1/25000 Ölçekli Jeoloji Haritası- F24-d3'ten alınmıştır.)



Şekil 3. Babaköy Bazaltının Arazide Mostra Görünümü

MİNERALOJİ-PETROGRAFI

Arazi çalışmaları sırasında 1 numaralı lokasyondan (Şekil 2) alınan Babaköy bazaltına ait kayaç örnekleri üzerinde mineralojik ve petrografik çalışmalar yapılmıştır. Yapılan çalışmalar sonucunda Babaköy bazaltı makroskobik incelemelerde yeşilimsi siyah renkli, masif dokulu ve ince kristal taneli volkanik bir kaya olarak tanımlanmıştır.

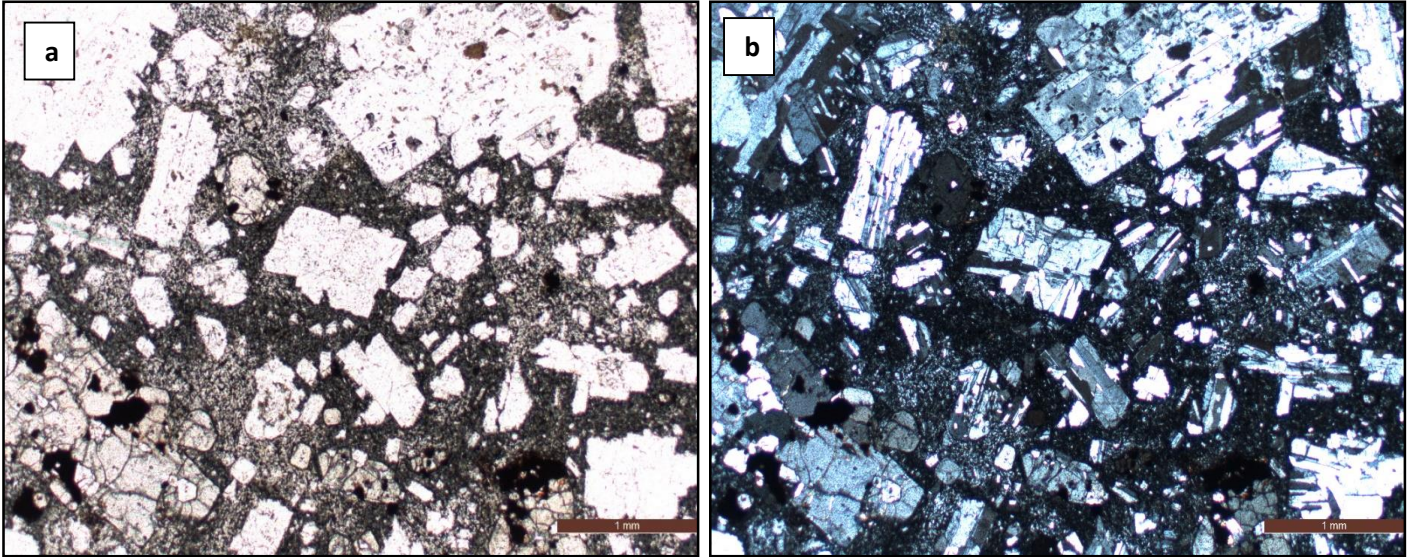
Bununla birlikte mikroskobik incelemeler sonucu plajiyoklaz (labrador), piroksen, olivin grubu mineraller, biyotit ve opak minerallerin bileşimine sahip olduğu tespit edilmiştir. Birimde porfirik doku gözlenmiştir. Örnekte bulunan plajiyoklaz mineralleri iri ve küçük taneli olarak görülmüştür. İri taneli olan plajiyoklazların bazılarında polisentetik ikizlenmeye bazılarında ise zonlu dokuya rastlanmıştır. Tablo 1’de inceleme alanında Babaköy bazaltından alınmış 1 nolu numuneye ait olan mikroskobik ve makroskobik tanımlaması ve bileşenleri verilmektedir 1 nolu numuneye ait örnek üzerinden hazırlanan ince kesitin mikroskobik görüntüleri Şekil 4’te yer almaktadır.

Tablo 1: Babaköy Bazaltının Mikroskobik ve Makroskobik Tanımlanması

	Köken	Renk	Doku	Tane Büyüklüğü	Çatlak	Gözenek	Doku	Bileşenler
Örnek Numunenin Tanımlanması	Magmatik	Yeşilimsi Siyah	Masif	İnce Taneli	--	--	Porfirik Doku	<ul style="list-style-type: none">PlajiyoklazPiroksen Grubu MinerallerOlivin Grubu MinerallerBiyotitOpak Mineraller

MALZEME ve YÖNTEM

Bu çalışmada deneylerde kullanılan numuneler Kandıra Babaköy bazalt ocağından ve Kuzey Marmara Otoyolu’nun (KMO) Sakarya’ da yer alan şantiye sahasından alınmıştır. Bazaltlar yeşilimsi siyah renkte olup yer yer kahverengi görünümlüdürler. Kandıra Babaköy’den alınan bazalt numuneleri 40-50 cm büyüklüğünde kaya kütleleri halinde olup, şantiye sahasından alınan numuneler ise 0-5 mm, 5-12 mm, 12-19 mm aralığında hazır kırılmış kırmataş agrega şeklindedir. İnceleme alanında bazalt kayaların mostra görünümü Şekil 2’de, jeoloji haritası ve numune alınan yerler ise Şekil 3’te verilmiştir.



Şekil 4. a. 1 No.lu Numunenin Tek Nikol Görünümü **b.** 1 No.lu Numunenin Çift Nikol Görünümü

Çalışmanın yöntem kısmı ise arazi çalışmaları, laboratuvar çalışmaları ve arazi ve laboratuvar çalışmalar sonucu elde edilen verilerin değerlendirilmesini kapsamaktadır. Arazi çalışmaları kapsamında inceleme alanını kapsayan Babaköy bazalt ocağında bulunan bazaltların jeolojik sınırları belirlenmiştir. Çalışmada jeoloji haritası olarak baz alınan Çelebi ve Köprübaşı (2007) haritası arazide kontrol edilerek numune alınan noktalar bu harita üzerine işaretlenmiştir. Laboratuvar çalışmaları yapmak için ilgili ocağın taze yüzeyli bazalt mostralarının üç farklı noktasından ve Kuzey Marmara Otoyolu'nun (KMO) Sakarya'da bulunan şantiye sahasından kırılmış hazır hale getirilmiş (0-5 mm, 5-12 mm, 12-19 mm) numuneler kullanılmıştır. Mostradan alınan örneklerin mineralojik ve petrografik analizlerinin yapılması için Ankara MTA Genel Müdürlüğü'ne numune gönderilmiştir. Petrografik incelemeler için ince kesit hazırlanmış polarizan mikroskop incelemeleri yapılmış, mineralojik bileşimi ve kayaç grubu açısından incelenmiştir. Daha sonra bu numuneler asfalt agregası olarak kullanılabilirliğinin değerlendirilmesi ve fiziko-mekanik özellikleri belirlemek için laboratuvara götürülmüştür. Karayolları teknik şartnamesi Kısım 407'de istenilen deneyler için TS standartlarına göre malzemeler hazırlanmış ve deneye tabi tutulmuştur. Bu deneyler parçalanma direnci (Los Angeles), aşınma direnci (Micro-Deval), hava tesirlerine karşı dayanıklılık, MgSO₄ ile kayıp, yassılık indeksi, su emme soyulma mukavemeti, kil toprakları ve ufalanabilir daneler, organik madde, metilen mavisidir. Birim hacim kütleinin belirlenmesi, piknometre yöntemi ile özgül ağırlık tayini, nokta yükü dayanım indeksi, tek eksenli basınç dayanımı deneyleri ise numunelerin fiziko-mekanik özelliklerini belirlemek için yapılmıştır.

Standartta belirtilen formüller ile hesaplamalar yapılarak deney sonuçları elde edilmiştir. Her bir deneyden 3 adet yapılmış deneylerin aritmetik ortalamaları alınarak ortalama değer bulunmuştur. Çalışmanın son kısmında Babaköy ocağı bazalt mostradan alınan numuneler ve Sakarya şantiye sahasından alınan numuneler için iri ve ince agregaların fiziksel özelliklerinin deney sonuçlarının karayolları teknik şartnamesinde asfalt agregası için belirtilen limitleri ile uygunlukları değerlendirilmiştir. Sonrasında, Çorlu- Karatepe Bazaltı ve Kandıra Babaköy Bazaltı laboratuvar sonuçlarının karşılaştırılması yapılmıştır. Yapılan deneylerin metotları aşağıda kısaca anlatılmıştır.

Parçalanma Direnci (Los Angeles): Bu deney TS EN 1097-2 standardına göre yapılmaktadır. Deneyin amacı agregaların mekanik dayanımını ve dayanıklılığını belirlemektir. Standart kapsamına göre deneyde 10 mm 11,2 mm ve 14 mm arasında kalan tane dağılımına sahip malzeme karışımı kullanılır. Tambur içerisinde bulunan çelik bilyalar (11 adet) yardımı ile 500 devir döndürülmesi sonucu aşınarak ne kadar malzeme kaybı olduğu ölçülmekte olup bu kayıp bize parçalanma direnci değerini vermektedir. Parçalanma direnci değerini 1,6 mm elekte kalan malzemenin miktarı belirlemektedir. Deney sonucunda elde edilen parçalanma direnci değeri, agreganın aşınmaya ve parçalanmaya karşı ne kadar dayanıklı olduğunu gösterir. Yol yapımında ve beton üretiminde kullanılan agregaların yüksek kalitede olması için parçalanma direncinin düşük olması gerekmektedir.

Aşınma Direnci (Micro-Deval): Deney TS EN 1097-1 standardına göre yapılmıştır. Agregaların aşındırıcı etkilere karşı direncini ölçmek amacıyla yapılan bir deneydir. Los Angeles deneyinde olduğu gibi deneyde çelik bilyalar kullanılır ancak boyutları küçüktür. İki adet tambur içerisine 500 g deney numunesi, 5000 g çelik bilye ve 2.5 l su

ilave edilmesiyle deney gerçekleştirilir. Tamburlar 100 devir/dk hızla 12000 devir döndürülür ve deney sonunda gerekli ölçümler yapılarak ne kadar malzeme kaybı olduğu hesaplanır. Bu kayıp, agreganın Micro-Deval katsayısını gösterir. Az kayıp, agreganın aşınmaya karşı daha dayanıklı olduğunu ifade eder. Yol kaplamaları gibi aşınmaya maruz kalan yapı elemanları için, % kayıp değerinin düşük olması tercih edilmektedir.

Hava Tesirlerine Karşı Dayanıklılık ($MgSO_4$): Deney TS EN 1367-2 standardına göre yapılmıştır. Agregaların donma-çözülme döngüleri veya kimyasallara maruz kalma durumu gibi iklimsel etkilere karşı ne kadar dayanıklı olduğunu ölçmek için yapılan bir deneydir. 10 mm ile 14 mm arasında kalan agregalar standart doğrultusunda belirtilen magnezyum sülfat ($MgSO_4$) çözeltisiyle belirli bir süre maruz bırakılması sonucunda ne kadar malzeme kaybettiği ölçülmektedir. Yüksek dayanıklılık, düşük kayıp oranı ile gösterilir.

Yassılık İndeksi Tayini: Bu deney TS EN 933-3 standardına göre yapılmıştır. Agregaların yassı veya ince yapıda olup olmadığını belirlemek için kullanılan bir ölçüttür. Standart gereği 4 mm ile 80 mm arasındaki tane büyüklüğüne sahip agregalar deneye tabi tutulmalıdır. Özellikle yol yapımı gibi alanlarda agregaların geometrik özelliklerini değerlendirmek amacıyla kullanılır. Yassı agregalar, asfalt karışımlarında boşluklar oluşturabilir, bu da karışımın dayanıklılığını ve performansını olumsuz yönde etkilemektedir.

Su Emme Oranı Tayini: Deney TS EN 1097-6 standardına göre yapılmıştır. Deney standart gereği tel sepet yöntemi ile yapılmış olup, 31,5 mm ile 63 mm arasında tane büyüklüğüne sahip agregalar kullanılmıştır. Deneyin amacı, bir malzemenin, genellikle agrega veya betonun, suyu emme kapasitesini ifade etmektedir. Bu oran, malzemenin boşluklu yapısını ve suya karşı davranışını değerlendirmek amacıyla kullanılır. Su emme oranı, malzemenin dayanıklılığı ve geçirgenlik gibi özellikleri üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Yüksek su emme oranı, malzemenin suya karşı daha geçirgen ve dolayısıyla daha az dayanıklı olduğunu göstermektedir.

Soyulma Mukavemeti: TS EN 12697-11 standardı gereği yapılan bu deney, agregaların bitüm ile kaplandıktan sonra su veya diğer etkenler karşısında bitüm kaplamasını ne kadar koruyabildiğini ölçmek için yapılmaktadır. Deney 10 mm elekten geçip 6,3 mm elek üzerinde kalan 200 g agrega parçacıkları üzerinde yapılır. Agregalar parçaları bitüm bağlayıcılar (50-70) ile kaplanır. Eğer bitüm, agregalardan kolayca soyulursa, suyun penetrasyonu artar ve yol kaplamasında bozulmalar meydana gelir. Bu nedenle, soyulma mukavemeti yüksek olan agregalar tercih edilir. Özellikle asfalt kaplamalarının suya karşı dayanıklılığını ve uzun ömürlülüğünü değerlendirmek için bu yöntem kullanılır.

Kil topakları ve Ufalanabilir Daneler Tayini: Kil topakları ve ufalanabilir taneler agrega taneleri üzerine sıkıca yapışmış şekilde veya agrega tanesi gibi agregaların içerisinde yer almaktadır. Deney ASTM C 142 standardına uygun şekilde yapılmıştır. Agregalar içinde bulunan ve genellikle suyla temas ettiğinde şişen, hacmi artan ve karışımın yapısal bütünlüğünü zayıflatan kil parçalarıdır. Kil, suyu emme eğiliminde olduğu için beton ve asfalt gibi yapı malzemelerinde çatlamalara, zayıf bağlanmalara ve dayanıklılık sorunlarına yol açmaktadır.

Organik Madde Tayini: Deney TS EN 1744-1 standardına uygun olarak yapılmıştır. Deney yapımında standartta belirtilen 4 mm göz açıklı elek kullanılarak elekten geçen taneler ile deney başlatılmıştır. Deney yapımında %3'lük NaOH çözeltisi kullanılmıştır. Deney sonucu çözeltinin rengine göre belirlenmektedir. Çözelti rengi renksiz veya açık sarı ise, organik madde bulunmadığını (negatif), koyu sarı, kahverengi veya kırmızımsı bir renk oluşmuş ise yüksek oranda organik madde bulunduğunu (pozitif) belirtmektedir. Agregalarda bulunan organik maddeler, yapı malzemelerinin bağlayıcı maddelerle (örneğin; bitüm) olan etkileşimini olumsuz yönde etkilemekte olup, malzemenin dayanıklılığını (mukavemetini) azaltmaktadır.

Metilen Mavisini Deneyi: Deney TS EN 933-9 standardına göre yapılmıştır. Deneyin amacı agregalarda bulunan zararlı maddelerin varlığını belirlemektir. Deney 2 mm göz açıklı elekten geçen malzeme üzerinde yapılmaktadır. Deney için 200 g numune kullanılmaktadır. Bu deney malzemenin kalitesini ve uygunluğunu değerlendirmek açısından önemlidir. Metilen mavisini değerinin yüksek olması zayıf bağlanmalara ve dayanıklılık sorunlarına yol açmaktadır.

Birim Hacim Kütle Belirlenmesi: Deney TS EN ISO 17892-2 standardı gereklere göre silindir numuneler üzerinde yapılmıştır. Bu özellik, özellikle agregalar, beton ve asfalt gibi yapı malzemelerinde önemli bir parametredir. Birim hacim kütle ağırlığın hacme oranıdır ve malzemenin yoğunluğu hakkında bilgi verir. Buda malzemenin taşıma kapasitesi, dayanıklılığı ve diğer mekanik özellikleri üzerinde etkilidir.

Özgül (Gerçek) Yoğunluk (Piknometre Yöntemi): Bu deney TS EN 1936 standardına göre yapılmıştır. Deneyin amacı ince agregaların özgül yoğunluğunu tayin etmektir. Özgül yoğunluk, malzemenin yoğunluğunu suyun yoğunluğuna oranlayarak hesaplanır ve bu özellik, malzemenin performansı ve kalitesi hakkında önemli bilgiler

vermektedir. Deneyde piknometre yöntemi kullanılmış ve yaklaşık 50 g öğütülmüş numune üzerinde yapılmıştır. İstenilen dayanım, dayanıklılık ve işlenebilirlik gereksinimlerini karşılayan beton veya asfalt karışımlarının tasarlanması için özgül yoğunluğun doğru bir şekilde belirlenmesi büyük önem taşımaktadır.

Nokta Yükü Dayanım İndeksi: Nokta yükleme deneyi kayaçların kırılma yükünün belirlenmesinde ve bu dayanım üzerinden malzemenin mukavemeti hakkında bilgi edinilmesi için yapılmaktadır. Bu deney TS 699 standardı gereği düzensiz şekilli 10 adet numune üzerinde yapılmıştır. Standarda göre düzensiz şekilli numuneler (50 ± 35) mm boyutunda, kalınlık (D) ve genişlik (W) oranı 0,3 ile 1,0 arasında olmalıdır. Çapı ve boyu kumpas ile ölçülen numune nokta yükleme deney cihazının konik uçlarının arasına yerleştirilir. Çap doğrultusunda yükleme yapılarak kırılma yükü bulunur. Kırılma yükü ne kadar artarsa mukavemet de o kadar artış göstermektedir.

Tablo 2. Kaba Agregaların Fiziksel ve Mekanik Özelliklerinin Şartname Limitleri (KTŞ, 2013) ve Deney Sonuçları

Deney Adı	Şartname Limitleri		Deney Sonuçları		Deney Standardı
	Binder	Aşınma	Mostradan Alınan Numuneler İçin	Sakarya Şantiye Sahasından Alınan Numuneler İçin (Babaköy Ocağı)	
Parçalanma Direnci (Los Angeles), % Kayıp	≤ 30 (LA ₃₀)	≤ 27 (LA ₂₇)	14,1	19,5	TS EN 1097-2
Aşınma Direnci (Micro-Deval), % kayıp	≤ 25 (M _{DE25})	≤ 20 (M _{DE20})	16,9	16,6	TS EN 1097-1
Hava Tesirlerine Karşı Dayanıklılık, MgSO ₄ ile Kayıp, %	≤ 18 (MS ₁₈)	≤ 16 (MS ₁₆)	15,08	14,23	TS EN 1367-2
Yassılık İndeksi	≤ 25 (FI ₂₅)	≤ 20 (FI ₂₀)	--	5-12 mm için; 6,5 12-19 mm için; 11,5	TS EN 933-3
Su Emme, %	$\leq 2,5$ (WA ₂₄₂₅)	$\leq 2,0$ (WA ₂₄₂₀)	0,4	5-12 mm için; 0,7 12-19 mm için; 0,6	TS EN 1097-6
Soyulma Mukavemeti, % Bitümlü Kaplı Yüzey (24 Saat 60 °C suda bekletmeden sonra)	≥ 60	≥ 60	85	85-90	TS EN 12697-11 (Kısım 403 Ek-A)
Kil topakları ve Ufalanabilir Daneler, %	≤ 3	≤ 3	0	0	ASTM C 142

Tek Eksenli Basınç Dayanımı: Deney TS EN 1926 standardına göre yapılmıştır. Bir malzemenin, özellikle kayaç ve beton gibi yapı malzemelerinin, aksel olarak uygulanan tek yönde basınca karşı dayanıklılığını ölçen bir deneydir. Bu test, malzemenin dayanıklılığını ve mukavemetini belirlemek için kullanılmaktadır. Malzeme dayanımını dış kuvvetlere karşı gösterilen direnç olarak tanımlamak mümkündür. Uygulanan dış kuvvet malzemenin

dayanımını geçtiğinde malzeme dayanımını kaybeder ve yenilir. Yenilmeye uğradığı kuvvet malzemenin dayanım değerini vermektedir.

BULGULAR ve TARTIŞMA

Bu çalışmada Kandıra Babaköy’de yüzeylenen Babaköy bazaltının jeolojik ve fiziko-mekanik özellikleri ortaya konulmuştur. Babaköy bazaltının jeolojik özellikleri arazi çalışmaları ile belirlenmiş, asfalt agregası olarak kullanılabilirliği amacıyla standartlara uygun şekilde laboratuvar çalışmaları yapılmıştır. Laboratuvar çalışmalarından elde edilen sonuçlara göre Karayolları Teknik Şartnamesi (2013)’nin Kısım 407’de Tablo 407-3’te belirtilen kaba agregaların fiziksel ve mekanik özellikleri ile Tablo 407-4’te belirtilen ince agreganın özelliklerine göre uygunluğu değerlendirilmiştir.

Tablo 2 ve Tablo 3’te mostradan alınmış kaya numuneleri ve bu numunelerin kırılması ile elde edilmiş hazır kırmataş numuneleri üzerinde yapılan deneylerin sonuçları yer almaktadır. Deney sonuçları incelendiğinde şartname limitlerini karşıladığı gözlemlenmektedir. Ancak mostradan alınan bazalt numuneleri üzerinde yapılan Metilen Mavisı deneyinin değeri yüksek çıkmıştır. Bunun nedeni ince malzemede bulunan kil oranıdır. Kil oranı arttıkça metilen mavisı değeri artmaktadır. Bu durumda deney sonuçları şartname limitlerinin dışında kaldığı için asfalt yapımında kullanılacak 0-5 mm’lik malzeme Dünyalar Ocağından temin edilmiş ve Kuzey Marmara Otoyolunda bu malzeme kullanılmıştır.

Tablo 4’te bazaltların fiziko-mekanik özellikleri incelenmiştir. Bazalt numunelerinin özgül ağırlıkları 2,60-3,22 g/cm³ olup dayanımları yüksektir. Yapılan deneyler sonucunda sonuçların bazaltların fiziko-mekanik özelliklerini taşıdığı gözlemlenmiştir.

Tablo 3. İnce Agregaların Özelliklerinin Şartname Limitleri (KTS, 2013) ve Deney Sonuçları

Deney Adı	Şartname Limitleri		Deney Sonuçları		Deney Standardı	
	Binder	Aşınma	Mostradan Alınan Numuneler İçin	Sakarya Şantiye Sahasından Alınan Numuneler İçin (Dünyalar Ocağı) (0-5 mm)		
Organik Madde, (%3 NaOH ile)	Negatif	Negatif	Negatif	Negatif	TS EN 1744-1	
Metilen Mavisı, g/kg	İnce agreganın 0/2 mm’lik kısmına	≤ 1,5 (MB _{1,5})	≤ 1,5 (MB _{1,5})	--	0,50	TS EN 933-9
		≤ 3,0 (MB _{3,0})	≤ 3,0 (MB _{3,0})			
	Öğütülmüş magmatik agreganın 0/2 mm kısmına	≤ 3,0 (MB _{3,0})	≤ 3,0 (MB _{3,0})	4,35	--	

Elde edilen veriler değerlendirilirken, İstanbul Bölgesindeki asfalt üretiminde yaygınca kullanılan bazalt, kireçtaşı ve kumtaşı agregaları referans olarak kullanılmıştır. Referans olarak kullanılan Çorlu- Karatepe Bazaltı ile çalışma konusu olan Kandıra Babaköy bazaltının laboratuvar sonuçlarını karşılaştırılmış, deneylerden elde edilen sonuçlar Tablo 5’te verilmiştir. Kandıra Babaköy bazaltı ile Çorlu- Karatepe bazaltını deney sonuçları karşılaştırıldığında ortalama değerlerin birbirlerine yakın olduğu ve şartname limitlerini karşıladığı gözlenmiştir. Ancak Çorlu- Karatepe bazaltında dona dayanıklılık (MgSO₄) değerinin düşük, tek eksenli basınç dayanımı değerinin yüksek olduğu

görülmektedir. Bunun nedeni agreganın cinsi ve petrografik yapısıdır. Agregaların dayanımına doku, kristalleşme derecesi, çimentolama, süreksizlik, porozite, anizotropi ve ayrışma dereceleri etki etmektedir. Agregada içindeki boşluk oranı arttıkça dayanıklılık azalmaktadır. Kayaçların içerisindeki mineraller yüzdeleri, kayaçların fiziksel ve kimyasal özelliklerine etki etmektedir. Kuvars yüzdesinin fazla olduğu durumlarda dayanımın yüksek olmasından kaynaklı değerler yüksek olur. Öte yandan kuvars yüzdelерinin düşük olmasına rağmen değerlerin yüksek çıkmasının nedeni, kayaçlardaki mineraller arası kenetlenmenin güçlü olması ve dolayısıyla da dayanımlarının yüksek olmasıdır (Yılmaz, 2012). Metilen mavisi değerini ele alacak olursak Kandıra Babaköy bazaltının mostralardan alınan numuneler üzerinde yapılan metilen mavisi deney sonuçları Çorlu- Karatepe bazaltına göre daha yüksektir. Bununla birlikte mostradan alınan malzemenin sonuçları şartname limitini karşılamamaktadır. Metilen mavisi değerinin yüksek olmasının nedeni agregada içerisinde bulunan kil oranına bağlıdır. Yol üst yapısındaki temel ve kaplama tabakalarında kullanılacak olan malzeme içerisinde bulunan kil oranının yüksek olması şişme ve sıkışma gibi durumlarda stabilite bozulmalarına sebep olmaktadır (Yiğit, 2021). Bu yüzden metilen mavisi değeri önemlidir. Metilen mavisi değeri arttıkça su emme oranı ve geçirimsizlik artar, dayanıklılık azalır. Bu durum agregada kalitesinin düşüklüğünü ifade etmektedir.

Tablo 4. Babaköy Bazaltı Mostrasından ve Sakarya Şantiye Sahasından Alınan Numuneler İçin Fiziko-Mekanik Özellik Değerleri

Deney Adı	Ortalama Deney Sonuçları		Deney Standardı
	Mostradan Alınan Numuneler İçin	Sakarya Şantiye Sahasından Alınan Numuneler İçin	
Birim hacim kütleinin belirlenmesi	2,69	--	TS EN ISO 17892-2
Piknometre yöntemi ile özgül ağırlık tayini	2,72	2,71	TS EN ISO 17892-1
Nokta yükü dayanım indeksi (kg/cm ²)	22,70	--	TS 699
Tek eksenli basınç dayanımı (MPa)	126,31	--	TS EN 1926

SONUÇLAR

Son yıllarda ülkemizde özellikle yapılaşmanın çok olduğu büyük şehirlerde doğal taşların kullanımı artmıştır. Yüksek dayanıma sahip olmasından dolayı doğa olaylarından ve iklim şartlarından az etkileneceği düşünülen en fazla tercih edilen doğal taş bazalttır. Bazaltlar lavların yüzeyde veya derinde oluşmasına bağlı olarak erken veya geç soğuma sonucu gözenekli veya gözeneksiz olarak oluşurlar. Bazaltların kullanım alanı her geçen gün artmakta olup agregada olarak yaygın kullanım alanı olan kireçtaşlarına kıyasla daha serttir ve aşınmaya karşı daha dayanıklı bir malzemedir. (Yıldız & Gültekin, 2022).

Kocaeli ili Kandıra ilçesinde yüzeylenen Kuzey Marmara Otoyolu'nda asfalt agregası olarak kullanılmış Babaköy bazaltı KTŞ (2013) kaba ve ince agregaların özelliklerine göre incelenmiştir. İnceleme sonuçlarına göre asfalt agregası olarak kullanılabilirliği için uygun görülmüştür. Ancak ince agregaların tabii tutulduğu metilen mavisi değeri %4,35 g/kg olup, TS EN 933-9+A1'de verilen limit değerini aştığından asfalt agregası olarak kullanıma uygun olmadığı tespit edilmiştir. Bu yüzden Kuzey Marmara Otoyolu yapımında Sakarya Ferizli'de işletilen özel bir taş ocağından alınan 0-5 mm ince agregada kullanılmıştır. Bu agreganın ortalama metilen mavisi değeri 0,50 g/kg olup KTŞ (2013) şartname limitlerini karşılamaktadır. Diğer bir yandan Kandıra Babaköy bazaltının fiziko- mekanik özelliklerini incelemek adına birim hacim ağırlık, özgül ağırlık, tek eksenli basınç dayanım ve nokta yükü dayanım indeksi deneyleri yapılmıştır. Deney sonuçları incelendiğinde ortalama olarak 2,72 özgül ağırlığa, 2,69 birim hacim

ağırlığa, 126,31 MPa tek eksenli basma dayanımına ve 22,70 kg/cm² nokta yükü dayanımına sahip olduğu saptanmıştır.

Tablo 5. Çorlu- Karatepe Bazaltı (Yılmaz, 2012) ve Kandıra Babaköy Bazaltı Fiziko-Mekanik Özellikleri Laboratuvar Deney Sonuçlarının Karşılaştırılması

Agrega Deneyleri	Çorlu- Karatepe Bazaltı (Yılmaz, 2012)	Kandıra Babaköy Bazaltı	
		Mostradan Alınan Numuneler	Sakarya Şantiye Sahasından Alınan Numuneler
Yassılık Endeksi (%)	13	--	5-12 mm için; 6,5
			12-19 mm için; 11,5
Metilen mavisi değeri (g/kg)	0,50	4,35	0,50
Görünür tane yoğunluğu (mg/m ³)	0-5 mm için; 2,78	2,75	5-12 mm için; 2,72
	5-20 mm için; 2,89		12-19 mm için; 2,71
Doymun yüzey kuru tane yoğunluğu (mg/m ³)	0-5 mm için; 2,84	2,73	5-12 mm için; 2,68
	5-20 mm için; 2,90		12-19 mm için; 2,69
Su emme değeri (%)	0-5 mm için; 2,14	0,4	5-12 mm için; 0,7
	5-20 mm için; 0,78		12-19 mm için; 0,6
Los Angeles katsayısı (%)	13	14,1	19,5
MgSO ₄ değeri (%)	5	15,08	14,23
Tek eksenli basınç dayanımı (MPa)	192	126,31	--

Kuzey Marmara Otoyol projesinde asfalt agregası olarak kullanımı düşünülen Çorlu- Karatepe bazaltı ile çalışma konusu olan Kandıra Babaköy bazaltının laboratuvar sonuçları karşılaştırıldığında fiziksel özelliklerine ait değerlerin ortalamasının birbirlerine yakın olduğu ancak Çorlu-Karatepe bazaltının dayanım sonuçlarının daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Bu sonuçlara göre proje alanına yakın olan Kandıra Babaköy bazaltından üretilen agregalar kullanılmıştır. Bunun temel nedeni ekonomi ve zaman parametreleri olup olumsuz metilen mavisi özelliğinin iyileştirilmesi için harmanlama yöntemi kullanılmıştır. Bu proje maliyetinin agregası bütçesi açısından daha düşük olması ve zaman açısından da daha kısa zamanda tamamlanması için alınmış bir mühendislik yaklaşımıdır. Yapılan deney sonuçları incelendiğinde Babaköy bazaltlarının ortalama değerlerinin şartname limitlerini karşıladığı, bununla birlikte mühendislik özelliklerinin doğal yapı taşı olarak mühendislik yapılarında kullanımı açısından uygun olduğunu göstermektedir. Kuzey Marmara otoyolu projesinde asfalt agregası olarak kullanılan bazalt malzemesi proje maliyetine ve tamamlanma süresine pozitif etki yapmıştır.

TEŞEKKÜR

Yazarlar bu çalışmada laboratuvar deneylerinin yapılması için imkân sağlayan ABM Mühendislik firmasına ve laboratuvar çalışmalarında yardımlarını esirgemeyen çalışanlarına teşekkür eder.

KAYNAKLAR

- Aslan, D. (2019). Diyarbakır yöresinde bitümlü sıcak karışımlarda kullanılan bazalt, kalker, dere malzemelerinin karakteristik özelliklerinin karşılaştırılması. Yüksek Lisans Tezi Harran Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Şanlıurfa 95s.
- Celebi, D., & Köprübaşı, N. (2007). Kefken-Kerpe dolayında (Kocaeli) yüzeyleyen volkanik kayaların jeokimyasal karakteristikleri. Türkiye Jeoloji Bülteni, 50(1) (Nisan), 289280. <https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/289280>
- Eker, A. N. (2019). Bazalt ve gabroların bitümlü sıcak karışımlarda agrega olarak kullanılabilirliğinin değerlendirilmesi. Yüksek Lisans Tezi. Batman Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı, Batman 120s.
- Gedik, İ., Pehlivan, Ş., & Timur, E. (2005). Kocaeli Yarımadası Jeolojisi. MTA Raporları 10774, Ankara.
- Güngör, A.G., Adiloğlu, U.K., Turhan, M.C. (2013). Yol Altyapısı, Sanat Yapıları, Köprü ve Tüneller, Üstyapı ve Çeşitli İşler. Karayolları Teknik Şartnamesi (KTS). Karayolları Genel Müdürlüğü, Ankara 431s.
- Karışmaz, B.K., & Morova, N. (2022). Diatomitin bitümlü sıcak karışımlarda filler olarak kullanılabilirliğinin araştırılması. *Uluslararası Teknolojik Bilimler Dergisi*, c. 14, sy. 3, ss. 103–115, <https://doi: 10.55974/utbd.1158664>
- Ketin, İ., & Gümüş, Ö. (1963). Sinop-Ayancık arasında III. bölgeye dahil sahaların jeolojisi. TPAO rapor 288, Ankara.
- Milli Savunma Bakanlığı, (2023). Kocaeli 1/200 000 ölçekli fiziki il haritası. MSB Harita Genel Müdürlüğü, Ankara.
- MTA, (2020). Ereğli F24-d3 Paftası 1/25000 ölçekli Jeoloji haritası. MTA Genel Müdürlüğü, Ankara. <https://www.harita.gov.tr/urun/kocaeli-fiziki-il-haritasi/368>
- Taşlıgil, N., & Şahin, G. (2016). Yapı malzemesi olarak kullanılan Türkiye doğal taşlarının iktisadi coğrafya odağında analizi. *Marmara Coğrafya Dergisi*, sy. 33, ss. 607–640, <http://www.marmaracografya.com/>
- Timur, E., & Aksay, A. (2002). 1/100 000 ölçekli Türkiye Jeoloji haritaları. Ereğli F 24 ve F 25 paftaları. MTA Jeoloji Etütleri Dairesi, Ankara.
- TS EN 1097-1 (2011). Agregaların Mekanik ve Fiziksel Özellikleri İçin Deneyler- Bölüm 1: Aşınmaya Karşı Direncin Tayini (Mikro-Deval). Türk Standartları Enstitüsü, Ankara 15s.
- TS EN 1097-2 (2020). Agregaların Mekanik ve Fiziksel Özellikleri İçin Deneyler Bölüm 2: Parçalanma Direncinin Tayini İçin Metotlar. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara 46s.
- TS EN 1097-6 (2022). Agregaların Mekanik ve Fiziksel Özellikleri İçin Deneyler- Bölüm 6: Tane Yoğunluğunun ve Su Emme Oranının Tayini. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara 64s.
- TS EN 12697-11 (2020). Bitümlü Karışımlar- Test Yöntemleri- Bölüm 11: Agrega ve Bitüm Arasındaki Benzeşmenin Belirlenmesi. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara 29s.
- TS EN 1367-2 (2011). Agregaların Termal ve Bozunma Özellikleri İçin Deneyler- Bölüm 2: Magnezyum Sülfat Deneyi. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara 11s.
- TS EN 1744-1 (2011). Agregaların Kimyasal Özellikleri İçin Deneyler- Bölüm 1: Kimyasal Analiz- Organik Madde Tayini. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara 46s.
- TS EN 933-1 (2012). Agregaların Geometrik Özellikleri İçin Deneyler – Bölüm 1: Tane Büyüklüğü Dağılımı Tayini – Eleme Yöntemi. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara 18s.
- TS EN 933-4 (2009). Agregaların Geometrik Özellikleri İçin Deneyler- Bölüm 3: Tane Şekli Tayini- Şekil Endeksi. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara 12s.
- TS EN 933-9 (2022). Agregaların Geometrik Özellikleri İçin Deneyler- Bölüm 9: İnce Tanelerin Tayini- Metilen Mavisi Deneyi. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara 22s.
- Yıldız, T.D., Gültekin, A.H., & Özdamar, Ş. (2022). Gerede- Kavacık bölgesi bazaltlarının endüstriyel kullanım yelpazesinin özelliklerinin belirlenmesi. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 10 (1), 7 - 27. <https://doi.org/10.21923/jesd.943867>

Yılmaz, M. (2012). Granitik kayaçların sıcak asfalt karışımlarında agrega olarak kullanılabilirliği. Doktora Tezi. İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Jeoloji Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul 149s.

Yiğit, N. (2021). Polipropilen lif boyutlarının asfalt aşınma tabakası taşıma kapasitesine etkilerinin incelenmesi. Yüksek Lisans Tezi. Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Sakarya 94s.