



KAHRAMAMARAŞ SÜTÇÜ İMAM
ÜNİVERSİTESİ

e-ISSN 1309-1751

Mühendislik Bilimleri Dergisi
Journal of Engineering Sciences

2024

SAYI / NUMBER : 1

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

Assist. 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. Fatih MENGELOĞLU
Landscape Arc.
KSU Univ. TURKEY
fmengelo@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
gokce@pau.edu.tr

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

Assoc. Prof.Dr.Tamer RIZAOĞLU
Geological Eng.
KSU Univ., TURKEY
tamer@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. Ö. Fatih KEÇECİOĞLU
Electrical and Electronics Eng.
KSU Univ. TURKEY
fkececioglu@ksu.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

Assoc.Prof.Dr. Pınar CİHAN
Computer Eng.
Namık Kemal Univ. TURKEY
pkaya@nku.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. Zeyneb KILIÇ
Civil Eng.
Adıyaman Univ. TURKEY
zkilic@adiyaman.edu.tr

Assist.Prof.Dr. Ayşe Ruşen DURUCAN
Civil Eng.
Fırat Univ. TURKEY
ardurucan@firat.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 1) KATKI VEREN HAKEMLER

Nil YAPICI

Muhammed Yasin DURGUN

Meral KORKMAZ

Yasin KABALCI

Selami DEMİR

Ayhan Öner YÜCEL

Abdulgazi GEDİK

Atilla Eren MAMUK

Fatih Tuncay EFE

Muhammed Safa KAMER

Pelin CANBAY

Cengizhan DURUCAN

Muhammed GÜMÜŞ

Tuğba ŞENTÜRK

Bahadır Erman YÜCE

Osman GÜNAYDIN

Fahriye GEMCİ

Bilgehan GÜRÜNLÜ

Miray BEKBOLET

Furkan DİNÇER

İsrafil KARADÖL

Adnan ALDEMİR

Sefa DURMAZ

Serdar ÇARBAŞ

Kubilay Muhammed SÜNNETÇİ

Hasan DEMİR

Fatih DARICIK

Fuad OKAY

Mustafa EKEN

Afsın CERİT

Cihan DOGUSGEN ERBAS

Muhammet Ali KARABULUT

Emre Oğuz KÖROĞLU

Nihat MOROVA

Pınar ÖZDEN

Turgay ÖZDEMİR

Ertuğrul ALTINTAŞ

Bahadır Erman YÜCE

Serap ERGÜN

Hümeyra ŞAHİN

Mücahid GÜNAY

Mumin TUTAR

Celalettin YÜCE

Mehmet Fatih ALTAN

Tuğrul OKTAY

Eyüp Emre ÜLKÜ

Yelda YALÇIN GÜRKAN

Mustafa TEKİN

Ersin YANMAZ

Kadir KARAKUŞ

Cengizhan DURUCAN

Refik Burak TAYMUŞ

Yalçın ÇEKİÇ

Mehmet EKER

Mehmet Tahir ERDİNÇ

Ufuk GÜL

Şadiye Defne AKBAŞ

Mesut BAŞIBÜYÜK

Zeynep ZAIMOĞLU



İÇİNDEKİLER

ARAŞTIRMA MAKALESİ – RESEARCH ARTICLE

- Isı Yalıtımlı Harç Üretiminde Bazı Etken Parametrelerin SPSS Yöntemi İle İncelenmesi**
Examination Of The Effective Parameters In Thermal Insulation Mortar Production By SPSS Method 1-15
Nükhet ŞAPCI, Mustafa SİVRİ
- Sıcak Boru Kaplamalarında Farklı Kompozit Kaplama Malzemelerin Termal Performanslarının Karşılaştırması Üzerine Bir Analiz**
An Analysis On The Comparison Of Thermal Performances Of Different Composite Coating Materials In Hot Pipe Coatings 16-29
Lütfullah GÜNDÜZ, Şevket Onur KALKAN, Oktay POZAM
- Performance Analysis Of Optical Wireless Communication System Designed By Using Different Filters**
Farklı Filtreler Kullanılarak Tasarlanan Optik Kablosuz Haberleşme Sisteminin Performans Analizi 30-39
Fethiye Merve KAVAK, Duygu KAYA
- Eksenel Akışlı Siklonlarda Kanat Sayısının Ayırma Verimi Ve Basınç Kayıplarına Olan Etkisinin Araştırılması**
Investigation Of The Effect Of Number Of Guide Vanes On Separation Efficiency And Pressure Drops In The Axial Flow Cyclones 40-48
Nihan BABAOĞLU, Ayşe Nur GÖKDUMAN
- Investigation Of The Effect Of Body Weight And Vehicle Speed On The Measurement Of Vibrations Used In Highway Pavement Evaluation**
Karayolu Üstyapı Değerlendirmesinde Kullanılan Titreşimlerin Ölçümünde Vücut Ağırlığı Ve Taşıt Hızı Etkisinin İncelenmesi 49-60
Ufuk KIRBAŞ, Mustafa KARSAHİN
- Nematik Sıvı Kristale V₂O₅ Nanoparçacık Katkılandırılması İle Dielektrik Davranışının İncelenmesi**
Investigation Of Dielectric Behavior With V₂O₅ Nanoparticle Doping To Nematic Liquid Crystal 61-68
Şükrü ÖZĞAN
- CNC Makinesi Kesme Parametrelerinin Ceviz Odununun Yüzey Pürüzlülüğü Üzerine Etkisinin Araştırılması**
Investigation Of The Effect Of CNC Machine Cutting Parameters On The Surface Roughness Of Walnut Wood 69-77
Osman KABA, Bekir Cihad BAL

A Numerical Analysis On The Submicron- And Micron-Sized Particle Sedimentation In A Wire-To-Plate Electrostatic Precipitator Telden-Plakaya Türde Bir Elektrostatik Çöktürücüde Mikronaltı- Ve Mikron-Boyutlu Partikül Birikiminin Nümerik Analizi Orçun EKİN	78-91
SDA: A Novel Skewed-Deep-Architecture For Vehicle Motion Detection In Driving Videos EDM: Sürüş Videolarında Araç Hareket Algılaması İçin Yeni Bir Eğik-Derin-Mimari Tansu TEMEL, Mehmet KILIÇARSLAN, Yaşar HOŞCAN	92-104
Improving The Behavior Of RC Frames By Using Lightweight Concrete Panels And Metallic Elements Hafif Beton Panel Ve Metalik Eleman Kullanılarak Betonarme Çerçeve Davranışının İyileştirilmesi Hakan KOMAN	105-120
Öznitelik Entegrasyonuna Dayalı ESA Mimarisi Kullanılarak Endoskopik Görüntülerin Sınıflandırılması Classification Of Endoscopic Images Using CNN Architecture Based On Feature Integration Hüseyin ÜZEN, Hüseyin FIRAT	121-132
The Application Of The Taguchi Method For Optimizing The Compression Strength Of PLA Samples Produced Using FDM FDM Kullanılarak Üretilen PLA Numunelerinin Basma Mukavemetini Optimize Etmek İçin Taguchi Yöntemi Uygulaması Oğuz TUNÇEL, Mehmet Said BAYRAKLILAR	133-140
Experimental And Analytical Investigation Of The Effect Of Layer Number And Thickness On The Bending Properties Of Glulam Beams Tabaka Sayısı Ve Kalınlığının Glulam Kirişlerin Eğilme Özellikleri Üzerine Etkisinin Deneysel Ve Nümerik Olarak İncelenmesi Yasemin ŞİMŞEK TÜRKER, Şemsettin KILINÇARSLAN	141-150
İHA Tabanlı Ray Kontrolü İçin Evrişimli Sinir Ağları İle Ray Görüntülerinin Gerçek Zamanlı Segmentasyonu Real-Time Segmentation Of Rail Images With Convolutional Neural Networks For UAV Based Rail Inspection Selçuk Sinan KIRAT, İlhan AYDIN	151-165
Zaman Serileri Tahminleme Algoritmaları İle Kontör Tüketim Tahminlemesi Ve Karşılaştırmalı Uygulaması Credit Consumption Estimation And Comparative Application With Time Series Estimation Algorithms Hakan AKÇAY, Derya YILTAS KAPLAN	166-189
A Novel Study On The Synthesis, Characterization, And Photocatalytic Activity Of CeO₂ Nanoparticles CeO₂ Nanotaneçiklerinin Sentezi, Karakterizasyonu Ve Fotokatalitik Aktivitesi Nazlı TÜRKTEN, Yunus KARATAŞ	190-198
Coğrafi Bilgi Sistemleri Tabanlı Analitik Hiyerarşi Yöntemi Kullanılarak Güneş Enerjisi Santrali Yer Seçimi: Mardin İli Örneği Solar Power Plant Site Selection Using Geographic Information Systems Based Analytical Hierarchy Method: The Case Of Mardin Province Durmuş Ali TEKAMAR, Kübra TEKAMAR	199-212

- Lignin İlavésinin Cam Elyaf Takviyeli Poliamid 6/Poliamid 610 Kompozitlerinin Özelliklerine Etkisinin İncelenmesi**
Investigation Of The Effect Of Lignin Addition On The Properties Of Glass Fiber Reinforced Polyamide 6/Polyamide 610 Composites 213-221
Bedriye ÜÇPINAR DURMAZ, Elnura ARTYKBAEVA, Ayşe AYTAC
- Limba Odununun (Terminalin Superba) Bazı Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi**
Determination Of Some Mechanical Properties Of Limba Wood (Terminalin Superba) 222-231
Musa KAYA, Ramazan BÜLBÜL
- Mixed Mode Fracture Of The Geopolymer Composites Reinforced With Recycled Steel Fibers**
Atık Çelik Liflerle Güçlendirilmiş Geopolimer Betonlarda Karışık Mod Kırılması 232-242
Muhammed GÜMÜŞ, Hakan BAYRAK
- Photoplethysmography Based Blood Pressure Estimation Using Synchrosqueezing Transform And Deep Learning** 243-255
Senkron Sıkıştırma Dönüşümü Ve Derin Öğrenme Kullanılarak Fotopletismografi Tabanlı Kan Basıncı Kestirimi
Yeşim HEKİM TANÇ, Mahmut ÖZTÜRK
- Kompozit Bir Silindir Gömleğinde İki Boyutlu Sıcaklık Dağılımın Sayısal İncelenmesi**
Numerical Investigation Of Two Dimensional Temperature Distribution Of A Composite Cylinder Liner 256-268
Ali YILDIRIM, Durmuş YARIMPABUÇ, Kerimcan ÇELEBİ
- Eklemeli İmalat Yöntemiyle Üretilen ABS Cıvata Numunesinin Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi**
ABS Bolt Sample Fabricated By Additive Manufacturing Method Investigation Of Mechanical Properties 269-277
Muhammed Tayyip KOÇAK, Mehmet Said BAYRAKLILAR, Osman ÜLKİR
- Soğukta Şekil Verilmiş Çelik Kesitlerin Gövde Ezilmesi Dayanımı Belirlenmesinde Kullanılan Güncel İki Standartın İncelenmesi**
An Investigation Of Two Current Standards For Determining The Web-Crippling Strength Of Cold-Formed Steel Sections 278-286
Yakup BÖLÜKBAŞ
- The Effect Of Immobilized Enzyme On Textile Wastewater** 287-292
İmmobilize Enzimin Tekstil Atık Sularına Etkisi
İrem AYRANPINAR, Melike KOZAK, Serdar GÖÇER, Kevser CIRIK



Kahramanmaraş Sutcu Imam University

Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 23.03.2023
Kabul Tarihi : 11.10.2023

Received Date : 23.03.2023
Accepted Date : 11.10.2023

ISI YALITIMLI HARÇ ÜRETİMİNDE BAZI ETKEN PARAMETRELERİN SPSS YÖNTEMİ İLE İNCELENMESİ

EXAMINATION OF THE EFFECTIVE PARAMETERS IN THERMAL INSULATION MORTAR PRODUCTION BY SPSS METHOD

Nükhet ŞAPCI^{1*} (ORCID: 0000-0002-8390-9134)
Mustafa SİVRİ² (ORCID: 0000-0002-2756-5357)

Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Teknik Bilimler MYO, İnşaat Bölümü, Isparta, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Nükhet ŞAPCI, nukhetsapci@isparta.edu.tr

ÖZET

Son yıllarda enerji tasarruflu binalar ekonomik ve ekolojik özellikleri nedeniyle önem kazanmıştır. Ayrıca deprem felaketlerinin yaşamamızda oluşturduğu ciddi hasarlar nedeniyle, çimentolu harçlarda hafif agreganın kullanımının önemi daha iyi anlaşılmıştır. Özellikle gözenekli hafif agregaların ısı yalıtımlı harçların geliştirilmesinde önemli bir hammadde olduğu görülmüştür. Kompozit formdaki bu harçların termal özelliğini gösteren en önemli etki ısı iletkenlik katsayılarının tespit edilmesidir. Bu makale çalışmada 3 farklı kökende hafif agreganın ana hammadde olarak kullanılmıştır. Toplamda polimer katkı 15 farklı karışım tasarımı yapılmıştır. Elde edilen sıva numunelerinin ısı iletkenlik özellikleri, polimer katkı kullanılmadan üretilen kontrol numuneleri ile kıyaslanmıştır. Deneysel çalışmalarda elde edilen örneklerin TS EN 998-1'e göre T1 ve T2 "Isı Yalıtımlı Harçlar" kategorisinde yer alabileceği tespit edilmiştir. En düşük kuru birim hacim ağırlık 554 kg/m³ ve 0,087 W/mK ısı iletkenlik katsayısı ile Diatomit agregalı serilerde belirlenmiştir. Ayrıca farklı tasarımlardaki bu harçların, bir duvar kesitinden ısıl konfor performansının incelenmesi yapılmıştır. Bu çalışmada birim hacim ağırlık ve ısı iletkenlik katsayısı analizlerinin etkinliklerinin belirlenmesi için SPSS (V26) programı ile sonucu etkileyen parametreler belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Hafif agreganın, kompozit harç, ısı iletkenlik katsayısı, enerji tasarrufu

ABSTRACT

In recent years, energy-efficient buildings have gained importance due to their economic and ecological features. In addition, due to the serious damage caused by earthquake disasters in our lives, the importance of using lightweight aggregate in cementitious mortars has been better understood. Particularly porous lightweight aggregates have been shown to be an important raw material in the development of thermal insulating mortars. The most important effect showing the thermal properties of these mortars in composite form is the determination of their thermal conductivity coefficients. In this article, lightweight aggregate of 3 different origins was used as the main raw material. In total, 15 different mixture designs with polymer additives were made. Thermal conductivity properties of the obtained plaster samples were compared with control samples produced without the use of polymer additives. It has been determined that the samples obtained in experimental studies can be included in the T1 and T2 "Thermal Insulating Mortars" categories according to TS EN 998-1. The lowest dry unit volume weight was determined in the Diatomite aggregate series with a thermal conductivity coefficient of 554 kg/m³ and 0.087 W/mK. In addition, the thermal comfort performance of these mortars with different designs was examined from a wall section. In this study, the parameters affecting the result were determined with the SPSS (V26) program to determine the effectiveness of unit volume weight and thermal conductivity coefficient analyses.

Keywords: Lightweight aggregate, composite mortar, thermal conductivity coefficient, energy saving

GİRİŞ

Son yıllarda küresel ısınma dünyanın en büyük problemleri arasındadır. Bu sorun iklim değişikliğini de beraberinde getirmiştir. İklim değişikliğinin en önemli sebebi ise sera gazı salınımlarıdır. Sera gazı salınım seviyeleri enerjiyi etkin kullanarak kontrol altına alınabilir (Wu vd., 2016). Bu nedenle binalarda enerjiyi verimli kullanmak ancak etkin bir şekilde ısı yalıtım uygulaması ile mümkündür (Şapcı, 2022).

Dünya üzerindeki birincil enerji kaynaklarının hızlı bir şekilde tükenmesi üzerine gelişmiş ülkeler başta olmak üzere tüm ülkeler enerji ihtiyaçlarını kontrol altına almak ve enerjiyi kontrollü bir şekilde kullanmak için yeni yöntemler geliştirmektedirler. Konutlarda kullanılan enerjinin büyük bir kısmı ısıtma ve soğutma amaçlı olarak tüketilmektedir. Bu enerjinin etkin kullanılması ısı yalıtımı ile sağlanabilir. Dolayısıyla doğal malzemelerle yalıtım elemanlarının üretilmesi ve uygulanması da bir o kadar önemli konu haline gelmiştir (Şapcı & Gündüz, 2021).

Ülkemizde Şubat 2006 döneminde yürürlüğe giren ve birkaç kez revize edilen TS EN 998-1 standardında “Isı Yalıtımı Sağlayan T Grubu Harç” kategorisinde yer alan harç ürünlerde aranılan özellikler teknik olarak tanımlanmış ve üretilen ürünlerin hangi teknik değerleri sağlaması gerektiği belirtilmiştir. Özellikle, inşaat sektöründe binalarda enerji tasarrufunun daha iyi sağlanması ve enerji kaynaklarımızın daha kontrollü kullanılması amacıyla binalarda bu yalıtımların çok özenle yapılması gerekmektedir (Şapcı vd., 2009).

Isı yalıtımı sağlayan kompozit harç ürünler konusunda yapılan çalışmalarda, Gündüz ve Kalkan (2016)’da, çimento esaslı hafif harçlarda diatomit agregaların etkisi konulu bir çalışma yapmışlardır. Bu çalışma da diatomit agregası ana malzeme olarak kullanılmış ve hafif harç örnekleri üretilmiştir. Ayrıca diatomit agrega boyut değişiminin hafif harç özellikleri üzerine etkilerini sayısal olarak irdelemişlerdir. Harç örneklerinin priz süresi sonunda birim hacim ağırlık değerleri 355 kg/m^3 - 591 kg/m^3 arasında, ısı iletkenlik katsayısı değerleri ise $0,057$ - $0,152 \text{ W/mK}$ arasında ölçülmüştür. Harç gruplarının ise TS EN 998-1’e göre T1 ve T2 grubunda yer alabileceğini belirtmişlerdir.

Gündüz vd., (2018)’de ısı yalıtım amaçlı kompozit harçlarda, açılmış vermikülit agreganın termal konfor parametreleri üzerindeki etkisinin incelenmesi üzerine bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Açılmış (genleşmiş) vermikülit agregaları ile üretilmiş kompozit yapı harçların termal konfor yönleri ve teknik performanslarını sayısal olarak irdelemişlerdir. Test sonuçlarına göre, açılmış vermikülit agrega oranı arttığında termal konfor değerlerinin iyileştiğini belirtmişlerdir. Böylece açılmış vermikülitin bir hafif agrega olarak enerji tasarruflu binalar için uygulanabilen bir ısı yalıtım malzemesi olarak kullanılabilceğini belirtmişlerdir.

Yıldırım ve Baba (2018)’de hafif agregalar kullanılarak kompozit yapı harç üretimi üzerine bir çalışma gerçekleştirmişlerdir. Reçete çalışmasında hacimsel olarak %0, 25, 50, 75 ve 100 oranlarında m^3 'te 250 kg çimento kullanılarak pomza ve geliştirilmiş perlit agregaları ile ürettikleri harç tasarımlarını kullanmışlardır. Ürettikleri 5 çeşit numune üzerinde; su emme, kuru birim hacim ağırlık, mukavemet analizi, kılcal su emme ve ısıl iletkenlik testleri yapılmıştır. Elde edilen analiz verilerine göre pomza agrega miktarı arttıkça su emme, basınç dayanımı ve kılcallık özellikleri olumlu etkilenirken, ısı iletkenlik ve kuru birim hacim ağırlık özelliklerinin olumsuz etkilendiğini belirtmişlerdir. Özellikle pomza ve geliştirilmiş perlit agregalarının %50 oranlarında karıştırılmasının en anlamlı sonuçları verdiğini tespit etmişlerdir.

Gündüz & Kalkan (2022)’de çimento esaslı hafif harç numunelerinin hazırlanmasında kullanılan agreganın birim hacim ağırlık ve gözeneklilik oranının, harç malzemelerinin özgül ısısı üzerinde etkili bir faktör olduğu sonucuna varmışlardır. Pomza, tuf, volkanik cüruf ve diatomit agregaları kullanılarak üretilen harçların ısı depolamada etkili olduğunu belirtmişlerdir.

Kılınçarslan vd. (2018), Gündüz ve Kalkan (2022), yapmış oldukları bilimsel çalışmalarda son yıllarda, çimentolu harçların, binaların enerji verimliliğine önemli katkılar sağladığını belirtmişlerdir. Ayrıca Bilgin ve Arıcı (2017); Kılınçarslan vd. (2018), günümüz binalarında optimum koşullarda termal konforun sağlanması için, standartlar ve yönetmeliklerde önemli bir kural olarak uygulamaya başlandığını belirtmişlerdir.

Bu çalışmanın amacı, inşaat endüstrisinde yeşil bina konseptine uygun olarak binaların iç ve dış cephelerinde uygulanabilecek ısı yalıtım özelliği yüksek, polimer bileşen katkılı kompozit formda harç karışımları tasarlamaktır. Sertleşmiş harç örneklerinin priz süresi tamamlandıktan sonra TS EN 998-1 standardına göre kuru birim hacim ağırlıkları ve ısı iletkenlik katsayıları ölçülmüştür. Bu analizlerden elde edilen teknik bulgular ışığında, 3 farklı hafif

agreganın kompozit yapının ısı yalıtım özelliklerine olan avantajları detaylı bir şekilde analiz edilmiştir. Ayrıca bu harç serilerden örnek bir kompozit harcın ısı yalıtım performansını daha ayrıntılı incelemek amacıyla TS 825 standardının öngördüğü bir duvar model kesiti için ısı yalıtım değerlendirmesi yapılmıştır. Deney girdi verilerinin etkinliklerinin belirlenmesi amacıyla SPSS ve ANFIS yöntemi kullanılarak kontrol sağlanmıştır.

MATERYAL VE METOT

Materyal

Çalışmada 3 farklı köken olarak pomza, volkanik cüruf ve diyatomit gibi hafif agregalar ana hammadde olarak kullanılmıştır (Şekil 1). Agrega türlerinin her birinin ana hammadde olarak kullanıldığı kendi içerisinde 5 ayrı karışım kombinasyonları tasarlanmıştır. Karışımlardaki pomza Nevşehir-Göre, volkanik cüruf Manisa-Kula ve diyatomit ise Ankara-Kazan bölgesi civarından temin edilmiştir. Çalışmada kullanılan 3 farklı agrega ve çimentonun kimyasal bileşimi, X-Işını Floresans spektrometresi (XRF) ile yapılmış ve sonuçlar Tablo 1'de paylaşılmıştır. Maden mühendisliği bölümü laboratuvarlarında agregalar birincil kırıcıda kırılarak, bilyalı değirmenlerde öğütülmüş daha sonra eleme yapmak suretiyle 0-4 mm ve 0-2 mm tane boyut aralığında sınıflandırılmıştır. Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Teknik Bilimler MYO İnşaat laboratuvarında agregaların fiziksel özelliklerini belirlemek için malzemelerin analizleri yapılmış TS EN 1097-6 ve TS 699'a göre sonuçlar irdelenmiştir (Tablo 2).

Tablo 1. Deneysel Çalışmalarda Kullanılan Çimento ve Agregaların XRF Kimyasal Analizi

Kimyasal Bileşen (%)	Çimento	Pomza	Volkanik Cüruf	Diyatomit
SiO ₂	18,12	70,99	43,80	89,80
Al ₂ O ₃	4,72	14,72	21,30	3,56
Fe ₂ O ₃	3,42	1,18	7,22	0,38
MgO	0,89	0,35	6,80	0,36
CaO	65,20	0,92	12,30	1,06
Na ₂ O+K ₂ O	1,21	8,96	6,90	0,50
TiO ₂	0,00	0,08	0,03	0,13

Tablo 2. Deneysel Çalışmalarda Kullanılan Agregaların Fiziksel Özellikleri

Malzeme	Özgül ağırlık (g/cm ³)	Etüv kuru tane yoğunluğu (g/cm ³)	Ağırlıkça su emme (%)
Diyatomit	2,34	0,518	62,50
Pomza	2,32	1,15	21,08
Volkanik cüruf	2,76	2,01	11,89

Pomza, yoğunluğu 1 g/cm³'ten düşük, sertliği mohs skalasına göre yaklaşık 5-6 civarında olan boşluklu volkanik bir kayadır. Volkanik cüruf ise kırmızımsı-siyahımsı renklerde olup çoğunlukla yüksek demir içeriğine sahiptir. Bazı volkanik cüruf türlerinin ise yüzeyi koyu yeşil bir renge sahip olabilir. Ayrıca oksidasyon koyu kırmızı kahverengi bir renge de yol açabilir (Demirdağ & Gündüz, 2008). Kimyasal analiz sonuçları incelendiğinde SiO₂ oranı %43,80 olarak belirlenmiştir. SiO₂ oranı %45'in altındaki malzemelerin jeolojik olarak bazik kökenli kayalar olarak değerlendirildiği bilindiğine göre volkanik cüruf malzeme pomza ve diyatomitten farklı olarak bazik karakter sergilemektedir. Diyatomit kayacı, tek hücreli mikroskobik diatome alglerinin fosilleşmiş silisli kabuklarından oluşan sedimanter kayalardandır. Hızlı bir şekilde çoğalan ve su içerisinde belirlenemeyen miktarlarda var olan bu

canlılar, canlılıklarını kaybettiklerinde su kütlesinin dibine batarak yığılırlar. Bu kayaçlar doğada yer yer kayaç formunda veya damar yapıları şeklinde bulunurlar (Özbey & Atamer 1987; Aruntaş 1996). Diyatomit kayacı ağırlıklı olarak silisten oluşmasına rağmen, kayacın sertliği mohs skalasına göre 1,5-2, tane mukavemeti ise 4-6,5 arasındadır (Gündüz & Kalkan, 2022).

Çalışmada bütün karışım tasarımlarında bağlayıcı bileşen olarak CEM I 52,5 R beyaz portland çimento ürünü ana bağlayıcı olarak kullanılmıştır. Ayrıca karışımın yapışma mukavemeti özelliğini artırmak için söndürülmüş toz kireç (Ca(OH)_2) kullanılmıştır. Karışımlarda dolgu malzemesi olarak iki tip malzeme kullanılmıştır. İşlenebilirlik özelliğinin artırılabilmesi için bütün serilerde 100 mikron altı mikronize kalsit ve harçların birim hacim ağırlığını minimum seviyeye düşürmek için 1 mm tane boyutu altında genişletilmiş perlit malzemesi ilave edilmiştir. Deneysel çalışmada kompozit matris yapıda harç numuneleri elde etmek, harcı kıvamlı hale getirmek ve ısı yalıtım amaçlı harç üretmek için kontrol karışımı hariç tüm karışımlarda toz şeklinde polimer katkıları kullanılmıştır. Bunlar, hava sürükleyici, kıvamlaştırıcı, su itici ve aderans artırıcı özellikteki katkılardır.



Şekil 1. Kompozit Harç Tasarımlarında Kullanılan Malzemelerin Görünümü

Metot

Bu çalışmada 3 farklı hafif agrega kullanılarak, her biri kendi içerisinde, polimer bileşenli kompozit yapıda 5 farklı karışım kombinasyonu tasarlanmıştır. Pomza agregalı seriler (PM1-PM5), volkanik cüruf agregalı seriler (VC1-VC5), Diyatomit agregalı seriler (DM1-DM5) olarak kodlandırılmıştır. Üç farklı hafif agrega türü kendi içinde ağırlıkça farklı çimento oranlarında (%26-%34) aralığında %2 artırmalı olarak kullanılmıştır. Toplamda her bir agrega türünün ana hammadde olarak kullanıldığı 15 farklı seride harç numuneleri hazırlanmıştır. Polimer bileşenli hafif agregalı bu serilerde %6 oranında mikronize kalsit ve %14 oranında genişletilmiş perlit dolgu malzemesi olarak kullanılmış ve bütün serilerde toplamda %20 oranında sabit tutulmuştur. Yine bütün serilerde söndürülmüş toz kireç malzemesi %8 oranında, polimer katkıları ise %5,5 oranında kullanılarak sabit tutulmuştur. Çalışmada teknik mukayesenin sağlanabilmesi amacıyla sabit %30 çimento oranında ve diğer bütün bileşenlerin aynı oranlarda kullanıldığı pomza agregalı (PM0), volkanik cüruf agregalı (VC0) ve diyatomit agregalı (DM0) kodlu kontrol harç örnekleri hazırlanmıştır. Bu harçlarda hiçbir polimer katkı kullanılmamıştır. Harç karışım tasarımları Tablo 3'te verilmiştir.

Deneysel çalışmada karışımların optimum su miktarının belirlenerek taze harç kıvamına getirilebilmesi amacıyla TS EN 1015-3 ve ASTM-C 230 standardına göre "flow table" yöntemi kullanılmıştır. Taze harç olarak elde edilen tüm karışımlar, TS EN 998-1 standardına göre 4x4x16 cm boyutundaki prizma kalıplara ve 20x40x5 cm boyutlu plaka kalıplara dökülerek uygun kütleme işlemleri yapılmıştır. 28 günlük kütleme işlemlerinden sonra numunelerin ısı iletkenlik katsayısı ve kuru birim hacim ağırlık gibi teknik özellikleri bu numuneler üzerinde analiz edilerek belirlenmiştir (Tablo 4). Bu çalışmadaki diğer bir irdeleme ise deney girdi verilerinin etkinliğini tespit etmek için SPSS yöntemi kullanılarak etkin parametreler belirlenmiştir. ANFİS ile veriler eğitilmiş ve deneysel verilerle sonuçlar kontrol edilmiştir.

Tablo 3. Harç Karışım Tasarımları, Ağırlıkça Yüzde (%) Kullanım Oranları

Bileşen	PM0 (Kontrol Harcı)	Polimer Bileşenli Pomza Agregalı Harç Karışım Tasarımları				
		PM1	PM2	PM3	PM4	PM5
0-2 mm Pomza Agregası	42,0	40,50	38,50	36,50	34,50	32,50
Beyaz Çimento	30,0	26,00	28,00	30,00	32,00	34,00
Sönmüş Toz Kireç	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00
Dolgu Malzemesi	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00
Polimer Katkı	--	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5
Bileşen	VC0 (Kontrol Harcı)	Polimer Bileşenli Volkanik Cüruf Agregalı Harç Karışım Tasarımları				
		VC1	VC2	VC3	VC4	VC5
0-2 mm Volkanik Cüruf Agregası	42,0	40,50	38,50	36,50	34,50	32,50
Beyaz Çimento	30,0	26,00	28,00	30,00	32,00	34,00
Sönmüş Toz Kireç	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00
Dolgu Malzemesi	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00
Polimer Katkı	--	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5
Bileşen	DM0 (Kontrol Harcı)	Polimer Bileşenli Diyatomit Agregalı Harç Karışım Tasarımları				
		DM1	DM2	DM3	DM4	DM5
0-2 mm Diyatomit Agregası	42,0	40,50	38,50	36,50	34,50	32,50
Beyaz Çimento	30,0	26,00	28,00	30,00	32,00	34,00
Sönmüş Toz Kireç	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00
Dolgu Malzemesi	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00	20,00
Polimer Katkı	--	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5

ARAŞTIRMA BULGULARI

Taze Harç Kıvam Analizi

Taze harçların kıvam ölçümü için “flow table” metodu kullanılmıştır. Bu analiz TS EN 1015-3 ve ASTM C 230’a göre bu yöntemde, taze harç olarak karışımın uygun su oranı, ilk yayılma çapının ortalama 165 \pm 5 mm olması esas alınarak elde edilmiştir (Bekar vd., 2007). Polimer bileşenli kompozit yapıları pomza agregalı serilerde (PM1-PM5) su/katı oranı 0,75, volkanik cüruf agregalı serilerde (VC1-VC5) 0,70, diyatomit agregalı serilerde (DM1-DM5) 0,85 olarak tespit edilmiştir. Kontrol harçlarında ise su/katı oranı sırasıyla pomza agregalı serilerde (PM0) 0,70, volkanik cüruf agregalı serilerde (VC0) 0,65, diyatomit agregalı serilerde (DM0) ise 0,80 olarak ölçülmüştür. Deneysel çalışmalarda kullanılmak üzere hazırlanmış numunelere ait görünüm Şekil 2’de verilmiştir.



Şekil 2. Deneysel Çalışmalarda Kullanılan Numunelerden Genel Görünüm

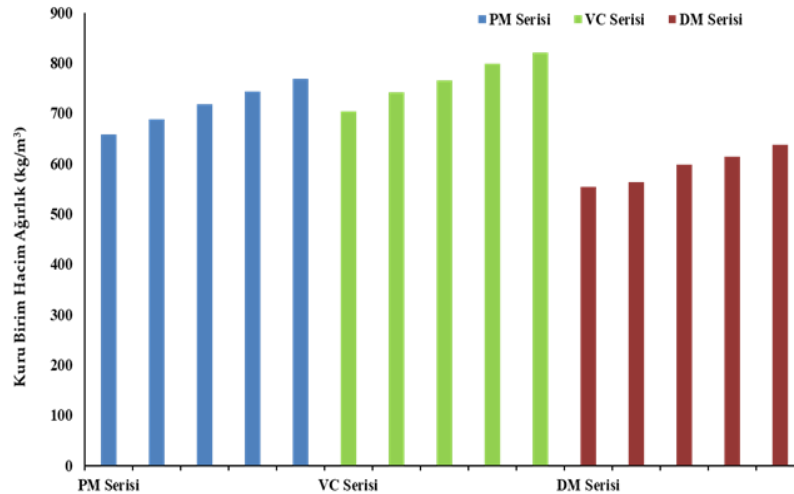
Kuru Birim Hacim Ağırlık Analizi

Bu çalışmada yapılan diğer bir analiz ise birim hacim ağırlık analizidir. Kontrol numunelerinin ve polimer bileşenli kompozit harç numunelerinin 28 günlük kür süresi sonunda birim hacim ağırlık değerleri TS EN 1015-10’a göre belirlenmiş olup, sonuçlar Tablo 4’te verilmiştir. Isı yalıtım amaçlı üretilen harçların birçok teknik özelliği harçın birim hacim ağırlığının bir fonksiyonu olarak değişim göstermektedir. Bu nedenle harçın ısı yalıtım özelliği ile ilgili

yorum yapabilmek için o harç örneklerinin kuru birim hacim ağırlık özelliklerinin de bilinmesi gerekmektedir. Deneysel çalışmada her bir seriden 6 adet numunenin birim hacim ağırlıkları ölçülmüş ve aritmetik ortalama şeklinde sonuç değer belirlenmiştir. Bu bağlamda, kontrol harç örneklerinin kuru birim hacim ağırlık değerleri 751-968 kg/m³ olarak belirlenmiştir. Çimento oranı %26'dan %34'e kadar farklı oranlardaki polimer katkılı kompozit yapıdaki harç numunelerinin birim hacim ağırlık değerleri ise sırasıyla; pomzalı serilerde (PM1-PM5), 658-768 kg/m³, volkanik cüruf agregalı serilerde ise (VC1-VC5) 704-821 kg/m³, diyatomitli serilerde ise 554-638 kg/m³ olarak belirlenmiştir. Sertleşmiş harç örneklerinin karşılaştırmalı kuru birim hacim ağırlıkları ile ilgili yapılan grafiksel analiz Şekil 3'te verilmiştir.

Tablo 4. Sertleşmiş Sıva Örneklerinin Analiz Bulguları

Pomzalı Seri	Kuru Birim Hacim Ağırlık (kg/m ³)	Isı İletkenlik Katsayısı, λ (W/mK)
PM0	906	0,253
PM1	658	0,099
PM2	688	0,104
PM3	718	0,115
PM4	744	0,136
PM5	768	0,144
Volkanik Cürufllu Seri	Kuru Birim Hacim Ağırlık (kg/m ³)	Isı İletkenlik Katsayısı, λ (W/mK)
VC0	968	0,288
VC1	704	0,111
VC2	742	0,142
VC3	766	0,156
VC4	798	0,161
VC5	821	0,188
Diyatomitli Seri	Kuru Birim Hacim Ağırlık (kg/m ³)	Isı İletkenlik Katsayısı, λ (W/mK)
DM0	751	0,186
DM1	554	0,087
DM2	563	0,089
DM3	598	0,092
DM4	614	0,095
DM5	638	0,097



Şekil 3. Polimer Katkılı Harç Örneklerinin Karşılaştırmalı Kuru Birim Hacim Ağırlık Analizi

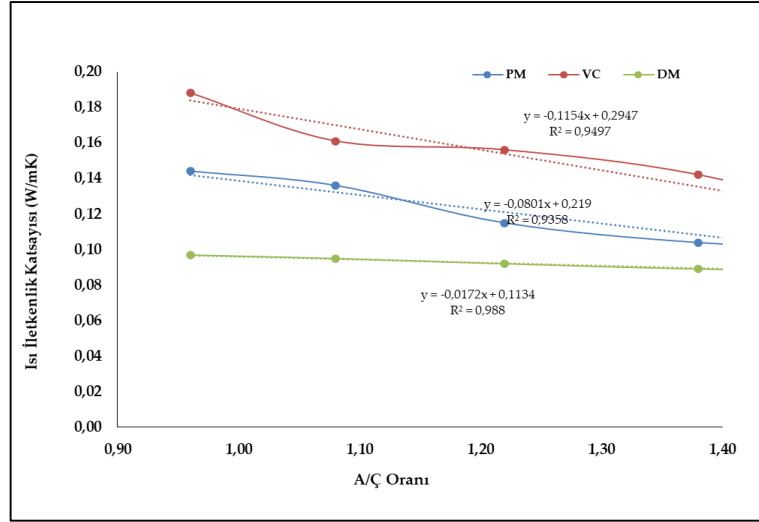
Daha önce yapılan deneysel çalışmalar ve literatür araştırmaları sonucuna göre; mikronize pomza ile üretilmiş polimer katkılı ısı yalıtımlı harçların kuru birim ağırlık değerlerinin 800 kg/m³ civarında ve daha düşük değerlerde olduğu görülmüştür (Bekar vd., 2007; Şapcı vd. 2009). Bu çalışmada da üç farklı hafif agreganın ana hammadde olarak kullanıldığı polimer katkılı kompozit yapıdaki harçların kuru birim ağırlık değerlerinin 800 kg/m³'ün altında

kaldığı görülmüştür (VC5 hariç). Çalışmada farklı karışım tasarımlarındaki harç ürünlerde en hafif sıva numunesinin 554 kg/m^3 ile DM1 kodlu %26 çimento oranındaki diyatomit agregalı seri olduğu görülmüştür. Diyatomit agregalı serilerin diğer pomza ve volkanik cüruf agregalı serilere göre birim hacim ağırlıkları daha düşüktür. Şekil 3'teki grafiksel analizde de bu durum açık bir şekilde görülmektedir. Bunun esas nedeni; diyatomit agregalarının yığın yoğunluğunun diğer agregalara göre daha düşük olmasıdır. Birim ağırlık bazında teknik bir karşılaştırma yapmak gerekirse, ağırlıkça %30 çimentonun kullanıldığı kontrol harç örnekleri ile polimer katkılı %30 çimentolu kompozit harçların sayısal irdemeleri yapılmıştır. Pomza agregalı kontrol harçlarının birim hacim ağırlığı 906 kg/m^3 iken, aynı çimento oranında (%30) polimer katkılı pomza agregalı kompozit harçların birim hacim ağırlık değeri 718 kg/m^3 olarak tespit edilmiştir. Volkanik cüruf agregalı kontrol harçlarında 968 kg/m^3 iken, polimer katkılı volkanik cüruf agregalı kompozit harçların 766 kg/m^3 , son olarak diyatomit agregalı kontrol harçlarında birim hacim ağırlık 751 kg/m^3 iken polimer bileşenli diyatomit agregalı kompozit harçlarda 598 kg/m^3 olarak ölçülmüştür. Hem ana hammaddelerin hafif agrega olarak birim hacim ağırlıklarının düşük olması, hem de karışımlarda kullanılan genişmiş perlit agregaları ciddi oranlarda sertleşmiş harçların birim hacim ağırlıklarını düşürmüştür. Ancak kontrol harçlarından farklı olarak ilave %5,5 oranında polimer katkı kullanılması kompozit yapıli harçların birim hacim ağırlıklarını daha da düşürmüştür. Polimer katkılı %30 çimento oranında kompozit harçların birim hacim ağırlık değerleri, aynı çimento oranındaki kontrol harç numunelerine göre yaklaşık olarak %20-%21 oranında azaldığı görülmüştür. Sertleşmiş harç numunelerinin birim hacim ağırlıklarının düşmesinde polimer katkılar oldukça önemli sonuçlar vermiştir. Özellikle karışım içerisinde %0,02 oranında kullanılan hava sürükleyici katkı, polimerizasyon süresince taze harç içerisinde boşluklar meydana getirmiş harcın yoğunluğunun düşmesinde etkili olmuştur. Ayrıca bütün toz polimer katkıların ana hammadde olarak kullanılan hafif agregalarla önemli ölçüde uyum sağladığı güçlü bir bağ oluşturarak harcın kıvamını dengelediği gözlemsel olarak da tespit edilmiştir.

Isı İletkenlik Analizi

Çalışmada yürütülen diğer bir inceleme ise; pomza, volkanik cüruf ve diyatomit agregası ile üretilen polimer katkılı kompozit yapıdaki harçların binaların iç ve dış cephe uygulamalarında kullanılması durumunda, ısıl performans açısından sağladığı yalıtım ölçütleri incelenmiştir. Isı yalıtımlı harçların üretimi ve değerlendirilmesi günümüzde genellikle TS EN 998-1'e göre belirlenebilmektedir. Bu standarda göre ısı yalıtımı sağlayan harç grupları için 2 ayrı sınıf (T1-T2) belirtilmiştir. Bu değerlendirme harç gruplarının ısı iletkenlik değerleri kapsamında yapılmış olup, sınır değerler şu şekilde verilmiştir: T1 Sınıfı-Isıl İletkenlik Değeri: $\leq 0.10 \text{ W/mK}$, T2 Sınıfı-Isıl İletkenlik değeri: $\leq 0.20 \text{ W/mK}$ dir.

TS EN 998-1 standardında belirtildiği gibi, bir harç malzemesinin ısıl iletkenlik katsayı değerinin bu iki gruptan birinde yer alması o harcın uygulamalarda ve/veya ürünlerde ısı yalıtımı da sağlayan harç olduğunu simgelemektedir. Bilindiği gibi bir malzemenin ısı yalıtım özelliğinin yüksek olması o malzemenin ısı iletkenlik katsayı değerinin düşük olması ile ilişkilendirilir (Şapcı & Gündüz, 2021). Bu çalışmada elde edilen tüm harç örneklerinin ısıl iletkenlik katsayı değerleri "Mahfazalı Sıcak Kutu" metoduna göre ölçülmüş olup, parametrik değerler Tablo 4'te verilmiştir. Isı iletkenlik katsayı değeri en düşük kompozit harç grubu DM kodlu diyatomit agregalı serilerdir. Isı iletkenlik katsayı değerleri $0,087-0,097 \text{ W/mK}$ arasında değişmektedir. Bu bağlamda Diyatomit agregalı serilerin tamamı T1 grubu ısı yalıtım harç statüsünde değerlendirilebilmektedir. Dolayısıyla ısı yalıtım açısından en performanslı ürünün bu çalışmada diyatomit agregalı seriler olduğu görülmüştür. Bu durumun diyatomit agregalı serilerin düşük birim hacim ağırlıklarından kaynaklandığı söylenebilir. Volkanik cüruf ve pomza agregalı serilerinde, ısı iletkenlik katsayısı değerleri $0,20 \text{ W/mK}$ 'in altında olup, T2 grubu harç kategorisinde yer aldığını söylemek mümkündür.

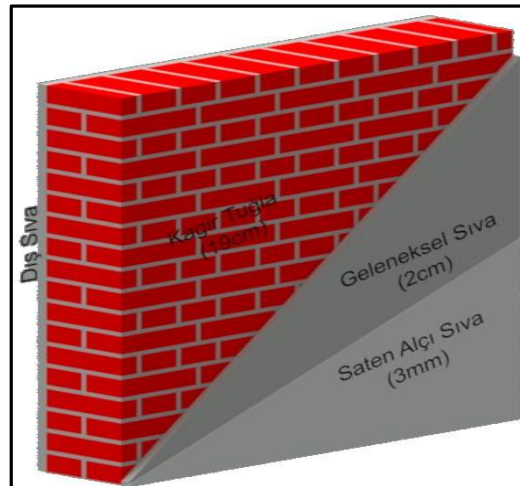


Şekil 4. Kompozit Yapılı Yalıtım Harçlarının A/Ç Oranına Göre Isı İletkenlik Analizi

Ayrıca, Agrega/Çimento (A/Ç) oran değişimine bağlı olarak yapılan grafiksel inceleme Şekil 4'te verilmiştir. Deneysel sonuçlar incelendiğinde, artan A/Ç oranında numunelerin ısı iletkenlik değerleri azalmaktadır. Diğer bir açıdan, karışımdaki çimento kullanım oranı arttıkça, harç örneklerinin ısı iletkenlik değeri artmakta olup ısısal konfor açısından performansı genel olarak azalmaktadır. Çünkü karışım içerisindeki çimento miktarı arttığından, sertleşmiş harç örneğinin kuru birim hacim ağırlık değeri artmaktadır. Ayrıca A/Ç oran değişimi ile numunelerin ısı iletkenlik katsayı değerleri arasında yüksek korelasyon değerinde lineer-doğrusal bir ilişkinin olduğu görülmektedir. Çıkarılan istatistiksel yaklaşımlarla, uygulamalarda optimize edilebilecek kombinasyondaki karışım parametrelerin kestirimi yapılarak, dizayn edilebilme olanağını sunabilmektedir.

Hafif Agregalı Harç Tasarımlarının Örnek Bir Duvar Kesitinde Isısal Konfor Performansının İncelenmesi

Deneysel çalışma kapsamında pomza, volkanik cüruf ve diatomit hafif agregalarının her birinin ana hammadde olarak kullanıldığı kompozit harç serileri oluşturulmuştur. Bu serilerden elde edilen sertleşmiş harç örneklerinin etüv kurusu birim hacim ağırlık değerleri ve Hot-Box metoduna göre ısı iletkenlik katsayıları belirlenmiş ve sonuçlar Tablo 4'te paylaşılmıştır. Bu çalışma da diğer bir irdeleme ise 3 farklı hafif agreganın kendi serileri içerisinde (PM serisi, VC serisi, DM serisi) ısı iletkenlik katsayısı en düşük olan kompozit harcın bir duvar kesitinden ısısal konfor özelliğini daha detaylı incelemek amacıyla, bu çalışmada Şekil 5'te verilen bir duvar modeli incelenmiştir. Bu duvar modelde, 19 cm kalınlığında bimsblok ($\lambda=0,24$ W/mK) bir duvar örgüsü üzerine, iç ortam kısmında 2 cm geleneksel iç sıva ($\lambda=0,85$ W/mK) uygulaması 3 mm kalınlığında saten alçı sıva uygulaması dikkate alınmıştır. Dış ortam kısmında ise 5 mm-35 mm kalınlık aralığında dış sıva uygulaması değerlendirilmiştir.



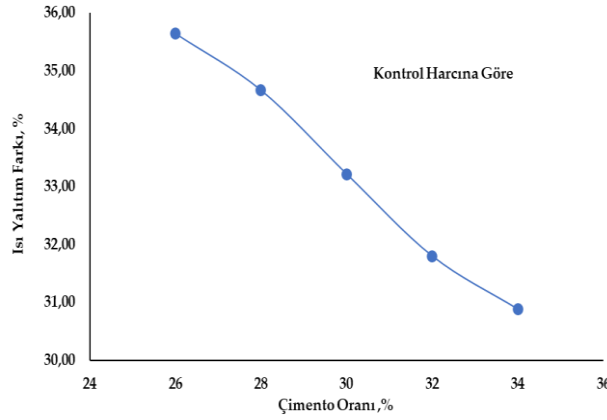
Şekil 5. Harçların Isı Yalıtım Değerlendirilmesinde Kullanılan Duvar Modeli Kesiti

Çalışmada ilk olarak pomzalı seriler, ikinci olarak volkanik cürüflü seriler üçüncü olarak ise diyatomitli seriler analiz edilmiştir. Bu analizde dış sıva uygulamasında sırasıyla, geleneksel dış sıva ($\lambda=1,20$ W/mK) kontrol harçları (pomzalı, volkanik cürüflü, diyatomitli) (PM0- $\lambda=0,253$ W/mK, VC0- $\lambda=0,288$ W/mK, DM0- $\lambda=0,186$ W/mK) ve polimer bileşenli yalıtım harçları pomzalı, volkanik cürüflü ve diyatomitli (PM1- $\lambda=0,099$ W/mK, VC1- $\lambda=0,111$ W/mK, DM1- $\lambda=0,087$ W/mK) ayrı ayrı uyarlanarak TS 825 standardına göre şekil 5’de verilen model duvar kesiti için ısı yalıtım değerlendirmesi yapılmıştır. Sonuçlar Tablo 5’te verilmiştir. Bu analiz çalışmasından da görüldüğü gibi, farklı türden hafif agregaların ana hammadde olarak kullanılmasıyla üretilen kompozit yapıdaki yalıtım harçları, dış mekanda sıva harcı olarak uygulandığında uygulama kalınlığına bağlı olarak hem geleneksel sıvaya hem de kontrol harcına göre önemli oranlarda enerji verimliliği sağlamaktadır. Uygulama kalınlığı arttıkça, bu verimlilikte paralel olarak artmaktadır. Ancak, burada elde edilen değerler yalnızca bu model duvar kesitinin bir karakteristiğidir. Duvar modelinde yer alan bileşenler ve kalınlıkları arttıkça bu analiz sonuçları da muhakkak değişecektir.

Tablo 5. Farklı Kökenli Hafif Agregalardan Üretilen Kompozit Harçların Karşılaştırmalı Yalıtım Hesabı Analizi

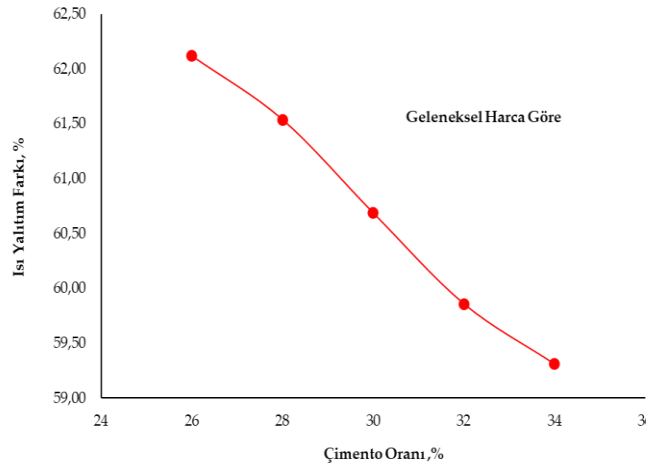
Pomza Agregalı (PM1) Kodlu Harcın Karşılaştırmalı Yalıtım Hesabı Analizi					
Dış Sıva Uygulama Kalınlığı (mm)	Isı Geçirgenlik Değeri, U, (W/m ² K)			Enerji Verimliliği, (%)	
	Geleneksel Sıva	Kontrol Harcı	Kompozit Yalıtım Harcı	Geleneksel Sıvaya Göre	Kontrol Harcına Göre
5	1,007	0,991	0,962	4,46	2,96
10	1,003	0,972	0,917	8,50	5,64
15	0,999	0,954	0,877	12,19	8,09
20	0,994	0,936	0,840	15,56	10,33
25	0,990	0,919	0,805	18,66	12,38
30	0,986	0,903	0,774	21,52	14,28
35	0,982	0,887	0,745	24,16	16,03
Volkanik Cüruf Agregalı (VC1) Kodlu Harcın Karşılaştırmalı Yalıtım Hesabı Analizi					
Dış Sıva Uygulama Kalınlığı (mm)	Isı Geçirgenlik Değeri, U, (W/m ² K)			Enerji Verimliliği, (%)	
	Geleneksel Sıva	Kontrol Harcı	Kompozit Yalıtım Harcı	Geleneksel Sıvaya Göre	Kontrol Harcına Göre
5	1,007	0,994	0,967	3,95	2,68
10	1,003	0,977	0,927	7,58	5,13
15	0,999	0,961	0,890	10,91	7,39
20	0,994	0,945	0,855	13,99	9,47
25	0,990	0,930	0,824	16,83	11,40
30	0,986	0,915	0,794	19,48	13,19
35	0,982	0,901	0,767	21,94	14,86
Diyatomit Agregalı (DM1) Kodlu Harcın Karşılaştırmalı Yalıtım Hesabı Analizi					
Dış Sıva Uygulama Kalınlığı (mm)	Isı Geçirgenlik Değeri, U, (W/m ² K)			Enerji Verimliliği, (%)	
	Geleneksel Sıva	Kontrol Harcı	Kompozit Yalıtım Harcı	Geleneksel Sıvaya Göre	Kontrol Harcına Göre
5	1,007	0,984	0,956	5,09	2,92
10	1,003	0,959	0,906	9,66	5,54
15	0,999	0,935	0,861	13,77	7,90
20	0,994	0,912	0,820	17,49	10,04
25	0,990	0,890	0,784	20,88	11,98
30	0,986	0,869	0,750	23,98	13,76
35	0,982	0,850	0,719	26,82	15,39

Bu çalışmada sonuçların daha net bir şekilde görülebilmesi için, diğer bir ısı yalıtımı değerlendirme analizi ise, deneysel çalışmalarda ısıl performans özelliği en yüksek harç grubu olan diyatomit agregalı serilere ait kompozit yalıtım harçlarının, birim eleman kapsamında 3 cm uygulama kalınlığında, kontrol harcına ve geleneksel harca göre enerji verimliliği çimento kullanım oranına bağlı olarak grafiksel olarak analiz edilmiştir (Şekil 6-Şekil 7). Burada geleneksel harç için ısı iletkenlik katsayı değeri ($\lambda=1,20$ W/mK), diyatomit agregalı kontrol harç serisi için ısı iletkenlik katsayı değeri ($\lambda=0,186$ W/mK) olarak esas alınmıştır.



Şekil 6. Diyatomitli Kompozit Yalıtım Harç Örneklerinin Kontrol Harcına Enerji Verimliliği Analizi

Bu iki grafiksel analiz incelendiğinde, en düşük çimento kullanım oranında bile (%26), kontrol harcına göre yaklaşık olarak %35,65'lik bir ısı yalıtım farkı oluştururken bu oran geleneksel harca göre yaklaşık olarak %62,12'lik bir ısı yalıtım farkı oluşturmuştur.



Şekil 7. Diyatomitli Kompozit Yalıtım Harç Örneklerinin Geleneksel Harca Göre Enerji Verimliliği Analizi

Bu grafiklerden de görüldüğü üzere kompozit harç karışımlarında çimento kullanım oranı, ısıl performans açısından belirleyici bir etken olarak gözlenmektedir. Yüksek oranda çimento kullanımının, malzemenin ısı yalıtım özelliğini düşürdüğü görülmektedir. Ayrıca DM1 serisinin bugün inşaat endüstrisinde uygulanan geleneksel harçlara göre yaklaşık %60 dan fazla ısı yalıtım sağladığını söylemek mümkün olabilmektedir.

SPSS Analizi

Bu çalışmadaki diğer bir inceleme ise; SPSS (V26) programında Pomza (PM), Volkanik Cüruf (VC) ve Diyatomit (DM) agregası karışım oranları için lineer regresyon analizi yapılmıştır. Pomza, Volkanik Cüruf ve Diyatomit agregası ve Polimer Katkı (PK) değerleri girdi olarak alınmıştır. Agregası yüzdesinin artmasıyla orantılı olarak azaltılan çimento miktarı ile sabit değer olarak alınan sönmüş kireç ve dolgu malzemeleri de değişken girdi değerlerine dahil edilmemiştir. Çıktı değeri olarak kuru birim hacim ağırlık ve ısı iletkenlik katsayılarının hesaplanmasında

kullanılacak denklemler belirlenmiştir. SPSS analizi sonucunda elde edilen lineer denklem katsayıları Tablo 6’da verilmiştir.

Tablo 6. SPSS Programı Kuru Birim Hacim Ağırlık ve Isı İletkenlik Lineer Denklem Katsayıları

	Kuru Birim Hacim Ağırlık (kg/m ³)	Isı İletkenlik Katsayısı, λ (W/mK)
Sabit Değer (Constant)	1424,5	0,4671
Pomza Agregası	-12,42	-0,0053
Volkanik Curuf Agregası	-11,02	-0,0045
Diyatomit Agregası	-15,81	-0,0062
Polimer Katkı	-46,43	-0,0274

$$\text{BHA}=1424.5-12.42*PM-11.02*VC-15.81*DM-15.81*PK \quad (1)$$

$$\text{Isı İletkenlik Katsayısı}=0.4671 - 0.0053*PM - 0.0045VC-0.0062DM-0.0274*PK \quad (2)$$

Denklem 1 ve 2 kullanılarak hesaplanan kuru bha ve ısı iletkenlik katsayısı ile deney sonuçları Tablo 7’de verilmiştir. Ortalama % hata değerleri BHA için %1.16 ve ısı iletkenlik katsayısı için %7.65 olarak belirlenmiştir. Bu lineer denklem katsayıları kullanılarak deney verilerine çok yakın sonuçların hesaplanabileceği görülmektedir.

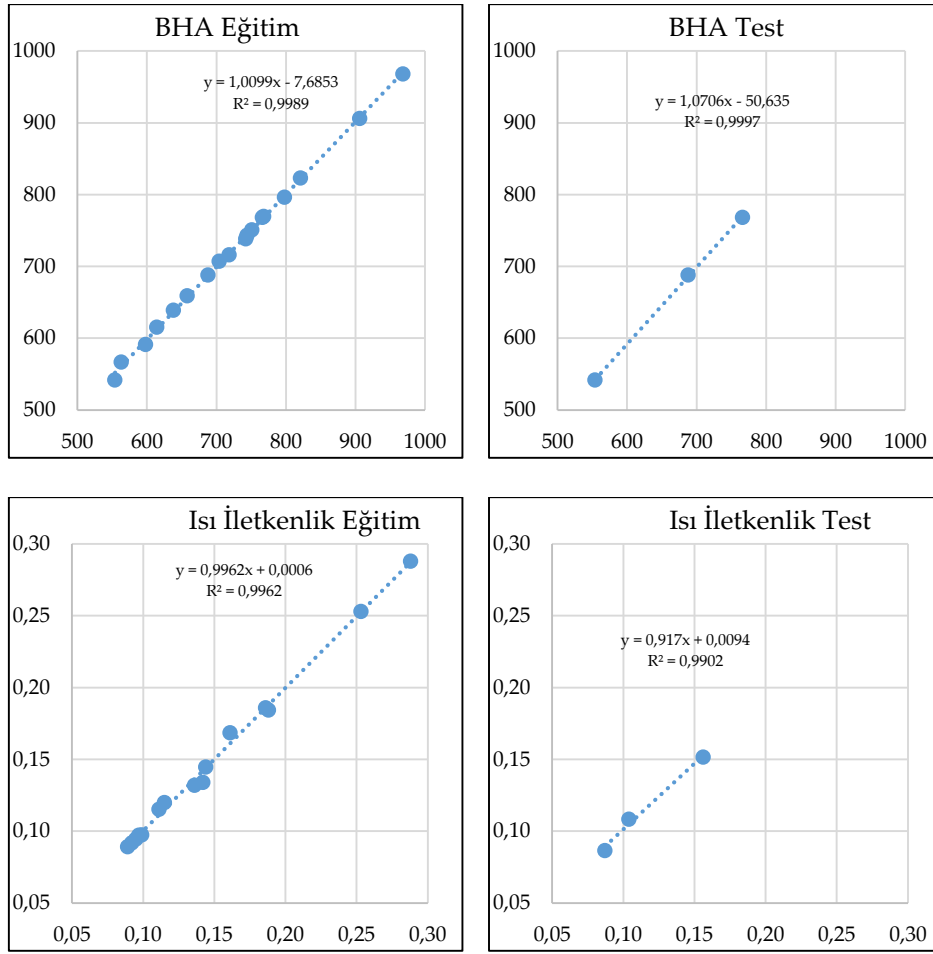
Tablo 7. Deney Verileri ve SPSS Lineer Denklem Analiz Sonuçları

Numune No	Pomza Agregası	Volkanik Cüruf Agregası	Diyatomit Agregası	Polimer Katkı (%)	BHA (kg/m ³)	BHA Regresyon (kg/m ³)	Hata Oranı %	Isı İletkenlik Katsayısı (W/mK)	Isı İletkenlik Katsayısı Regresyon (W/mK)	Hata Oranı %
PM0	42,0	0	0	0	906	903	0,37	0,253	0,243	3,89
PM1	40,5	0	0	5,5	658	666	1,21	0,099	0,100	1,48
PM3	38,5	0	0	5,5	688	691	0,41	0,104	0,111	6,85
PM4	36,5	0	0	5,5	718	716	0,33	0,115	0,122	5,90
PM5	34,5	0	0	5,5	744	741	0,47	0,136	0,132	2,61
VC0	32,5	0	0	5,5	768	765	0,34	0,144	0,143	0,62
VC1	0	42,0	0	0	968	962	0,65	0,288	0,279	3,17
VC2	0	40,5	0	5,5	704	723	2,67	0,111	0,135	21,52
VC4	0	38,5	0	5,5	742	745	0,39	0,142	0,144	1,30
VC5	0	36,5	0	5,5	766	767	0,12	0,156	0,153	2,04
DM0	0	34,5	0	5,5	798	789	1,13	0,161	0,162	0,48
DM2	0	32,5	0	5,5	821	811	1,22	0,188	0,171	9,19
DM3	0	0	42,0	0	751	761	1,28	0,186	0,205	10,19
DM4	0	0	40,5	5,5	554	529	4,51	0,087	0,064	26,89
DM5	0	0	38,5	5,5	563	561	0,42	0,089	0,076	14,51
PM0	0	0	36,5	5,5	598	592	0,97	0,092	0,089	3,73
PM1	0	0	34,5	5,5	614	624	1,60	0,095	0,101	6,37
PM3	0	0	32,5	5,5	638	655	2,73	0,097	0,114	17,04
Ortalama hata %							1,16			7,65

Tablo 8. Deney ve Test Verileri ANFİS Sonuçları

Deney No	Ponza	Volkanik curuf	Diyatomit	0-2 mm Ponza 0-2 mm Volkanik Cüruf 0-2 mm Diyatomit	Polimer Katkı	BHA (kg/m ³)	Anfis BHA	Hata oranı %	Isı İletkenlik Katsayısı (W/mK)	Anfis Isı İletkenlik Katsayısı (W/mK)	Hata oranı %	
Eğitim Verileri ANFİS	PM0	42,0	0	0	42,0	0,0	906	906,0	0,00	0,253	0,253	0,00
	PM1	40,5	0	0	40,5	5,5	658	659,2	0,18	0,099	0,097	1,52
	PM3	36,5	0	0	36,5	5,5	718	716,0	0,28	0,115	0,120	4,29
	PM4	34,5	0	0	34,5	5,5	744	743,2	0,11	0,136	0,132	2,96
	PM5	32,5	0	0	32,5	5,5	768	769,6	0,21	0,144	0,145	0,42
	VC0	0	42,0	0	42,0	0,0	968	968,0	0,00	0,288	0,288	0,00
	VC1	0	40,5	0	40,5	5,5	704	707,0	0,43	0,111	0,115	3,79
	VC2	0	38,5	0	38,5	5,5	742	738,4	0,49	0,142	0,134	5,71
	VC4	0	34,5	0	34,5	5,5	798	796,4	0,20	0,161	0,168	4,63
	VC5	0	32,5	0	32,5	5,5	821	823,2	0,27	0,188	0,184	1,88
	DM0	0	0	42,0	42,0	0,0	751	751,0	0,00	0,186	0,186	0,00
	DM2	0	0	38,5	38,5	5,5	563	566,8	0,68	0,089	0,089	0,22
	DM3	0	0	36,5	36,5	5,5	598	591,4	1,10	0,092	0,092	0,11
	DM4	0	0	34,5	34,5	5,5	614	615,6	0,25	0,095	0,095	0,42
	DM5	0	0	32,5	32,5	5,5	638	639,2	0,19	0,097	0,097	0,31
Ortalama Hata %								0,29			1,75	
Test Verileri ANFİS	PM2	38,5	0	0	38,5	5,5	688	688,0	0,00	0,104	0,108	4,29
	VC3	0	36,5	0	36,5	5,5	766	768,1	0,28	0,156	0,152	2,81
	DM1	0	0	40,5	40,5	5,5	554	541,7	2,22	0,087	0,086	0,58
Ortalama Hata %								0,83			2,56	

MATLAB programında ANFİS ile birim hacim ağırlık (BHA) ve ısı iletkenlik katsayılarının agrega tür ve oranı, polimer katkı oranı ile ilişkisi belirlenmeye çalışılmıştır. Girdi değeri olarak agrega tür ve oranı ile polimer katkı oranı girdi değeri olarak alınmıştır. Kompozit harç agrega miktarı ile orantılı değişen beyaz çimento miktarı ve sabit değer olarak alınan sönmüş toz kireç ve dolgu malzemesi değişken olarak tanımlanmamıştır. 18 deney verisinden 15 tanesi eğitim verisi, 3 tanesi de test verisi olarak alınmıştır. ANFİS programında her katmanda 3 alt katmana bölünerek verilerin eğitimi sağlanmıştır. ANFİS sonuç değerleri Tablo 8’de verilmiştir. Birim hacim ağırlık için %0,29 ve ısı iletkenlik katsayısı için %1,75 hata oranı elde edilmiştir. Test verileri ile sonuç doğrulaması yapılmış ve hata oranları test verileri için %0,83 ve %2,56 olmuştur. Eğitim ve test verilerinin karşılaştırılması Şekil 8’de verilmiş ve hem eğitim verilerinde hem de test verilerinde %99 oranının da modelin doğruluğu belirlenmiştir.



Şekil 8. Eğitim Verileri ve Test Verilerinin Karşılaştırılması

SONUÇLAR

Bu araştırma çalışmasında üç farklı hafif, doğal ve gözenekli agrega kullanılarak polimer bileşenli kompozit yapıda toplamda 15 farklı harç karışım tasarımı yapılmış ve hafif formda harçlar üretilmiştir. Çalışmada pomza agregalı seriler (PM1-PM5), volkanik cüruf agregalı seriler (VC1-VC5), diyatomit agregalı seriler (DM1-DM5) olarak kodlanmıştır. Ayrıca teknik karşılaştırmanın yapılabilmesi içinde polimer katkıların kullanılmadığı kontrol harçları geliştirilmiş ve elde edilen teknik bulgular irdelenmiştir. Özellikle üretilen bu harçların deneysel çalışma sonuçlarına göre ısıl özellikleri üzerinde karşılaştırmalı bir analiz yapılmıştır.

Konu ile ilgili yapılan literatür araştırmalarında farklı hammaddelerle kompozit yapı harç üretim çalışmalarının yapıldığı görülmüştür. Genellikle bu harçların fiziksel ve mekanik özellikleri analiz edilmiştir. Ancak bu kategorideki örnek numunelerin termal özellikleri ile ilgili çalışmaların kısıtlı olduğu görülmüştür. Bu nedenle bu çalışmada özellikle doğal malzemelerle ısı yalıtımlı harçların üretilebileceği görülmüştür. Çalışmada farklı tür hafif agregalarla geliştirilen hafif ve kompozit yapıdaki harç formlarının ısı yalıtım özellikleri araştırılmıştır. Sonuç olarak pomza, volkanik cüruf ve diyatomit agregasının ana hammadde olarak kullanıldığı bütün polimer bileşenli harçların TS EN 998-1'e göre T Grubu ısı yalıtımlı harç kategorisinde değerlendirilebileceği görülmüştür. Ancak polimer bileşenli pomza ve volkanik cüruf serilerin (PM1-PM5 ve VC1-VC5) ısı iletkenlik katsayısı değerleri 0,20 W/mK'in altında kaldığı için T2 grubu harç kategorisinde değerlendirilirken, polimer bileşenli diyatomit agregalı serilerin (DM1-DM5) ısı iletkenlik katsayısı 0,10 W/mK'nin altında kalmaktadır ve T1 grubu ısı yalıtım harç kategorisinde değerlendirilebilmektedir.

Kontrol harç serilerinde ise sırasıyla pomza agregalı harç (PM0) ısı iletkenlik katsayısı 0,253 W/mK, volkanik cüruf agregalı harç (VC0) 0,288 W/mK ve diyatomit agregalı kontrol harçlarının ise 0,186 W/mK olarak ölçülmüştür. Burada pomza ve volkanik cüruf agregalı kontrol harçların tek başına ısı yalıtımlı harç olarak değerlendirilemeyeceğini söylemek mümkün olabilmektedir. Bu çalışmada özellikle Diyatomit agregaları ile

geliştirilen polimer katkıli kompozit yapıdaki harçların ısısal konfor özelliklerinin yüksek olduğu elde edilen teknik bulgular ve deneysel çalışmalardaki gözlemler sırasında açık bir şekilde görülmüştür. Örneğin TS 825 standardına göre model duvar kesiti için ısı yalıtım değerlendirme yapıldığında Diyatomit agregalı polimer katkıli harcın 3 cm uygulama kalınlığında geleneksel harca göre %23,98, kontrol harcına göre %13,76 oranında enerji verimli olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca bu çalışmada toz şeklindeki polimer katkıların harçların birim hacim ağırlığının düşürülmesi, kıvam ve aderans özelliklerinin iyileştirilmesinde mükemmel bir performans sağladığı görülmüştür.

Ayrıca bu çalışmada SPSS ve ANFİS yöntemleri kullanılarak etkin parametreler belirlenmiş ve analiz verileriyle sonuçlar kontrol edilmiştir. Yöntemde 18 deney verisinden 15 tanesi eğitim verisi, 3 tanesi de test verisi olarak alınmıştır. ANFİS programında her katmanda 3 alt katmana bölünerek verilerin eğitimi sağlanmıştır. Sonuçta, BHA için %0.29 ve ısı iletkenlik katsayı için %1.75 hata oranı elde edilmiştir. Test verileri ile sonuç doğrulaması yapılmış ve hata oranları test verileri için %0.83 ve %2.56 olmuştur. Eğitim ve test verilerinin karşılaştırılması yapılmış ve hem eğitim verilerinde hem de test verilerinde %99 oranının da modelin doğruluğu belirlenmiştir. Böylece deney ölçümlerinde yapılan hataların (ortam şartları, ölçüm aleti hassasiyeti gibi) sonuçların değerlendirilmesindeki etkisinin en aza indirilmesi için SPSS ve ANFİS modellerini kullanmak bu çalışma açısından oldukça etkili olmuştur.

Bu çalışma bulguları, polimer bileşenlerin ve karışımlarda kullanılan dolgu malzemesi ve söndürülmüş toz kirecin sabit miktarlarda kullanımı sonucu elde edilmiştir. Bu çalışmanın daha detay bir incelemesi olarak, değişen dolgu malzemesi ve polimer bileşenleri oranlarında benzer çalışmaların yapılması tavsiye edilebilir. Ayrıca kullanılan hafif agregaların türleri ve boyut aralıkları daha da genişletilerek, farklı boyut dağılımlarında da deneysel çalışmalar yapılması, farklı sonuçların elde edilmesine olanak sağlayabilir.

KAYNAKLAR

- Aruntaş, H.Y. (1996). Diatomit Özellikleri, Kullanım Alanları İnşaat Sektöründeki Yeri. *Çimento ve Beton Dünyası* 1(4):27–32.
- ASTM C230/C230M-08, (2008). Standard Specification for Flow Table for Use in Tests of Hydraulic Cement, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA.
- Bilgin, F., & Arıcı, M. (2017). Effect of Phase Change Materials on Time Lag, Decrement Factor and Heat-Saving. *Acta Phys Pol A*, 132(3):1102–1105
- Demirdağ, S., & Gunduz., L. (2008). Strength Properties of Volcanic Slag Aggregate Lightweight Concrete for High Performance Masonry Units. *Construction Building Materilas*, 22(3):135–142.
- Gündüz, L., Bekar, M., Şapcı, N. (2007). Influence of a New Type of Additive on The Performance of Polymer-Lightweight Mortar Composites. *Cement and Concrete Composite*, Vol.29, No.8, pp. 594-602.
- Gündüz, L., & Kalkan, O. Ş. (2016). Diyatomit Agregaların Çimento Esaslı Hafif Harç Özelliklerinin Gelişimine Etkisi. 8. Uluslararası Kırmataş Sempozyumu, Kütahya, s.284-294, 13-14.
- Gündüz, L., & Kalkan, O. Ş. (2019). A Technical Evaluation on the Determination of Thermal Comfortparametric Properties of Differenet Originated Expanded and Exfoliated Aggregates. *Arabian Journal of Geosciences*, 12:119.
- Gündüz, L., & Kalkan, Ş.O. (2022). The Efect of Diferent Natural Porous Aggregates on Thermal Characteristic Feature in Cementitious Lightweight Mortars for Sustainable Buildings. *Iranian Journal of Science and Technology. Transactions Of Civil Engineering*, 47:843-861, <https://doi.org/10.1007/s40996-022-00937-3>.
- Kilincarslan, Ş., Davraz, M., Akça, M. (2018). The Efect of Pumice as Aggregate on the Mechanical and Thermal Properties of Foam Concrete. *Arabian Journal of Geosciences*, 11:289, <https://doi.org/10.1007/s12517-018-3627-y>
- Mineral Commodity Summaries 2009. (2009). In Mineral Commodity Summaries. <https://doi.org/10.3133/mineral2009>.
- Özbey, G., & Atamer, N. (1987). Kizelgur (Diatomit) Hakkında Bazı Bilgiler. 10. Türkiye Madencilik Bilimsel Teknik Kongresi, Ankara, pp 493–502, https://www.maden.org.tr/resimler/ekler/aeae10ea1c6433c_ek.pdf [in Turkish].
- Şapcı, N., vd. (2009). Mikronize Andezitin Yalıtım Amaçlı Kompozit Harç Üretiminde Değerlendirilmesi Üzerine Teknik Bir Analiz. 5. Ulusal Kırmataş Sempozyumu, İstanbul, s.77-88, 1-2 Aralık.

Şapcı, N., & Gündüz, L. (2021). An Investigation on the use of Pumice Formations in the Kayseri Region in the Production of Insulating Composite Mortar. International Symposium of Scientific Research and Innovative Studies (ISSRIS'21), Bandırma/Balıkesir, s.69-83, 22-25 Şubat.

Şapcı, N. (2022). Examining the Effect of Pumice Aggregate in the Production of Energy Efficient Composite Plasters. 2nd International Symposium of Scientific Research and Innovative Studies (ISSRIS'22), Bandırma/Balıkesir. s1217-1219, 2-5 Mart.

TS 825, Mayıs 2008 Binalarda ısı yalıtım kuralları, Ankara, TSE.

TS EN 998-1, (2006). Kâgir harcı-Özellikler-Bölüm 1: Kaba ve İnce Sıva Harcı. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

TS EN 1015-3, (2000). Kâgir Harcı- Deney Metotları- Bölüm 3: Taze Harç Kıvamının Tayini (Yayılma Tablası İle). Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

TS EN 1015-10, (2001). Kâgir Harcı-Deney Metotları-Bölüm 10: Sertleşmiş Harcın Boşluklu Kuru Birim Hacim Kütlelerinin Tayini. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

Wu MH, Ng TS, Skitmore MR (2016). Sustainable Building Envelope Design By Considering Energy Cost And Occupant Satisfaction. Energy Sustain Dev 31:118–129

Yıldırım, T.Z.& Baba, E. (2018). Bims Agregalı ve Genleştirilmiş Perlit Agregalı Hafif Kompozit Harçların Özelliklerinin Deneysel Olarak İncelenmesi. Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 1 (1): (2018) 47-52.



Kahramanmaraş Sütçü İmam University Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi :10.04.2023
Kabul Tarihi :17.11.2023

Received Date :10.04.2023
Accepted Date :17.11.2023

SICAK BORU KAPLAMALARINDA FARKLI KOMPOZİT KAPLAMA MALZEMELERİN TERMAL PERFORMANSLARININ KARŞILAŞTIRMASI ÜZERİNE BİR ANALİZ

AN ANALYSIS ON THE COMPARISON OF THERMAL PERFORMANCES OF DIFFERENT COMPOSITE COATING MATERIALS IN HOT PIPE COATINGS

Lütfullah GÜNDÜZ¹ (ORCID: 0000-0003-2487-467X)
Şevket Onur KALKAN^{1*} (ORCID: 0000-0003-0250-8134)
Oktay POZAM² (ORCID: 0009-0004-5511-6825)

¹ İzmir Kâtip Çelebi Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İzmir, Türkiye
² Shieldmix Teknolojik Yalıtım Kaplama Kimyevi Üretim İnşaat Taahhüt San.Tic.Ltd.Şti, İzmir, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Şevket Onur KALKAN, sevetonur.kalkan@ikcu.edu.tr

ÖZET

Boru hatlarının bütünlüğü farklı amaçlarla kullanılan çeşitli kaplama elemanlarının uygulanması ile sağlanabilmektedir. Her ne kadar farklı amaçlarla boru kaplamaları yapılsa da boru kaplamalarının en önemli uygulama amaçlarından biri yalıttır. Son yıllarda, çift katmanlı, üç katmanlı ve hatta bazı uygulamalarda üçten fazla katmanlı olarak uygulanan geleneksel ısı izolasyon kaplamalarının yerini tek katmanlı uygulamaların alması gelişen teknoloji ile gündeme gelmiştir. Bu deneysel çalışmada, içerisinden yüksek sıcaklıkta akışkan geçen boru hatlarının kaplanmasında tek kat olarak uygulanabilecek üç farklı kaplama malzemesinin deneysel sonuçları paylaşılmaktadır. Bu kaplama malzemeleri; akrilik dispersiyon esaslı kaplama malzemesi, çimento+stiren akrilik kopolimer bağlayıcı genleşmiş cam, seramik, perlit ve inorganik dolgu malzemeleri ihtiva eden kaplama malzemesi ve çimento bağlayıcı genleşmiş kil, doğal volkanik tüf, perlit ve inorganik dolgu malzemeleri ihtiva eden kaplama malzemesidir. Sabit özellikteki bir çelik boruya, her bir kaplama malzemesinden eşdeğer uygulama kalınlığı 24 mm olacak şekilde boru yüzeyine kaplama uygulaması yapılarak üç farklı harcın termal özellikleri tespit edilmiştir. Çalışma sonuçlarına göre, eşdeğer kaplama kalınlığında uygulandığında akrilik dispersiyon esaslı kaplama malzemesinin yüzey sıcaklık değerinin daha düşük derecelerde elde edilmesi sebebiyle ısı performansının daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Sıcak boru, kaplama, termal performans, enerji tasarrufu, yalıtım

ABSTRACT

The integrity of the pipelines can be ensured by the application of various coating elements used for different purposes. Although pipe coatings are made for different purposes, one of the most important application purposes of pipe coatings is insulation. In recent years, it has come to the fore with the developing technology that single-layer applications replace the traditional heat insulation coatings, which are applied as double-layer, three-layer and even more than three layers in some applications. In this experimental study, the results of three different coating materials that can be applied as a single layer in the coating of pipelines through which fluid flows at high temperatures are shared. These coating materials: acrylic dispersion-based coating material, cement+styrene acrylic copolymer binder-containing expanded glass, ceramic, perlite and cement-binding expanded clay, natural volcanic tuff, perlite and inorganic filling materials. The thermal properties of three different mortars were determined by applying a coating to a fixed steel pipe on the pipe surface, with an equivalent application thickness of 24 mm from each coating material. According to the results of the study, it has been determined that the thermal performance of the acrylic dispersion-

ToCite: GÜNDÜZ, L., KALKAN, Ş.O., & POZAM, O., (2024). SICAK BORU KAPLAMALARINDA FARKLI KOMPOZİT KAPLAMA MALZEMELERİN TERMAL PERFORMANSLARININ KARŞILAŞTIRMASI ÜZERİNE BİR ANALİZ. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 27(1), 16-29.

based coating material is higher when applied at an equivalent coating thickness, since the surface temperature value is obtained at lower temperature.

Keywords: Hot pipe, coating, thermal performance, energy saving, insulation

GİRİŞ

Boru yalıtımı, boruların taşıdığı sıvı ve/veya gazın dış ortamlardan etkilenmeksizin özelliği ve sıcaklık değerleri değişime uğramadan taşınması için yapılan izolasyon uygulamasıdır. Boru hatları konutlar, fabrikalar, iş merkezleri, alt yapı tesisatları vb. gibi birçok endüstriyel uygulama alanlarında güncel hayatımızda yer alan tesisat hatlarıdır. Boru hatlarının yer aldığı iç ve/veya dış mekân ortamında boru izolasyonu yaptırmanın en temel sebebi, ısı dolayısıyla enerji kaybının minimuma indirilmesidir (Nsofor, 2011). İzolasyon yapılmayan borular, çevrelerinde bulunan soğuk ya da sıcak fark etmeksizin dış etkenlerden fazlasıyla etkilenip verimden düşebilmektedir. Bu boruların yeterli verimle çalışmasını sağlamak, enerji kaybını en aza indirmek hatta sıfırlamak ve sağlanan bu enerji tasarrufuyla yüksek miktarda kazanımlar istenildiğinde boru izolasyonu kaçınılmaz bir gereklilik olmaktadır. Bununla birlikte, borunun izole edilmesi, bu kazanımlara ilaveten tesisatın korunması ve uzun ömürlü kullanım açısından da büyük avantajlar sağlayacaktır (Nsofor, 2011; Simpson vd., 2019; Tesisat İzolasyonu, 2020; Temimy vd. 2021). Boru hatlarının ısı yalıtımı, boru sistemlerinin düzenli çalışması için gereklidir. Taşınan sıvıların ve gazların özelliklerine bağlı olarak (ısıtma ve su tedarik sistemleri, sıvı ve gazların pompalanması, yağ ve gaz tedarik sağlama sistemleri) ısı yalıtım malzemeleri için gereksinimler çok farklıdır (Isollat, 2023; Sargison, 2006).

Boru yalıtımları yapılan izolasyon işlemine göre genellikle Sıcak Yalıtım, Soğuk Yalıtım, Kişisel Koruma İzolasyonu ve Ses Yalıtımı gibi çeşitli parametrelere göre sınıflandırılmaktadır (Dey, 2023). Sıcak Yalıtım, boru sistemi içinde sıcak su ve/veya gaz taşınımının yapıldığı bir tesisat hattında boru sisteminde taşınan sıvı veya gazdan ısı enerjisi akışını önlemek için boru sisteminin sıcak yüzeylerine uygulanan izolasyon işlemidir. Bu uygulamaya sıcak boru yalıtımı adı da verilmektedir. Sıcak boru yalıtımının temel amacı ısı tasarrufudur. Sıcak borular, genellikle fabrikalar, kazan ve boru hatları, LPG, su tesisatları, yakıt tankları, tuğla ve ekmek fırınları ve kullanım alanı oldukça geniş bina ve konutlarda ısıtma ve sıcak su dağıtımını gibi uygulama alanlarında yaygın olarak kullanılmaktadır (Nsofor, 2011). Sıcak boru yalıtımında güncel olarak kullanılan izolasyon malzemeleri arasında, uygulama performansları farklı sıcaklık değerleri aralığında değişim göstermekle birlikte mineral cam fiber, mineral yün, kaya yünü, cam yünü, kalsiyum silikat, genleşmiş perlit, genleşmiş silika, refrakter fiber, hücresel cam ve seramik fiber vb. gibi malzeme türlerinin kullanımları görülebilmektedir. Soğuk yalıtım, dış ortam hava sıcaklığına göre görece çok daha düşük sıcaklık değerinde bir akışkan veya gazın boru sisteminin içinde taşındığı bir tesisatta, borunun soğuk yüzeylerinde dışarıdan ısı kazanımını veya yoğunlaşmayı önlemek amacıyla yapılan yalıtımdır. Sıcak boru yalıtımında güncel olarak kullanılan izolasyon malzemeleri arasında, Poliüretan Köpük, Genleştirilmiş Perlit Köpük, Genleştirilmiş Polistiren Köpük vb. malzemelerin yaygın olarak kullanıldığı görülebilmektedir (Dey, 2023, İzoder, 2023).

Kişisel Koruma İzolasyonu ise, kişisel ısı yaralanmasını önlemek için sıcak boru sistemlerinde kişisel koruma yalıtımı uygulaması da yapılmaktadır. Soğukun borulara zarar vermesini önlemek için tasarlanan boru yalıtımının yanı sıra, çevredeki alanı borulardan akan maddelerin neden olduğu aşırı sıcaklıklardan korumak için aynı yaklaşım kullanılabilir. Genellikle 65 °C'yi aşan tüm açıkta kalan boru yüzeylerine kişisel koruma izolasyonu uygulanması prensip edinilmektedir. Örneğin, Isıtma borularının duvar boyunca ilerlerken temas ettiği yerlerde, insanların kazara kendilerini yakmalarını önlemek için yalıtımın yapılması gerekli olmaktadır. Borular açıkta kaldığında, yalıtım normalde boruların etrafına sıkıca oturabilen ve çevredeki renk düzeniyle uyum sağlayacak şekilde boyanabilen malzemelerden oluşur. İnşaat veya işletme personelinin erişemeyeceği alanlar açıkta bırakılabilir. Kişisel koruma yalıtım malzemesi olarak açık ağ metal koruyucu, mineral yün vb. gibi malzemeler bu amaçla kullanılabilir. Boru sistemlerinde ses yalıtımı ise, potansiyel bir ses kaynağı olduğu düşünülen tüm borular için farklı kalınlıklarda kaplama şeklinde akustik yalıtım uygulaması yapılmaktadır. Bundaki temel amaç, gürültüyü (titreşimi) kabul edilebilir bir sınıra indirmektir. Akustik yalıtım malzemesi olarak akustik köpük, cam elyafı, polyester/poliüretan köpükler ve taş yünü gibi malzemeler kullanılabilir (Dey, 2023, İzoder, 2023).

Boru yalıtımı, borular ve borulardan akan herhangi bir madde için kabul edilebilir bir sıcaklığın korunmasına yardımcı olmak üzere tasarlanmış boru etrafına sarılarak veya doğrudan boru yüzeyine tatbik edilerek uygulanan koruyucu bir kaplamadır (Abdullah, 2022; Nsofor, 2011; Sargison, 2006). Çoğu durumda boru yalıtımı, boru sıcaklığının yakın çevre üzerindeki etkisini de en aza indirerek, enerji kayıplarını büyük ölçüde azaltır. Yalıtımın

işyerlerinde, apartmanlarda ve evlerde bazı boru sistemlerinin oluşturduğu gürültü miktarını azaltması da alışılmadık bir durum değildir.

Güncel ısı yalıtım uygulamalarında belirli kalınlıklarda kullanılan fiberglas, mineral yün, taş yünü, cam yünü, polistren köpük, genişmiş perlitli plaklar ve kalsiyum silikat gibi malzemelerin termal performansı, genellikle levha şeklindeki numuneleri üzerinde ısı akışının standartlar kapsamında değerleri ölçülerek belirlenebilmektedir. Isı akışı ne kadar düşük olursa yalıtım performansları da o oranda daha etkili olduğu kabul edilir. Ancak, bu tarz test ve ölçme yöntemi sıcak boru termal kaplamalarına uygulanamaz. Çünkü sıcak boru kaplamalarında kaplama kalınlığı ince olup, kaplamaları test etmek için yeterli kalınlığı elde etmek için birçok katman gerekir. Bu da test uygulaması zor bir süreci işaret etmektedir. 2008 yılında Kuzey Amerika Yalıtım Üreticileri Derneği'nin (NAIMA) talebi üzerine akredite bağımsız bir laboratuvar tarafından sıcak boru kaplamalarının termal performansı üzerine bir test yöntemi geliştirilmiş (NAIMA, 2023) ve 2013 yılında Amerikan Isıtma Soğutma ve İklimlendirme Mühendisleri Derneği (ASHRAE) (2013) tarafından da bu yöntem kullanılmıştır. NAIMA ve ASHRAE çalışmalarında, çıplak çelik ve yalıtılmamış bir termal boru test düzeneğinin öncelikle belirli bir sıcaklık aralığında boru içi ve boru yüzey sıcaklık değişimleri ölçülerek kaydedilmiştir. Sonrasında çıplak çelik boru yüzeyine ince bir katman şeklinde kaplama malzemesi uygulanarak kaplanmış boru düzeneğindeki ısı akışı, boru içi sıcaklık değerleri, kaplama yüzeyi sıcaklık değerleri ve ısı kaybı miktarları ölçülerek hesaplanmıştır. Kaplama malzemesinin çıplak çelik boruya sağlamış olduğu termal performans değerleri kaplamasız v kaplamalı boru verilerinin karşılaştırmalı hesabı ile tanımlanarak yorumlanmıştır (NAIMA, 2023; Manville, 2023; ASTM, 2021; ASHRAE, 2013). Bu yöntem bir yaklaşım olarak daha sonraki dönemlerde de sıcak boru kaplamalarının termal performanslarının belirlenmesi amacıyla farklı araştırmacılar tarafından da uygulanmıştır (Yarbrough, 2008).

Boru hatlarının ısı yalıtımı için kullanılan en yaygın malzemelerin başında mineral (bazalt) yün gelmektedir (Isollat, 2023). Ancak mineral yünün sıcak boru kaplamalarda uygulanmasında ortamda yer alabilecek buhar ve sudan kolaylıkla etkilenecek, kaplama malzemesi ısı yalıtım performansını önemli ölçüde kaybeder (Isollat, 2023). Ayrıca ısıtma ve sıcak su borularının köpük türü malzemeler ile yalıtılmasında da birtakım dezavantajlar oluşabilmektedir. Bunlar arasında UV radyasyonuna karşı iyi bir koruma sağlama ihtiyacı söz konusudur. Bu tip yalıtımın aktif metal korozyonuna neden olabilmesi bir diğer dezavantaj olarak kaydedilmektedir (Isollat, 2023). 100°C sıcaklığın üzerinde poliüretan köpük izolasyonlu boruların kullanılması kaplama malzemesinin bu sıcaklık değerlerine dayanımının düşük olması sebebiyle kullanımı zorluklar içermektedir. Benzer şekilde, köpük kauçuktan yapılmış malzemelerde sıcaklık dayanım eşik değeri genellikle 80°C'den daha düşük olması sebebiyle daha yüksek sıcaklıklarda özelliklerini kaybedebilmekte ve sıcak boru kaplamalarında yalıtım performansları kaybolabilmektedir (Isollat, 2023). Bununla birlikte geleneksel olarak uygulanan yalıtım malzemeleri, koruyucu kaplama gerektirir. Genelde bunun için galvanizli metal kaplamalar kullanılmaktadır. Bu uygulama şekli de hem mekân daralmasına sebebiyet verebilmekte hem yüksek maliyet hem de bakım masrafları gibi bazı dezavantajları gündeme getirebilmektedir (Isollat, 2023).

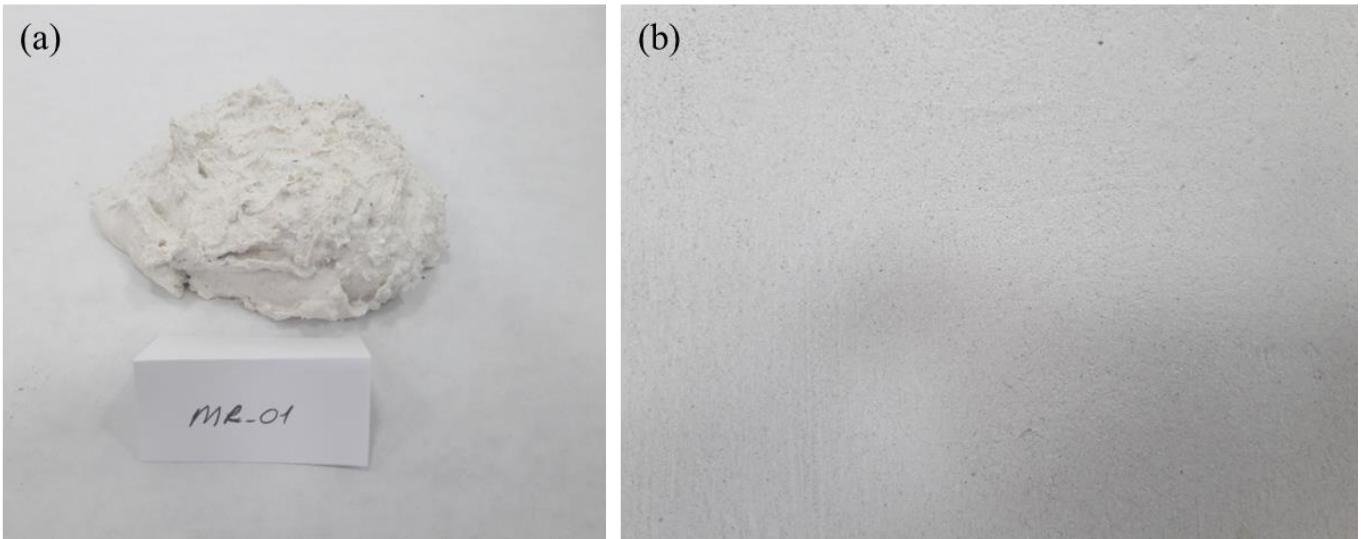
Yukarıda özetle verilen uygulamalarda karşılaşılan dezavantajları minimize etmek ve mümkün olduğunca tamamen ortadan kaldırmak amacıyla, günümüzde yeni nesil olarak da adlandırılacak yenilikçe boru kaplama malzemelerinin geliştirilmesi ihtiyacı kaçınılmaz olmaktadır. İnşaat sektöründe yalıtım uygulamalarına yardımcı olmak amacıyla geliştirilmiş çimentolu ve/veya çimentosuz hafif agregalı harç kombinasyonlarının sıcak boru kaplama malzemesi hüviyetiyle kullanımları zaman zaman uygulamalarda görülebilmektedir. Bu tür harç malzemelerin sıcak ve/veya soğuk boru kaplama uygulamalarındaki ısı kazançları, termal performansları ve uygulanabilirlik kriterleri üzerine henüz yeter düzeyde tecrübeye de rastlanılamamaktadır. Ancak, bu malzeme bileşenlerinin kullanıldıkları ortamda duraylılığı, yanmaya karşı korunumu, atmosfer ortam koşullarından etkilenebileceği özelliği ve kullanım ömürlerinin daha uzun olması gibi özellikleri inşaat sektöründeki uygulamalarında tecrübe edinilmiştir. Ancak bu malzemelerin boru yüzeylerine uygulanmasındaki zorluklar, yeterli kalınlık unsurunun kolaylıkla sağlanamaması gibi hususlar dezavantaj oluştursa da ince katman şekliyle kullanımları görülebilmektedir. Bu amaçla sektörel malzeme gelişmelerinde sıcak boru yüzeylerine kolay uygulanabilirliği sağlanmış ve istenilen kalınlık değerine ulaştırılabilen akrilik dispersiyon esaslı yeni nesil kaplama harcı malzemelerinin uygulamalarda ısı kazançları açısından daha olumlu sonuçlar verdiği tecrübe edinilmeye başlanmıştır. Bu uygulamalarda kaplama malzemesinin boru hattını korozyona uğratmaksızın, yoğunlaşma oluşumunu engelleyerek uzun ömürlü ve ilave yalıtım katmanı veya materyaline gerek duyulmaksızın enerji tasarrufunun sağlanabilmesine olanak sağlamaktadır. Bu makalede, sıcak boru kaplamalarında uygulamaları görülebilen üç farklı kaplama malzemesinin karşılaştırmalı analizi irdelenmektedir. Bu kaplama malzemeleri; akrilik dispersiyon esaslı kaplama malzemesi, çimento+stiren akrilik kopolimer bağlayıcılı genişmiş cam, seramik, perlit ve inorganik dolgu

malzemeleri ihtiva eden kaplama malzemesi ve çimento bağlayıcılı genişmiş kil, doğal volkanik tüf, perlit ve inorganik dolgu malzemeleri ihtiva eden kaplama malzemesidir. Kaplama malzemelerinin uygulandığı sıcak boru hattında ısı dolayısıyla enerji kaybının minimuma indirgenme performanslarının karşılaştırması üzerine deneysel bir çalışmanın bulguları tartışmalı olarak sunulmaktadır.

MATERYAL VE YÖNTEM

Kompozit Kaplama Malzemeleri

Yüksek sıcaklık boru kaplamalarında borunun termal performansına etkisini analiz etmek amacıyla çalışma kapsamında üç farklı kompozit kaplama malzemesi deneysel olarak irdelenmiştir. Bu malzemeler MR_01, MR_02 ve MR_03 olarak kodlanarak deneysel analizlerde kullanılmıştır. MR_01; akrilik dispersiyon esaslı bor, seramik, perlit, kuvars teknolojiyle geliştirilmiş farklı endüstriyel alanlarda ısı yalıtımı amaçlı kullanıma uygun hazır formda inovatif bir kaplama malzemesi olup, ticari piyasa koşullarından temin edilerek kullanılmıştır. Düşük ve yüksek yoğunluklu vakumlanmış mikro seramik kürecik partiküllerini içeren su bazlı özel modifiyeli akrilik dispersiyon esaslı, uygulandığı yüzeylerde yüksek performanslı ısı geçirimsizliği oluşturan, nefes alabilen nitelikli bir yalıtım malzemesidir (Şekil 1). Sıcaklık değeri +900°C'ye kadar olan kazan ve boru hatları, LPG, su tesisatları, yakıt tankları, tuğla ve ekmek fırınları, termik bacalar ve diğer tüm ekipmanların ısı yalıtımı ve enerji tasarrufu sağlaması amacıyla endüstriyel kullanıma uygun geliştirilmiş bir malzemedir. Uygulama sonrası kuru yoğunluğu 350±30 kg/m³ olup, genellikle beyaz, açık renkli ve uygulama kalınlığına göre de grimsi renktedir. Püskürtme, rulo ve/veya fırça ile boru dış cidarına kolaylıkla uygulanabilen ve uygulama yüzeyinde homojen özellik sergileyen bir karakteristiğe sahiptir.

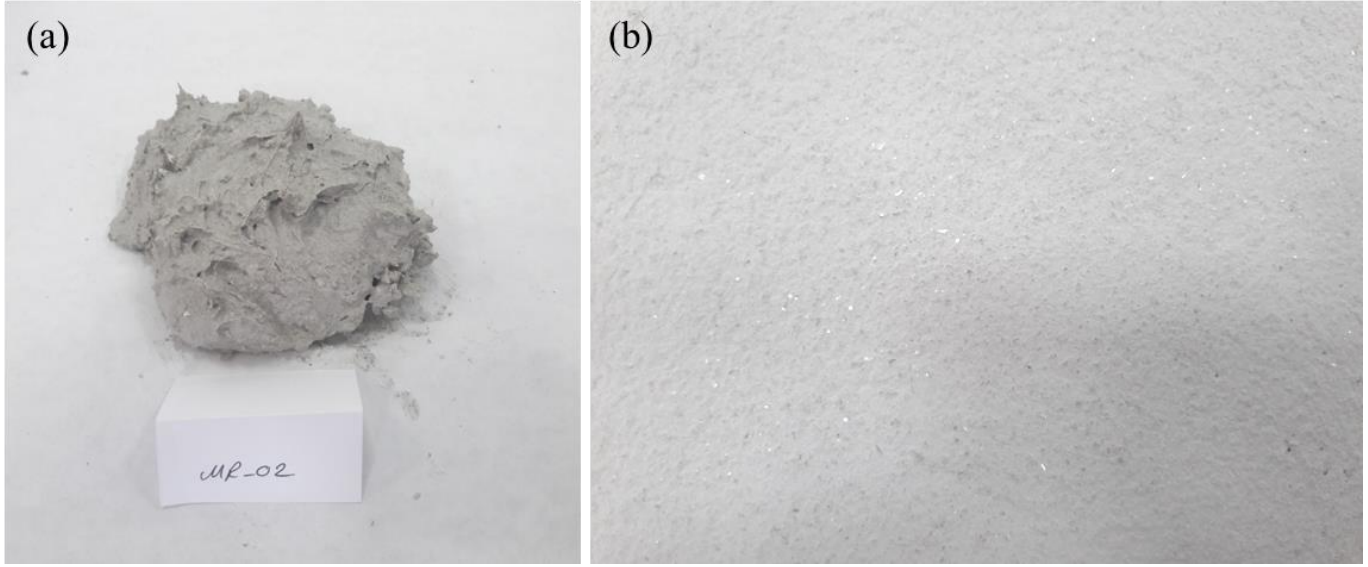


Şekil 1. MR_01 Akrilik Dispersiyon Esaslı Kaplama Malzemesi Genel Görünümü: (a) Uygulama Öncesi Hazır Kaplama Formu, (b) Kaplama Uygulamasının Sertleşmiş Yüzey Formu Görünümü

MR_02; çimento + stiren akrilik kopolimer bağlayıcılı genişmiş cam, seramik, perlit ve inorganik dolgu malzemeleri ihtiva eden endüstriyel alanlarda ısı yalıtımına katkı sağlamak amacıyla geliştirilmiş kullanıma uygun hazır yaş formda bir kaplama harcı malzemesi olup, ticari piyasa koşullarından temin edilerek kullanılmıştır (Şekil 2). Bu kaplama malzemesi içeriğinde yer alan akrilik kopolimer, çimento esaslı yapı kimyasalları için üretilmiş, elastik, düşük camsı geçiş sıcaklık (T_g) değerine ve asitlik değerine sahip, yüksek alkali ve su dayanımı olan çimento ile alkali reaksiyon yapmayan stiren akrilik kopolimerdir. İnşaat endüstrisinde binaların iç ve/veya dış bölme duvarlarında ısı yalıtımına katkı sağlamak ve binanın daha enerji tasarruflu olması amacıyla sektörel alanda kullanımı görülebilen endüstriyel bir kompozit malzemedir. Sertleşmiş kuru yoğunluğu 240±25 kg/m³ olup, genellikle açık renkli bir uygulama formu göstermektedir. Genellikle mala ve fırça ile de uygulanabilen ve uygulama kesitinde heterojen yapısal özellik gösteren bir karakteristiğe sahiptir. Bu çalışma kapsamında MR_02 deneysel irdemelerde diğer kaplama malzemeleriyle karşılaştırma amaçlı boru dış cidarına fırça ile tatbik edilerek sıcak boru kaplama malzemesi şeklinde değerlendirilmiştir.

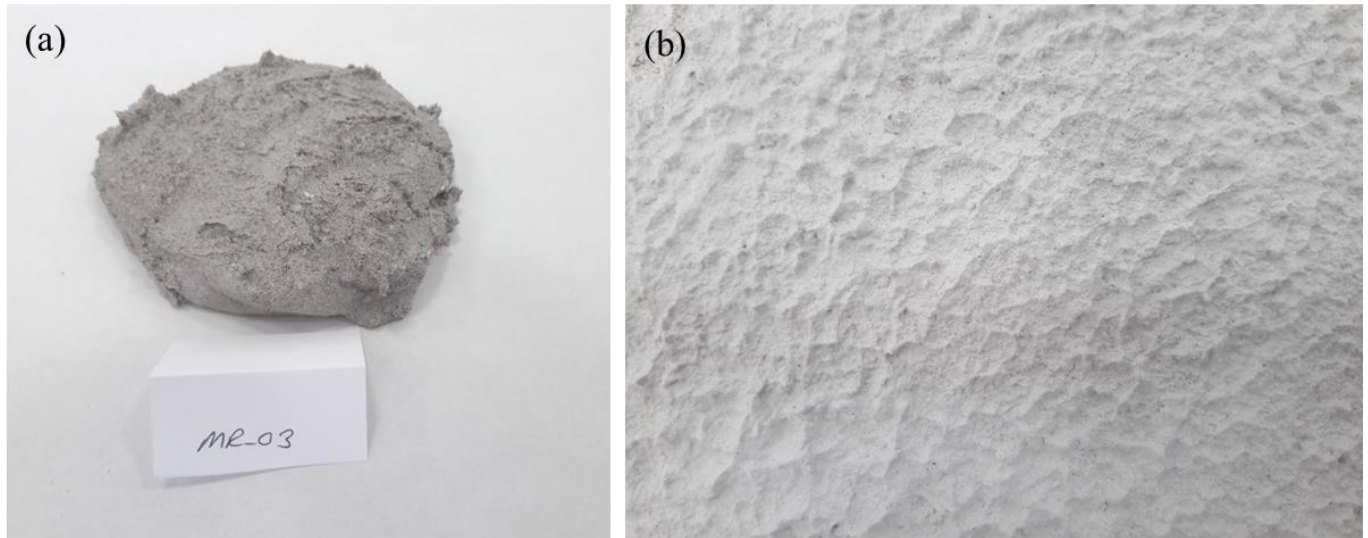
MR_03; çimento bağlayıcılı genişmiş kil, doğal volkanik tüf, perlit ve inorganik dolgu malzemeleri ihtiva eden inşaat sektöründe binaların ısı yalıtımına katkı sağlamak amacıyla geliştirilmiş TS EN 998-1 standardına göre ısı

performansı T₂ kategorisinde, basınç dayanım değeri CS II kategorisinde yer alan toz formda bir kompozit harç malzemesi olup, ticari piyasa koşullarından temin edilerek kullanılmıştır (Şekil 3).



Şekil 2. MR_02 Çimento+Stiren Akriklik Kopolimer Esaslı Kaplama Malzemesi Genel Görünümü: (a) Uygulama Öncesi Hazır Kaplama Formu, (b) Kaplama Uygulamasının Sertleşmiş Yüzey Formu Görünümü

Kompozit harç örneği, toz formda temin edildikten sonra çalışma kapsamında boru yüzeyi kaplama harcı olarak kullanımı için öncelikle su/katı oranı 0.85 olacak şekilde karma suyu ile bir mikser içerisinde homojen bir yaş karışım elde edilinceye kadar 7 dakika karıştırılmış ve sonrasında 5 dakika dinlemeye bırakılmıştır. Dinlenmiş yaş harç, daha sonra deney örneğinin hazırlanmasında boru dış cidarına küçük bir spatula yardımıyla tatbik edilmiş ve sonrasında fırça ile yüzeyi düzeltilmiştir. MR_03 kompozit harcın sertleşmiş kuru yoğunluğu $740 \pm 35 \text{ kg/m}^3$ olup, uygulama kesitinde heterojen yapısal özellik gösteren bir karakteristiğe sahiptir. Bu çalışma kapsamında MR_03, deneysel irdelemelerde MR_01 ve MR_02 kaplama malzemeleriyle karşılaştırma amaçlı boru dış cidarına tatbik edilerek sıcak boru kaplama malzemesi şeklinde değerlendirilmiştir.

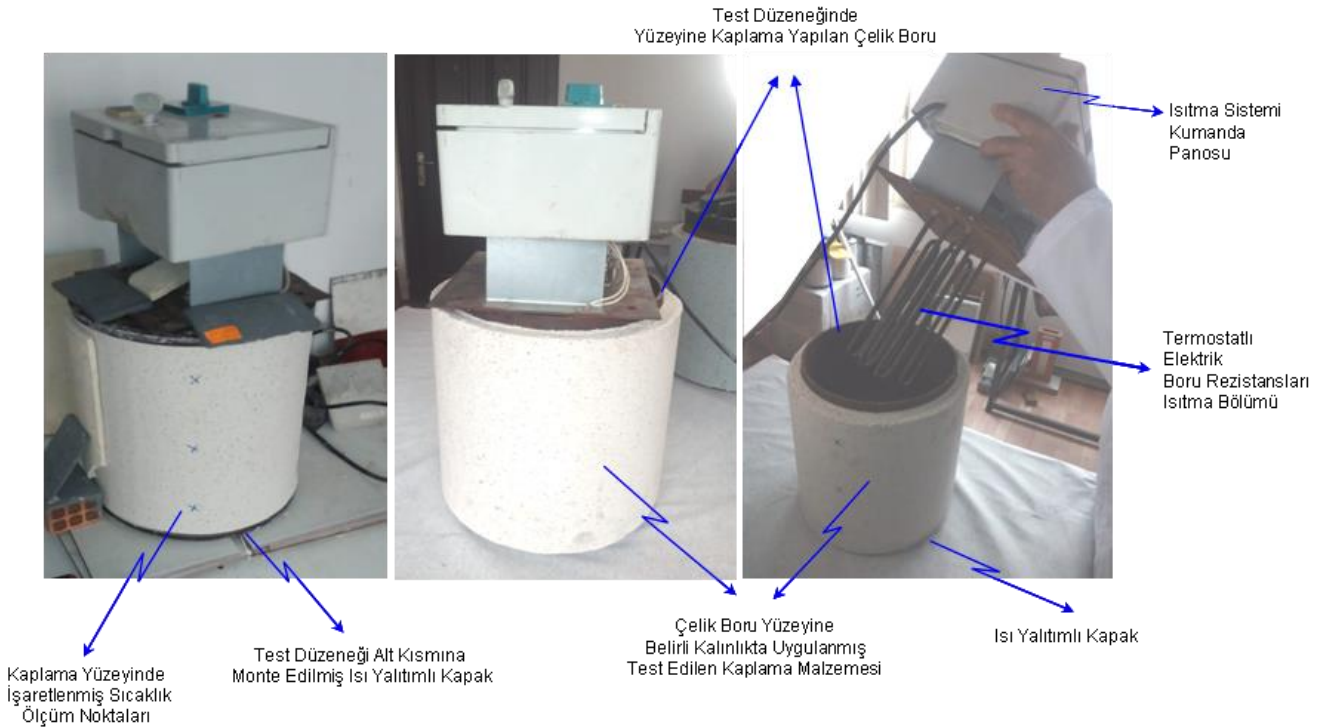


Şekil 3. MR_03 Çimento Esaslı Kaplama Harcı Genel Görünümü: (a) Uygulama Öncesi Hazır Kaplama Formu, (b) Kaplama Uygulamasının Sertleşmiş Yüzey Formu Görünümü

Deneysel Metodoloji

Yüksek sıcaklık boru kaplama uygulamalarında farklı alternatif malzemelerin kullanılageldiği bilinmektedir. Ancak, uygulamalarda çoğunlukla bu malzemelerin önceden kalıp şeklinde bir forma büründürülüp, sonrasında boru üzerine sarma ve/veya kenetleme yöntemiyle kaplamanın yapıldığı ve çoklu ayrı katmanlardan oluşan uygulamalar olarak da sıklıkla görülmektedir. Bu tür uygulamalarda özellikle kaplamada kullanılan birimlerin birleşim yerlerinde farklı

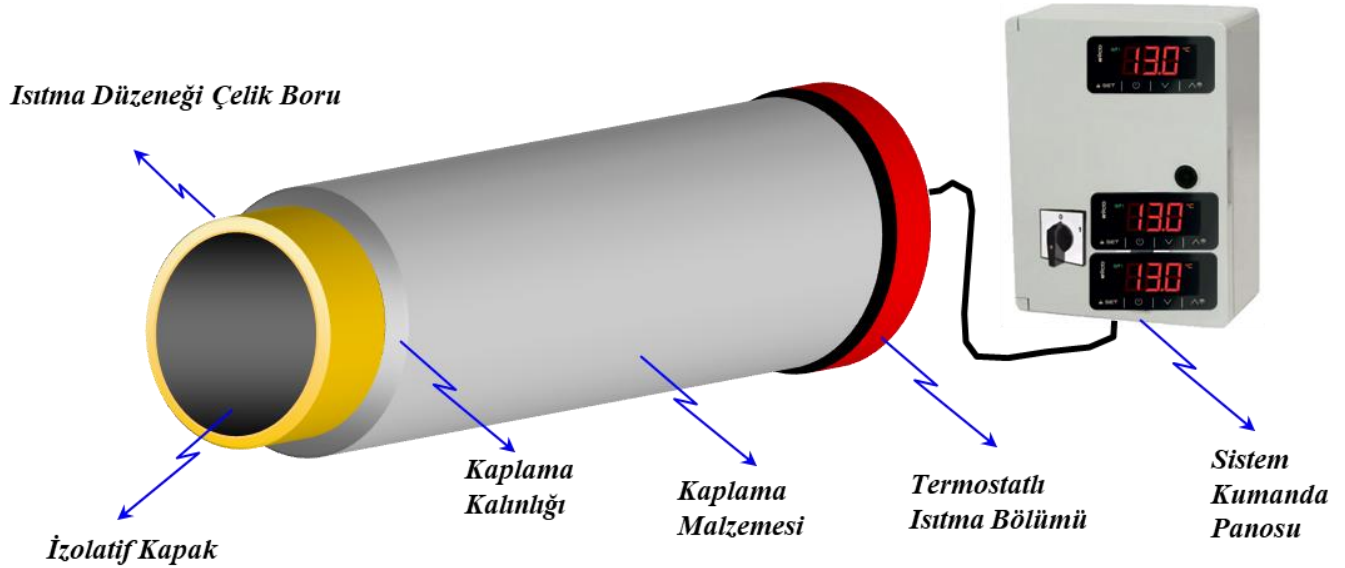
açıklıklarda derzler oluşmakta ve bu derzlerin kapatılması için de ayrı bir uygulama yapma zorunluluğu gündeme gelmektedir Aynı zamanda, bu derzler sebebiyle boru yüzeyinde kaplama birimleri uzanımı boyunca ısı köprüleri de oluşabilmekte, bu da kaplama performansını olumsuz etkileyebilmektedir. Bununla birlikte, bu tür uygulamalarda uygulama sonrası boru yüzeylerinin bütünlüğünde yekpare bir kaplama uygulanamamasından kaynaklı rahatsız edici görsellikler de oluşabilmektedir. Bu amaçla, yüksek sıcaklık boru kaplama uygulamalarında yekpare kaplama uygulamasına imkân tanıyan, derz boşlukları veya açıklıkları meydana gelmeyen, uygulama sonrası tamir, tarama veya onarımı oldukça kolay, ince katman şeklinde tek bir malzeme kullanılarak uygulanabilen, doğrudan çelik boru yüzeyine yapışabilme kabiliyetine sahip yeni nesil niteliğinde kaplama malzemelerinin kullanımı önemli olmaktadır. Bu amaçla, bu çalışma kapsamında bu gereklere cevap verebilecek ve yukarıdaki bölümde bileşenleri tanımlanan 3 farklı kaplama malzemesinin uygulama performansının etüdü amacıyla bir test yöntemi ve test düzeneği tasarlanarak geliştirilmiştir. Deneysel çalışmada kullanılan test ölçüm düzeneğinin genel görünümü ve detayları Şekil 4'te verilmiştir. Üç farklı kaplama malzemesinin yüksek sıcaklık boru kaplamasında ısıl performanslarının karşılaştırılması amacıyla anma boyutu 40 mm, dış çapı 48,3 mm, iç çapı 38,3 mm, et kalınlığı ortalama 5 mm ve yoğunluğu ortalama 5,34 kg/m olan bir çelik çekme borudan ortalama 600 mm uzunluğunda test ünitesinin kaplama yapılacak ana boru malzemesi kısmı seçilmiştir. Test düzeneğindeki bu ünite, Şekil 4'de "*test düzeneğinde yüzeyine kaplama yapılan çelik boru*" tanımı ile gösterilmiştir. Testler sırasında her bir kaplama malzemesi ve farklı kalınlıkları için eşdeğer özellikte ayrı bir çelik çekme boru kullanımı düşünülmüştür. Bu boyutlardaki bir çelik çekme boru kullanılarak borunun bir tarafı eşdeğer özellikte bir çelik plaka "*test düzeneği alt kısmına monte edilmiş ısı yalıtımlı kapak* (Şekil 4)" ile kapalı forma getirilerek diğer tarafına ise termostatlı ve kümelenendirilmiş farklı elektrik akımı değerlerine sahip elektrik boru rezistanslarından oluşan bir ısıtma düzeneği tasarlanarak monte edilmiştir (Şekil 4). Daha sonra borunun ısıtma bölümü tarafından başlanılmak üzere ortalama 550 mm uzunluğa sahip olacak şekilde borunun tüm dış cidarı ısıl performansı irdelenecek kompozit kaplama malzemesi ile kaplanarak, test örneği ve ölçüm düzeneği analiz için hazır hale getirilmiştir.



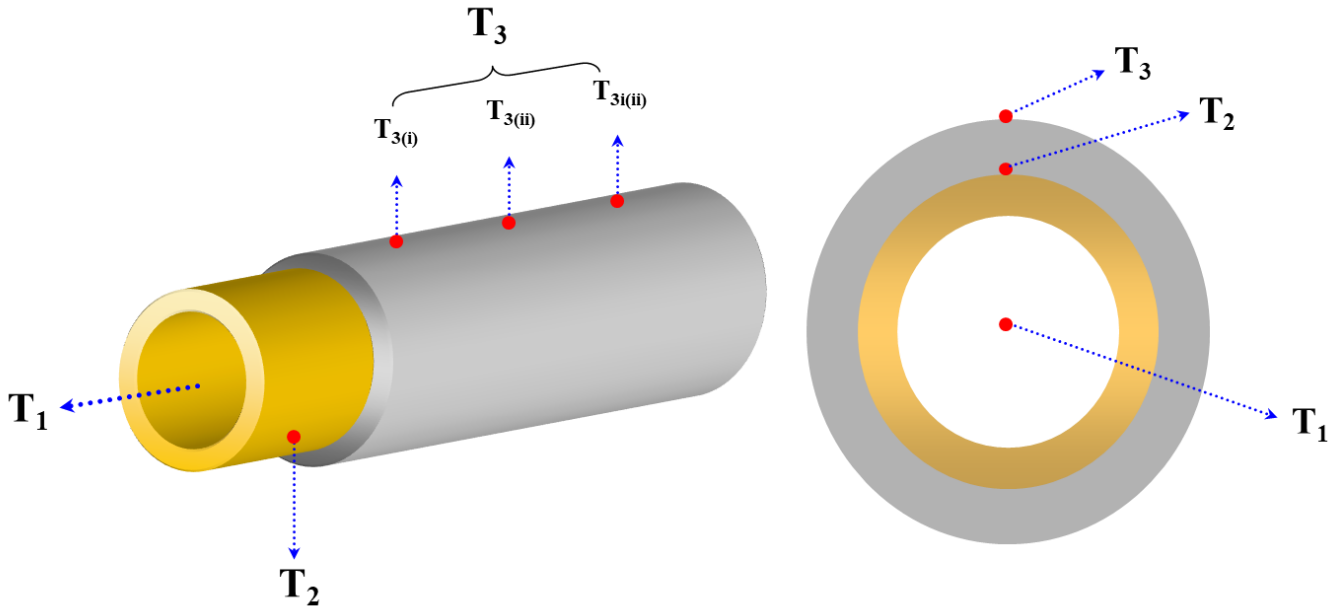
Şekil 4. Test Düzeneğinin Genel Görünümü ve Detayları

Çalışma kapsamında her bir kaplama malzemesi öncelikle üretici beyanına uygun şekilde karma suyu ilave edilerek kaplama harcı formu şekline getirilerek kullanım için hazırlanmıştır. Sonrasında, her bir kaplama malzemesinden ayrı ayrı test örneklerde olmak koşuluyla eşdeğer uygulama kalınlığı 24 mm olacak şekilde boru yüzeyine kaplama uygulaması yapılarak, kaplama malzemesi 22 ± 2 °C oda ortamı sıcaklığında sertleşmeye bırakılmıştır. Uygulama sonrası her bir kaplama malzemesinin 72 saat sonrasında boru içerisindeki sıcaklık 22 °C değerinden başlanılmak üzere ortalama 500 ± 15 °C sıcaklık değerine kadar artırımlı olarak ısıtılarak, her bir sıcaklık artırımında en az 60 dakika boyunca test düzeneğindeki sıcaklık değişimleri her 5 dakikada bir kayıt altına alınmıştır. Deneysel analizde her bir kaplama malzemesi örneği için 12 ayrı sıcaklık artırımını uygulanmış olup, her bir sıcaklık değeri için 3 farklı

test sıcaklık ölçümü kaydedilmiştir. Bunlar: T_1 , T_2 ve T_3 sıcaklık değerleridir (Şekil 5 ve Şekil 6). T_1 sıcaklığı, boru iç bölümüne yerleştirilen $0.1\text{ }^\circ\text{C}$ hassasiyetli termokupl sıcaklık ölçüm sensörünün ortalama sıcaklık değerini temsil eder. T_2 sıcaklığı, test düzeneğini oluşturan çelik borunun dış cidarına mont edilen $0.1\text{ }^\circ\text{C}$ hassasiyetli termokupl sıcaklık ölçüm sensörünün ortalama sıcaklık değerini temsil eder. T_3 sıcaklığı ise, test düzeneğinde boru dış cidarına kaplama olarak uygulanmış malzemenin 3 farklı noktasına yerleştirilen $0.1\text{ }^\circ\text{C}$ hassasiyetli termokupl sıcaklık ölçüm sensörlerinin ortalama sıcaklık değerini temsil eder.



Şekil 5. Test Düzeneği ve Çalışma Prensibi-Sembolik Görünümü



Şekil 6. Test Düzeneğinde Ölçülen Sıcaklık Değerleri-Sembolik Gösterimi

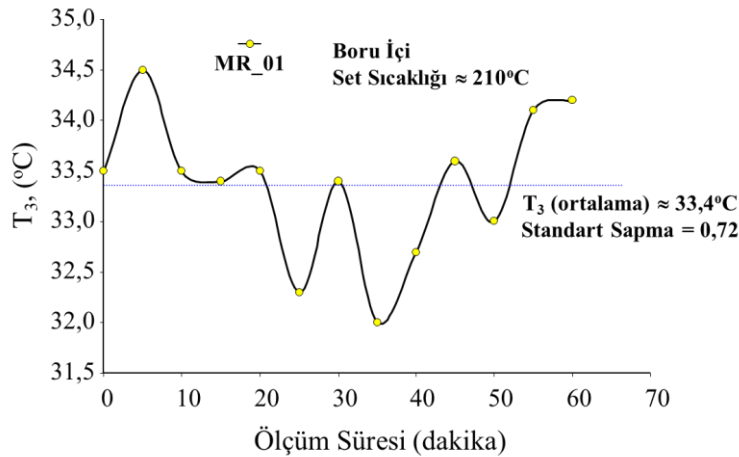
BULGULAR

Deneysel çalışmada her bir kompozit kaplama malzemesi ile ortalama 24 mm kaplama kalınlığı için $22\text{ }^\circ\text{C}$ – $510\text{ }^\circ\text{C}$ aralığında 12 ayrı sıcaklık değerinde test düzeneğinde sıcaklık değişim değerleri kaydedilmiştir. Boru iç bölgesinde set olarak ayarlanan her bir sıcaklık değerinde minimum 60 dakika boyunca her 5 dakikada bir T_1 , T_2 ve T_3 sıcaklık değerleri kaydedilerek ortalama değerleri belirlenmiştir. Çizelge 1'de MR_01 kodlu akrilik dispersiyon esaslı kaplama malzemesinin $210\text{ }^\circ\text{C}$ boru içi sıcaklık değerindeki ölçüm değerleri test bulgularına örnek olarak verilmiştir.

Tablo 1. MR_01 Örneği İçin 210°C Boru İçi Sıcaklık Değerindeki Ölçüm Bulguları

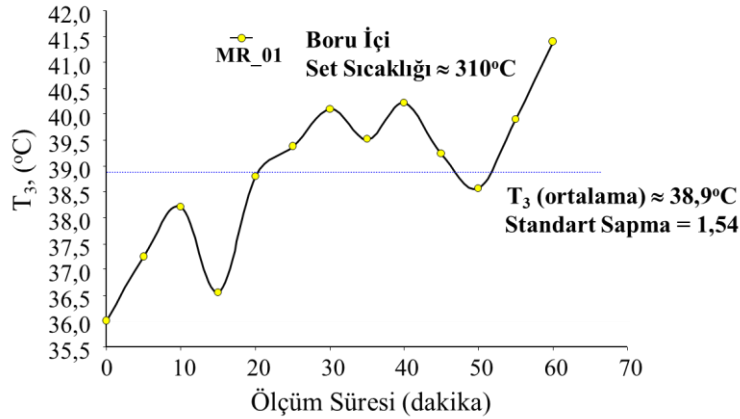
Ölçüm Sırası	Ölçüm Zamanı	Süre (dakika)	T ₁ (°C)	T ₂ (°C)	T ₁ -T ₂ (°C)	T ₃ (°C)	T ₂ -T ₃ (°C)
1	18:00	0	210,1	208,2	1,90	33,5	174,73
2	18:05	5	210,2	208,1	2,13	34,5	173,58
3	18:10	10	210,6	208,4	2,21	33,5	174,89
4	18:15	15	209,8	208,2	1,62	33,4	174,81
5	18:20	20	209,8	208,4	1,44	33,5	174,88
6	18:25	25	210,2	208,0	2,17	32,3	175,70
7	18:30	30	210,2	208,0	2,22	33,4	174,61
8	18:35	35	210,2	208,3	1,91	32,0	176,25
9	18:40	40	209,9	208,6	1,35	32,7	175,86
10	18:45	45	209,7	208,7	1,05	33,6	175,08
11	18:50	50	209,9	208,6	1,22	33,0	175,63
12	18:55	55	209,9	208,5	1,47	34,1	174,36
13	19:00	60	210,3	208,6	1,62	34,2	174,44
Ortalama:			210,1	208,3	1,72	33,4	174,99
Standart Sapma:			0,244	0,239	0,401	0,72	0,720
Varyans:			0,059	0,057	0,160	0,52	0,518

Çizelge 1'den görüldüğü üzere, MR_01 akrilik dispersiyon esaslı kaplama malzemesi 210°C sıcaklık değerinde 60 dakika boyunca boru içi sıcaklık değeri hemen hemen sabit kalması durumunda kaplama malzemesinin yüzeyindeki ortalama sıcaklık (T₃) 32,0°C ile 34,5°C aralığında kısmi bir dalgalanma oluşturarak değişim göstermektedir. T₃ sıcaklık ortalaması ise 33,4°C'dir. Zamana bağlı T₃ sıcaklık değişimi grafiksel olarak Şekil 7'de görülmektedir.

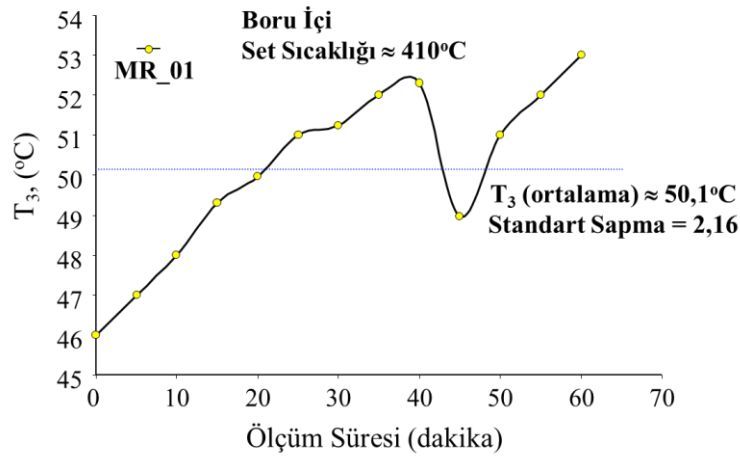
**Şekil 7.** MR_01 Örneği İçin 210°C Boru İçi Sıcaklık Değerinde Kaplama Yüzeyindeki Sıcaklık Değişimi

60 dakikalık ölçüm periyodunda kaplama malzemesinin yüzey sıcaklığının 0,72°C standart sapma değeriyle değişkenlik gösterdiği belirlenmiştir. Yüzey sıcaklığındaki dalgalanmanın, kaplama yüzeyinden ısı transferinin homojen bir eğilim göstermemesinden kaynaklandığı düşünülmektedir. Özellikle, boru içi sabit sıcaklıkta ölçüm periyodunun yarı zaman diliminde kaplama sıcaklığının daha düşük değerlerde oluşabildiği gözlenmiştir. Bu dalgalanmadaki bir diğer faktörün boru içi sıcaklık değerinin büyüklüğünün de etkili olduğu düşünülmüştür. Bu bağlamda boru içi sıcaklık değeri arttıkça, bu dalgalanmanın artan bir eğilimde artış gösterebileceği tahmin edilmiştir. 210°C'lik boru içi sıcaklık değerinde, MR_01 akrilik dispersiyon esaslı kaplama malzemesiyle hazırlanmış test örneğinin sıcak çelik boru ortamına sağladığı 60 dakikalık zaman dilimindeki ısı kazancı ortalama %83,99, test örneği yüzeyinde oluşan ısı kaybı ise ortalama %16,01 olarak belirlenmiştir. Çalışma kapsamında elde edilen bulgularından 310°C ve 410°C boru içi sıcaklığı değerleri için de benzer analiz grafiksel olarak irdelenmiş olup, her iki sıcaklık değeri için Şekil 8 ve Şekil 9'da sırasıyla verilmiştir.

MR_01 akrilik dispersiyon esaslı kaplama malzemesi için 310°C boru içi set sıcaklık değerinde 60 dakikalık zaman periyodunda kaplama malzemesinin yüzeyindeki ortalama sıcaklık (T₃) 36,0°C ile 41,4°C aralığında kısmi bir dalgalanma oluşturarak değişim göstermektedir. T₃ sıcaklık ortalaması ise 38,9°C'dir. Bu set sıcaklığı değeri için kaplama malzemesinin yüzey sıcaklığının 1,54°C standart sapma değeriyle değişkenlik gösterdiği belirlenmiştir.



Şekil 8. MR_01 Örneği İçin 310°C Boru İçi Sıcaklık Değerinde Kaplama Yüzeyindeki Sıcaklık Değişimi



Şekil 9. MR_01 Örneği İçin 410°C Boru İçi Sıcaklık Değerinde Kaplama Yüzeyindeki Sıcaklık Değişimi

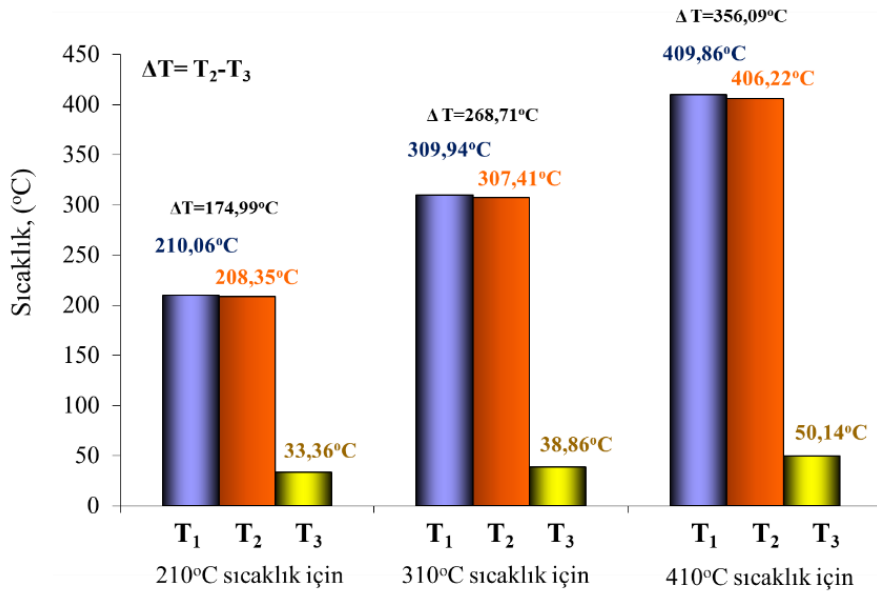
MR_01 kaplama yüzeyinden zamana bağlı artan bir eğilimle sıcaklık artışının olduğu görülmektedir. Benzer şekilde, 410°C boru içi set sıcaklık değerinde 60 dakikalık zaman periyodunda ise MR_01 kaplama malzemesinin yüzeyindeki ortalama sıcaklık (T_3) 46,0°C ile 53,0°C aralığında değişim göstermiştir. T_3 sıcaklık ortalaması ise 50,1°C'dir. Bu set sıcaklığı değeri için kaplama malzemesinin yüzey sıcaklığının 2,16°C standart sapma değeriyle değişkenlik gösterdiği belirlenmiştir. 310°C'lik boru iç sıcaklık değerinde, MR_01 akrilik dispersiyon esaslı kaplama malzemesiyle hazırlanmış test örneğinin sıcak çelik boru ortamına sağladığı 60 dakikalık zaman dilimindeki ısı kazancı ortalama %87,37, test örneği yüzeyinde oluşan ısı kaybı ise ortalama %12,63 olarak belirlenmiştir. Benzer olgu 410°C'lik boru iç sıcaklık değerinde ise sırasıyla %87,66 ve %12,34 olarak belirlenmiştir. Üç ayrı boru içi set sıcaklık değerinde MR_01 kaplama örneği için elde edilen test bulgularının genel bir karşılaştırması ortalama değerler olarak Şekil 10'da verilmiştir.

Bu üç detay analiz bulgusuna göre, boru içi set sıcaklığı arttıkça MR_01 akrilik dispersiyon esaslı kaplama malzemesinin ısı kazancı performansının göreceli olarak artış eğilimi sağladığı görülmüştür. Bu sıcaklık değerlerinin hiç birisinde kaplama malzemesi yüzeyinde ve malzemenin matris yapısında yapısal herhangi bir bozunma olgusu gelişmediği ve malzeme bütünlüğünün korunduğu gözlenmiştir.

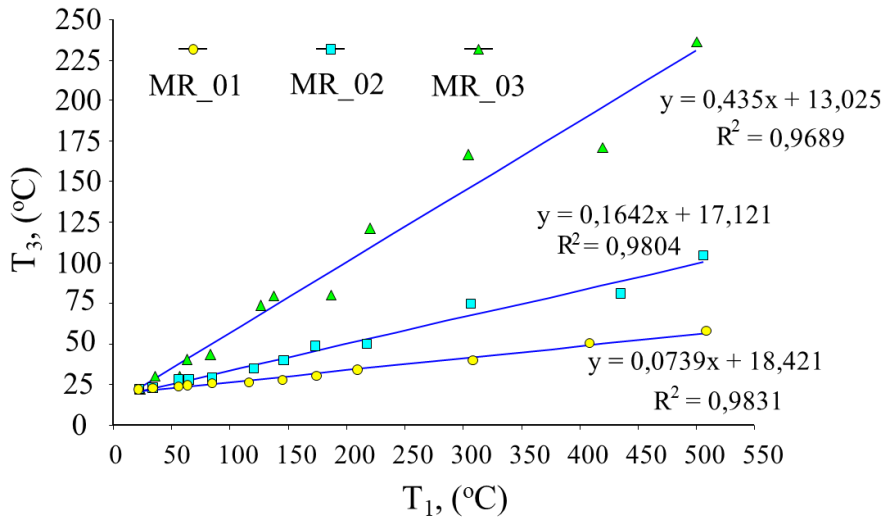
Çalışma kapsamında üç ayrı MR_01, MR_02 ve MR_03 kaplama malzemesi örneklerinin boru içi set sıcaklıkları (T_1) değişimine bağlı kaplama malzeme yüzey sıcaklıkları (T_3) arasındaki ilişki, karşılaştırmalı olarak Şekil 11'de verilmiştir.

Şekil 11 irdelendiğinde eşdeğer kaplama kalınlığında uygulandığında MR_01 akrilik dispersiyon esaslı kaplama malzemesinin eşdeğer T_1 sıcaklık değerlerinde diğer iki tür MR_02 ve MR_03 kaplama malzemelerine kıyasla T_3

yüzey sıcaklık değerinin daha düşük derecelerde elde edilmesi sebebiyle ısı kazanç performansının daha yüksek olduğu görülmektedir.



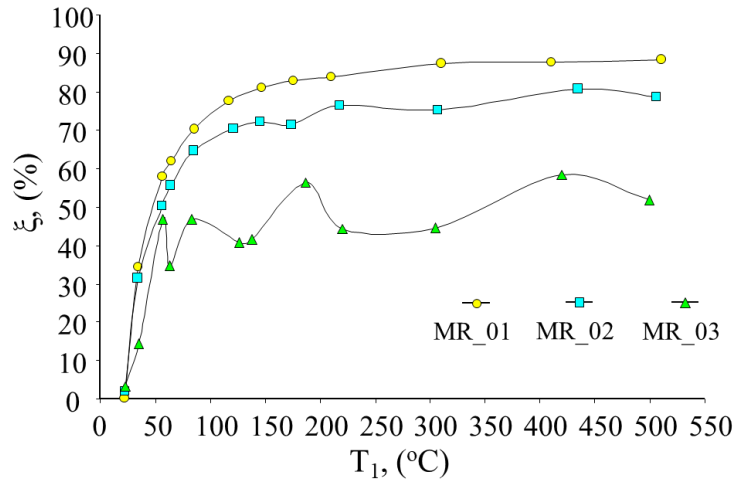
Şekil 10. MR_01 Örneği İçin Analiz Bulgularının Karşılaştırması



Şekil 11. Kaplama Malzeme Örneklerinin T₁ ve T₃ Sıcaklık Etkileşimi İlişkisi

Örneğin, boru içi set sıcaklığı 55°C değerinde MR_01 kaplamalı örneğinin T₃ sıcaklığı ortalama 23,2°C, MR_02 kaplamalı örneğinin T₃ sıcaklığı ortalama 27,4°C ve MR_03 kaplamalı örneğinin T₃ sıcaklığı ortalama 29,9°C'dir. Bu bulgulara göre MR_01 kaplama malzemesi, MR_02'ye göre yaklaşık %18, MR_03'e göre de yaklaşık %29 oranında daha ısı kazançlı kaplama malzemesi olduğunu göstermiştir. Benzer şekilde bir diğer boru içi set sıcaklığı örneğin 120°C değeri irdelendiğinde ise; MR_01 kaplamalı örneğinin T₃ sıcaklığı ortalama 26,1°C, MR_02 kaplamalı örneğinin T₃ sıcaklığı ortalama 35°C ve MR_03 kaplamalı örneğinin T₃ sıcaklığı ortalama 73,4°C'dir. Bu bulgulara göre MR_01 kaplama malzemesi, MR_02'ye göre yaklaşık %34, MR_03'e göre de yaklaşık %180 oranında daha ısı kazançlı kaplama malzemesi olduğunu temsil etmektedir. Bu analiz bulgularından da görüleceği üzere, akrilik dispersiyon esaslı kaplama malzemesinin artan boru içi set sıcaklık değerlerinde diğer iki tür çimento+stiren akrilik kopolimer esaslı kaplama malzemesi (MR_02) ve çimento esaslı kaplama harcı (MR_03) örneklerine kıyasla çok daha belirgin bir ısı kazancı sağladığı görülmektedir. Diğer bir değişle, akrilik dispersiyon esaslı kaplama malzemesinin ısı kazancı değişimi açısından daha duraylı ve daha kararlı bir matris yapı özelliği sergilemektedir. Çelik çekme boru yüzeyine uygulama yapıldıktan sonra kaplama malzemesinin matris yapısında gerek malzeme bileşenlerinden gerekse uygulama koşullarından kaynaklı olası oluşabilecek porozite, kaplamanın performansını etkileyebilecek bir diğer faktördür. Ancak bu çalışma kapsamında bu bağlamda olası porozite oluşumu ve etkileri değerlendirmelere alınmamıştır.

Çalışma kapsamında her bir kaplama malzemesi ile yapılmış test örneklerinin boru içi set sıcaklık değişiminde kaplama yüzeylerinde oluşan sıcaklık değişimi dikkate alınarak ısı kazancı oranları (ξ) detaylı olarak analiz edilmiş olup, analiz bulguları grafiksel olarak Şekil 12’de verilmiştir.



Şekil 12. Kaplama Malzeme Örneklerinin T₁ Sıcaklık - Isı Kazancı Oransal Etkileşim İlişkisi

MR_01 kaplama örneğinin sıcaklık değişimine bağlı ısı kazanç oranı yüzde değerlerinin düzenli bir artan eğilim formu gösteren karakteristiğe sahip olduğu belirlenmiştir. Bunun yanı sıra MR_02 çimento+stiren akrilik kopolimer esaslı kaplama malzemesinin ise MR_01’e göre daha düşük ısı kazanç yüzde değerlerine sahip ve aynı zamanda ısı kazancı değişimi açısından kısmen kararlı olarak kabul edilebilecek bir matris yapı özelliği sergilemektedir. MR_03 çimento esaslı kaplama harcıyla oluşturulmuş test örneğinin ise diğer örneklerle kıyasla ısı kazancı değişiminin çok daha düşük bir karalılıkta artan eğilim gösterdiği belirlenmiştir.

Isı transferi, iki sistem arasında ısıнын yayılarak değiş tokuş edilmesi ile oluşan fiziksel termal enerjidir. Sıcaklık ve ısı akışı kavramları, ısı transferinin iki temel prensibidir. Mevcut termal enerji miktarı sıcaklık tarafından belirlenir ve ısı akışı termal enerjinin hareketini temsil eder (Püsgül, 2018). Mikroskobik boyutta incelendiğinde, moleküllerin kinetik enerjisi direkt olarak termal enerji ile ilişkilidir. Sıcaklık yükseldikçe, moleküllerin doğrusal hareketi ve titreşimi ile ortaya çıkan termal çalkalanma artar. Böylelikle, daha yüksek kinetik enerjinin olduğu bölgeler, enerjiyi daha düşük kinetik enerjiye sahip noktalara aktarır (Püsgül, 2018). Çalışma kapsamında elde edilen bulgulardan her bir test ortamının ve kaplama yapılmış sıcak boru kesiti bileşenlerine göre kaplama yüzeyinden oluşan ısı transferi değerleri hesaplanmaya çalışılmıştır. Bu hesaplamada tek veya birçok katmandan oluşan bir kesitin birim alanından (m²) birim zamanda (1 saat) gerçekleşen ısı kaybı değeri temel algoritma olarak kullanılmış olup, hesaplamada aşağıda belirtilen eşitlik (1) uygulanmıştır (Yakut vd., 2022):

$$q = U \times (T_1 - T_h) \quad (1)$$

Burada;

q : Sistemden yayılan ısı transferi miktarı, W/m²,

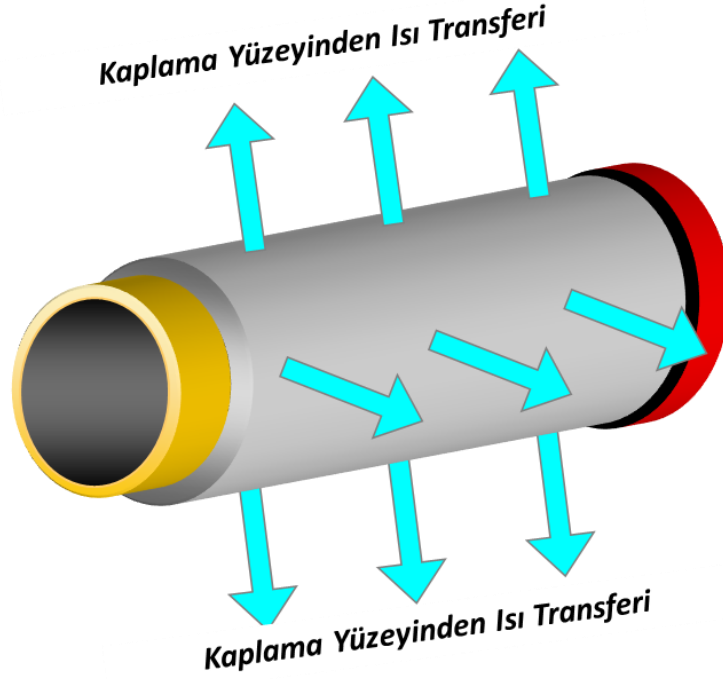
U : Sistemin ısı geçirgenlik değeri, W/m²K,

T₁ : Boru içi sıcaklık değeri, W,

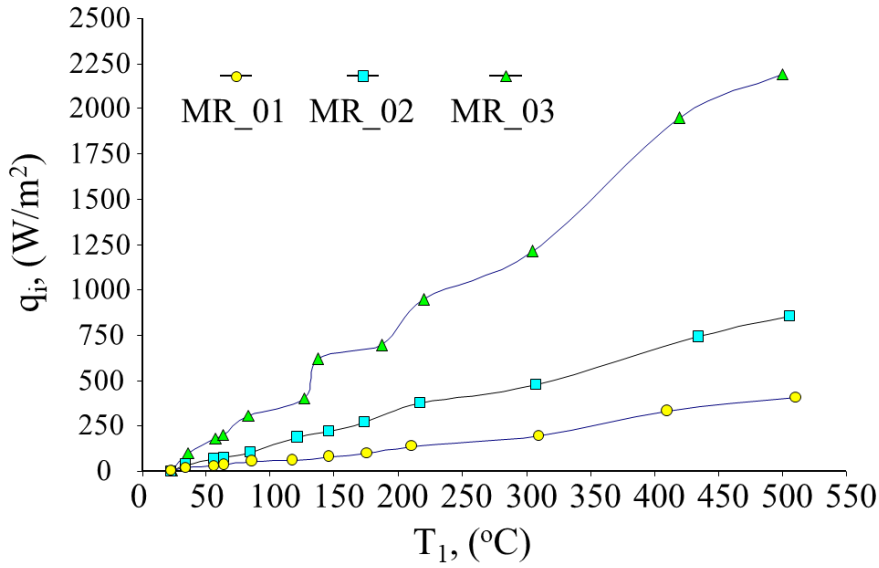
T_h : Sistem dışındaki ortamın sıcaklık değeri, W.

Bu değerlendirmeye göre MR_0,1, MR_02 ve MR_03 test örneklerinin 24 mm kalınlıkta kaplama yapıldıktan sonra boru sisteminin yüzeyinden oluşan ısı transferi (Şekil 13), test sürecinde boru iç sıcaklık değişimleri bağlamında grafiksel analizi Şekil 14’te verilmiştir.

MR_01 akrilik dispersiyon esaslı kaplama örneğinin boru içi T₁ sıcaklık artışı değişimine bağlı kaplamalı boru sisteminde oluşan ısı transferi lineer kabul edilebilecek bir eğilimle artış karakteristiği göstermiştir. Ortalama 22°C’lik T₁ sıcaklık değerinde oluşan ısı transferi yaklaşık 0.70 W/m² iken bu ısı miktarının T₁ sıcaklığının 510°C’ye ulaşması durumunda ise yaklaşık 405 W/m² değerine ulaştığı görülmektedir.



Şekil 13. Boru Sisteminin Yüzeyinden Oluşan Isı Transferi Sembolik Gösterimi



Şekil 14. Boru İçi Sıcaklık Değeri – Isı Transferi İlişkisi

MR_02 çimento+stiren akrilik kopolimer esaslı kaplama örneğinin boru içi T_1 sıcaklık artışı değişimine bağlı kaplamalı boru sisteminde oluşan ısı transferi de MR_01 kaplama malzemesine benzer şekilde lineer kabul edilebilecek bir eğilimle artış karakteristiği göstermiştir. Bu kaplama malzemesi için de ortalama 22°C 'lik T_1 sıcaklık değerinde oluşan ısı transferi yaklaşık 1.69 W/m^2 iken bu ısı miktarının T_1 sıcaklığının 510°C 'ye ulaşması durumunda ise yaklaşık 858 W/m^2 değerine ulaştığı görülmektedir. MR_01'e göre ısı transferi miktarındaki artış $2,11 - 2,41$ kat aralığında değişim göstermiştir. Diğer taraftan, MR_03 çimento esaslı kaplama harcıyla oluşturulmuş örneğinin boru içi T_1 sıcaklık artışı değişimine bağlı sistemde oluşan ısı transferinin genel karakteristiğinin ise MR_01 ve MR_02 örneklerinin performansından göreceli olarak daha farklı olduğu belirlenmiştir. MR_03 kaplamalı sistemde ise ortalama 22°C 'lik T_1 sıcaklık değerinde oluşan ısı transferi yaklaşık 5.44 W/m^2 iken bu ısı miktarının T_1 sıcaklığının 510°C 'ye ulaşması durumunda ise yaklaşık 2194 W/m^2 değerine ulaştığı görülmektedir. Bu değerler bağlamında kaplama malzemelerinin ısı transferi bağlamında değişimi irdelendiğinde MR_03 kaplamalı sistemin MR_01'e göre

ısı transferi miktarındaki artışı 5,41 – 7,77 kat aralığında değişim göstermiştir. Boru içi T_1 sıcaklığı düştükçe, kaplama malzemelerinin ısı transferi miktarlarındaki karşılaştırma aralığının arttığı, T_1 sıcaklığının artan değerlerinde ise bu aralığın azaldığı görülmüştür. Elde edilen bulgular bağlamında genel bir yaklaşım olarak, MR_01 akrilik dispersiyon esaslı kaplama malzemesinin sıcak boru sisteminde diğer MR_02 ve MR_03 kaplama malzemelerine kıyasla, boru sistemini ısı kayıplarına karşı daha korumalı bir sistem oluşumuna olanak sağladığı görülmüştür. Bununla birlikte, MR_02 çimento+stiren akrilik kopolimer esaslı kaplama malzemesinin de sıcak boru sisteminde MR_03 kaplama malzemesine kıyasla, boru sistemini ısı kayıplarına karşı daha korumalı bir sistem formuna dönüştürmektedir. Sıcak boruların ısı kaybına karşı daha izolatif ve aynı zamanda minimum ısı transferi miktarları bağlamında üç ayrı alternatif kaplama malzemesi mukayese edildiğinde performans yaklaşımının $MR_01 > MR_02 > MR_03$ kaplama malzemeleri şeklinde sıralandığı görülmüştür.

SONUÇLAR

Bu makalede, sıcak boru kaplamalarında tek kat olarak uygulanabilen üç farklı kaplama malzemesinin karşılaştırmalı analizi irdelenmektedir. Bu kaplama malzemeleri; akrilik dispersiyon esaslı kaplama malzemesi, çimento+stiren akrilik kopolimer bağlayıcılı genişlemiş cam, seramik, perlit ve inorganik dolgu malzemeleri ihtiva eden kaplama malzemesi ve çimento bağlayıcılı genişlemiş kil, doğal volkanik tüf, perlit ve inorganik dolgu malzemeleri ihtiva eden kaplama malzemesidir. Kaplama malzemelerinin uygulandığı sıcak boru hattında ısı dolayısıyla enerji kaybının minimuma indirgenme performanslarının karşılaştırması üzerine deneysel bir çalışmanın bulguları tartışmalı olarak sunulmuştur. Çalışma sonuçlarına göre;

MR_01 akrilik dispersiyon esaslı kaplama malzemesi 210°C sıcaklık değerinde 60 dakika boyunca boru içi sıcaklık değeri hemen hemen sabit kalması durumunda kaplama malzemesinin yüzeyindeki ortalama sıcaklık (T_3) $32,0^{\circ}\text{C}$ ile $34,5^{\circ}\text{C}$ aralığında kısmi bir dalgalanma oluşturarak değişim göstermektedir. 210°C 'lik boru iç sıcaklık değerinde, MR_01 akrilik dispersiyon esaslı kaplama malzemesiyle hazırlanmış test örneğinin sıcak çelik boru ortamına sağladığı 60 dakikalık zaman dilimindeki ısı kazancı ortalama %83,99, test örneği yüzeyinde oluşan ısı kaybı ise ortalama %16,01 olarak belirlenmiştir. 310°C boru içi set sıcaklık değerinde 60 dakikalık zaman periyodunda kaplama malzemesinin yüzeyindeki ortalama sıcaklık (T_3) $36,0^{\circ}\text{C}$ ile $41,4^{\circ}\text{C}$ aralığında kısmi bir dalgalanma oluşturarak değişim göstermektedir. 410°C boru içi set sıcaklık değerinde 60 dakikalık zaman periyodunda ise MR_01 kaplama malzemesinin yüzeyindeki ortalama sıcaklık (T_3) $46,0^{\circ}\text{C}$ ile $53,0^{\circ}\text{C}$ aralığında değişim göstermiştir. 310°C 'lik boru iç sıcaklık değerinde, MR_01 akrilik dispersiyon esaslı kaplama malzemesiyle hazırlanmış test örneğinin sıcak çelik boru ortamına sağladığı 60 dakikalık zaman dilimindeki ısı kazancı ortalama %87,37, test örneği yüzeyinde oluşan ısı kaybı ise ortalama %12,63 olarak belirlenmiştir. Benzer olgu 410°C 'lik boru iç sıcaklık değerinde ise sırasıyla %87,66 ve %12,34 olarak belirlenmiştir.

MR_01 akrilik dispersiyon esaslı kaplama malzemesinin eşdeğer T_1 sıcaklık değerlerinde diğer iki tür MR_02 ve MR_03 kaplama malzemelerine kıyasla T_3 yüzey sıcaklık değerinin daha düşük derecelerde elde edilmesi sebebiyle ısı kazanç performansının daha yüksek olduğu görülmektedir. MR_01 kaplamalı örneğinin T_3 sıcaklığı ortalama $26,1^{\circ}\text{C}$, MR_02 kaplamalı örneğinin T_3 sıcaklığı ortalama 35°C ve MR_03 kaplamalı örneğinin T_3 sıcaklığı ortalama $73,4^{\circ}\text{C}$ 'dir. Bu bulgulara göre MR_01 kaplama malzemesi, MR_02'ye göre yaklaşık %34, MR_03'e göre de yaklaşık %180 oranında daha ısı kazançlı kaplama malzemesi olduğunu temsil etmektedir.

MR_01 akrilik dispersiyon esaslı kaplama örneğinin boru içi T_1 sıcaklık artışı değişimine bağlı kaplamalı boru sisteminde oluşan ısı transferi lineer kabul edilebilecek bir eğilimle artış karakteristiği göstermiştir. Ortalama 22°C 'lik T_1 sıcaklık değerinde oluşan ısı transferi yaklaşık 0.70 W/m^2 iken bu ısı miktarının T_1 sıcaklığının 510°C 'ye ulaşması durumunda ise yaklaşık 405 W/m^2 değerine ulaştığı görülmektedir. MR_02 örneğinin MR_01'e oranla ısı transferi miktarındaki artış 2,11 – 2,41 kat aralığında değişim göstermiştir. MR_03 kaplamalı sistemin MR_01'e göre ısı transferi miktarındaki artışı 5,41 – 7,77 kat aralığında değişim göstermiştir.

Tüm çalışma çıktıları birlikte değerlendirildiğinde, sıcak boruların ısı kaybına karşı daha izolasyonlu ve aynı zamanda minimum ısı transferi oluşturması bağlamında üç ayrı kaplama malzemesi mukayese edildiğinde en uygun tek kat kaplama malzemesinin MR_01 olduğu gözlemlenmiştir.

KAYNAKLAR

- Abdullah, A. S., Mohd Nawi, M. N., Othuman Mydin, M. A., Sari, M. W., Ahmad, R. & Abdullah, M. M. A. B. (2022). The Significant Effect of Mechanical Treatment on Ceramic Coating for Biomedical Application. *Materials*, 15(19), 6550. <https://doi.org/10.3390/ma15196550>
- ASHRAE, 2013. Thermal Performance of Selected Insulating Coatings on Piping and Ductwork. Research Report 1550-RP 8/2013.
- ASTM C518, 2021. Standard Test Method for Steady-State Thermal Transmission Properties by Means of the Heat Flow Meter Apparatus.
- Dey, A. K. Piping Insulation: Types of Pipe Insulation (With PDF). (2023). <https://whatispiping.com/piping-insulation/> Erişim 27.03.2023.
- Isollat. Sıcak ve Soğuk Boru Hatları Isı Yalıtımı. (2023). <https://www.isollat.com/uygulama-alani/sicak-ve-soguk-boru-hatlari-isi-yalitimi> Erişim 27.03.2023
- İzoder. Tesisatlarda Isı Yalıtımı. (2023). <https://www.izoder.org.tr/dosyalar/tesisatlardaisiyalitimi.pdf> Erişim 27.03.2023.
- Manville, J. (2023). Industrial Insulation, Comparing The Thermal Performance Of Insulation Coatings Vs. Traditional Insulation, Technical Bulletin, A Berkshire Hathaway Company, IND-TB024 02/28/23 (Replaces 02/12/21)
- NAIMA. Insulation Products for Commercial and Industrial Applications: Thermal Performance of Coatings Used to Insulate Pipes, Ducts, and Equipment. (2023). <https://insulationinstitute.org/wp-content/uploads/2016/01/CI224.pdf> Erişim 27.03.2023.
- Nsofor, E. C. and Vijay, V., 2011. Pipe insulation model for energy conservation in buildings. *Energy Engineering*, 108(3), 37-50.
- Püsgül, T. (2018). Isı Transferi Nedir ? Çeşitleri Nelerdir ? <https://muhendistan.com/isi-transferi-nedir/> Erişim 27.03.2023.
- Sargison, J. E. (2006). Pipeline protection and extension of internal coating life. *Corrosion & Materials*, 31(2), 10-14.
- Simpson, A., Fitton, R., Rattigan, I. G., Marshall, A., Parr, G. & Swan, W. (2019). Thermal performance of thermal paint and surface coatings in buildings in heating dominated climates. *Energy and Buildings*, 197, 196-213. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2019.04.027>
- Temimy, A. A., Abdulrasool, A. A., & Hamad, F. A. (2021). Study of Heat Pipe Thermal Performance with Internal Modified Geometry. *Fluids*, 6(7), 231. <https://doi.org/10.3390/fluids6070231>
- Tesisat İzolasyonu. Tesisat İzolasyonu Neden Önemlidir?. (2020). <https://tesisatizolasyonu.com/boru-izolasyonu-neden-onemlidir#> Erişim 27.03.2023.
- Yakut, A. K., Selbaş R., & Yakut, M. Z. (2022). Mühendislikte Isı Transferi, Isparta Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Yayını, Yayın No:008, ISBN: 975-605-81136-8-8, s401
- Yarbrough, D.W. (2008). Measurement of Heat Loss from Coated and Insulated Steel Pipes, R&D Services Report, December 2008.



Kahramanmaraş Sütçü İmam University

Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 15.05.2023
Kabul Tarihi : 04.01.2024

Received Date : 15.05.2023
Accepted Date : 04.01.2024

PERFORMANCE ANALYSIS OF OPTICAL WIRELESS COMMUNICATION SYSTEM DESIGNED BY USING DIFFERENT FILTERS

FARKLI FİLTRELER KULLANILARAK TASARLANAN OPTİK KABLOSUZ HABERLEŞME SİSTEMİNİN PERFORMANS ANALİZİ

Fethiye Merve KAVAK İMAK^{1*} (ORCID: 0000-0001-6180-8263)
Duygu KAYA² (ORCID: 0000-0002-6453-631X)

^{1,2}Firat University, Faculty of Engineering, Electrical-Electronics Engineering, Elazığ/ Turkey

Corresponding Author: Fethiye Merve KAVAK İMAK, kavakmervef@gmail.com

ABSTRACT

Free space optical communication (FSO) technology, which has been developing in recent years, is advantageous compared to other wireless communication technologies due to its features such as high bandwidth, low latency, and high security. Since the FSO system is sensitive to atmospheric events, it needs various signal processing and filtering techniques to reduce the deterioration in the quality of the signal. The FSO free space channel has several channel types, such as the scattered channel and the optical wireless communication (OWC) channel. In this study, comparisons were made using various filters in an FSO system designed using the optical wireless communication (OWC) transmission channel model, and the system was analyzed based on the results obtained.

Keywords: Optical wireless communication (OWC), free space optical communication (FSO), bit error rate (BER), Q factor, optical filter

ÖZET

Son yıllarda gelişmekte olan serbest uzay optik iletişim (FSO) teknolojisi, yüksek bant genişliği, düşük gecikme süresi ve yüksek güvenlik gibi özelliklerinden ötürü diğer kablosuz iletişim teknolojilerine kıyasla avantajlı durumdadır. FSO sistemi atmosferik olaylara karşı hassasiyet içerdiğinden sinyalin kalitesinde gerçekleşen bozulmaların azaltılması için çeşitli sinyal işleme ve filtreleme tekniklerine ihtiyaç duymaktadır. FSO boş alan kanalının dağınık kanal ve optik kablosuz iletişim (OWC) kanalı gibi çeşitli kanal türleri bulunmaktadır. Bu çalışmada optik kablosuz iletişim (OWC) iletim kanal modeli kullanılarak tasarlanan bir FSO sisteminde çeşitli filtreler kullanılarak karşılaştırmalar yapılmış ve elde edilen sonuçlar üzerinden sistem analiz edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Optik kablosuz iletişim (OWC), serbest uzay optik iletişimi (FSO), bit hata oranı (BER), Q faktörü, optik filtre

INTRODUCTION

Free space optical technology (FSO) is an optical communication system that transmits high-bandwidth data. However, since the data transmission channel is atmosphere, system performance is directly dependent on atmospheric conditions. Therefore, researchers have been working to improve the performance of FSO systems (Bayraktar, 2020). Optical wireless communication (OWC) is a communication technology that uses a line of sight to transmit signals, data, and information between two points. OWC relies solely on optical communication and uses a free space-spreading transmission medium as the transmission line. In this context, Optical wireless communication (OWC) is a technology that includes free field optical communication (FSO). OWC technology is used when physical connection is not possible (Yadav Kumar et al., 2014). The transmission environments determine the difference between an OWC system and an FSO system. OWC system is also a line-of-sight based communication technology like free field optics (FSO), but it is based on optical communication only and uses air as the transmission medium. FSO, on the other hand, can use a transmission line such as an optical fiber cable or optical as the transmission medium. These differences arising from different transmission environments can cause differences in performance and efficiency between OWC and FSO (Goyal et al., 2015).

Many studies have been carried out recently to analyze the performance of OWC systems. In his study on OWC, Shabaneh made a system performance analysis by comparing the systems established with APD and PIN photodetectors (Shabaneh, et al.). The study of Mohsen and his friends with the OWC system was based on the investigation and comparison of various parameters in OWC systems designed with RZ and NRZ coding techniques (Dehaq E. Mohsen, 2023). El-Mokadem and his colleagues examined the effects of various weather conditions on OWC systems and made performance analysis with various designs (El-Mokadem et al., 2023).

When transmitting signals in an OWC system, a PRBS generator is used to convert analog signals to digital format, and an external modulation is used for optical modulation. It is carried out using a CW laser array consisting of four different laser signal wavelengths around the wavelength of 1550 nm and the frequency range of 100 GHz. These laser signals are combined with WDM technology and form a CW laser with the same frequency and frequency range. The digitized signal is modulated with the help of the multiplexed laser signal and transmission is provided by OWC (Tiwari et al., 2015). The low-pass filter used in the system is a type of filter used to suppress high-frequency components and pass low-frequency components. This filter performs signal processing using the frequency transfer function (Uzun, 2019). The block diagram of the OWC system is shown in Figure 1.

Visible Light Communication has an advantage over other communication branches in terms of energy efficiency, high bandwidth and reliability. In this study, an Optical Wireless Communication (OWC) system was designed using 5 different filters in order to analyze the performance of systems in which data transmission is provided by visible light communication. The main contributions of the study are:

- In transmissions carried out with the OWC channel type, whose working principle is based on optical signal transmission in a free air environment, the elements used in the system were examined in order to minimize the negative effects caused by the environment.
- In the OWC systems established in the study, the best transmission was tried to be achieved by using different parameters.
- The results obtained from the designed systems have shown that the transmission quality can be improved with alternative systems established with different parameters and elements.

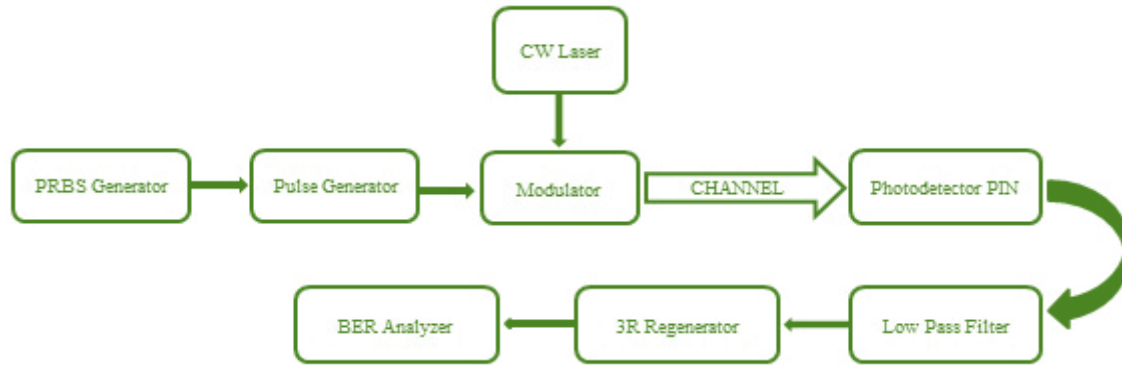


Figure 1. Block Diagram of an OWC System

FILTER USAGE IN OPTICAL WIRELESS COMMUNICATION SYSTEM

In communication systems, two port structures used to provide a certain frequency response are defined as filters (Arslan, 2020). Optical filters are optical elements that allow selective transmission or blocking of beams of particular wavelengths. These filters are used in different types of optical networks and devices, changing the transmission characteristics. There are various types of optical filters, they can be produced using semiconductor technology as well as other optical materials can be used. These filters can be used in wavelength division multiplexing (WDM) systems, optical fiber communication systems, optical sensors, lasers, optical spectroscopy, and optical microchips.

Low pass optical filters are one of the filter technologies used in optical systems. These filters function as selective filtering by blocking signals of higher wavelengths or frequencies while passing signals below a certain wavelength or frequency. For example, a low-pass optical filter can pass light signals below a certain wavelength or frequency, while blocking light signals above it. In this way, the frequency spectrum of the filtered optical signal is lowered and its amplitude is reduced, reducing the sharpness of the signal and smoothing it. Low-pass optical filters can be used in many optical applications such as color correction, camera lenses, cameras, optical sensors, and analyzers. These filters allow the filtering of unwanted signals without changing the characteristics of the optical signal.

OWC SYSTEM DESIGN WITH DIFFERENT FILTER TYPES

The Optisystem simulation program was used to analyze the performance of filter types in the OWC system. The system basically consists of a transmitter, receiver, and OWC channel. The transmitter part is designed so that the receiver can communicate wirelessly. The input signal is fed from a pulse generator. The CW laser used in the system is responsible for transmitting the signal away. The signal to be transmitted is modulated with the Mach Zehnder modulator, which is known to work with high performance in the wireless communication system. The receiver consists of a photodiode that receives the laser signals transmitted from the OWC channel and a filter that reduces the noise in the signal and increases the signal quality. A BER analyzer was used to analyze the designed system. The CW laser power used in the system is selected as 20 dBm and the laser operates at a wavelength of 550 nm. The receiver and transmitter aperture diameter of the OWC channel is 30 cm, and the OWC channel lengths used for analysis in the system are 100, 200, 300, 400, and 500 m, respectively.

In the literature, IIR digital filters are generally used in studies on OWC systems. In the study, low-pass IIR digital filter types such as low-pass Gaussian filter, low pass Bessel filter, low pass Butterworth filter, low pass Chebyshev filter, and low pass Raised Cosine filter are used to filter the signal obtained from the photodiode output.

Figures 2,3,4,5 and 6 show OWC systems with low pass Gaussian filter, low pass Bessel filter, low pass Butterworth filter, low pass Chebyshev filter, and low pass Raised Cosine filter, respectively.

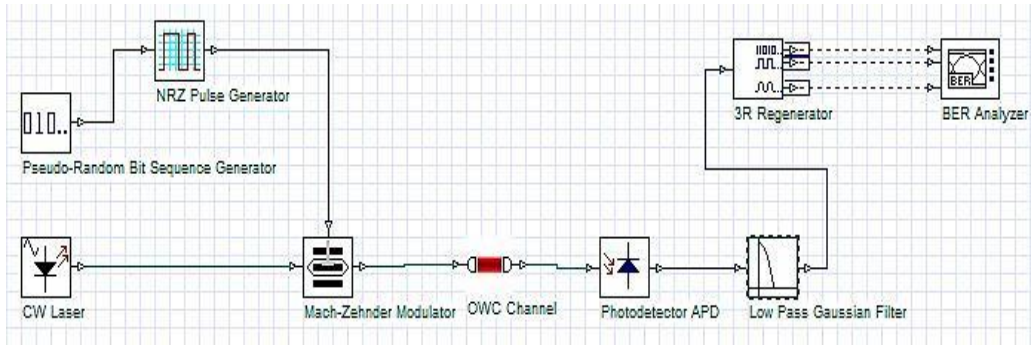


Figure 2. OWC System Designed with Low Pass Gaussian Filter

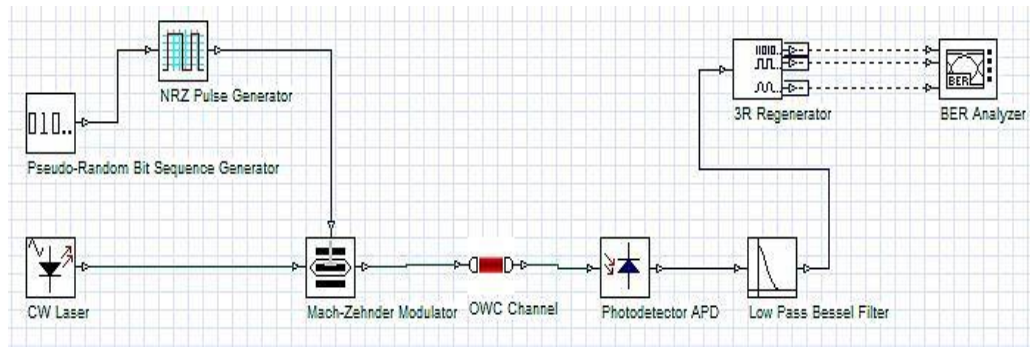


Figure 3. OWC System Designed with Low Pass Bessel Filter

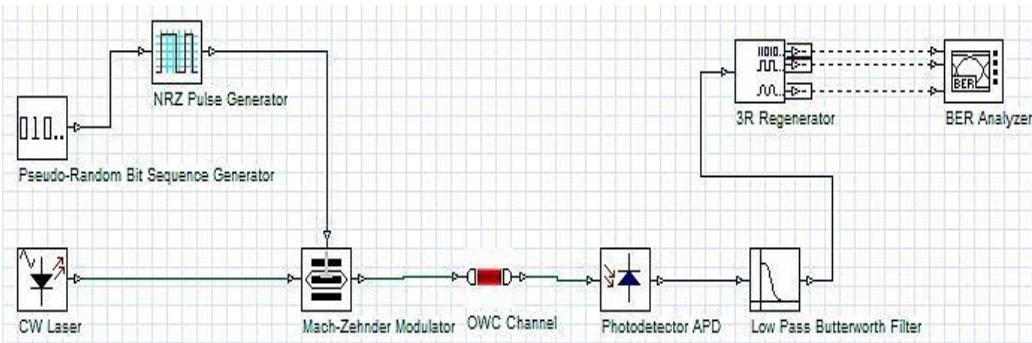


Figure 4. OWC System Designed with Low Pass Butterworth Filter

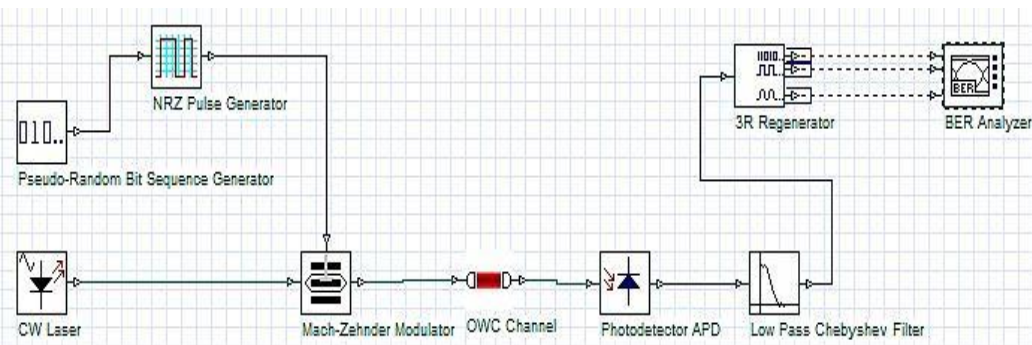


Figure 5. OWC System Designed with Low Pass Chebyshev Filter

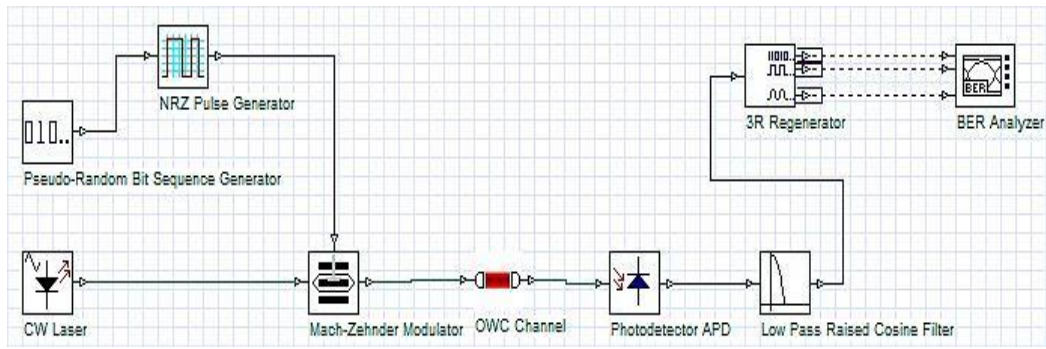


Figure 6. OWC System Designed with Low Pass Raised Cosine Filter

OWC SYSTEM ANALYSIS

BER Analyzer

In this section, the systems simulated using the BER analyzer with the communication system simulation program called Optisystem are examined. With the BER analyzer, eye diagrams were obtained to show the quality of the system. The aperture ratio in the eye diagrams shows the good working performance of the system. BER reveals the percentage of incorrect bits relative to the total number of bits of a received signal (Shivam et al., 2023). The eye diagrams obtained from the BER analyzer of the OWC system designed with low pass Gaussian, Bessel, Butterworth, Chebyshev, and Raised Cosine filters are shown in Figures 7, 8, 9, 10, and 11, respectively.

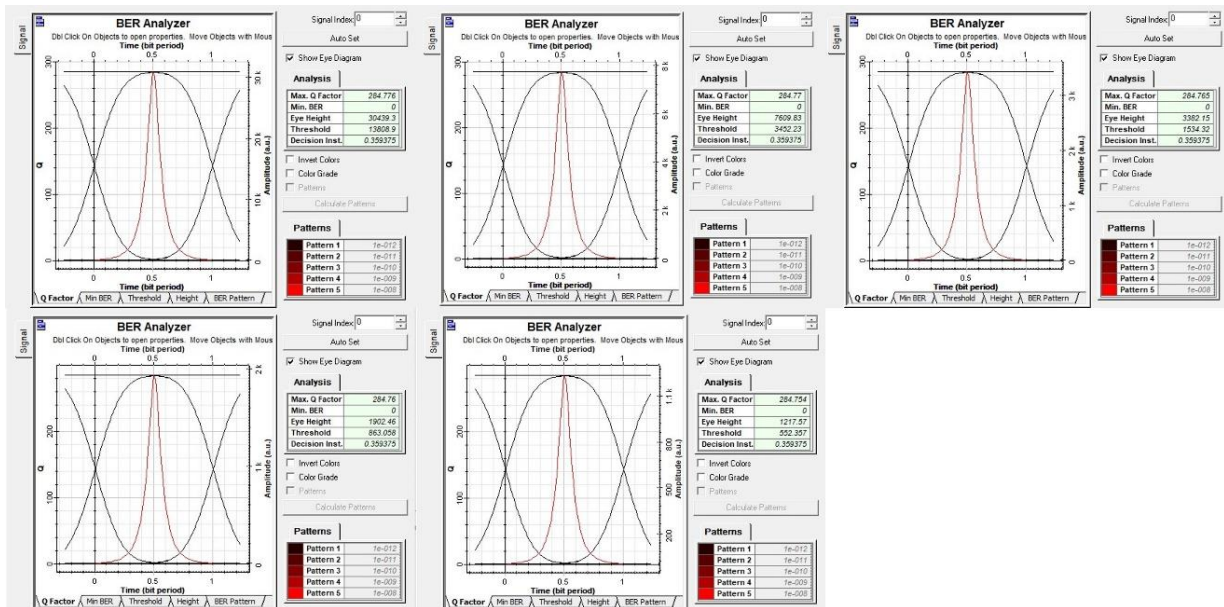


Figure 7: Eye Diagram Outputs of The OWC System Installed with A Low Pass Gaussian Filter for V=100,200,300,400,500 m

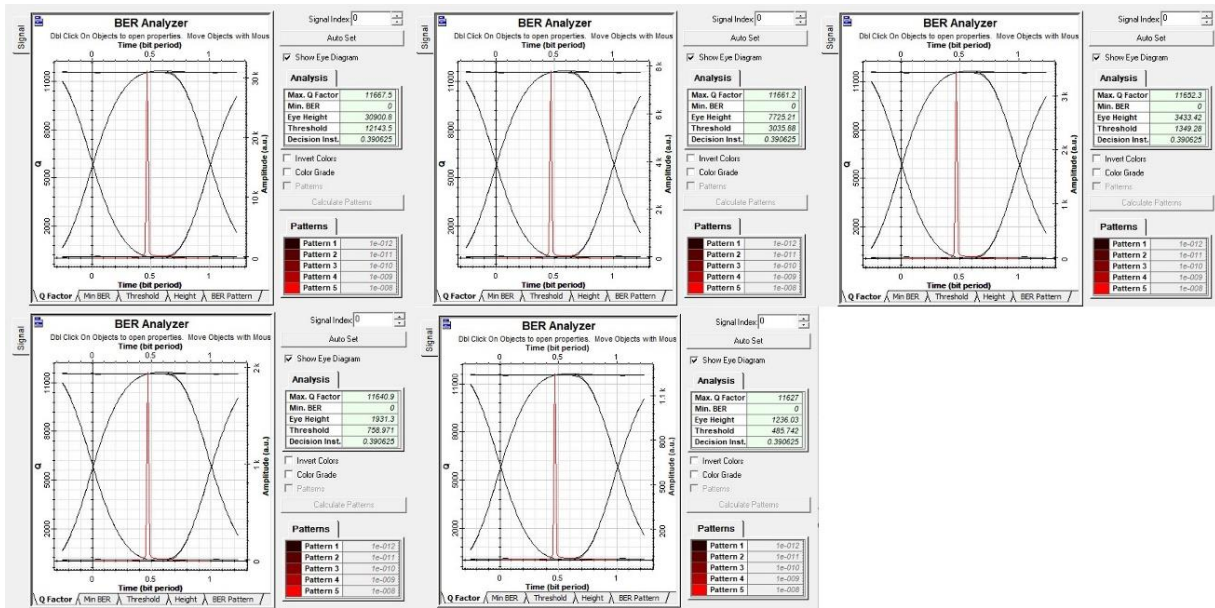


Figure 8: Eye Diagram Outputs of The OWC System Installed with Low Pass Bessel Filter for $V=100,200,300,400,500$ m

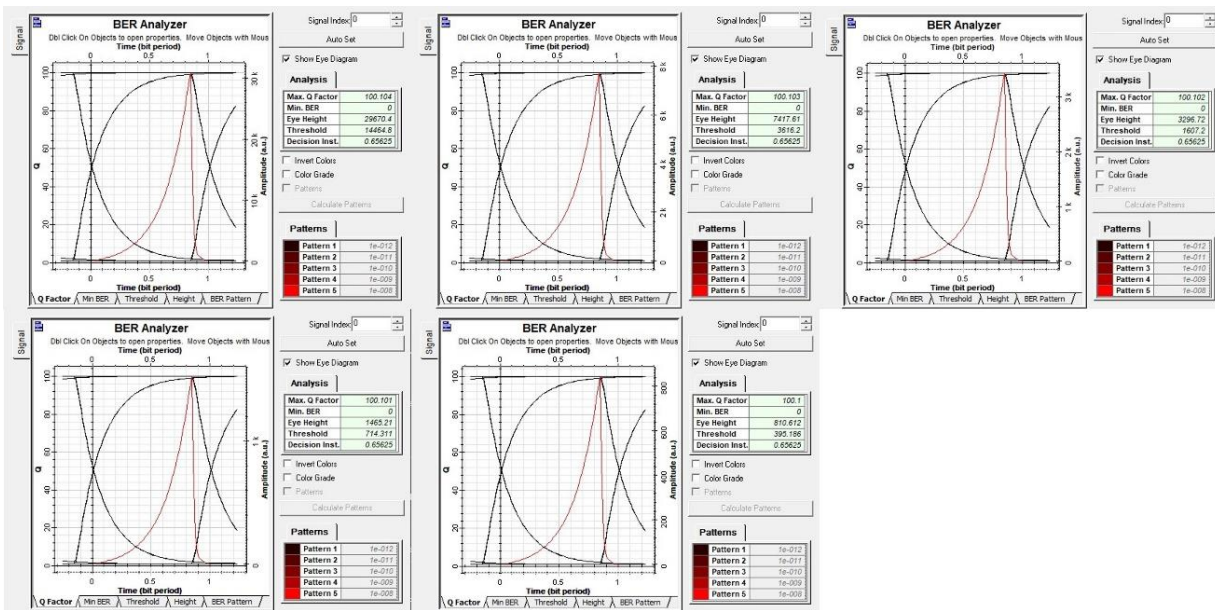


Figure 9: Eye Diagram Outputs of The OWC System Installed with Low Pass Butterworth Filter for $V=100,200,300,400,500$ m

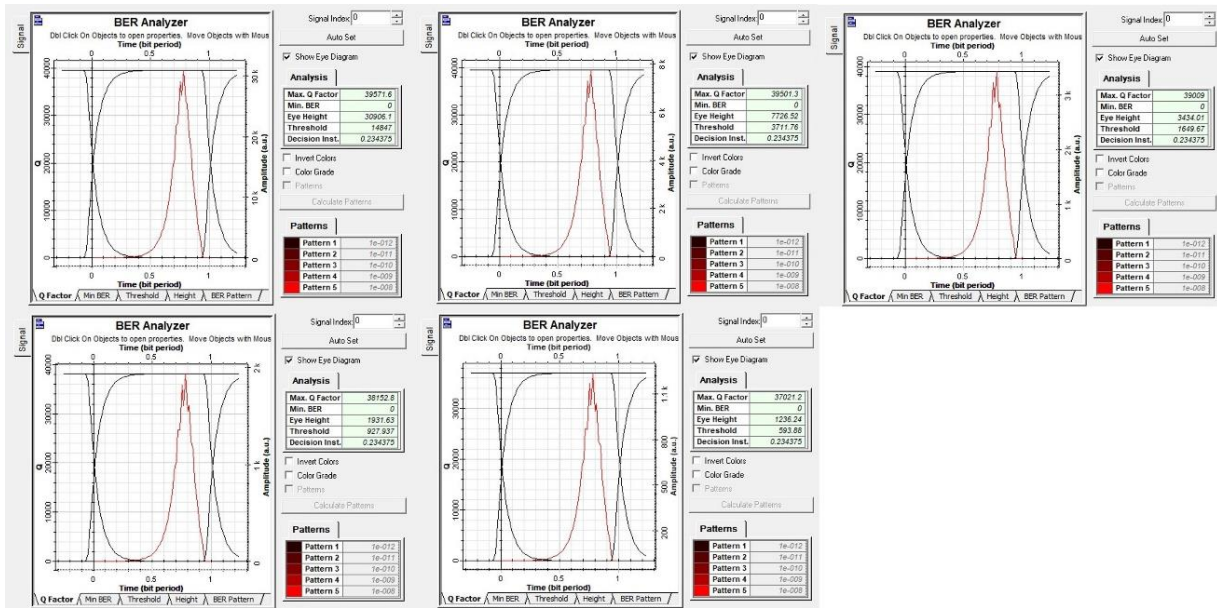


Figure 10: Eye Diagram Outputs of The OWC System Installed with Low Pass Chebyshev Filter for $V=100,200,300,400,500$ m

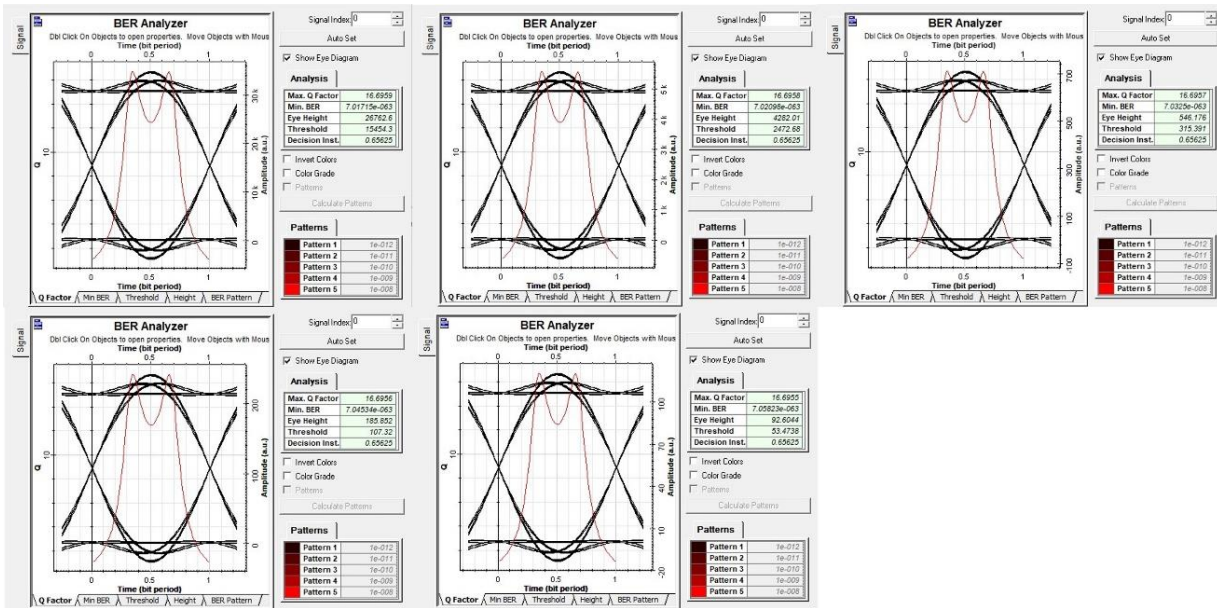


Figure 11: Eye Diagram Outputs of The OWC System Installed with Low Pass Raised Cosine Filter for $V=100,200,300,400,500$ m

Max. Q Factor Analysis

In wireless communication systems, the Max Q factor refers to the point where the signal strength is the most intense. Max Q factor is a parameter used to optimize signal strength in wireless communication systems. Especially when transferring data over long distances or at high speeds, detecting and focusing on the point where the signal is most intense helps to prevent data loss. Therefore, Max Q factor analysis is an important tool to improve the performance of wireless communication systems. Table 1 shows the Max Q factor values that vary depending on the channel length.

Table 1: Max Q Factor Values Based on OWC Channel Length

		Channel length				
		100 m	200 m	300 m	400 m	500 m
Max Q factor	LP Bessel Filter	11667.5	11661.2	11652.3	11640.9	11627
	LP Gaussian Filter	284.776	284.77	284.765	284.76	284.754
	LP Butterworth Filter	100.104	100.103	100.102	100.101	100.100
	LP Chebyshev Filter	39571.6	39501.3	39009	38152.8	37021.2
	LP Raised Cosine Filter	16.6959	16.6958	16.6957	16.6956	16.6955

Eye Height Analysis and Min. BER Analysis

In wireless communication systems, various factors affect the transmitted signal quality. One of them is eye height. The transmitted signal consists of data bits, which are at a certain level during the modulation of the signal. Eye height refers to the distance between the lowest and highest points of these signal levels and is used as an indicator of signal quality. In Table 2, the Eye Height values, which vary depending on the length of the channel, are shown.

Min BER analysis expresses the minimum error rate of a communication system. Bit error rate is a measure of how many errors will be made during data transfer in a transmission system. Min BER refers to the level at which it can achieve the lowest error rate in a given signal quality. This value is important for measuring the performance of a transmission system. In Table 3, Min BER values that vary depending on the channel length are shown.

Table 2: Eye Height Values Based on OWC Channel Length

		Channel length				
		100 m	200 m	300 m	400 m	500 m
Eye Height	LP Bessel Filter	30900.8	7725.21	3433.42	1931.3	1236.03
	LP Gaussian Filter	30439.3	7609.83	3382.15	1902.46	1217.57
	LP Butterworth Filter	29670.4	7417.61	3296.72	1465.21	810.612
	LP Chebyshev Filter	30906.1	7726.52	3434.01	1931.63	1236.24
	LP Raised Cosine Filter	26762.6	4282.01	546.176	185.852	92.6044

Table 3: Min BER Values Based on OWC Channel Length

	Channel length				
	100 m	200 m	300 m	400 m	500 m
LP Bessel Filter	0	0	0	0	0
LP Gaussian Filter	0	0	0	0	0
LP Butterworth Filter	0	0	0	0	0
LP Chebyshev Filter	0	0	0	0	0
LP Raised Cosine Filter	7.01×10^{-63}	7.02×10^{-63}	7.03×10^{-63}	7.04×10^{-63}	7.05×10^{-63}

Choosing the laser power as 20 dBm in the system caused the effects of high attenuation in the free space environment to decrease, and the BER values of the system were close to zero.

Figure 12 shows the performance graph created by taking the Max Q factor values obtained from the system.

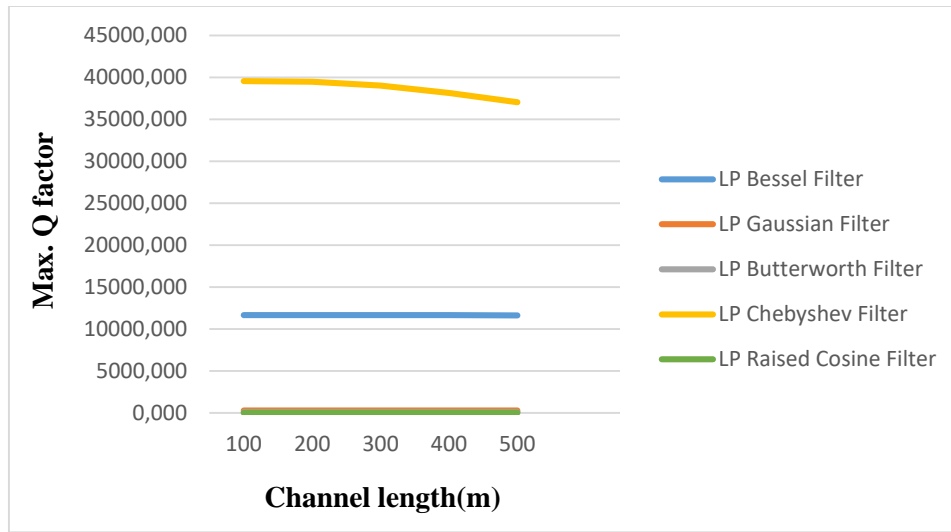


Figure 12: Performance Graph of the OWC System Designed with Low-Pass Gaussian, Bessel, Butterworth, Chebyshev and Raised Cosine Filters Based on the Change of Channel Length

CONCLUSION

In the study, an Optical Wireless Communication (OWC) system was designed using 5 different filters. First of all, the effect of channel length on the transmission system was examined in the study. As a result of the analysis, as the channel length increased in the OWC system, there was a decrease in the quality of the system. This decrease is clearly seen in the eye diagrams obtained from the Optisystem simulation program. As the channel length increases, the mesh size of the system decreases, which means that the transmission quality decreases. Then, by changing the channel length of OWC systems designed for low pass Gaussian filter, low pass Bessel filter, low pass Butterworth filter, low pass Chebyshev filter and low pass Raised Cosine filter, Max. Q factor, Min. BER analysis and eye height results were obtained. The results obtained from the installed OWC systems show that the low pass Bessel filter allows obtaining a better signal than other filter types.

THANKS

This study was supported by the Scientific Research Projects Coordination Unit of Firat University. Project number MF.24.01.

ACKNOWLEDGMENT

This study has been produced from the master thesis of Fethiye Merve KAVAK İMAK.

REFERENCES

- Arslan, E. (2020). *Mikroşerit alçak geçiren filtre tasarımı ve analizi* [Master's thesis]. Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Bayraktar, M. (2020). Serbest Uzay Optik Haberleşme Sistemlerinde Turbo Çarpım Kodların Performans Analizi. *EMO Bilimsel Dergi*, 10(1), 45–48.
- Dehaq E. Mohsen, E. M. A. M. M. A. (2023). Performance Analysis of OWC System based (S-2-S) Connection with Different Modulation Encoding. *International Journal of Intelligent Systems and Applications in Engineering*, 11(4s), 400–408.
- El-Mokadem, E. S., Tawfik, N. I., Aly, M. H., & El-Deeb, W. S. (2023). *Design and performance evaluation of vehicular visible light communication system under different weather conditions and system parameters*. <https://doi.org/10.24425/opelre.2023.145580>
- Goyal, H., Saxena, J., & Dewra, S. (2015). Performance analysis of optical communication system using different channels. *Int J Adv Res Comput Commun Eng*, 4, 19–22.
- Shabaneh, A. A. A. (n.d.). (2022) Performance Analysis And Comparison Of Apd And Pin Photodetectors Using Optical Wireless Communication Channel. *International Journal of Electrical, Electronics and Data Communication*, 2022(10), 2321–2950.
- Shivam, Sharma, C., Singh, S., & Kumar, R. (2023). Performance Analysis of an Indoor Visible Light Communication System Using Optisystem Software. *2023 3rd International Conference on Advances in Electrical, Computing, Communication and Sustainable Technologies, ICAECT 2023*. <https://doi.org/10.1109/ICAECT57570.2023.10117680>
- Tiwari, P., Jaiswal, A. K., Agrawal, N., Professor, A., & Nitin, N. (2015). Analysis of Bidirectional Wireless Optical Channel Integrated with Optical Fiber. *International Journal of Computer Applications*, 121(5), 975–8887.
- Uzun, P. (2019). *Görünür ışık haberleşmesinde modülasyon türlerinin incelenmesi* [Master's thesis]. Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Yadav Kumar, S., Professor, Y. A., & Chouhan, S. (2014). Performance Analysis of Optical Wireless Communication Link By Multiple Tx/Rx with and Without Amplifier. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, 3.



Kahramanmaraş Sütçü İmam University

Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 23.07.2023
Kabul Tarihi : 22.09.2023

Received Date : 23.07.2023
Accepted Date : 22.09.2023

EKSENEL AKIŞLI SIKLONLARDA KANAT SAYISININ AYIRMA VERİMİ VE BASINÇ KAYIPLARINA OLAN ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF NUMBER OF GUIDE VANES ON SEPARATION EFFICIENCY AND PRESSURE DROPS IN THE AXIAL FLOW CYCLONES

Nihan BABAOĞLU^{1*} (ORCID: 0000-0003-3356-9407)
Ayşe Nur GÖKDUMAN¹ (ORCID: 0009-0009-2436-1138)

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

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Nihan BABAOĞLU, nuygur@gmail.com

ÖZET

Bu çalışmada, eksenel akışlı siklonlarda kanat sayısının ayırma verimliliği ve basınç kayıpları üzerindeki etkisi Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği (HAD) kullanılarak incelenmiştir. Eksenel akışlı siklonlar, yüksek partikül ayırma verimliliği ve basınç düşüşü sağlayan teğetsel ve ters akışlı siklon ayırıcılar ile karşılaştırılmıştır. Literatürdeki benzer çalışmalar dikkate alınarak bu çalışmada eksenel akışlı siklonlar ele alınmıştır. Çalışmada 2 ile 10 arasında değişen kılavuz kanat sayıları dört farklı durum için incelenmiştir. Önerilen eksenel akış siklonundaki partikül ayırma verimi ve basınç kayıpları sayısal model kullanılarak hesaplanmıştır. İncelenen dört durum için, eksenel akışlı siklonun HAD sonuçları, sabit kanat açısı ve kanat dönüşünün kanat sayısı ile ters orantılı olduğu durumun diğer üç duruma kıyasla, kanat sayısı arttıkça performansın arttığı görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Eksenel siklon, kanat sayısı, kanat yüksekliği, hesaplamalı akışkanlar dinamiği, kesme çapı, basınç kayıpları.

ABSTRACT

In this study, the effect of the number of guide vanes on separation efficiency and pressure drops in the axial flow cyclones was investigated using the Computational Fluid Dynamics (HAD). Axial flow cyclones were compared with the tangential and reverse flow cyclone separators, which provide high particle collection efficiency and pressure drop. Axial flow cyclones were considered in this study by taking into account the similar studies in the literature. In the study, guide vane numbers ranging from 2 to 10 were examined for four different situations. The particle separation efficiency and pressure drops in the proposed axial flow cyclone were computed by using numerical model. The HAD results of the axial flow cyclone are, for the four cases studied, the situation where the fixed vane angle and vane rotations are inversely proportional to the number of vanes, compared to the other three cases, it was observed that the performance increased as the number of vanes increased.

Keywords: Axial cyclone, number of guide vanes, swirler height, computational fluid dynamics, cut-off diameter, pressure drops.

GİRİŞ

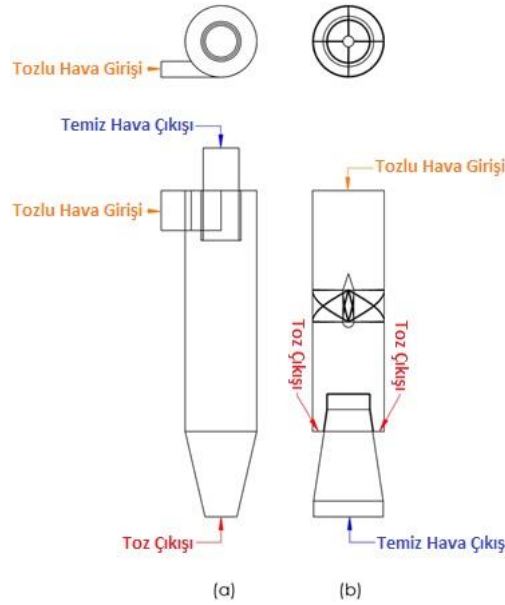
Hızla gelişmekte olan dünyamızda en önemli çevre sorunlarından biri de hava kirliliğidir. Hava kirliliğine neden olan maddeler ise partikül maddeler ve gaz halindeki kirleticilerdir (Babaoğlu vd., 2021). Partikül maddeler 2'ye ayrılır. Bunlar; Çapı 2,5 µm'den 10 µm'ye kadar olan kaba partikül ve çapı 2,5 µm'den daha küçük olan ince partikül maddelerdir. Kısa ve uzun maruziyet sürelerinde insan sağlığına olumsuz etkileri bulunmaktadır (Arkouli vd., 2010; Wilson & Suh, 2012). İnsan sağlığına yaptığı olumsuz etkilerden biri ve en önemlisi solunum sistemine zarar vererek çeşitli hastalıklara neden olmasıdır (Kreyling vd., 2006; Cheng, 2003; Pope vd., 2002; Morawska, vd., 1999; Dockery & Pope, 1996). Görüş mesafesini kısıtlaması ve iç ortam kalitesini düşürmesi gibi etkileri çevreye olan olumsuz etkilerinin en önemlilerinden bazılarıdır (Canha vd., 2014; Brewer & Belzer, 2001). İnsan sağlığı ve çevreye verdiği zarardan ötürü bunların kontrolü gerekmektedir.

Partikül maddelerin kontrolü için çeşitli hava kirliliği kontrol cihazları kullanılmaktadır. Bu cihazların çalışma prensipleri, verimlilikleri partikül ayırmada veya tutmada tercih sebebi olabilmektedir. Bu cihazlar gerek ön arıtma ve gerekse daha ileri arıtma için art arda kullanılabilir. Partikül madde kontrol cihazları; çökeltme odaları, siklonlar, ıslak arıtıcılar, torbalı filtreler ve elektro filtrelerdir. Bu cihazlarda partikül maddelerin tutulmasına etki eden bazı kuvvetler bulunmaktadır. Bunlar; yerçekimi kuvveti, santrifüj kuvveti, atalet, doğrudan çarpma, difüzyon ve elektrostatik kuvvetlerdir. Partikül madde kontrol yöntemleri bu kuvvetlerle tutma işlemi gerçekleştirirler. Bu yöntemlerden çökeltme odaları, yerçekimi kuvveti etkisiyle tutma gerçekleştirir. Bunlarda alan ihtiyacı çok fazladır ve küçük çapta partikül madde tutma verimi düşüktür. Islak arıtıcılarda atalet kuvveti etkisiyle tutma gerçekleşirken, küçük çapta partikül tutma verimi yüksek olmasına rağmen bunların dezavantajı olarak atıksu oluşur ve bu atık suyun uzaklaştırılması gerekmektedir. Aynı zamanda sürekli temiz su gerekebilir ve buharlaşma kayıpları olabilir. Torbalı filtrelerde ise doğrudan çarpma kuvveti ile gerçekleşir. Toplanan tozun giderilmesi için filtre değişimi yani yüksek bakım maliyeti, asitli ortamlarda tozun patlama ya da yangın riski gibi dezavantajları bulunmaktadır. Elektro filtrelerde elektrik alan kuvveti ile gerçekleşir. Çok fazla elektrik enerjisine ihtiyaç duyarlar ve kirleticiler nemli ve yapışkan değilse kullanılabilir. Bu yöntemlerin dezavantajları nedeniyle siklonlar ön plana çıkmaktadır (US EPA, 1999).

Partikül madde kontrol yöntemlerinden olan siklonlar; kolay temin edilebilen malzemeden oluşması, basit ve tek parçadan oluşması, oluşabilecek korozyona karşı kimyasallarla kaplanabilir olması ve düşük işletme maliyeti gibi avantajları bulunmaktadır (Hoffmann vd., 1992; Karakaş, 2020; Oruç, 2020). Bu avantajları nedeniyle birçok alanda tercih edilmektedir. Maden ve mermer ocakları, elektrikli süpürgeler, yem sanayi, inşaat, gıda üretim tesisleri ve toplu taşıma araçları bunlara örnek verilebilir (Karakaş, 2020; Oruç, 2020). Siklonlar genel olarak bir ön arıtma cihazı olarak düşünülebilir. Ancak son yıllarda siklonlarda siklon tipi, siklon geometrisi, akış hızı ve giriş geometrisi üzerinde yapılan bir takım değişiklikler ayırma veriminin artırılıp, basınç kayıplarının azaltılmasını hedeflemektedir (Kuo, Kung-Yu, 2001). Bir siklon ayırıcıda toplama verimi ve basınç kayıpları siklon performansını ifade eden iki parametredir (Babaoğlu vd., 2021; Wasilewski & Brar, 2017). Ayırma veriminin yüksek olmasının yanında basınç kayıplarının düşük olması bu cihazlarda en önemli kriterlerdendir (Babaoğlu vd., 2021). Siklonlar basit yapılarının ve ekonomik olmalarının yanı sıra, sürekli faz (gaz-partikül karışımı) bakımından oldukça kompleks cihazlar olup, halihazırda bu yönde çeşitli çalışmalar yapılmaktadır. Bununla birlikte, siklonlardaki sürekli fazın hareketi oldukça karmaşıktır ve hala tam olarak anlaşılabilmiştir. Siklonik akışlar, daha yoğun parçacıkları daha hafif olanlardan ayırmak için ikili bir girdap oluşturur (Elsayed vd., 2020). Siklona giren gaz-partikül karışımı ve siklon tasarımı bu girdap oluşumlarında etkilidir. Bunlardan bir tanesi akışkanın siklona girdiği anda aşağı inerken oluşturduğu hareket, diğeri ise aşağıda oluşan akışkanın yukarı çıkmasına neden olan harekettir. Özellikle tasarım şekline bağlı olarak ortaya çıkan merkezkaç kuvveti girdap oluşumları üzerinde etkilidir. Gaz-partikül karışımı siklon duvarlarından sürtünerek aşağı doğru inerken, temiz hava borudan yukarı doğru hareket eder ve partiküller partikül toplama haznesinde toplanır (Babaoğlu vd., 2021; Brar & Elsayed, 2017; Demir & Karadeniz 2016).

Çalışma prensiplerine göre siklonlar incelendiğinde içerisinde gaz-partikül karışımının akış şekline göre teğetsel akışlı ve eksenel akışlı siklonlar olmak üzere başlıca iki grupta incelenirler. Öte yandan eksenel akışlı siklonlarında akışkanın yönüne bağlı olarak kendi arasında ters akışlı ve düz akışlı olmak üzere iki grupta incelenir. Teğetsel siklonlar ayırma verimleri daha yüksek oldukları için çokça tercih edilen siklon türleri olarak karşımıza çıkmaktadırlar. Ancak gerek ters akışlı olsun gerekse normal eksenel siklon olsun bu yapıların kullanım kolaylığı nedeniyle bu türlerinde kullanımına ve optimizasyon çalışmalarına literatürde çokça rastlanmaktadır. Eksenel siklonlar akış yönü, geometrisi ve içinde bulundurduğu vorteks oluşturucu nedeniyle teğetsel siklondan farklılıkları bulunmaktadır (Babaoğlu vd., 2022; Hsiao vd., 2011).

Ters akışlı ve aksel olmak üzere, bu iki tür aksel siklon içinde yapılan karşılaştırmalarda, aksel siklonların daha düşük bir basınç düşüşüne maruz kaldığı ve daha küçük bir boyutta oldukları görülmüştür. Aksel siklonlar diğer siklonlara oranla daha az basınç düşüşü, daha düşük türbülans seviyesi ve enerji kayıplarını azaltan mekanizmaya sahip olduğundan daha fazla tercih edilmektedir (Babaoğlu vd., 2021; Babaoğlu vd., 2022; Parvaz vd., 2020). Bu nedenle aksel siklonlar üzerine artan bir ilgi vardır ve özellikle gaz-sıvı ayırma alanında gelecekte oldukça fazla kullanılır hale geleceklerdir. Kılavuz kanatlar, bir aksel siklonda temel bileşenlerdir. Bu kanatların yapısal parametreleri, aksel siklonun ayırma performansı üzerinde önemli bir etkiye sahiptir. Bu nedenle, aksel siklon kullanarak yüksek ayırma performansı elde etmek için kılavuz kanadı incelemek çok önemlidir (Deng vd., 2020).

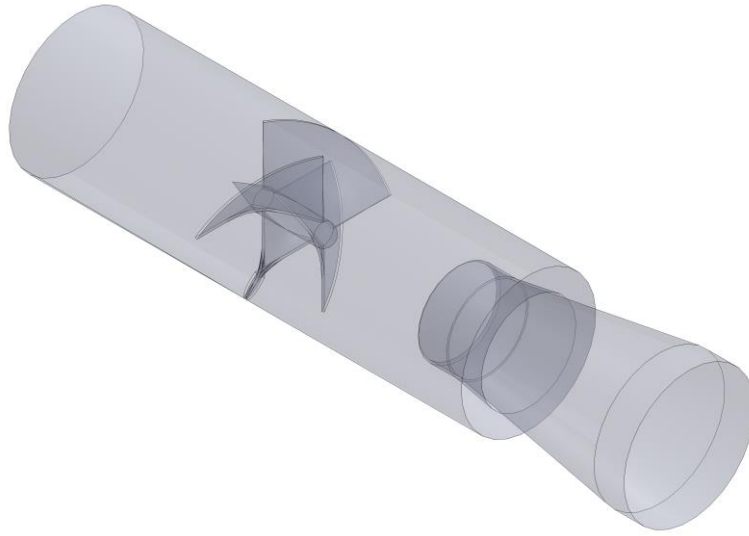


Şekil 1: Giriş Şekillerine Göre Çalışma Prensibi (N. U. Babaoğlu vd., 2022).

Siklonların kullanılacağı alana göre tasarım kriterleri değişkenlik gösterebilir. Bu bağlamda aksel siklonlardaki kanat yapıları da farklı konfigürasyonlarda olabilirler. Daha öncede belirtildiği gibi siklonlarda basınç kaybı ve partikül ayırma verimi parametrelerini yapılacak olan konfigürasyonlar şekillendirmektedir (Babaoğlu vd., 2021; Demir vd., 2016). Son yıllarda bu iki kriterin sonucunun incelenebilmesi için matematiksel bir model olarak HAD analizi kullanılmaktadır (Babaoğlu vd., 2021; Babaoğlu vd., 2021; Parvaz vd., 2020; Brar & Elsayed, 2017; Zhao vd., 2006) Bu çalışmada da HAD metodu kullanılarak aksel siklondaki kanat sayısının, partikül ayırma verimi ve basınç kaybına etkisi incelenmiştir.

MATERYAL METOD

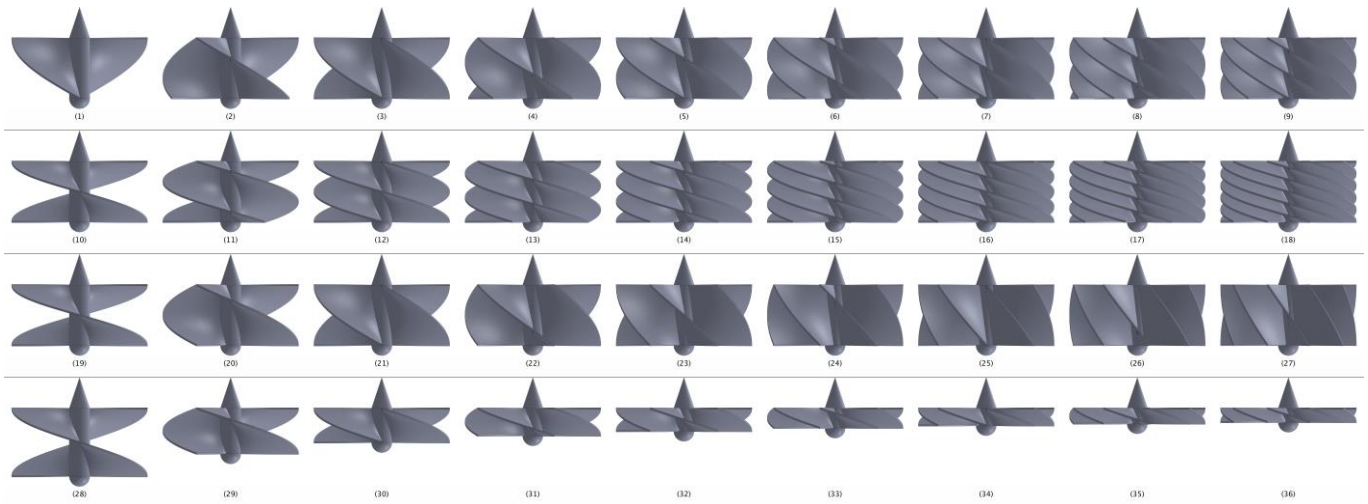
Bu çalışma kapsamında aksel siklonlarda kanat sayındaki değişimin siklon performansına olan etkisi araştırılmıştır. Çalışmada kullanılan siklon geometrisi Şekil 2'de görülmektedir. Aksel siklonlarda bulunun kanat yapısı, aksel yöndeki akışa teğetsel yönde hız kazandırmakta böylece partiküller üzerinde santrifüj etkisi oluşturarak partiküllerin siklon duvarına doğru sürüklenmesini sağlamaktadır. Bu etkinin sonucunda gaz-partikül karışımında, partiküllerin akışkan gazdan ayrılması sağlanmaktadır. Bu özelliği sebebiyle kanat geometrisi bir aksel siklonun en önemli kısmıdır denilebilir. Ancak aksel siklon içerisinde yer alan kanadın akışa karşı direnç göstermesi sebebiyle basınç kaybına neden olması mutlaklıdır. Bu çalışmada kanat sayısı ile kesme çapı ve basınç kayıpları arasındaki ilişki incelenmiştir. Dört farklı durumda inceleme yapılarak detaylı bir çalışma yapılmıştır. İlk olarak 0,25 tur yapan kanatlara sahip kanatlarla oluşturulan geometri 2'den 10'a kadar değişen kanat sayıları ile incelenmiştir. İkinci durumda 0,5 tur yapan kanatlar kullanılarak çalışma genişletilmiştir. Üçüncü durumda kanatların tur sayıları toplamı 1'e eşit olacak şekilde çalışılmıştır. Dördüncü durumda ise üçüncü durumda olduğu gibi çalışılmıştır ancak bu durumda kanat açıları sabitlemiştir.



Şekil 2. Eksenel Siklon Geometrisi (N. Babaoğlu vd., 2021).

Yukarıda anlatılan dört duruma göre oluşturulan kanat geometrileri Şekil 3’de yukarıdan aşağıya doğru sırasıyla verilmiştir. Dört durum, 2’den 10’a kadar değişen kanat sayılarıyla incelenmiş, böylece 36 farklı siklon geometrisi üzerinde çalışılmıştır. HAD çalışmaları sonucunda elde edilen sonuçlar ki grafiklerden yararlanılmıştır. Şekil 4’te verilen grafiklerde sırasıyla 1’den 9’a, 10’dan 18’e, 19’dan 27’ye ve 28’den 36’ya kadar numaralandırılmış geometriler için (a-b), (c-d), (e-f) ve (g-h) kesme çapı ve basınç kayıplarının değişimleri sırasıyla verilmiştir. Burada kesme çapı küçüldükçe siklondaki toplama veriminin artması sözkonusu olmaktadır. Siklon ayırıcılar her ne kadar tutabildikleri partikülün çapı nisbetinde, ki bu tutma aralığı genel olarak 5 ila 10 mikrondan büyük olmak üzere, bir ön arıtma cihazı olarak görülselerde, yapılan modifikasyonlar ile bu kesme çapının azaltılıp toplama veriminin artması arzu edilen bir durumdur (Kuo & Kung-Yu, 2001). Bu bağlamda grafiklerden görüleceği üzere, kesme çapı birinci durum ve dördüncü durumlar için azalan yönde bir trend göstermiştir. Ancak bir siklonda sadece kesme çapları na bağlı olarak performanstan bahsedilemez. Bu anlamda basınç kayıplarının da kapsamlı olarak ele alınması gerekir. Basınç kayıpları bahsi geçen dört durum için incelendiğinde, birinci durumda basınç kayıpları artan bir eğilim gösterirken; iki, üç ve dördüncü durumlarda azalan eğilimler olduğu görülmektedir. Özellikle dördüncü durumun diğer üç duruma göre nispeten daha anlamlı değerlerden meydana geldiği söylenebilir.

Tablo 1’de sunulmuştur.



Şekil 3. Çalışmada Kullanılan Eksenel Siklon Kanatları.

Tablo 1’de sunulan verilerin daha anlaşılır hale gelmesi için Şekil 4’deki grafiklerden yararlanılmıştır. Şekil 4’te verilen grafiklerde sırasıyla 1’den 9’a, 10’dan 18’e, 19’dan 27’ye ve 28’den 36’ya kadar numaralandırılmış geometriler için (a-b), (c-d), (e-f) ve (g-h) kesme çapı ve basınç kayıplarının değişimleri sırasıyla verilmiştir. Burada kesme çapı küçüldükçe siklondaki toplama veriminin artması sözkonusu olmaktadır. Siklon ayırıcılar her ne kadar tutabildikleri partikülün çapı nisbetinde, ki bu tutma aralığı genel olarak 5 ila 10 mikrondan büyük olmak üzere, bir ön arıtma cihazı olarak görülselerde, yapılan modifikasyonlar ile bu kesme çapının azaltılıp toplama veriminin artması arzu edilen bir durumdur (Kuo & Kung-Yu, 2001). Bu bağlamda grafiklerden görüleceği üzere, kesme çapı birinci durum ve dördüncü durumlar için azalan yönde bir trend göstermiştir. Ancak bir siklonda sadece kesme çapları na bağlı olarak performanstan bahsedilemez. Bu anlamda basınç kayıplarının da kapsamlı olarak ele alınması gerekir. Basınç kayıpları bahsi geçen dört durum için incelendiğinde, birinci durumda basınç kayıpları artan bir eğilim gösterirken; iki, üç ve dördüncü durumlarda azalan eğilimler olduğu görülmektedir. Özellikle dördüncü durumun diğer üç duruma göre nispeten daha anlamlı değerlerden meydana geldiği söylenebilir.



Kahramanmaraş Sütçü İmam University

Journal of Engineering Sciences

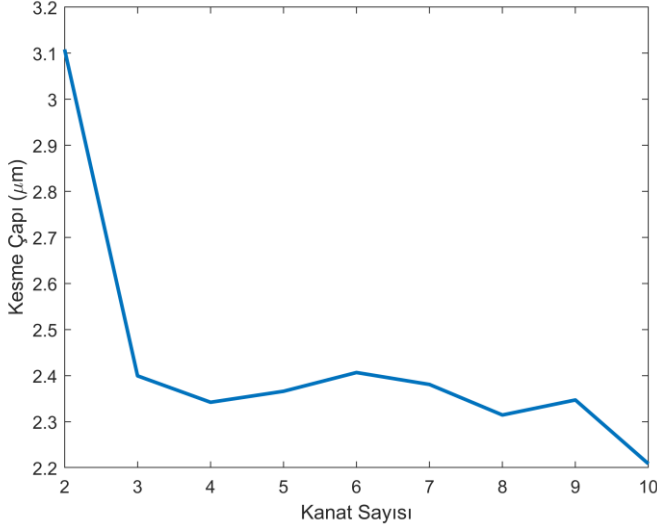


Geliş Tarihi :
Kabul Tarihi :

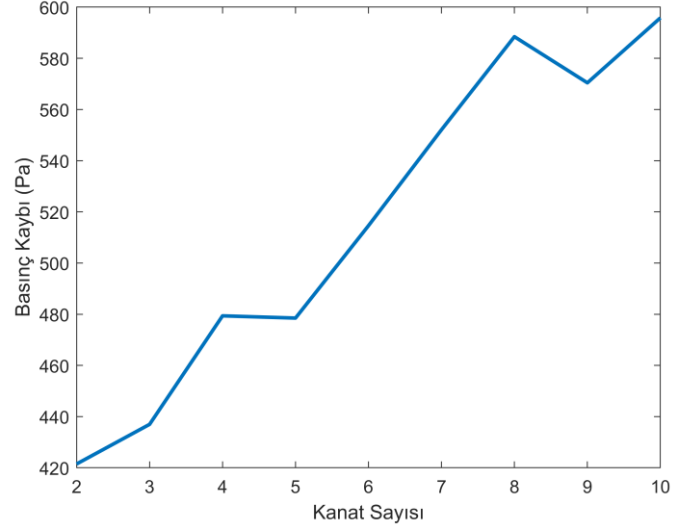
Received Date :
Accepted Date :

Tablo 1. Çalışmada Kullanılan Geometrik Veriler ve HAD Sonuçları.

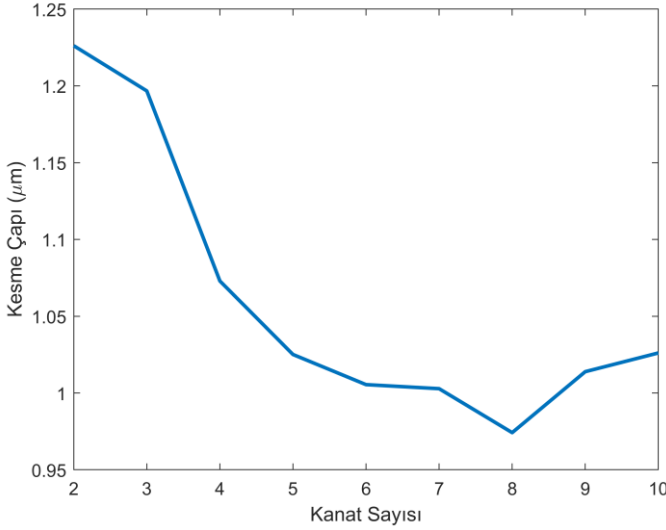
No.	Kanat Sayısı	Kanat Tur Sayısı	Kanat Yüksekliği	Kesme Çapı (μm)	Basınç Kaybı (Pa)
1	2	0,250	0,444	3,108	421,477
2	3	0,250	0,444	2,399	436,958
3	4	0,250	0,444	2,342	479,364
4	5	0,250	0,444	2,366	478,490
5	6	0,250	0,444	2,407	514,587
6	7	0,250	0,444	2,381	552,059
7	8	0,250	0,444	2,315	588,442
8	9	0,250	0,444	2,347	570,421
9	10	0,250	0,444	2,209	595,792
10	2	0,500	0,444	1,226	1269,516
11	3	0,500	0,444	1,197	1395,400
12	4	0,500	0,444	1,073	1520,249
13	5	0,500	0,444	1,025	1502,673
14	6	0,500	0,444	1,005	1411,385
15	7	0,500	0,444	1,003	1324,992
16	8	0,500	0,444	0,974	1249,909
17	9	0,500	0,444	1,014	1240,817
18	10	0,500	0,444	1,026	1336,995
19	2	0,500	0,444	1,224	1275,690
20	3	0,333	0,444	1,879	752,998
21	4	0,250	0,444	2,344	485,827
22	5	0,200	0,444	3,415	420,570
23	6	0,167	0,444	3,240	418,282
24	7	0,143	0,444	7,189	407,181
25	8	0,125	0,444	7,817	438,772
26	9	0,111	0,444	9,054	509,861
27	10	0,100	0,444	9,131	568,362
28	2	0,500	0,500	1,838	1235,477
29	3	0,333	0,333	1,483	1231,722
30	4	0,250	0,250	1,359	1217,415
31	5	0,200	0,200	1,306	1231,479
32	6	0,167	0,167	1,380	1186,956
33	7	0,143	0,143	1,340	1165,758
34	8	0,125	0,125	1,415	1142,218
35	9	0,111	0,111	1,324	1087,675
36	10	0,100	0,100	1,261	1083,802



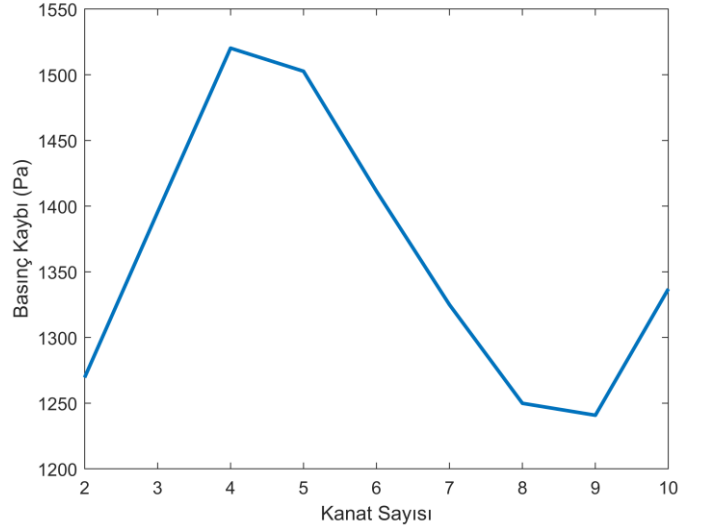
(a) No. 1-9 için Kesme Çapları



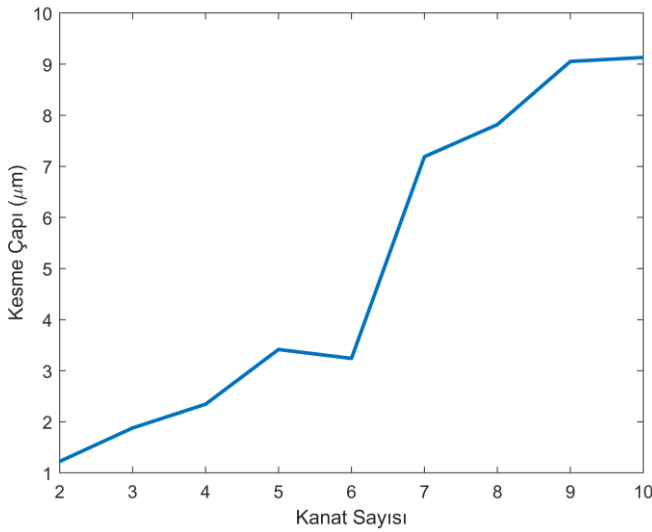
(b) No. 1-9 için Basınç Kayıpları



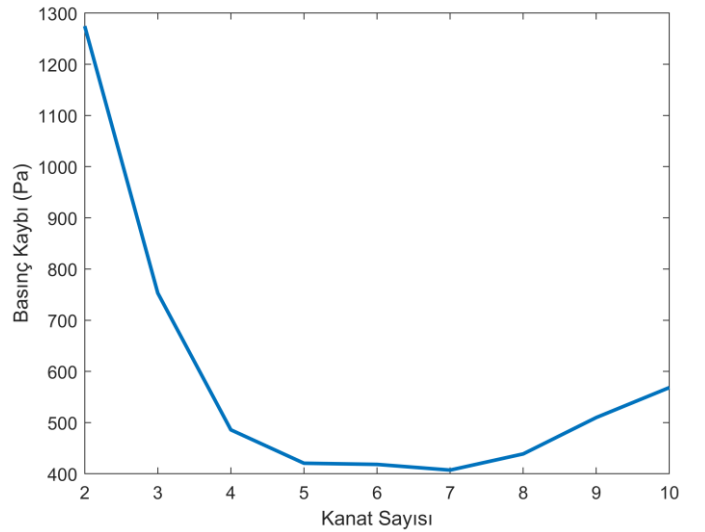
(c) No. 10-18 için Kesme Çapları



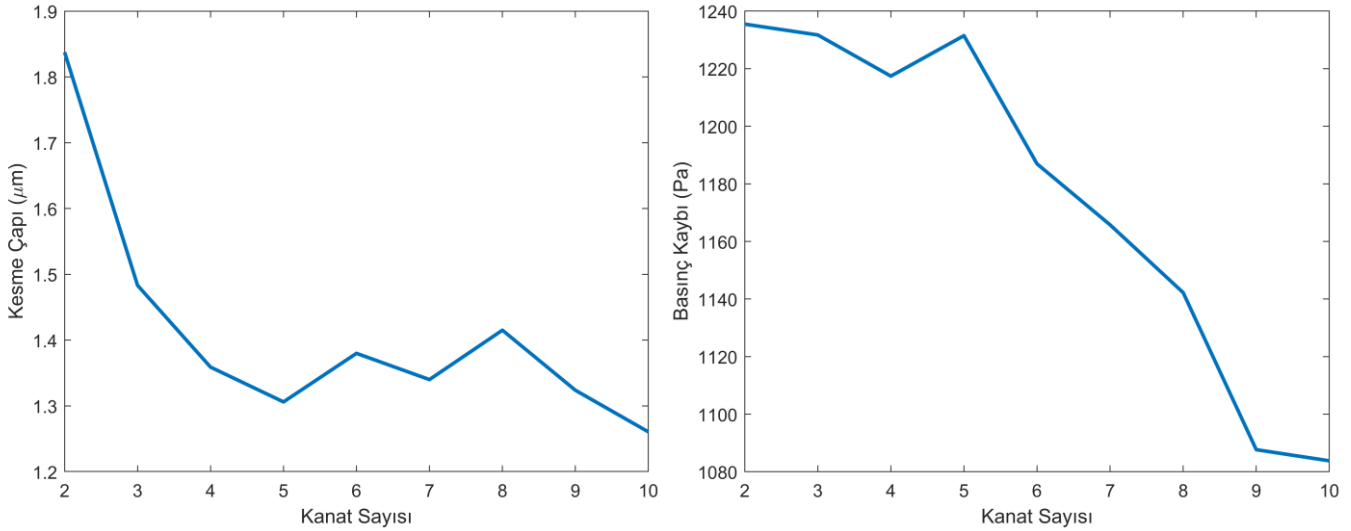
(d) No. 10-18 için Basınç Kayıpları



(e) No. 19-27 için Kesme Çapları



(f) No. 19-27 için Basınç Kayıpları



(g) No. 28-36 için Kesme Çapları (h) No. 28-36 için Basınç Kayıpları
Şekil 4. Kanat Sayıları İle Kesme Çapı ve Basınç Kayıpları Arasındaki Değişimlerin Grafikleri

SONUÇLAR

Eksenel siklonlarda kanat sayısının performansa etkisinin araştırıldığı bu çalışmada toplama verimi ve basınç kayıpları detaylı bir şekilde ele alınmıştır. Eksenel siklonlarda bulunan kanatların yapısal özelliklerine bağlı olarak, siklon içerisinde santrifüj kuvvetlerin oluşumu ve sonuç olarak partiküllerin gaz-partikül akışından ayrılarak tutulma mekanizmaları incelenmiştir. Bir eksenel siklonda partikül tutulmasında en etkili faktörlerden biri olarak kanat yapıları gösterilebilir. Kanatlar ayrıca basınç kayıplarına sebep olan yine en önemli bileşenlerdir denilebilir. Çünkü eksenel siklon içerisinde yer alan kanadın akışa karşı direnç göstermesi sebebiyle basınç kayıpları oluşmaktadır. Bu çalışmada kanat sayısı ile toplama verimi ya da kesme çapı ve basınç kayıpları arasındaki ilişki incelenmiştir. Yapılan çalışmada dört farklı durumda inceleme yapılarak detaylı bir sonuç ortaya koyulmaya çalışılmıştır. Bahsi geçen dört farklı durum kanat sayısı, kanat tur sayısı ve kanat yüksekliği baz alınarak meydana getirilmiştir. İlk durumda girdap oluşturucu 0,25 tur yapan kanatlar ve 2'den 10'a kadar değişen kanat sayıları ile; ikinci durumda 0,5 tur yapan kanatlar ve 2'den 10'a kadar değişen kanat sayıları ile; üçüncü durumda tur sayıları toplamı 1'e eşit olacak şekilde ayarlanması ile ve dördüncü durumda üçüncü durumdan farklı olarak kanat yüksekliği tur sayısı ile orantılı şekilde değiştirilerek kanat açısı sabit tutulmuştur. Çalışma sonucunda elde edilen ana bulgular aşağıda listelenmiştir;

- Sabit tur sayısı ve kanat yüksekliğine sahip kanatlar için kanat sayısının artışı ayırma verimini artırırken; basınç kayıplarını da arttırmıştır.
- Aynı kanat sayısına sahip girdap oluşturucular için tur sayısının artması ayırma verimi ve basınç kayıplarını arttırmaktadır.
- Sabit kanat yüksekliği ve kanat sayısı ile orantılı şekilde azalan tur sayısına sahip kanatlar için kanat sayısının artışı ayırma verimini ve basınç kayıplarını azaltmaktadır.
- Kanat eğiminin korunduğu ve kanat sayısı ile orantılı şekilde azalan tur sayısına sahip kanatlar için kanat sayısının artışı ayırma verimini artırırken basınç kayıplarını da azaltır. Bu durum performansın iki ölçüsünün de artması anlamını taşır.
- İncelenen durumlar için kanat eğiminin korunduğu ve kanat sayısı artarken kanat tur sayısının orantılı şekilde azaldığı durumun diğer durumlara göre daha performanslı olduğu söylenebilir.

KAYNAKLAR

Arkouli, M., Ulke, A. G., Endlicher, W., Baumbach, G., Schultz, E., Vogt, U., ... Scheffknecht, G. (2010). Distribution and temporal behavior of particulate matter over the urban area of Buenos Aires. *Atmospheric Pollution Research*, 1(1), 1–8. <https://doi.org/10.5094/APR.2010.001>

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

Babaoğlu, N. U., Hosseini, S. H., Ahmadi, G., & Elsayed, K. (2022). The effect of axial cyclone inlet velocity and geometrical dimensions on the flow pattern, performance, and acoustic noise. *Powder Technology*, 407(July).

<https://doi.org/10.1016/j.powtec.2022.117692>

Babaoğlu, N. U., Parvaz, F., Hosseini, S. H., Elsayed, K., & Ahmadi, G. (2021). Influence of the inlet cross-sectional shape on the performance of a multi-inlet gas cyclone. *Powder Technology*, 384, 82–99. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2021.02.008>

Brar, L. S., & Elsayed, K. (2017). Analysis and optimization of multi-inlet gas cyclones using large eddy simulation and artificial neural network. *Powder Technology*, 311, 465–483. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2017.02.004>

Brewer, R., & Belzer, W. (2001). Assessment of metal concentrations in atmospheric particles from Burnaby Lake, British Columbia, Canada. *Atmospheric Environment*, 35(30), 5223–5233. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(01\)00343-0](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(01)00343-0)

Canha, N., Almeida, S. M., Freitas, M. D. C., Trancoso, M., Sousa, A., Mouro, F., & Wolterbeek, H. T. (2014). Particulate matter analysis in indoor environments of urban and rural primary schools using passive sampling methodology. *Atmospheric Environment*, 83, 21–34. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.10.061>

Cheng, Y. S. (2003). Aerosol deposition in the extrathoracic region. *Aerosol Science and Technology*, 37(8), 659–671. <https://doi.org/10.1080/02786820300906>

Demir, S., Karadeniz, A., Teknolojisi, M. A.-P., & 2016, U. (2016). Silindirik ve konik yüksekliklerin siklonlardaki basınç ve hız alanlarına etkileri. *Elsevier*.

Deng, Y., Yu, B., & Sun, D. (2020). Multi-objective optimization of guide vanes for axial flow cyclone using CFD, SVM, and NSGA II algorithm. *Powder Technology*, 373, 637–646. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.06.078>

Dockery, D., & Papa, B. (1996). *Akut sağlık etkilerinin epidemiyolojisi : zaman serisi çalışmalarının özeti*.

Elsayed, K., Parvaz, F., Hosseini, S. H., & Ahmadi, G. (2020). Influence of the dipleg and dustbin dimensions on performance of gas cyclones: An optimization study. *Separation and Purification Technology*, 239(September 2019). <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.116553>

Hoffmann, A. C. A., Santen, A. Van, Allen, R. W. K., Technology, R. C.-P., 1992, undefined, van Santen, A., ... Clift, R. (1992). Effects of geometry and solid loading on the performance of gas cyclones. *Powder Technology*, 70(1), 83–91. [https://doi.org/10.1016/0032-5910\(92\)85058-4](https://doi.org/10.1016/0032-5910(92)85058-4)

Hsiao, T. C., Chen, D., Greenberg, P. S., & Street, K. W. (2011). Effect of geometric configuration on the collection efficiency of axial flow cyclones. *Journal of Aerosol Science*, Vol. 42, pp. 78–86. <https://doi.org/10.1016/j.jaerosci.2010.11.004>

Karakaş, C. (2020). *YÜKSEK VERİMLİ FARKLI GEOMETRİDEKİ MİNİ SİKLONLARIN PERFORMANSININ DENEYSEL OLARAK İNCELENMESİ*. Bursa Uludağ Üniversitesi.

Kreyling, W. G., Semmler-Behnke, M., & Möller, W. (2006). Health implications of nanoparticles. *Journal of Nanoparticle Research*, 8(5), 543–562. <https://doi.org/10.1007/S11051-005-9068-Z/METRICS>

Kuo, Kung-Yu, T. C.-J. (2001). Kuo AAQR2001. *Aerosol and Air Quality Research*, 1, 47–56.

Morawska, L., Thomas, S., Gilbert, D., & Greenaway, C. (1999). Yoğun bir yola göre mikrometre altı parçacıkların yatay ve dikey profilinin incelenmesi. *Atmosferik*.

Oruç, E. (2020). *EKSENEL SİKLON AYIRICILARIN PERFORMANS PARAMETRELERİNİN SAYISAL OLARAK İNCELENMESİ Emre ORUÇ*. Bursa Uludağ Üniversitesi.

Parvaz, F., Hosseini, S. H., Elsayed, K., & Ahmadi, G. (2020). Influence of the dipleg shape on the performance of gas cyclones. *Separation and Purification Technology*, 233(May 2019), 116000. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2019.116000>

Pope, C. A., Burnett, R. T., Thun, M. J., Calle, E. E., Krewski, D., Ito, K., & Thurston, G. D. (2002). Lung Cancer, Cardiopulmonary Mortality, and Long-term Exposure to Fine Particulate Air Pollution. *JAMA*, 287(9), 1132–1141. <https://doi.org/10.1001/JAMA.287.9.1132>

US EPA. (1999). *APTI 413: Control of Particulate Matter Emissions, fifth ed.*

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

Wilson, W. E., & Suh, H. H. (2012). Fine Particles and Coarse Particles: Concentration Relationships Relevant to Epidemiologic Studies. *Http://Dx.Doi.Org/10.1080/10473289.1997.10464074*, 47(12), 1238–1249. <https://doi.org/10.1080/10473289.1997.10464074>

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



Kahramanmaraş Sütçü İmam University Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 01.08.2023
Kabul Tarihi : 23.10.2023

Received Date : 01.08.2023
Accepted Date : 23.10.2023

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF BODY WEIGHT AND VEHICLE SPEED ON THE MEASUREMENT OF VIBRATIONS USED IN HIGHWAY PAVEMENT EVALUATION

KARAYOLU ÜSTYAPI DEĞERLENDİRMESİNDE KULLANILAN TİTREŞİMLERİN ÖLÇÜMÜNDE VÜCUT AĞIRLIĞI VE TAŞIT HIZI ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Ufuk KIRBAŞ^{1*} (ORCID: 0000-0002-2389-425X)
Mustafa KARAŞAHİN² (ORCID: 0000-0002-3811-2230)

¹ Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Samsun, Türkiye

² İstanbul Gelişim Üniversitesi, Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

*Corresponding Author: Ufuk KIRBAŞ, ufuk.kirbas@omu.edu.tr

ABSTRACT

The study delved into investigating the impact of body weight on the determination of vibration parameters, as outlined in the ISO 2631 standard, which elucidates the evaluation concept of Whole Body Vibration. First of all, the ride speed component, which significantly affects the amplitude of the vibration experienced in the vehicle, was determined. In this context, vibration data were recorded at three different points in the vehicle at 20, 30, 40, and 50 km/h ride speeds on a road section whose roughness can be considered homogeneous. Measurements were repeated with drivers weighing 58, 80, and 113 kg to determine the effect of driver weight on vibration parameters. The vibration parameters produced due to the analyses were evaluated with both parametric and non-parametric statistical methods. In the urban road network with bituminous hot mixture pavement, it has been determined that the most appropriate ride speed for passenger car-type vehicles to evaluate the service level of the pavement is 40 km/h. In the last stage, the differences between the averages of the measurements made with three different weight drivers at the determined ride speed were evaluated statistically. Through analysis of three distinct data recording points within the vehicle, it has been established that the driver's weight exerts no discernible influence on any of the vibration parameters.

Keywords: Whole-body vibration, ride speed, body weight

ÖZET

Bu çalışmada Tüm Vücut Titreşiminin değerlendirilmesi kavramını açıklayan ISO 2631 standardında tanımlanan titreşim parametrelerinin belirlenmesinde vücut ağırlığının etkisi araştırılmıştır. Öncelikle taşıt içerisinde maruz kalınan titreşimin genliğini önemli derecede etkileyen sürüş hızı bileşeni belirlenmiştir. Bu kapsamda düzgünsüzlüğünün homojen olduğu kabul edilebilen bir yol kesiminde 20, 30, 40 ve 50 km/sa sürüş hızlarında taşıt içerisinde üç farklı noktada titreşim verileri kaydedilmiştir. Sürücü ağırlığının titreşim parametreleri üzerindeki etkisini tespit edebilmek için ölçümler 58, 80 ve 113 kg ağırlığındaki sürücüler ile tekrarlanmıştır. Analizler sonucu üretilen titreşim parametreleri parametrik ve parametrik olmayan istatistik analiz yöntemleri ile değerlendirilmiştir. Bitümlü sıcak karışım kaplamalı kentsel yol ağında, binek araç türü taşıtlarda üstyapının hizmet seviyesinin değerlendirmesini yapabilmek için en uygun sürüş hızınının 40 km/sa olduğu tespit edilmiştir. Son aşamada, belirlenen sürüş hızında üç farklı ağırlıktaki sürücü ile yapılan ölçümlerin ortalamaları arasındaki farklar istatistik olarak değerlendirilmiştir. Taşıt içerisinde veri kaydedilen üç farklı noktada tüm titreşim parametreleri üzerinde sürücü ağırlığının etkisiz olduğu tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Tüm vücut titreşimi, sürüş hızı, vücut ağırlığı

INTRODUCTION

In the years when the theory of the Pavement Management System (PMS) began to be developed, it is known that the service capabilities of highway pavements were made by panel evaluations based on riding comfort (Haas, Hudson, & Zaniewski, 1994). In these evaluations, the service capability of the pavements to the driver and passengers is measured by the experts' perception of comfort during travel. The vibration parameter is the most critical component in grading this perception in experts' brains. The exposure to whole-body vibration (WBV) experienced while traveling in vehicles has various adverse effects on human health, safety, and overall comfort, particularly impacting drivers and passengers in multiple ways (Griffin, 2012).

Ride comfort is often assessed in numerous studies by evaluating the square mean (a_{wz}) derived from frequency-weighted analysis of the vertical vibration measurements. Cantisani and Loprencipe (2010) explored the correlation between the International Roughness Index (IRI), a measure of pavement performance, and a_{wz} , which quantifies whole-body vibration following the ISO 2631 standard. The studies reveal that extended travel on low-performing pavements has an adverse impact on human health. In addition, in many studies, it is seen that the Vibration Dose Value (VDV) component, which includes the time exposed to vibration in the analysis and gives more sensitive results in the analysis of acceleration measurements at extreme points, is used to express the effects of vibration on human health numerically (S. Wang, Zhang, & Yang, 2010; Turner & Griffin, 1999). A study compared the impacts of vibrations on human health in vehicles utilized by the US armed forces, employing the ISO 2631-1 and ISO 2631-5 standards for assessment (Alem, 2005).

Furthermore, the literature has explored the topic of assessing the present condition of pavements using accelerometers. From the publications on this subject, it is clear that researchers mainly focus on comparing the surface distress data and roughness data of the pavement with the vertical vibration data of the vehicle. It is evident that with the help of the standard developed with the ASTM E 950 code and explaining how IRI measurements should be made, it will provide convenience to institutions/organizations trying to establish their PMS to make surface deterioration assessments with the help of accelerometers. In studies, it is seen that researchers use acceleration data as calibration data in vehicle dynamics models or to investigate their correlations with surface distress data and roughness data. In the evaluation of vehicle vibration, it was seen that the researchers created simulation models and mechanisms that can be considered the last point in PMS engineering. Put differently, when all PMS studies are evaluated, it is seen that the service level of the road can be determined before the road is built, with the distress that will occur over time in a pavement that will be manufactured after its design using today's latest technology and the effects of these distresses on the road users (Bolling et al., 2011; Muniz de Farias & de Souza, 2009; González, O'Brien, Li, & Cashell, 2008; Liu, Zhang, & Ji, 2008; Ahlin & Granlund, 2002; Kropáč & Múčka, 2005).

Significant attention should be drawn to the abundance of studies in the literature that delve into the correlation between vehicle-induced vibrations and pavement performance metrics. The studies analyzed ride comfort using dynamic vehicle models that respond to signal stacks representing macrotexture depth. In other words, they rely on profile inputs that can quantitatively describe the road surface (C. Zhang & Guo, 2023; J. Zhang, Wang, Jing, Wu, & Li, 2020; Cantisani & Loprencipe, 2010; Hou, Liang, Ma, & Hua, 2009). Furthermore, research examining ride comfort by employing synthetic road profiles corresponding to the road classifications outlined in the ISO 8608 (Du, Li, Ning, & Sun, 2020; ISO, 1995) standard is a notable focus in the literature (Agostinacchio, Ciampa, & Olita, 2013; Múčka, 2015; Nguyen, Lechner, Wong, & Tan, 2019). Similarly, investigations have explored the connections between pavement performance and vibration measurements conducted on road sections of specific lengths with superimposed pavement distress (Múčka, 2017, 2021; Abudinen, Fuentes, & Carvajal Muñoz, 2017; F. Wang & Easa, 2016). The studies highlight those vibrations recorded in passenger car-type vehicles of various sizes, particularly at urban speed limits, exhibit minimal variation irrespective of the car's brand and model (Múčka, 2020, 2021; Duarte & de Melo, 2018). In studies concerning this topic, it is evident that the impact of road surface-induced vibrations experienced within a vehicle on ride comfort is frequently assessed using performance index components that reflect the pavement's current condition.

When the literature is examined in detail, it is seen that although many parameters, such as differences between vehicles, differences between compared indexes, and so on, are evaluated in the measurements made to determine the comfort level and even the profile of the road, the body weight taken into account during the measurement is not considered.

The prevailing consensus is that the primary factors contributing to vibrations in the vertical axis direction are the vehicle's mechanical structure and the road surface deformations encountered during travel. The study investigated the effects of driver weights on the determination of vibration parameters accepted in the ISO 2631-1 (1997) standard. In this context, numerous measurements were conducted with drivers weighing 58 kg, 80 kg, and 113 kg at measurement speeds of 20, 30, 40, and 50 km/h on a road section with well-documented pavement performance, from which vibration parameters were derived. Whole-body vibrations affected by the driver's seat and the changes in the vehicle's vibrations at driving speeds of 20 to 50 km/h and specified driver weights were examined graphically. Similarity inquiries were made with statistical analyses between the determined many measurements and the vibration parameters produced from these measurements, and the results were examined. Vibration measurements were completed on a newly made pavement section to eliminate the possibility of vehicles overreacting due to vehicle mechanics due to significant level differences on the road surface.

MATERIALS AND METHODS

ISO 2631 Standard

The study evaluated the change between driver weight and driving speed changes, which is considered to affect these vibrations in the vehicle, and the vibration data in the vertical direction. The evaluation in question was conducted following the standard guidelines of ISO 2631-1, which pertain to Mechanical vibration and shock - Evaluation of human exposure to whole-body vibration (ISO, 1997). The standard, last published by the International Organization for Standardization (ISO) in 1997, establishes criteria for assessing the comfort and health impact on individuals exposed to whole-body vibration in various vehicle types. Additionally, it outlines the principles for calculating and evaluating these effects. The first part of the ISO 2631 standard (ISO 2631-1) covers the evaluation of periodic, random, and discontinuous vibration movements about people's health, perception, and comfort responses. Regarding their impact on the human body, this standard categorizes vibrations into two frequency ranges: 0.5 Hz to 80 Hz, where vibrations may lead to discomfort, fatigue, and health issues, and 0.1 Hz to 0.5 Hz, which can induce motion sickness.

The ISO 2631-1 standard asserts that the a_w component is the most suitable parameter for describing the acceleration transmitted to an individual exposed to vibrations and, consequently, the sensations experienced by that person (ISO, 1997). The ISO 2631-1 standard suggests organizing vibration signals based on 1/3 (one-third) octave band frequency limits using the Butterworth filtering technique. The acceleration values filtered in the one-third octave band are multiplied by the gain coefficients defined in the frequency weight filters, and the weighted total values (a_w) in the direction of the relevant axis are obtained. To clarify, the weighted acceleration values are obtained by multiplying the acceleration frequencies, divided into one-third octave band frequencies, with the corresponding weights specified in the standard. Equation (1) shows the parameter's mathematical expression. In this context, a_w represents the frequency-weighted acceleration, w_i denotes the corresponding frequency-defined weighting factor, and a_i stands for the Root Mean Squared (RMS) acceleration value for the i^{th} one-third octave band. Besides, random shock vibrations transmitted to road users can also be defined in the standard with the help of partial analysis of the entire vibration data stack recorded in a specific time interval, made in short time intervals. The weighted square mean ($a_w(t_0)$) value, which occurs in a time interval recommended as 1 second in the standard but recommended to be determined by the operator performing the analysis, is determined. The weighted square mean value is expressed in equation (2).

$$a_w = \left[\sum_i (w_i a_i)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

$$a_w(t_0) = \left\{ \frac{1}{\tau} \int_{t_0-\tau}^{t_0} [a_w(t)]^2 dt \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

Within this equation, $a_w(t)$ signifies the instantaneous frequency-weighted acceleration value, τ denotes the moving average period, t represents the measurement variable, and t_0 corresponds to the measurement time. To reiterate, it is recommended to choose 1 second as the time frame of the moving average in the ISO 2631-1 standard. In light of this information, the maximum transient vibration value (MTVV) is expressed in equation (3).

$$\text{MTVV} = \max[a_w(t_0)] \quad (3)$$

According to the ISO 2631-1 standard, the fourth power vibration dose method (VDV), which can give more accurate results than the a_w parameter in the evaluation of the most significant acceleration data during the accepted measurement period, is made by taking the 4th floor instead of the 2nd floor of the acceleration measurements made in the time interval. Even though the unit of the VDV parameter is designated as $m/s^{1.75}$, its calculation is performed using equation (4).

$$VDV = \left\{ \int_0^T [a_w(t)]^4 dt \right\}^{\frac{1}{4}} \quad (4)$$

Within this equation, $a_w(t)$ represents the instantaneous frequency-weighted acceleration value, while T denotes the total measurement time.

Acceleration Data Measurement Kit

The study collected data through a vibration measurement set consisting of three accelerometers (with a measurement range of $\pm 4g$ and sensitivity of 500 ± 15 mV/g), one GPS antenna (with an accuracy below 3 meters), and a data logger. Vibration data were captured in the vertical direction to assess the correlation between the flexible pavement surface and whole-body vibration. The acceleration measurement set operates in conjunction with the computer, enabling simultaneous collection of vertical acceleration and GPS data. During the study, vertical vibration data were gathered at 1000 intervals per second, while GPS data were collected at one-second intervals and promptly transferred to the computer. Vertical vibration measurements were carried out on an automobile belonging to the lower middle-class C segment, with a length ranging between 4100-4600 mm, according to the Euro NCAP car segment classification.

In order to assess whole-body vibration following the definitions outlined in the ISO 2631-1 standard, an accelerometer should be positioned directly beneath the driver to capture the interaction with the passenger accurately. The accelerometer, which determines the driver's WBV values, is positioned on a rubber pad. The accelerometer is fixed since the driver sits on this pad during measurements. The other two accelerometers (over the middle axle and right front seat points) were placed and restrained in a light bed (using a towel) that did not allow free horizontal movement. The mentioned measuring point is shown in Figure 1. Throughout the measurements, the accelerometers were positioned at three distinct locations: the driver's seat (with the driver seated), the right front seat (without any passengers), and the middle axle (at foot level). The mentioned acceleration measurement points are shown in Figure 2. The researchers analyzed the measured vibration values utilizing both the analysis method developed in the MATLAB® interface and the analysis method prescribed in the ISO 2631-1 standard. Figure 3 displays the vibration measurement set employed for field surveys along with the software designed to assess vibration data.



Figure 1. Position of Accelerometer According to ISO Standard (Point 2)

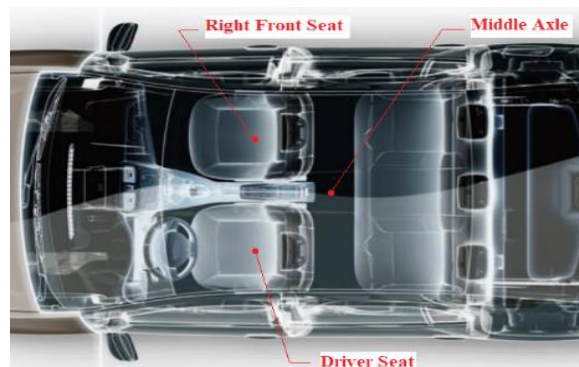
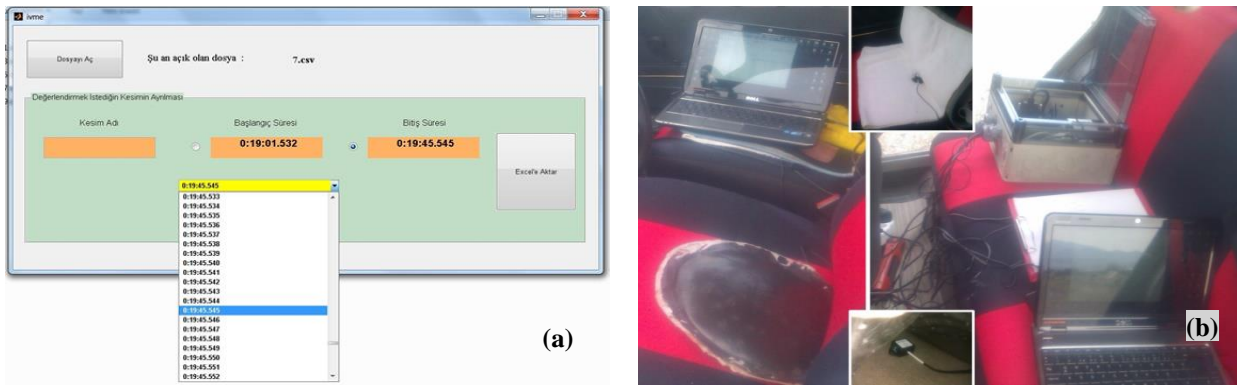


Figure 2. Location of Accelerometers Placed Inside the Vehicle**Figure 3. a.** Analysis Program and **b.** Vibration Measurement Set Used in the Study

Measured Road Pavement Section

The pavement of the road section used in vibration evaluation is Bituminous Hot Mixed Asphalt (HMA). In the pavement design, a 25 cm crushed stone subbase, 20 cm crushed stone base, 6 cm binder course, and 5 cm surface course are envisaged. The section foreseen in the design was applied in place. All vibration measurements were made above the surface course. The longitudinal slope of the measured road is 0, and its length is 960 m. The roughness index of the section measured after manufacturing was determined to be approximately 1.2 m/km, and the pavement performance status (PCI) was about 100. The “Soiltest CT-444 electronics roughness indicator” device was used to determine the roughness values. Values ranging from 1,152 to 1,247 m/km were measured during the roughness measurements made on the surface layer. The standard deviation of the measurements was found to be ± 0.03 m/km.

Marshall design method was used to determine the optimum bitumen content in the binder and surface layers designed as a bituminous hot mixture. The mixture design determined that 4.25% by-weight bitumen with a 70-100 penetration value should be used for the binder layer, and 4.65% by-weight bitumen with a 50-70 penetration value should be used for the surface layer. Additionally, due to the high peeling rates of the aggregate, it is envisaged to add 0.5% anti-stripping Diamine HBG additive to the 50-70 penetration bitumen in the wearing layer. It was implemented at the foreseen manufacturing site.

RESULTS AND DISCUSSION

Vibration Change According to Driving Speed

The study investigated whether the driver's weight affects the evaluation results in the vibration measurements made with the driver on the driver's seat, which the standard defines as the most suitable measurement place. As stated in the previous section, field measurements were made on a newly constructed flexible pavement section where the surface roughness characteristic can be assumed to be homogeneous. To evaluate only the effects of driver weights on vibration parameters, a flexible pavement section with a pavement condition index value of 100 was determined as the road section to be measured. Namely, numerous measurements were made on the route at measurement speeds of 20, 30, 40, and 50 km/h with the same drivers weighing 58 kg, 80 kg, and 113 kg in a flexible pavement section with a pavement condition index value of 100. Measurements were completed at different speeds on the same route, and vibration parameters were calculated.

In this study, vertical vibration data were recorded at three different points in the vehicle at 20, 30, 40, and 50 km/h speeds with drivers weighing 58, 80, and 113 kg on the same pavement section and analyzed according to the principles of ISO 2631-1 standard. At least six measurement data were recorded for each speed and driver weight. By evaluating the vibration data, a_w , MTVV, and VDV vibration parameter values were obtained at different speeds and driver weights. During the measurements, vibration data were measured in the vertical direction to see only the changes caused by the vehicle, and the vibration parameters produced from these data were named a_{wz} , $MTVV_z$, and VDV_z . Evaluation data stacks were created by averaging the data obtained at each driver's weight and measurement (driving) speed. The a_{wz} parameter changes of these produced vibration parameters at three different vibration measurement points according to the driving speeds and driver weights are shown in Figure 4, the $MTVV_z$ parameter changes in Figure 5, and the VDV_z parameter changes in Figure 6.

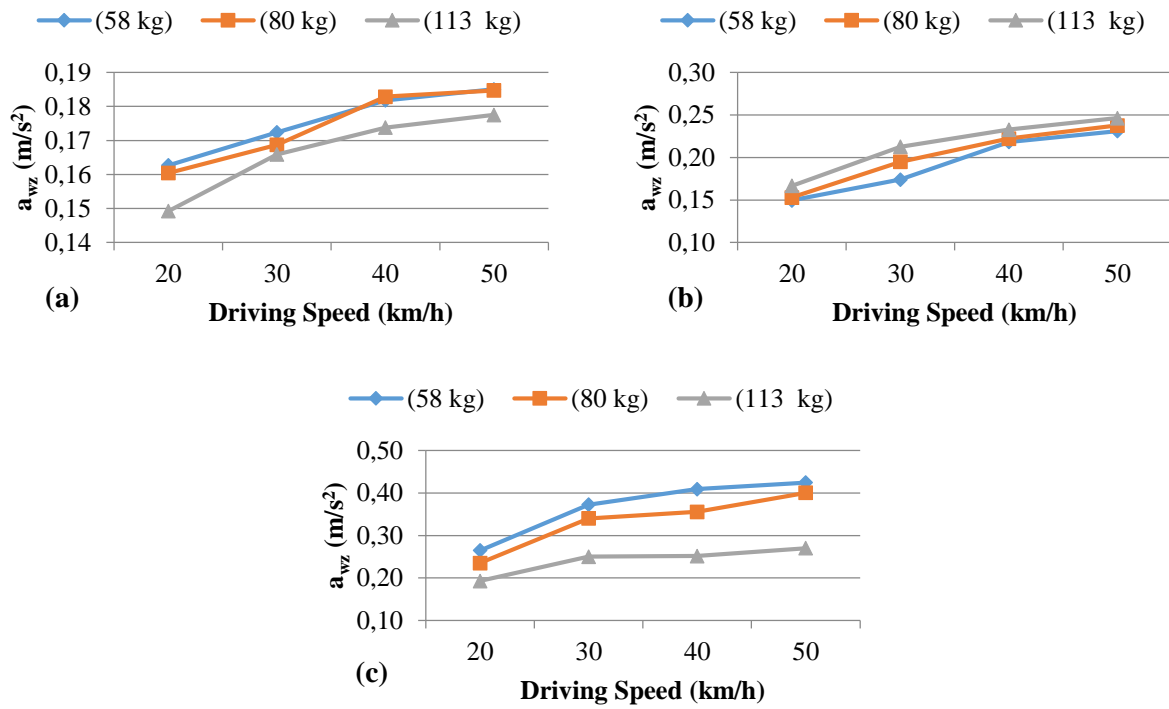


Figure 4. a_{wz} Changes According to Driving Speed in **a.** Driver Seat, **b.** Over Middle Axle and **c.** Right Front Seat Points

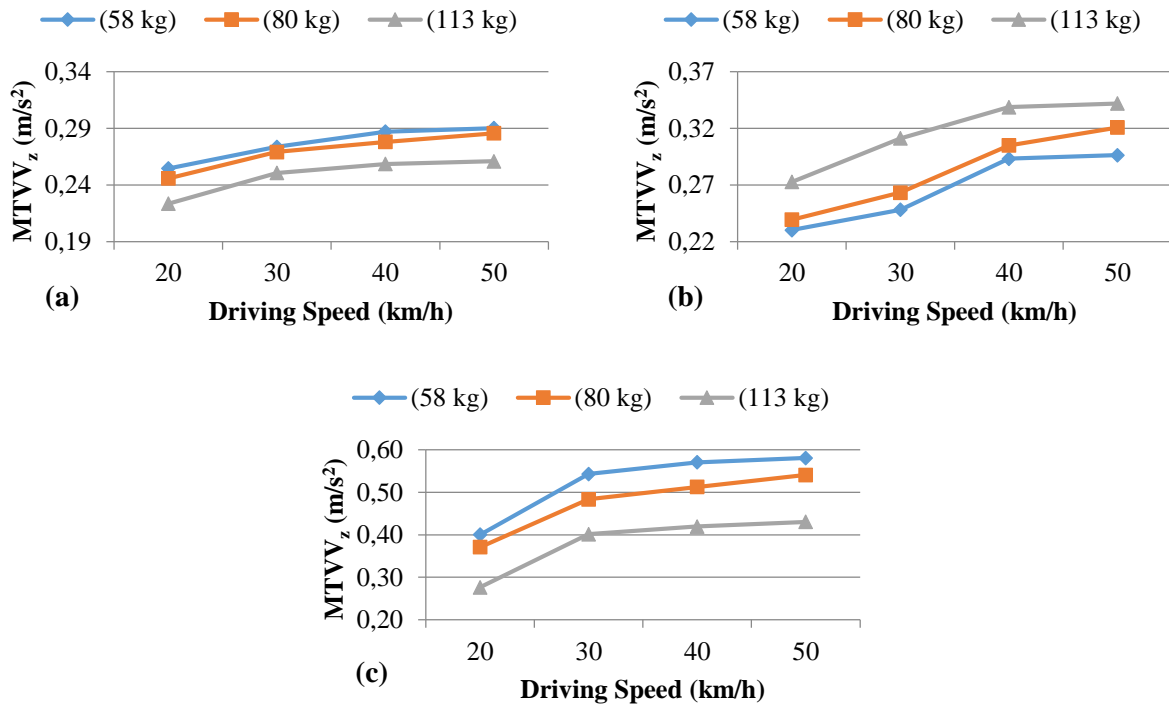


Figure 5. $MTVV_z$ Changes According to Driving Speed in **a.** Driver Seat, **b.** Over Middle Axle and **c.** Right Front Seat Points

As can be seen from the graphs created as a result of the analysis, as the driving speed increases, the vibration parameter values in the vehicle increase. According to all measurement parameters, relatively large vibration values in the measurements on the seat (driver and right front seat) occur in the measurements made with the driver weighing 58 kg. In comparison, the measurements made with the driver weighing 113 kg in the measures on the mid-axle show

high vibration values. Thus, due to the suspension effect, less driver weight increases the vibration amplitude on the seat, while more driver weight increases the vibration amplitude on the vehicle floor. However, in general, it is seen that there are no significant numerical differences between vibration parameters according to different driver weights.

It is seen in Figure 5 that there are similar results in the $MTVV_z$ parameter, which expresses the maximum vibration values in the one-second interval in vibration measurements, in other words, the instantaneous shock value. The pavement section where the measurements were made was made recently, and since the surface roughness was homogeneous and at minimum values, the $MTVV_z$ parameters, i.e. instantaneous shock values, did not reach significant values. Similarly, in the evaluations made according to the VDV_z parameter, which more precisely reflects the change in vibration amplitude, no difference is observed in the order of the driver's weight versus the measurement point (seen in Figure 6).

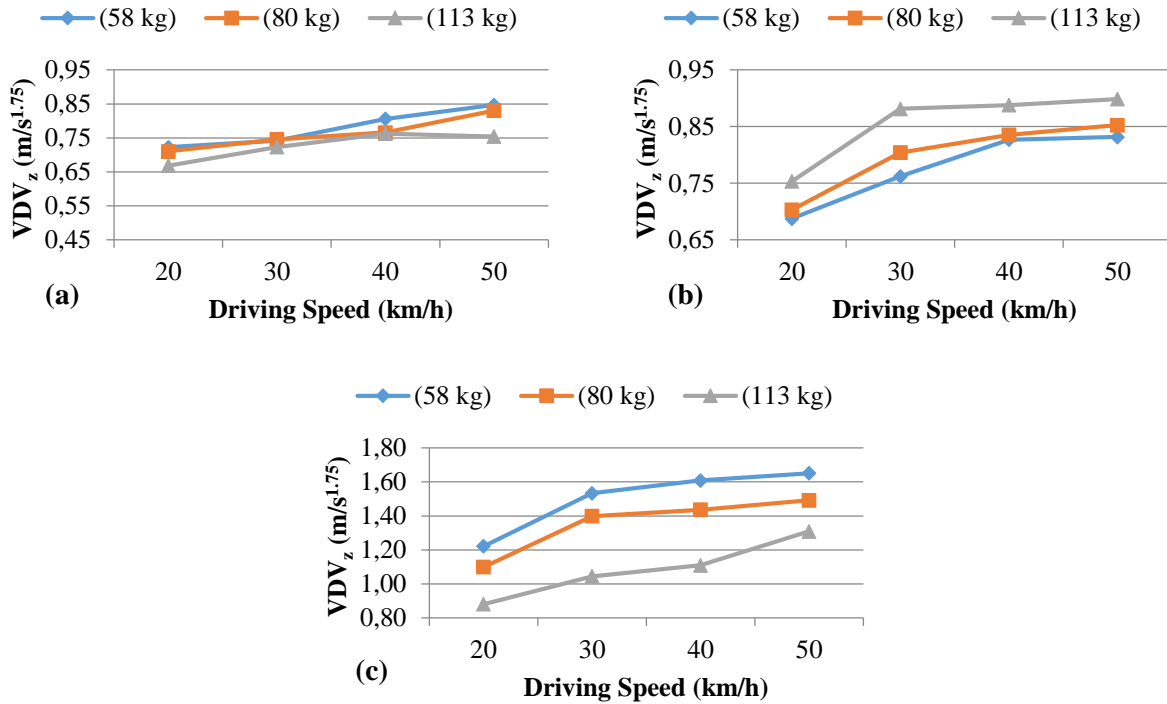


Figure 6. VDV_z Changes According to Driving Speed in **a.** Driver Seat, **b.** Over Middle Axle and **c.** Right Front Seat Points

Correlation between Driver Weight and Vibration Parameters

These vibration parameters obtained were evaluated with both parametric and non-parametric statistical methods, and it was investigated whether there was a statistically significant difference between the values. The SPSS package program was used in all statistical evaluations. Primarily, evaluation was made with non-parametric methods. In this sense, the Kruskal-Wallis H Test was used to compare the measurements of more than two groups with non-parametric data. Measurements made at different driver weights of 58, 80, and 113 kg and speeds of 20, 30, 40, and 50 km/h were evaluated statistically for each of the measurement points of the driver's seat, on the middle axle and right front seat. The statistical significance values (p) found as a result of the evaluation made using the SPSS program are shown in Table 1.

Table 1. Kruskal-Wallis H Test Statistical Significance Values

Speed (km/h)	Driver Seat			Middle Axle			Right Front Seat		
	a_{wz}	$MTVV_z$	VDV_z	a_{wz}	$MTVV_z$	VDV_z	a_{wz}	$MTVV_z$	VDV_z
20	0.033	0.526	0.030	0.001	0.018	0.008	0.000	0.001	0.000
30	0.147	0.687	0.034	0.004	0.037	0.025	0.001	0.034	0.001
40	0.056	0.190	0.066	0.085	0.118	0.172	0.000	0.000	0.000
50	0.090	0.263	0.069	0.593	0.125	0.162	0.001	0.001	0.001

In the statistical evaluation, the parameters that the H_1 hypothesis is fulfilled, that is, the statistical significance value is more significant than 0.05, are shown with grey fill in the table. That is, the table shows cases where the differences

between the vibration parameters measured and calculated in gray filled cells, with 95% accuracy, at 58, 80, and 113 kg driver weights, are statistically insignificant compared to the driver's weight. As a result of the evaluation, it was determined that the differences in the vibration parameters produced in the measurements made only at 40 and 50 km/h speeds at the measurement points on the driver's seat and on the middle axle were statistically insignificant.

Another evaluation was made using the independent sample one-way Analysis of Variance (ANOVA) test, which compares the measurements of more than two groups from parametric methods. As it is known, to make parametric evaluations in statistical evaluations, the conditions for the data to be homogeneous and to comply with the normal distribution are sought. Therefore, the values found as a result of the evaluation made according to the variance test homogeneity are shown in Table 2. According to the evaluation, it was observed that the vibration parameters produced from the measurements made on the driver's seat and the middle axle at 40, and 50 km/h speeds were homogeneous. It has been emphasized that another condition for parametric statistical evaluations is that the data should be by the normal distribution. As a result of the evaluations, statistical significance values of the parameters of the measurements made on the driver's seat, on the middle axle, and the right front seat at 20, 30, 40, and 50 km/h speeds for each vibration parameter were found for drivers weighing 58, 80 and 113 kg. Evaluation results for a_{wz} , $MTVV_z$ and VDV_z parameters are shown in Tables 3, 4, and 5, respectively. In the tables, cells, where the difference between the data is statistically insignificant are shown with grey fill. As a result of all these evaluations, it has been determined that each vibration parameter is by the normal distribution.

Table 2. Variance Homogeneity Evaluation Statistical Significance Values

Speed (km/h)	Driver Seat			Middle Axle			Right Front Seat		
	a_{wz}	$MTVV_z$	VDV_z	a_{wz}	$MTVV_z$	VDV_z	a_{wz}	$MTVV_z$	VDV_z
20	0.121	0.005	0.918	0.055	0.003	0.098	0.002	0.281	0.001
30	0.568	0.010	0.195	0.204	0.100	0.952	0.003	0.049	0.005
40	0.206	0.093	0.258	0.623	0.063	0.113	0.033	0.427	0.047
50	0.129	0.069	0.062	0.036	0.107	0.095	0.342	0.053	0.225

Table 3. The Statistical Significance Values of The a_{wz} Parameter Conforming to The Normal Distribution

a_{wz}	Driver Seat			Middle Axle			Right Front Seat		
	58 kg	80 kg	113 kg	58 kg	80 kg	113 kg	58 kg	80 kg	113 kg
20	0.965	0.813	0.972	0.877	0.967	0.999	0.980	0.700	0.518
30	0.979	0.764	1.000	0.996	0.805	0.712	0.826	0.877	0.976
40	0.867	0.953	0.786	0.890	0.820	0.766	0.715	1.000	0.952
50	0.999	0.316	0.981	0.976	0.993	0.638	0.988	0.731	0.998

Table 4. The Statistical Significance Values of The $MTVV_z$ Parameter Conforming to The Normal Distribution

$MTVV_z$	Driver Seat			Middle Axle			Right Front Seat		
	58 kg	80 kg	113 kg	58 kg	80 kg	113 kg	58 kg	80 kg	113 kg
20	0.994	0.933	0.828	0.872	0.478	0.839	0.655	0.117	0.651
30	0.999	0.999	0.152	0.997	0.986	0.990	0.782	0.972	0.908
40	0.937	0.949	0.293	0.837	0.450	0.999	0.995	0.809	0.937
50	0.731	0.641	0.401	0.975	0.974	0.906	0.966	0.992	0.853

Table 5. The Statistical Significance Values of The VDV_z Parameter Conforming to The Normal Distribution

VDV_z	Driver Seat			Middle Axle			Right Front Seat		
	58 kg	80 kg	113 kg	58 kg	80 kg	113 kg	58 kg	80 kg	113 kg
20	0.574	0.641	0.875	0.991	0.690	0.979	0.779	0.578	0.822
30	0.993	0.974	0.359	0.951	0.992	0.896	0.724	0.943	0.569
40	0.831	0.240	0.999	0.953	0.998	0.940	0.772	1.000	0.894
50	0.868	0.100	0.957	0.832	0.754	0.950	0.997	0.933	0.856

It has been determined that the vibration parameters of the measurements made on the driver's seat and the middle axle at 40 and 50 km/h speeds generally meet the mentioned criteria. After this conformity assessment, the ANOVA test was applied and investigated whether the difference between the parameters of the vibration data measured at different driver weights was statistically significant. The results of the evaluation are shown in Table 6.

Table 6. ANOVA Test Statistical Significance Values

Speed (km/h)	Driver Seat			Middle Axle			Right Front Seat		
	a_{wz}	MTVV _z	VDV _z	a_{wz}	MTVV _z	VDV _z	a_{wz}	MTVV _z	VDV _z
20	0.027	0.368	0.029	0.000	0.000	0.012	0.000	0.116	0.000
30	0.125	0.568	0.156	0.001	0.026	0.020	0.000	0.013	0.000
40	0.051	0.079	0.292	0.065	0.083	0.086	0.000	0.000	0.000
50	0.544	0.100	0.108	0.202	0.061	0.121	0.000	0.000	0.000

The cases where the differences between the vibration parameters measured and calculated at 58, 80, and 113 kg driver weight with a 95% accuracy are statistically insignificant compared to the driver weight are shown in Table 6 with grey-filled cells. As a result of the ANOVA analysis, which is a parametric statistical evaluation method, it was determined that the differences in the vibration parameters produced in the measurements made at 40 and 50 km/h speeds at the measurement points on the driver's seat and on the middle axle, as in the result of the non-parametric statistical analysis Kruskal-Wallis H Test, were found to be statistically insignificant.

It has been emphasized before that there is no statistically significant difference according to the hypothesis tests performed in the results, with a statistical significance value of $p > 0.05$ at the 95% confidence interval. In this evaluation, when we evaluated the data obtained from the vibration measurements made according to 58, 80 113 kg driver weights with both parametric and non-parametric methods, it was determined that the difference between the data was insignificant only at 40 and 50 km/h speeds on a highway where the pavement roughness is considered homogeneous. In other words, from statistical evaluations, it can be accepted that the driver's weight is insignificant only at speeds of 40 and 50 km/h. When a certain speed is exceeded, it is understood that the mechanical vibrations created by the rotational forces arising from the vehicle movement are homogeneously distributed in the vehicle body, and the driver's weight becomes meaningless with the increasing vibration value.

In addition, these statistical evaluations determined that the differences between the vibration parameters produced from the measurements made on the right front seat were statistically significant in both parametric and non-parametric evaluations. In the study, the statistically significant difference between the vibration parameters was found as a result of the measurements made in the right front seat, even in a superstructure where the vertical vibration values are minimal; in other words, the PCI value is accepted as 100, is taken as an indication that the measurements made at this point are not reliable.

Then again, it was determined that the differences between the parameters produced from the measurements made on the driver's seat and the middle axle were statistically insignificant only in the measurements made at 40 and 50 km/h speeds. Therefore, as a result of all statistical evaluations, 20, 30, 40, and 50 km/h speed values of 40 and 50 km/h were found to be acceptable measurement speed values. It has been determined that the speed limits allowed, especially in urban residential areas, are pretty low, and 40 km/h driving speed would be the most appropriate choice in vehicle measurements to determine pavement performance due to the difficulties arising from urban road geometries.

In addition, vertical vibration measurements were evaluated regarding driver weight in all sections to be considered in the study. The similarities of the vibration parameter set produced at each driver weight at the 40 km/h measurement speed with the others were investigated. To rephrase it, whether the vibration parameters produced at any driver weight reflect the general was statistically evaluated. In this sense, a single sample t-test was performed for each measurement point. As a result of the t-test for each driver weight and vibration parameter, it was seen that the H_1 hypothesis was correct since the significance values of the t-distribution were more significant than 0.05 in the evaluation. To reiterate, the average values accepted as calibration parameters for the 40 km/h measurement speed were determined to reflect the set of parameters. As an example of the evaluation, the statistical significance evaluation results, which were found due to the comparison of the 80 kg driver's weight with the other driver's consequences, are shown in Table 7.

Table 7. t Test Statistical Significance Values

	Driver Seat	Middle Axle	Right Front Seat
a_{wz}	0.137	0.091	0.443
MTVV _z	0.241	0.051	0.500
VDV _z	0.794	0.352	0.573

One of the primary sources of vibration experienced while driving is the roughness of the road surface. Although it is impossible to predict the IRI, which expresses the condition of the road, with high accuracy with acceleration measurement data, it is possible to comment on the IRI status of a road according to the acceleration values obtained. The IRI is a standardized measurement used to assess the roughness or smoothness of a road's surface. It is typically determined by analyzing vehicle response to road surface irregularities, often using vertical displacement and acceleration data.

CONCLUSION

It is known that road pavement distress adversely affects vehicle drivers and passengers. It is seen in many studies that vibrations in the vehicle are at the beginning of these adverse effects. The study investigated the changes in the vibrations occurring in the vehicle and the whole-body vibrations affected by the driver's seat at different driving speeds and driver weights. The acceleration data measured for vibration evaluation were analyzed according to the evaluation principles specified in the ISO 2631-1 coded standard. In the study, the analyses were made as a result of the measurements, and the results were evaluated with the help of graphics.

In addition, the effects of rider weight were analyzed in whole-body vibration studies. In this sense, statistical similarities between the data were investigated by applying the Kruskal-Wallis H Test, one of the non-parametric tests, and the Independent Sample One-Way Analysis of Variance, one of the parametric tests. It was determined that the difference between the vibration parameters measured on the driver's seat and the middle axle at speeds of 40 km/h and above was statistically insignificant. To put it differently, it was concluded that the driver's weight is not essential in evaluating the vibrations measured on the driver's seat and the middle axle at 40 km/h and above.

Many authorities accept that the most challenging step in the operation of pavement management systems is to determine the current performance levels of pavements. Today, it is known that the most effective method, especially in determining the pavement performance of urban roads, is the relative evaluations made by experts. These evaluations can be made by experts trained in the field by visual analysis of the pavement surface, collecting surface distress data, and evaluating the driving comfort in the vehicle. In this study, it was concluded that the speed of the vehicle should be at least 40 km/h so that the pavement evaluation specialist can decide on the pavement comfort without being affected by his weight; in other words, to obtain the correct expert opinion in the pavement performance evaluations made with the driving comfort in the vehicle. Instead, considering the pavement roughness evaluation standards, it is recommended that the superstructure performance evaluations with the driving comfort evaluation principle should be done at a constant speed and a minimum speed of 40 km/h.

It is thought that repeating similar measurements with different vehicle types, such as minibuses and buses, in the further stages of the study and mutually evaluating these results will provide significant gains to the literature. On the other hand, simulating the results of the measurements with mechanical models that consider the human body-vehicle interaction will also allow the mutual evaluation of test sections with deterioration on the road surface.

ACKNOWLEDGEMENT

This study was supported by Istanbul University Scientific Research Projects (Project no: 21794).

REFERENCES

- Abudinen, D., Fuentes, L. G., & Carvajal Muñoz, J. S. (2017). Travel Quality Assessment of Urban Roads Based on International Roughness Index. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2612, 1-10. <https://doi.org/10.3141/2612-01>
- Agostinacchio, M., Ciampa, D., & Olita, S. (2013). The vibrations induced by surface irregularities in road pavements – a Matlab® approach. *European Transport Research Review*, 6(3), 267-275. <https://doi.org/10.1007/s12544-013-0127-8>

- Ahlin, K., & Granlund, N. O. J. (2002). Relating Road Roughness and Vehicle Speeds to Human Whole Body Vibration and Exposure Limits. *International Journal of Pavement Engineering*, 3(4), 207-216. <https://doi.org/10.1080/10298430210001701>
- Alem, N. (2005). Application of the New ISO 2631-5 to Health Hazard Assessment of Repeated Shocks in U.S. Army Vehicles. *Industrial Health*, 43(3), 403-412. <https://doi.org/10.2486/indhealth.43.403>
- Bolling, A., Jansson, J., Hjort, M., Lidström, M., Nordmark, S., Sehammar, H. k., & Sjögren, L. (2011). An Approach for Realistic Simulation of Real Road Condition in a Moving Base Driving Simulator. *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, 11(4), 041009. <https://doi.org/10.1115/1.4005450>
- Cantisani, G., & Loprencipe, G. (2010). Road Roughness and Whole Body Vibration: Evaluation Tools and Comfort Limits. *Journal of Transportation Engineering*, 136(9), 818-826. <https://doi.org/10.1061//ASCE/TE.1943-5436.0000143>
- Du, H., Li, W., Ning, D., & Sun, S. (2020). *Advanced Seat Suspension Control System Design for Heavy Duty Vehicles* (1st Edition ed.). London, UK: Academic Press.
- Duarte, M. L. M., & de Melo, G. C. (2018). Influence of pavement type and speed on whole body vibration (WBV) levels measured on passenger vehicles. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 40(3), 150. <https://doi.org/10.1007/s40430-018-1057-0>
- González, A., O'Brien, E. J., Li, Y. Y., & Cashell, K. (2008). The use of vehicle acceleration measurements to estimate road roughness. *Vehicle System Dynamics*, 46(6), 483-499. <https://doi.org/10.1080/00423110701485050>
- Griffin, M. J. (2012). *Handbook of human vibration*. London, UK: Academic press.
- Haas, R., Hudson, W. R., & Zaniewski, J. P. (1994). *Modern Pavement Management*. Malabar, Florida, USA: Krieger Pub. Co.
- Hou, X., Liang, X., Ma, S., & Hua, W. (2009, 5-9 August). *The Analysis of the Correlation between International Roughness Index and Body Ride Comfort*. Paper presented at the Ninth International Conference of Chinese Transportation Professionals (ICCTP), Harbin, China.
- ISO. (1995). Mechanical vibration - Road surface profiles - Reporting of measured data. In *ISO 8608*. Geneva, Switzerland: ISO.
- ISO. (1997). Mechanical vibration and shock - Evaluation of human exposure to whole-body vibration, Part 1: General Requirement. In *ISO 2631-1*. Geneva, Switzerland: ISO.
- Kropáč, O., & Múčka, P. (2005). Be careful when using the International Roughness Index as an indicator of road unevenness. *Journal of Sound and Vibration*, 287(4-5), 989-1003. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2005.02.015>
- Liu, Z., Zhang, E., & Ji, Z. (2008). Simulation and Experimental Study of Human Riding Comfort in Dynamic Man-Automobile System. In *Intelligent Robotics and Applications* (pp. 577-587): Springer.
- Múčka, P. (2015). Sensitivity of Road Unevenness Indicators to Distresses of Composite Pavements. *International Journal Pavement Research Technology*, 8(2), 72-84. [https://doi.org/10.6135/ijprt.org.tw/2015.8\(2\).72](https://doi.org/10.6135/ijprt.org.tw/2015.8(2).72)
- Múčka, P. (2017). Road Roughness Limit Values Based on Measured Vehicle Vibration. *Journal of Infrastructure Systems*, 23(2), 04016029. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)is.1943-555x.0000325](https://doi.org/10.1061/(asce)is.1943-555x.0000325)
- Múčka, P. (2020). Vibration Dose Value in Passenger Car and Road Roughness. *Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements*, 146(4), 04020064. <https://doi.org/10.1061/jpeodx.0000200>
- Múčka, P. (2021). International Roughness Index Thresholds Based on Whole-Body Vibration in Passenger Cars. *Transportation Research Record*, 2675(1), 305-320. <https://doi.org/10.1177/0361198120960475>
- Muniz de Farias, M., & de Souza, R. O. (2009). Correlations and Analyses of Longitudinal Roughness Indices. *Road Materials and Pavement Design*, 10(2), 399-415. <https://doi.org/10.1080/14680629.2009.9690202>
- Nguyen, T., Lechner, B., Wong, Y. D., & Tan, J. Y. (2019). Bus Ride Index – a refined approach to evaluating road surface irregularities. *Road Materials and Pavement Design*, 22(2), 423-443. <https://doi.org/10.1080/14680629.2019.1625806>

- Turner, M., & Griffin, M. J. (1999). Motion sickness in public road transport: passenger behavior and susceptibility. *Ergonomics*, 42(3), 444-461. <https://doi.org/10.1080/001401399185586>
- Wang, F., & Easa, S. (2016). Analytical Evaluation of Ride Comfort on Asphalt Concrete Pavements. *Journal of Testing and Evaluation*, 44(4), 1671-1682. <https://doi.org/10.1520/jte20140339>
- Wang, S., Zhang, J., & Yang, Z. (2010). *Experiment on Asphalt Pavement Roughness Evaluation Based on Passengers' Physiological and Psychological Reaction*. Paper presented at the 10th International Conference of Chinese Transportation Professionals—Integrated Transportation Systems: Green, Intelligent, Reliable, Beijing, China.
- Zhang, C., & Guo, L.-X. (2023). Analysis of lumbar spine injury with different back inclinations under whole-body vibration: A finite element study based on whole human body models. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 95. <https://doi.org/10.1016/j.ergon.2023.103447>
- Zhang, J., Wang, L., Jing, P., Wu, Y., & Li, H. (2020). IRI Threshold Values Based on Riding Comfort. *Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements*, 146(1), 04020001. <https://doi.org/10.1061/jpeodx.0000144>



Kahramanmaraş Sütçü İmam University

Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 02.08.2023
Kabul Tarihi : 13.12.2023

Received Date : 02.08.2023
Accepted Date : 13.12.2023

NEMATİK SIVI KRİSTALE V₂O₅ NANOPARÇACIK KATKILANDIRILMASI İLE DİELEKTRİK DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

INVESTIGATION OF DIELECTRIC BEHAVIOR WITH V₂O₅ NANOPARTICLE DOPING TO NEMATIC LIQUID CRYSTAL

Şükrü ÖZĞAN (ORCID: 0000-0001-9334-327X)

Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Fizik Bölümü, Kahramanmaraş, Türkiye

Sorumlu Yazar / Corresponding Author: : Şükrü ÖZĞAN, ozgan@ksu.edu.tr

ÖZET

Bu çalışmada Vanadyum Pentaoksit (V₂O₅) nanoparçacık, E7 nematik sıvı kristaline farklı oranlarda katkılanarak numuneler elde edilmiştir. Bu numunelerin gerçel ve sanal dielektrik sabitlerinin frekansa ve voltaja bağlı olarak değişimleri empedans analizör ile 100 Hz-20 MHz frekans ve 0-40 Volt DC voltaj aralığında oda sıcaklığında incelenmiştir. Gerçel dielektrik sabiti düşük frekanslarda hızlı bir düşüş göstermiştir, sonra yaklaşık sabit kalarak çok az azalarak değişmiştir, 0.2 MHz frekans değerinde azalarak sıfıra gitmektedir. Sanal dielektrik kısmı düşük frekanslarda azalmakta, sonra neredeyse sabit gibi davranmakta ve daha yüksek frekanslarda artarak yaklaşık 3 MHz frekans civarında pik yapmaktadır ve daha yüksek frekanslarda azalarak sıfıra yaklaşmaktadır. Gerçel dielektrik sabiti düşük voltajlarda birden bire artış göstermekte ve daha sonra daha yüksek voltajlarda sabit bir şekilde devam etmektedir. Sanal dielektrik kısmı ise düşük voltajlarda hızlıca azalırken, belirli bir voltaja geldiğinde yeniden artışa geçmekte ve bir pik yaptıktan sonra azalarak sıfıra yaklaşmaktadır. Numunelerin gevşeme frekansı ve zamanını belirlemek için dielektrik sabitinin gerçel ve sanal kısım eksenlerinde Cole-Cole grafiği elde edilmiştir. Nematik sıvı kristalin iyonları ile katkı malzemesi V₂O₅ nanoparçacığın iyonlarının etkileştiği, grafikteki saf sıvı kristale ait yarı çemberin yarıçapının katkılı numunelerinkinden büyük olduğu görülmektedir. Bu ise V₂O₅ malzemenin elektrik enerjisi depolama aygıtlarında kullanımı ile uyumlu olduğunu göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: Vanadyum Pentaoksit (V₂O₅), nanoparçacık, sıvı kristal, dielektrik

ABSTRACT

In this study, samples were prepared by adding Vanadium Pentoxide (V₂O₅) nanoparticles to the E7 nematic liquid crystal in various proportions. The real and imaginary dielectric constants of these samples were investigated at room temperature using an impedance analyzer in the frequency range of 100 Hz to 20 MHz and a DC voltage range of 0-40 Volts. The real dielectric constant showed a rapid decrease at low frequencies, then remained approximately constant with slight variations, eventually decreasing towards zero around 0.2 MHz. The imaginary dielectric component decreased at low frequencies, behaved almost as a constant, and exhibited a peak at around 3 MHz before decreasing towards zero at higher frequencies. The real dielectric constant exhibited a sudden increase at low voltages and then continued to remain relatively constant at higher voltages. The imaginary dielectric component, on the other hand, decreased rapidly at low voltages, then increased again at a certain voltage, formed a peak, and decreased towards zero. To determine the relaxation frequency and time of the samples, Cole-Cole graphs were obtained for the real and imaginary parts of the dielectric constant. It was observed that the radius of the semicircle associated with the pure liquid crystal in the graph was larger for the doped samples, indicating an interaction between the ions of the nematic liquid crystal and the V₂O₅ nanoparticles. This suggests compatibility with the use of V₂O₅ material in electrical energy storage devices.

Keywords: Vanadium Pentoxide (V₂O₅), nanoparticle, liquid crystal, dielectric

To Cite: ÖZĞAN, Ş., (2024). NEMATİK SIVI KRİSTALE V₂O₅ NANOPARÇACIK KATKILANDIRILMASI İLE DİELEKTRİK DAVRANIŞININ İNCELENMESİ Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 27(1), 61-68.

GİRİŞ

Maddenin katı ve sıvı ana fazları arasında bir ara faz olarak tanımlanan sıvı kristaller teknolojiye birçok alanda kullanılmakta ve sıvı kristallerin önemi gittikçe artmaktadır. Özellikle farklı elektro-optik cihazların gösterge sistemlerinde yoğun kullanım alanı bulmaktadır. Sıvı kristaller, daha düşük güç tüketimi ve daha az yer kaplaması nedeniyle bilgisayar ve televizyon ekranlarında, birçok makinenin ve aracın gösterge sistemlerinde kullanılmaktadır (Khoo 2022; Meier, Sackmann ve Grabmaier 2012). 2000'li yılların başlarında, endüstriyel uygulamalarda sıvı kristallerin yıllık satışının oldukça fazla olduğu görülmüştür (Stolpe 2002). Sıvı kristaller elektro-optik filtreler (Caputo vd., 2009), hologram (Matharu, Jeeva ve Ramanujam 2007), dijital veri depolama (Bleha vd., 1978; Lencer vd., 2011) ve biyosensörlerin (Wang vd., 2021) yapımında da yoğun olarak kullanılmaktadır. Genel olarak, modern sıvı kristallerin endüstriyel uygulamaları için geniş sıvı kristal faz sıcaklık aralığı, küçük anahtarlama süresi, yüksek optik ve dielektrik anizotropiye gereksinim duyulmaktadır. Bu amaçla yeni sıvı kristal sentezlenmesi (Ahmed and Aboelnaga 2022) veya ikili, üçlü hatta daha fazla sıvı kristal karışımının oluşturulması (Özgan ve Okumuş 2011) ve katkı malzemelerin kullanılması (Özgan, Eskalen, ve Tapkıranlı 2018) farklı amaçlar için kullanım potansiyeline sahip sıvı kristal elde etmek için uygulanan yöntemlerdir. Sıvı kristal kullanan gösterge cihazının performansı, kullanılan sıvı kristale ve konuk katkı malzemelerine önemli ölçüde bağlıdır. Farklı özellikte sıvı kristal üretmek için boya (Shen vd., 2023), polimer (Bronnikov, Kostromin ve Zuev 2013) ve nanoparçacık (Eskalen vd., 2015) gibi malzemeler konuk katkı maddesi olarak kullanılmaktadır. Nematik sıvı kristallerdeki %1 boya katkısı, nematik sıvı kristal molekülünün yeniden yönelmesini iki katına kadar artırabilmektedir. Nematik sıvı kristale boya katkısının, eşik voltajını neredeyse %25'e kadar, kırılma indisi modülasyonunu da üç kata kadar azalttığı tespit edilmiştir (Jánossy 1994; Köysal vd., 2011).

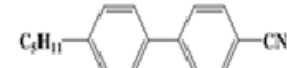
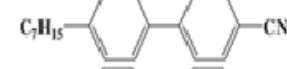
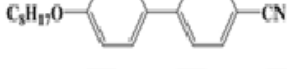
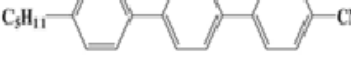
Gösterge sistemlerinde sıvı kristal kullanan cihazlarının performansının artırılması için kullanılan konuk malzemeler polimer, boyar malzemeler ve nano malzemelerdir. Bu çalışmada kullandığımız dört sıvı kristalin ötektik karışımı olan E7 nematik sıvı kristalinde olduğu gibi iki veya daha çok sıvı kristali belirli oranlarda karıştırarak farklı fiziksel özelliklere sahip yeni sıvı kristal malzeme elde edilebilmektedir. Eskalen ve ark. E7/6CB/6AB üçlü sıvı kristal karışımın elektro-optik, ısısal ve dielektrik özelliklerini incelemişlerdir (Eskalen, Okumuş ve Özgan 2019). Sıvı kristallere katılan nanoparçacık sıvı kristalin özelliklerini değiştirmektedir. Literatürde bu amaçla metalik nano parçacıklar (Li vd., 2013), ferromanyetik nanoparçacıklar (Okutan vd., 2012), yarı iletken ve karbon nanoparçacık (Lee ve Chiu 2001; Lee, Gau, and Chen 2005) gibi farklı tipte nanoparçacık kullanılmaktadır. Özgan ve ark. heksilsiyano-bifenil sıvı kristaline grafen oksit nanoparçacık katkılayarak ısısal ve elektro-optik özelliklerini incelemişlerdir (Özgan vd., 2018). Bir başka çalışmada karbon kuantum noktaların nematik sıvı kristalin elektro-optik performansı üzerine etkisi incelenmiştir (Eskalen 2020). GO@ Fe₃O₄@ TiO₂ tipi organik-inorganik nanohibrit materyal sentezi ve bu nanohibrit malzemenin E7 sıvı kristaline katkısının nasıl bir değişikliğe sebep olduğu ve siprofloksasinin fotokatalitik bozunması araştırılmıştır (Uruş vd., 2022). Farklı sıcaklıklarda hidrotermal yöntemi ile üretilen kobalt oksit nanoparçacık nematik sıvı kristalin faz geçiş sıcaklığı ve eşik voltajına etkisi araştırılmıştır (Eskalen, Kerli ve Özgan 2017).

Vanadyum pentoksit (V₂O₅) düşük üretim maliyeti ile iyi bilinen bir geçiş metal oksit malzemedir. İyi termal ve kimyasal kararlılığa ve termoelektrik özellikler sahip olmasından dolayı güneş pilleri, gaz sensörleri, kimyasal algılama, elektrokromik ve optoelektronik cihazlar başta olmak üzere çeşitli alanlarda kullanılmaktadır (Lu ve Zhou 2018; Wu vd., 2016). Bu çalışmada, hidrotermal yöntem ile sentezlenmiş olan V₂O₅ nanoparçacık (Eskalen, Özgan, ve Kerli 2019) E7 nematik sıvı kristaline farklı oranlarda katılandırılmıştır. V₂O₅:E7 katkılı numuneler İndiyum Kalay Oksit (ITO) hücrelere doldurulmuştur. Empedans analizör kullanılarak katkılı sıvı kristal numunelerin gerçel ve sanal dielektrik sabiti frekansa ve voltaja bağlı olarak incelenmiştir.

MATERYAL VE YÖNTEM

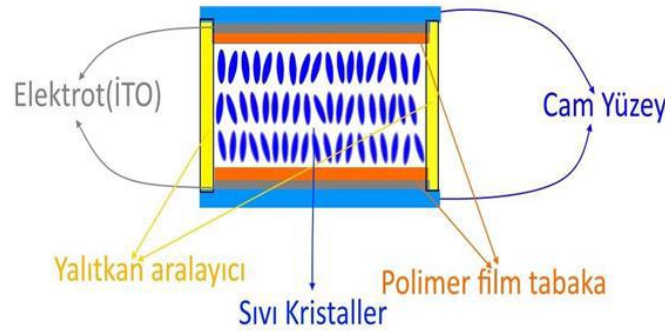
Çalışmada kullanılan E7 nematik sıvı kristal dört farklı sıvı kristalin ötektik bileşeni olup satın alınma yoluyla temin edilmiştir (Military University of Technology, Warsaw, Poland). E7 nematik sıvı kristalin kimyasal yapısı Şekil 1'de görülmektedir.

V₂O₅ nanoparçacıkların belirli oranlarda E7 nematik sıvı kristale katılarak elde edilen numunelerin gerçel ve sanal dielektrik sabitleri frekansa ve voltaja bağlı ölçümlerini yapabilmek için birer yüzeyi indium kalay oksit ile iletken haline getirilmiş, ışığı geçiren, düzlemsel (planar) yönelime sahip üst üste iki plakadan oluşan 0.8 µm aralıklı ve 1 cm² etkin alanlı cam hücre satın alınmış (Military University of Technology, Warsaw, Poland) ve kullanılmıştır.

İsim	Yüzde	Faz geçiş sıcaklık aralığı	Molekül yapısı
5CB	51 %	22°C → 35°C	<chem>C7H11</chem> 
7CB	25 %	28°C → 42°C	<chem>C7H15</chem> 
8OCB	16 %	54°C → 80°C	<chem>C8H17O</chem> 
7CT	8 %	130°C → 239°C	<chem>C9H11</chem> 

Şekil 1. E7 Nematik Sıvı Kristal Karışımın Kimyasal Yapısı

V_2O_5 nanoparçacık %0.1, %0.2 ve %0.5 üç farklı oranda alınarak ayrı ayrı E7 nematik sıvı kristale karıştırılmıştır. V_2O_5 nanoparçacık katkılı nematik sıvı kristal karışımlar boş ITO hücrelere 65°C sıcaklıkta kılcal hareket yoluyla doldurulmuştur. Numunelerin doldurulduğu ITO hücrelerin numune doldurmak için açık bırakılan iki kenarı epoksi yapıştırıcı ile kapatılmıştır. Numunelerin ITO hücrelere doldururken 65°C sıcaklık olması, E7 nematik sıvı kristalin nematik-izotropik sıvı faz geçiş sıcaklığında E7'nin daha akıcı olması ve ITO hücreye kılcal hareket yöntemiyle kolaylıkla doldurulabilmesi için yapıldı. Nanoparçacık katkılı sıvı kristal numunelerin doldurulduğu ITO hücrenin yapısı Şekil 2'de görülmektedir.



Şekil 2. ITO Hücre Yapısı

Gösterge sistemlerinde kullanılan sıvı kristallerin dielektrik özelliğini bilmek önemlidir. Dielektrik, gerçel ve sanal kısımlarına bağlı olarak kompleks olarak verilir.

$$\varepsilon^* = \varepsilon' + i\varepsilon'' \quad (1)$$

Burada sırasıyla ε' dielektrik sabitinin gerçel kısmıdır malzemede elektrik yükü ve dolayısıyla enerji depolanmasını göstermektedir. ε'' dielektrik sabitinin sanal kısmıdır malzemedeki elektrik yükü boşalmasını ifade etmektedir.

Dielektrik sabitinin gerçel ve sanal kısmı birbirine bağlı olarak bu şekilde verilmektedir,

$$\varepsilon'' = \varepsilon' \tan \delta \quad (2)$$

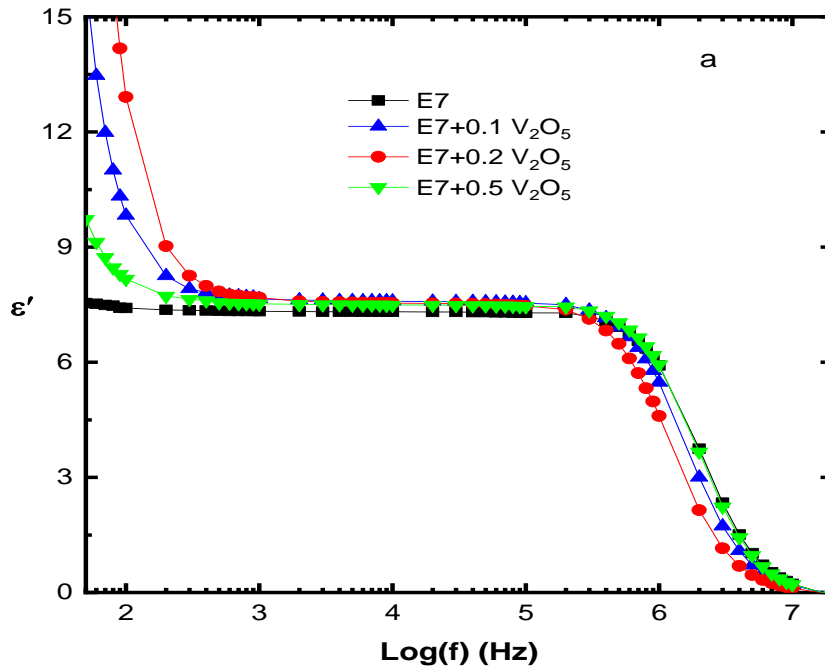
Bu eşitlikteki $\delta = 90 - \varphi$ ile verilir ve φ ise faz açısıdır.

Hazırlanan üç farklı oranda V_2O_5 nanoparçacık E7 nematik sıvı kristale katılanmasıyla elde edilen numunelerin dielektrik değerleri, 100 Hz-20 MHz frekans aralığında, sıfır doğru akım voltajında ve oda sıcaklığında, frekansa bağlı olarak ölçümleri yapıldı. Benzer şekilde hazırlanan numunelerin dielektrik değerleri, 0-40 Volt doğru akım aralığında ve 1 kHz sabit frekans ve oda sıcaklığında HP 4194A empedans analizör ile voltaja bağlı olarak ölçüldü ve elde edilen değerlerin grafikleri üretildi.

BULGULAR

Sentezlenen V_2O_5 nanoparçacık %0.1, %0.2 ve %0.5 oranında E7 nematik sıvı kristaline ayrı ayrı karıştırılarak elde edilen numuneler ITO hücrelere dolduruldu. Numunelerin dielektirik gerçel ve sanal kısmı frekansa ve voltaja bağlı olarak incelendi.

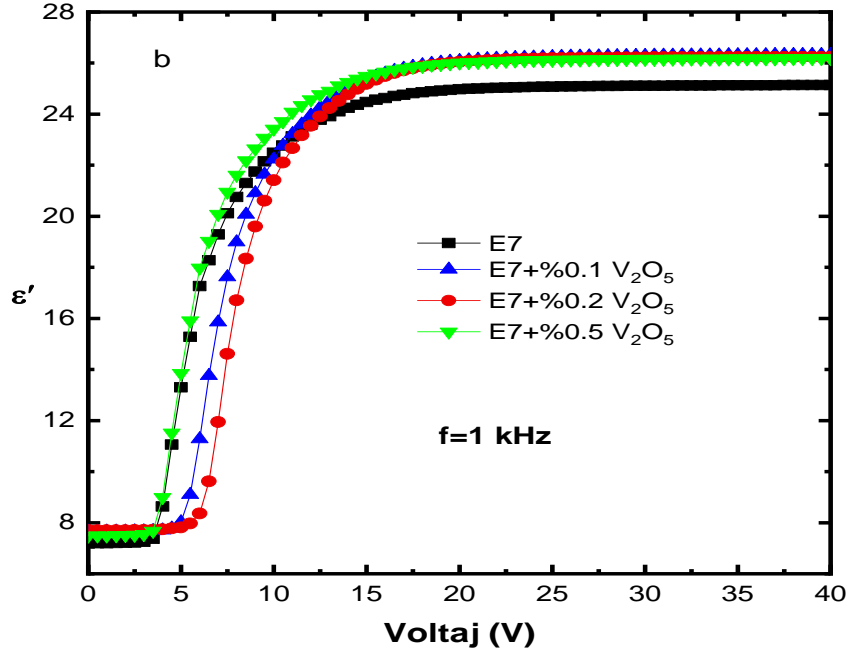
Saf E7 sıvı kristal ve nanoparçacık katkılı sıvı kristal numunelerin dielektirik gerçel kısmının frekansa bağlı değişimi DC 0 V ve AC 0.5 V potansiyel fark uygulanarak oda sıcaklığında empedans analizör ile elde edilen ölçüm sonuçları orjin grafik programı kullanılarak elde edilen grafik Şekil 3'de görülmektedir. Düşük frekanslarda (100 Hz-300 kHz) dielektrik gerçel kısmı hızlıca azalıyor, yani elektrik yük kaçışının arttığı anlaşılmaktadır; sonra 7-8 civarında sabit olarak devam etmektedir. Elektrik yükün şarj olması küçük ve daha büyük frekanslarda azalmaktadır, yaklaşık 500 Hz- 300 kHz frekans aralığında sabit kalmaktadır. Yaklaşık 20 MHz frekansta sıfır olmaktadır.



Şekil 3. Dielektrik Gerçel Kısmı Frekans ile Değişimi

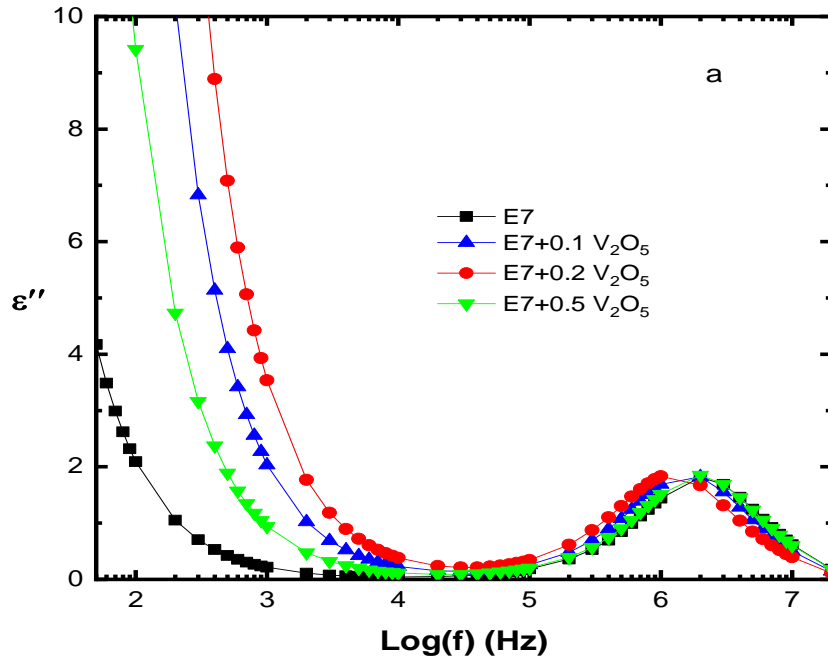
Nematik sıvı kristal ve nanoparçacık karışımli numunelerin dielektirik gerçel kısmının voltaja bağlı değişimi, $f=1$ kHz sabit frekans, AC 0.5 V gerilim uygulanarak oda sıcaklığında empedans analizör ile elde edilen ölçüm sonuçları orjin grafik programı kullanılarak elde edilen grafik Şekil 4'de görülmektedir. Düşük voltajlarda dielektrik gerçel kısmı sabit gibi davranmakta ve yaklaşık 5 V civarında birdenbire büyük bir değere ulaşmakta, yaklaşık 10 volttan sonra sabit gibi çok az artış davranışı sergilemektedir. Bu artış 3-10 Volt DC geriliminde dielektrik gerçel kısmının çok hızlı bir şekilde arttığı, yani elektrik yüklerin plakaları doldurduğu ve elektrik enerjisi depolandığı, daha yüksek voltajlarda sabit kaldığı anlaşılmaktadır. Bu sonuç ise adaptörlerin ve elektrik şarj aletlerinin genel olarak 6-12 voltta tutulması, daha küçük voltajlarda yapılmaması ile uyumludur. Daha yüksek voltajlarda şarj yapılabilir, ancak şarj kabiliyeti pek değişmemektedir ve yüksek voltajlar kullanıcı açısından risk oluşturmaktadır. Bu çalışmada frekans 1 kHz sabit frekans alınarak dielektrik gerçel kısmının voltaja bağlı değişimi incelendi. Elbette ki farklı frekanslarda da aynı araştırma yapılabilir. Ne için 1 kHz frekansta bu araştırma yapıldı denilirse, Şekil 3'de dielektrik gerçel kısmının frekansa bağlı değişim grafiğinde, dielektrik gerçel kısmı yaklaşık 1 kHz ile 0.2 MHz frekans aralığında kararlı bir davranış sergilediği için bu frekans değeri kullanıldı.

Saf E7 nematik sıvı kristal ve nanoparçacık katkılı numunelerin dielektrik sanal kısmının frekansa bağlı değişimi DC 0 V ve AC 0.5 V potansiyel fark uygulanarak oda sıcaklığında empedans analizör ile elde edilen ölçüm sonuçları orjin grafik programı kullanılarak elde edilen grafik Şekil 5'de görülmektedir. Dielektrik sanal kısmı düşük frekanslarda hızlıca azalmakta ve sıfıra yaklaşmakta, yaklaşık 50 kHz frekans civarında artmakta ve 3 MHz frekansta (Gevşeme frekansı - Relaxtion frequency) bir maksimuma ulaşmakta, 20 MHz frekansta sıfır olmaktadır.



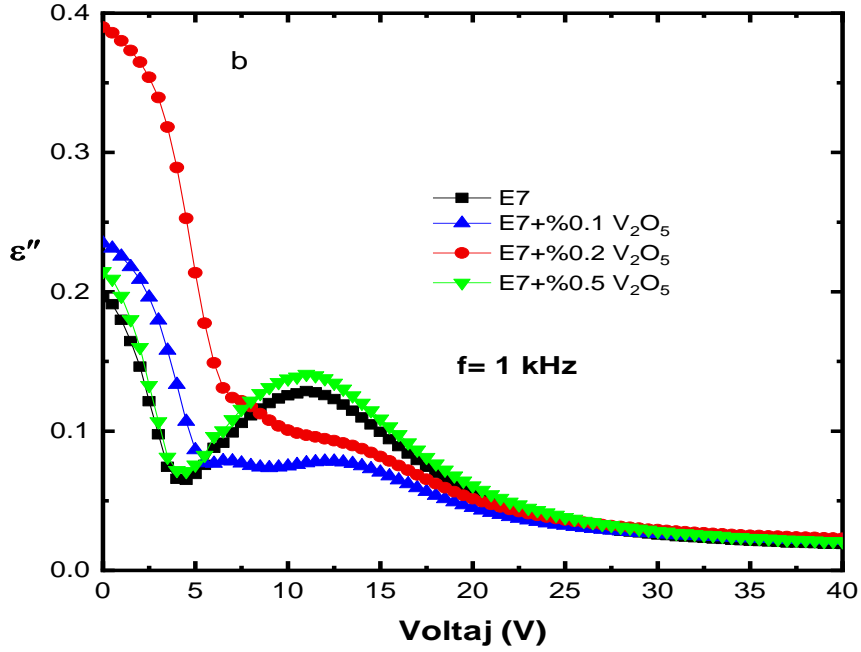
Şekil 4. Dielektrik Gerçel Kısmı Voltaj ile Değişimi

Dielektrik sanal kısmının yüksek değerde olması bu frekanslarda elektrik yük kaçıışı, yani deşarjı büyük miktarda olmakta, tersi durumunda yani dielektrik sanal kısmının düşük olduğu frekanslarda ise elektrik yüklerinin plakalarda tutulduğu, depolandığı durumunu göstermektedir.



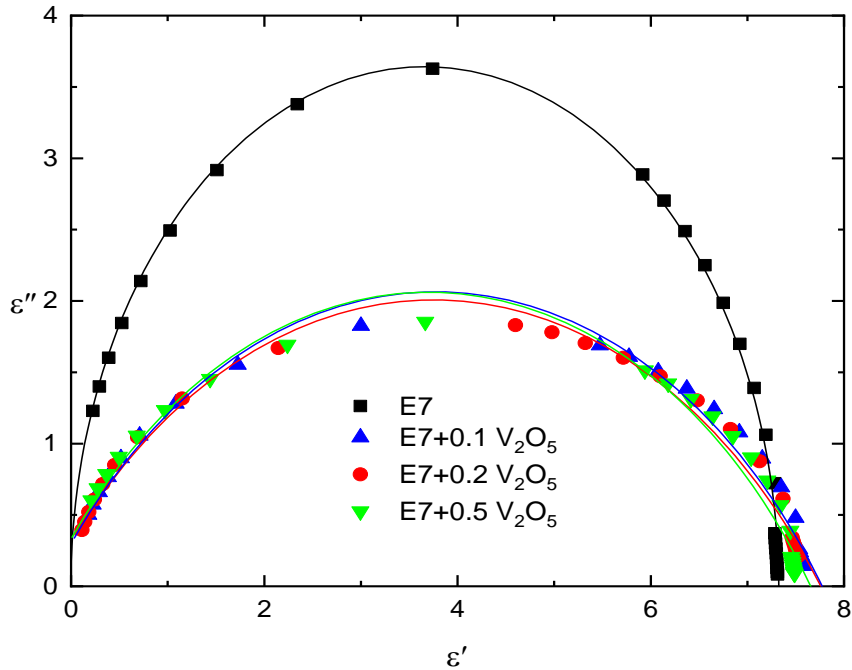
Şekil 5. Dielektrik Sanal Kısmı Frekans ile Değişimi

Nematik sıvı kristal ve nanoparçacık karışımı numunelerin dielektrik sanal kısmının voltaja bağlı değişimi AC 0.5 V gerilim uygulanarak oda sıcaklığında empedans analizör ile elde edilen ölçüm sonuçları orjin grafik programı kullanılarak elde edilen grafik, $f=1$ kHz sabit frekans için, Şekil 6'de görülmektedir. Dielektrik sanal kısmı düşük voltajlarda hızlıca azalmakta, 5 volt civarında artışa geçmekte ve yaklaşık 12 volt'da bir pik yaparak voltajın artmasına bağlı olarak azalarak sifira yaklaşmaktadır.



Şekil 6. Dielektrik Sanal Kısmı Voltaj ile Değişimi

Saf E7 sıvı kristal ve nanoparçacık katkılı sıvı kristal numunelerin dielektrik gerçel kısmı yatay eksen ve sanal kısmı düşey eksen olarak çizilen Cole-Cole grafiği Şekil 7’de görülmektedir. Doğrusal Olmayan Örtük Eğri Uydurma (Nonlinear Implicit Curve Fit) uygulanmıştır. Bu yarım çemberlerin tepe noktası gevşeme frekansını (relaxation frequency) vermektedir. Gevşeme frekansı bütün numunelerde yaklaşık 2 MHz frekansta meydana gelmektedir. Saf E7 nematik sıvı kristalin grafiğinde yarı çemberin yarıçapı daha büyük olmaktadır. Katkı olan V₂O₅ nanoparçacık sıvı kristal hücrede elektriksel yüklerin çabuk boşalmasına engel oluyor şeklinde yorumlanabilir. Vanadyumun elektrik yük ve enerji depolayan aygıtlarda ve lityum pillerde kullanılmasının sebebi bataryanın çabuk boşalmasını engel olmasıdır ki burada elektrik yük taşınmasını ifade eden dielektrik sanal kısmının değerini düşük olması şeklinde ortaya çıkmaktadır. Bu durum Vanadyumun pil ve bataryalarda enerji depolanmasında olumlu etkisinin olduğunu doğrulamaktadır.



Şekil 7. Dielektrik Gerçel ve Sanal Kısmı Cole-Cole Grafiği

TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu çalışmada, vanatyum pentaoksit V_2O_5 nanoparçacık %0.1, %0.2 ve %0.5 oranlarında E7 nematik sıvı kristal ile katkılılandırıldı. Üretilen karışım numuneler ITO hücrelere doldurularak empedans analizör kullanılarak dielektrik sabiti gerçel ve sanal kısmı frekans ve voltaja bağlı olarak oda sıcaklığında incelendi. Dielektrik gerçel kısmı frekansa bağlı olarak değişimi incelendiğinde, düşük frekanslarda hızlıca azalmakta, sonra 7-8 civarında sabit olarak devam etmekte ve daha sonra 300 kHz frekansta azalarak sifıra yaklaşmaktadır. Numunelerin dielektrik gerçel kısmının voltaja bağlı $f=1\text{kHz}$ sabit frekansta değişimi incelendiğinde, düşük voltajlarda sabit gibi davranmakta, yaklaşık 5 volt civarında birdenbire artarak büyük bir değere ulaşmakta ve yaklaşık 10 volttan sonra sabit gibi çok az artış ile değişim göstermektedir. Dielektrik gerçel kısmının voltaja bağlı değişiminde 1kHz sabit frekansta incelenmesinin sebebi, dielektrik gerçel kısmı yaklaşık 1 kHz ile 0.2 MHz arasında karalı bir davranış sergilemektedir. Numunelerin dielektrik sanal kısmının frekansa bağlı değişimi, düşük frekanslarda hızlıca azalmakta ve sifıra yaklaşmakta, yaklaşık 50 kHz frekans civarında artmaya başlamakta ve 2 MHz frekansında bir maksimuma ulaşmakta, sonra azalarak 20 MHz frekansta sifır olmaktadır. Saf sıvı kristal ve nanoparçacık katkılı sıvı kristal numunelerin dielektrik gerçel kısmı yatay eksen ve sanal kısmı düşey eksenini olarak çizilen Cole-Cole grafiği incelendiğinde gevşeme frekansı ve zamanı değişmemektedir. Ancak Coe-Cole grafiğinde yarım çemberlerden saf E7 nematik sıvı kristalin oluşturduğu yarı çemberin yarıçapı daha büyük iken, nanoparçacık katkılı numunelerin yarıçapları daha küçük olmaktadır. Dielektrik kayıp (Dielectric loss) olarak da adlandırılan dielektrik gerçel kısmının nanoparçacık katkılı numunelerde gevşeme frekansında daha düşük olması katkı maddesi olan vanadyum penta oksit nanoparçacığın elektrik yük kaybına veya kaçışına engel olduğu anlamına gelmektedir. Bu sonuç ise Vanadyumun elektrik yük ve enerji depolayan aygıtlarda ve lityum pillerin üretilmesinde kullanılması ile uygunluk içerisinde (Kim vd., 2021).

KAYNAKLAR

- Ahmed, H. A., & Aboelnaga A. (2022). Synthesis and Mesomorphic Study of New Phenylthiophene Liquid Crystals. *Liquid Crystals* 49(6):804–11. <https://doi.org/10.1080/02678292.2021.2008032>
- Bleha, W. P., Lipton, L. T., Wiener-Avneer, E., Grinberg, J., Reif, P. G., Casasent, D., Brown, H. B. & Markevitch B. V. (1978). Application of the Liquid Crystal Light Valve to Real-Time Optical Data Processing. *Optical Engineering* 17(4):371–84. <https://doi.org/10.1117/12.7972245>
- Bronnikov, S., Kostromin S., and Zuev V. (2013). Polymer-Dispersed Liquid Crystals: Progress in Preparation, Investigation, and Application. *Journal of Macromolecular Science, Part B* 52(12):1718–35. <https://doi.org/10.1080/00222348.2013.808926>
- Caputo, R., De Luca, A., De Sio, L., Pezzi, L., Strangi, G., Umeton, C., Veltri, A., Asquini, R., d'Alessandro, A., & Donisi, D., (2009). POLICRYPS: A Liquid Crystal Composed Nano/Microstructure with a Wide Range of Optical and Electro-Optical Applications. *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics* 11(2):24017. <https://doi.org/10.1088/1464-4258/11/2/024017>
- Eskalen, H., Okumuş, M., & Özğan, Ş. (2019). Electro-Optical, Thermal and Dielectric Properties of Ternary Mixture of E7/6CB/6BA Liquid Crystal Mixture Complex. *Optik* 187. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2019.02.119>
- Eskalen, H., Özğan, Ş., Alver, Ü., & Kerli, S. (2015). Electro-Optical Properties of Liquid Crystals Composite with Zinc Oxide Nanoparticles. *Acta Physica Polonica, A*. 127(3). <https://doi.org/10.12693/APhysPolA.127.756>
- Eskalen, H., Özğan, Ş., & Kerli, S. (2019). Synthesis, Characterization of V_2O_5 Nanoparticle and Dispersion of Them into Nematic Liquid Crystal. *Applied Physics A: Materials Science and Processing* 125(12). <https://doi.org/10.1007/s00339-019-3157-9>.
- Eskalen, H. (2020). "Influence of Carbon Quantum Dots on Electro-Optical Performance of Nematic Liquid Crystal." *Applied Physics A* 126(9):708. <https://doi.org/10.1007/s00339-020-03906-7>.
- Eskalen, H., Kerli, S., & Özğan, Ş. (2017). Hydrothermally Produced Cobalt Oxide Nanostructures at Different Temperatures and Effect on Phase Transition Temperature and Threshold Voltage of Nematic Liquid Crystal Host. In K. Maaz (ed.) *Cobalt*. s 71-85, IntechOpen.
- Jánossy, I. (1994). "Molecular Interpretation of the Absorption-Induced Optical Reorientation of Nematic Liquid Crystals." *Physical Review E* 49(4):2957. <https://doi.org/10.1103/PhysRevE.49.2957>
- Khoo, I. (2022). *Liquid Crystals*. John Wiley & Sons.

- Kim, A., Kalita, G., Kim, J.H., & Patel, R. (2021). Recent Development in Vanadium Pentoxide and Carbon Hybrid Active Materials for Energy Storage Devices. *Nanomaterials* 11(12):3213. <https://doi.org/10.3390/nano11123213>
- Köysal, O., Okutan, M., & Gökçen, M. (2011). Investigation of Dielectric Properties and Diffraction Efficiency Enhancements Caused by Photothermal Effect in DR9 Dye-Doped Nematic Liquid Crystal. *Optics Communications* 284(20): 4924–28. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2011.06.046>
- Lee, W., & Chiu, C. (2001). Observation of Self-Diffraction by Gratings in Nematic Liquid Crystals Doped with Carbon Nanotubes. *Optics Letters* 26(8):521–23. <https://doi.org/10.1364/OL.26.000521>
- Lee, W., Gau, J. S., & Chen, H. Y. (2005). Electro-Optical Properties of Planar Nematic Cells Impregnated with Carbon Nanosolids. *Applied Physics B* 81(2):171–75. <https://doi.org/10.1007/s00340-005-1914-2>
- Lencer, D., Salinga, M., & Wuttig, M. (2011). Design Rules for Phase-change Materials in Data Storage Applications. *Advanced Materials* 23(18):2030–58. <https://doi.org/10.1002/adma.201004255>
- Li, X., Yang, C., Wang, Q., Jia, D., Hu, I., Peng, Z., & Xuan, L. (2013). Enhanced Birefringence for Metallic Nanoparticle Doped Liquid Crystals. *Optics Communications* 286:224–27. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2012.09.001>
- Lu, Y., & Zhou, X. (2018). Synthesis and Characterization of Nanorod-Structured Vanadium Oxides. *Thin Solid Films* 660:180–85. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2018.06.020>
- Matharu, A. S., Jeeva, S., & Ramanujam, P. S. (2007). Liquid Crystals for Holographic Optical Data Storage. *Chemical Society Reviews* 36(12):1868–80. <https://doi.org/10.1039/B706242G>
- Meier, G., Sackmann, E., & Grabmaier, J. G. (2012). *Applications of Liquid Crystals*. Springer Science & Business Media.
- Okutan, M., Köysal, O., San, S. E., & Köysal, Y. (2012). Electrical Parameters of Different Concentrations of Methyl Red in Fullerene Doped Liquid Crystal. *International Scholarly Research Notices*. <https://doi.org/10.5402/2012/596125>
- Özgan, Ş., Eskalen, H. & Tapkıranlı, Y. (2018). Thermal and Electro-Optic Properties of Graphene Oxide-Doped Hexylcyanobiphenyl Liquid Crystal. *Journal of Theoretical and Applied Physics* 12(3):169–76. <https://doi.org/10.1007/s40094-018-0307-y>.
- Özgan, Ş., & Okumuş, M. (2011). Thermal and Spectrophotometric Analysis of Liquid Crystal 8CB/8OCB Mixtures. *Brazilian Journal of Physics* 41(2–3):118–22. <https://doi.org/10.1007/s13538-011-0034-1>.
- Shen, W., Zhang, H., Miao, Z. & Ye, Z. (2023). Recent Progress in Functional Dye-Doped Liquid Crystal Devices. *Advanced Functional Materials* 33(6):2210664. <https://doi.org/10.1002/adfm.202210664>
- Stolpe, M. (2002). Determinants of Knowledge Diffusion as Evidenced in Patent Data: The Case of Liquid Crystal Display Technology. *Research Policy* 31(7):1181–98. [https://doi.org/10.1016/S0048-7333\(01\)00192-5](https://doi.org/10.1016/S0048-7333(01)00192-5)
- Uruş, S., Çaylar, M., Eskalen, H., & Özğan, Ş. (2022). Synthesis of GO@ Fe₃O₄@ TiO₂ Type Organic–Inorganic Nanohybrid Material: Investigation of the Effect of Nanohybrid Doped Liquid Crystal E7 and the Photocatalytic Degradation of Ciprofloxacin. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics* 33(7):4314–29. <https://doi.org/10.1007/s10854-021-07625-4>
- Wang, Z., Xu, T., Noel, A., Chen, Y., & Liu, T. (2021). Applications of Liquid Crystals in Biosensing. *Soft Matter* 17(18):4675–4702. <https://doi.org/10.1039/D0SM02088E>
- Wu, K., Sun, X., Duan, C., Gao, J., & Wu, M. (2016). Vanadium Oxides (V₂O₅) Prepared with Different Methods for Application as Counter Electrodes in Dye-Sensitized Solar Cells (DSCs). *Applied Physics A* 122:1–6. <https://doi.org/10.1007/s00339-016-0317-z>



Kahramanmaraş Sütçü İmam University

Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 30.08.2023
Kabul Tarihi : 05.12.2023

Received Date : 30.08.2023
Accepted Date : 05.12.2023

CNC MAKİNESİ KESME PARAMETRELERİNİN CEVİZ ODUNUNUN YÜZEY PÜRÜZLÜLÜĞÜ ÜZERİNE ETKİSİNİN ARAŞTIRILMASI

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF CNC MACHINE CUTTING PARAMETERS ON THE SURFACE ROUGHNESS OF WALNUT WOOD

Osman KABA¹ (ORCID: 0000-0001-5627-8966)

Bekir Cihad BAL^{2*} (ORCID: 0000-0001-7097-4132)

¹ Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Malzeme Bilimi ve Müh. ABD, Kahramanmaraş/Türkiye

² Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Teknik Bilimler MYO, Malzeme Bölümü, Kahramanmaraş/Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Bekir Cihad BAL, bcbal@hotmail.com

ÖZET

Ceviz, sapelli ve sarıçam gibi bazı ağaç türleri, ahşap yüzey oyma işlemlerinde kullanılan ağaç türlerindedir. Günümüzde, ahşap yüzey oyma işlemleri manuel olarak veya CNC makinelerinden yararlanılarak yapılabilmektedir. Bu çalışmada, CNC tezgâhında farklı besleme hızı, bıçak adımı ve bıçak motoru devri kullanılarak masif ağaç malzemenin yüzey pürüzlülüğü ve işlem süresi belirlenmeye çalışılmıştır. Masif ağaç malzemenin önemli kalite özelliklerinden birisi yüzey pürüzlülüğüdür. Ayrıca, CNC makinelerinde her bir parça için işlem süresi toplam kapasiteyi etkileyen önemli bir parametredir. Bu çalışmanın amacı; masif ağaç malzemenin CNC makineleri ile şekillendirilmesi esnasında, kesme parametrelerinin yüzey pürüzlülüğü ve işlem süresi üzerine etkisini belirlemektir. Çalışma sonunda; bıçak motoru hızının artması ile Ra , Rp ve Rv değerlerinde bir düşüş olduğu görülmüştür. Fakat bıçak adımı ve besleme hızının artmasıyla yüzey pürüzlülüğünün arttığı belirlenmiştir. Genel olarak, bıçak motoru hızı arttıkça ve bıçak adımı ve besleme hızı azaldıkça yüzey pürüzlülüğü azalmakta olduğu ve bıçak adımı ve besleme hızı azaldıkça işlem süresinin arttığı tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Bilgisayar destekli üretim, kesme parametreleri, mobilya, masif ceviz odunu

ABSTRACT

Some wood species such as walnut, sapele and Scots pine are used in wood carving processes. Today, wooden surface carving operations can be done manually or using CNC machines. In this study, it was tried to determine the surface roughness and processing time of solid wood material by using different spindle speed, step over and feed rate on the CNC machine. One of the important quality features of solid wood material is surface roughness. The processing time for each part in CNC machines is an important parameter that affects the total capacity. The aim of this study is to determine the effect of tool path settings on surface roughness and processing time during the processing of wood material with CNC machines. At the end of the experiments; it is seen that there is a decrease in the Ra , Rp and Rv in general with the increase of spindle speed. However, it is determined the roughness increases with the increase of step over and feed rate. In general, it has been found the surface roughness decreases as the spindle speed increases, and the stepover and feed rate decrease, and the processing time increases as the step over and feed rate decrease.

Keywords: Computer added manufacture, cutting parameters, furniture, solid walnut wood

GİRİŞ

Ahşap malzeme işleme makineleri, mobilya endüstrisinde önemli bir yer tutmaktadır. Bu makinelerin en önemlilerinden birisi CNC makineleridir. CNC makineleri ile işlem yapabilmek için çeşitli kesme parametreleri ayarlanmalıdır. Bunlar; bıçak motoru devri, hareket hızı, bıçak yanal ilerleme miktarı, dalma hızı, işleme stratejisi vs. dir. Ayrıca, işlenen ahşap malzemenin yoğunluğunun, rutubetinin ve bıçak dalma derinliğinin değişmesi veya CNC makinelerinde yapılan bu ayarlamaların değişmesi ile malzemenin yüzey kalitesi değişmektedir (Sofuoğlu 2008; Karagöz 2010; Koç vd., 2017; Bal ve Gündüş 2020; Singer ve Özşahin 2022; Demir vd., 2022; Çakıroğlu vd., 2022).

CNC makineleri masif ağaç malzemenin ve ahşap esaslı kompozit levhaların, özellikle lif levhanın yüzeyinin şekillendirilmesinde orta ve büyük ölçekli işletmelerde oldukça fazla kullanılmaktadır. CNC makinalarında işlem gören, özellikle yüzey süslemeciliğinde kullanılan bazı ağaç türleri şunlardır; Sarıçam (*Pinus sylvestris*), Ceviz (*Juglans regia*), Audire (*Guarrea Africana Pellegr*), Maun (*Khaya sp.*), İhlamur (*Tilia cordata*) (Kaba 2022).

Ağaç işleri sektöründe, masif ağaç malzeme ve ahşap esaslı kompozit malzemelerin üretiminde ve işlenmesinde yüzey kalitesinin her yönden önemli olması nedeniyle, yüzey pürüzlülüğüyle ilgili birçok çalışma yapılmıştır. Teknolojinin ilerlemesiyle birlikte üretimde hassasiyet ve beklentiler artmıştır. Bu konuyla ilgili olarak yapılan bazı çalışmalar bulunmaktadır. Örneğin; Cutri vd., (1991) ahşap malzemelerin planlanmış ve şekillendirilmiş parçaların üretimi sırasında makinadan etkilendiğini belirttiği çalışmada işlem sırasında yapılan ölçümlerde dokunmalı ölçüm sisteminin makinanın titreşiminden ve ilerleme hızından etkilendiğini belirterek lazer ölçüm sistemini kullanmaya başlamıştır. Baykan (1996) nem oranı, kesme yönü, planlamaya ve zımparalama işlemlerinden geçen malzemelerin yüzey pürüzlülüğünü araştırmış ve düşük rutubet miktarındaki parçada ve düşük besleme hızında daha kaliteli yüzeyler elde edildiği görülmüştür. Örs ve Baykan (1999) tarafından planlama da kesme derinliği, kesme sayısı ve ilerleme hızının yüzey pürüzlülüğüne etkisinin araştırıldığı çalışmada, mobilya üretiminde fazlaca kullanılan meşe (*Quercus petraea* L.) ve akasya (*Robinia pseudoacacia* L.) ağaç türleri kullanılmıştır. Testler için, 4 ve 2 bıçaklı planya, 9,5 mm/dk ve 4,2 mm/dk hareket hızı ve 1 mm kesme derinliği uygulama amaçlı numuneler hazırlanmıştır. Yapılan pürüzlülük ölçümlerine göre, akasyanın meşeye oranla daha düzgün yüzeyde olduğu, kesiş derinliği ve ilerleme hızı azaldıkça, kesici sayısı fazlaştıkça yüzey kalitesinin arttığı görülmüştür.

Mitchell ve Lemaster'in (2002), akçağaç test örneklerinin CNC makinesi ile farklı yüzeylerde, farklı kesici devir sayısı, işleme yönü ve farklı kesici uçlar ile yaptığı araştırmada, liflere paralel işlemenin, liflere dik işlemeye göre daha düşük yüzey pürüzlülük değeri verdiği gözlemlenmiştir. İlerleme hızının artması ile yüzey kalitesinin azaldığı görülmüştür. Sofuoğlu (2016) sarıçam odunundan hazırlanmış masif panel test örnekleri üzerinde, CNC makinesinde işlemede en uygun kesme parametrelerini belirlemek amacı ile Taguchi tasarım yöntemini kullanmıştır. Bu uygulamada, 5 işleme parametresinin (kesiş derinliği, ilerleme hızı, devir sayısı, işleme stratejisi ve kesici tipi) yüzey düzgünlüğü üzerine etkisi incelenmiştir. En uygun şartı sağlayan işleme sinyal/gürültü oranı (S/N) kullanılmış ve incelenmiştir. En iyi pürüzlülük değeri R_z ve R_a için 1 numaralı kesici, 1000 mm/dak ilerleme hızında, 16 000 dev/dak sayısında, raster işleme stratejisi ile elde edilmiştir. Testlerin sonuçlarına göre başlangıç parametreleri ele alındığında R_z parametresinde 2,0 kat ve R_a parametresinde 2,8 kat azalma görülmüştür.

Yapılan bir başka çalışmada ise, CNC makinesi ile işlemede ceviz ve dişbudak ağacı kerestesi kullanılmıştır. Çalışmada, üç farklı kesici takım çapı (3 mm, 6 mm ve 8 mm), 3 farklı iş mili hızı (12000 rpm, 15000 rpm ve 18000 rpm) ve 3 farklı ilerleme hızının (3 m/dk, 6 m/dk ve 9 m/dk) kesme koşulları olarak denemeleri yapılmıştır. Bu çalışmada aynı zamanda, CNC işleminden hemen sonra ölçülen enerji tüketimi ve işlem süresi değerleri ile testlerden elde edilen yüzey pürüzlülüğü ve temas açısı değerleri kullanılarak, yapay sinir ağı (YSA) analizleri gerçekleştirilmiştir. Çalışma sonunda elde edilen verilere; çalışmada kullanılmayan ara kesme koşullarına karşılık gelen çıkış değerleri de başarılı bir şekilde tahmin edilmiştir (Çakıroğlu vd., 2022).

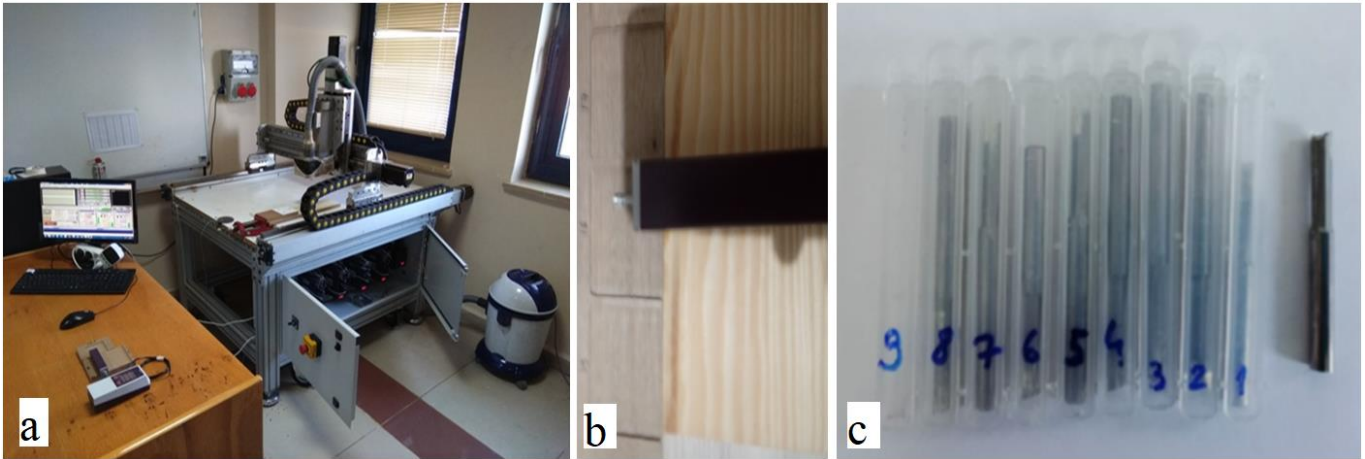
CNC makinelerinde işlem yapabilmek için çeşitli kesme parametrelerinin iyi bir şekilde ayarlanması gerekmektedir. Bu kesme parametrelerinin değişmesi ile CNC makinesinde işlem gören parça için yüzey pürüzlülüğü ve işlem süresi de değişkenlik göstermektedir. Bu çalışmanın amacı, CNC makinesinin farklı takım yolu ayarlarının, cep işleme yöntemi ile işlenen ceviz odunun yüzey pürüzlülüğü ve parça işleme esnasındaki işlem süresi üzerine etkisini belirlemektir.

MATERYAL VE METOT

Materyal

Bu çalışmada, ceviz odunu kullanılmıştır. Kullanılan ceviz odununun ortalama yoğunluk değeri 610 kg/m^3 ve rutubet değeri % 8,31'dir. Ceviz odunu çalışmanın amacına uygun olarak oymacılıkta fazla kullanılan bir tür olduğu için seçilmiştir. Denemelerde kullanılan ceviz odunu özel bir işletmeden, biçilmiş ve kurutulmuş kereste olarak tedarik edilmiştir. Elde edilen kerestelerden $17 \times 110 \times 800 \text{ mm}$ (kalınlık x genişlik x uzunluk) 10 adet test örneği hazırlanmıştır.

Testlerin yapılmasında, laboratuvar ölçekli bir CNC makinesi kullanılmıştır. Makine, alüminyum konstrüksiyona sahip bir makinedir (Şekil 1-a). Makine 3 eksenli bir makinedir ve hareket motorları 750 W Servo Motordur. CNC makinesinin bıçak motor devri maksimum 18 000 d/dak'dir ve 2.2 kw gücünde ve hava soğutmalıdır. Makine bir bilgisayar ile ve Mach 3 programı kullanılarak kontrol edilmiştir.



Şekil 1. CNC Makinesi Ve Bilgisayar Kontrolü (a), Test Örneği Ve Pürüzlülük Ölçümü (b) ve Bıçaklar (c)

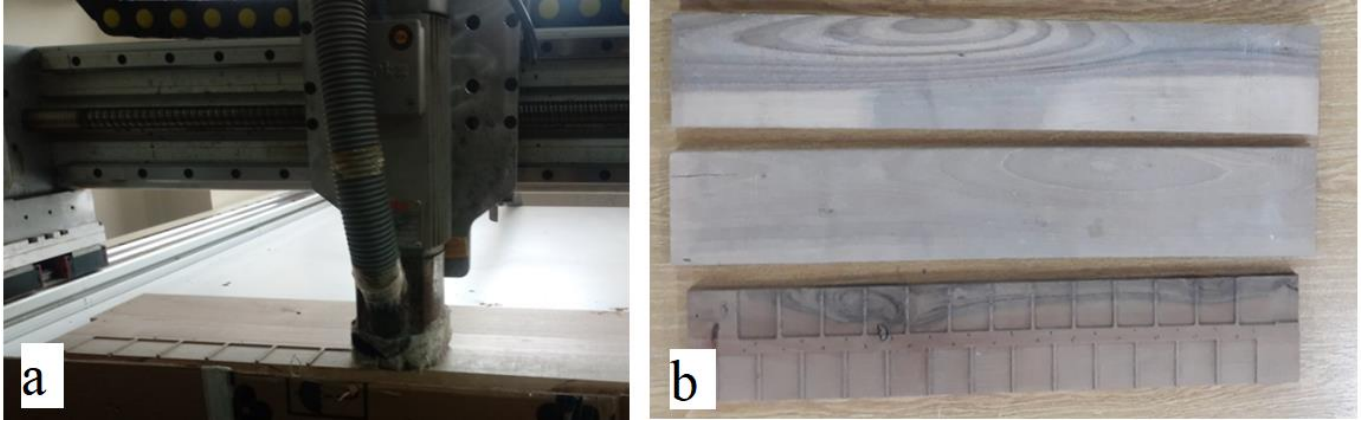
Pürüzlülüğü tespit edebilmek için, Mitutoyo SJ-210 model cihaz kullanılmıştır (Şekil 1-b). Pürüzlülük ölçüm cihazı ayarları; λc : 2,5 mm, stylus ucu açısı 60° , sürücü ünite hızı 0,75 mm/sn.

Testlerde, ortalama pürüzlülük (Ra), maksimum vadi derinliği (Rv) ve maksimum tepe yüksekliği (Rp) olan üç pürüzlülük değeri belirlenmiştir. CNC makinesinde masif test numunelerinin şekillendirilmesinde 2 kanatlı bir bıçak kullanılmıştır. Testlerde, Şekil 1-c'de görülen, 6 mm çapında, karbür çeliğinden üretilmiş bıçaklar kullanılmıştır. Her 3 grup için 1 bıçak olmak üzere toplam 27 grup için 9 adet bıçak kullanılmıştır.

Metot

Yapılan bu çalışmada, pürüzlülük testlerinin yapılabilmesi için 10 adet numune hazırlanmıştır. Her biri numune üzerinde 27 adet farklı kod dosyası ile cep boşaltma denemesi yapılmıştır. Test örneklerine 50 x 50 mm ölçüsünde, CNC ile 3 mm derinlikte cep boşaltma işlemi yapılmıştır (Şekil 2). Daha sonra bu alanın 4 farklı noktasından yüzey pürüzlülüğü ölçülmüştür. Testlerden elde edilen veriler excel programında işlenmiş ve bir istatistik programı ile varyans analizi testi yapılmıştır.

Test numunelerinin yoğunlukları ve rutubetleri TS 2471 ve TS 2472'ye göre belirlenmiştir. Pürüzlük ölçümleri ise TS 971'e göre yapılmıştır. Yüzey pürüzlülüğü, test örneği üzerinde işlenen alanın yüzey pürüzlülüğünün cihaz ile ölçülmesi için boy yönünde iki eşit parçaya bölünmüştür. İki eşit parçaya ayrılan her bir modelin test örneğinin bir tarafında 13 diğer tarafında 14 cep boşaltma yapılmıştır. Ölçümler, CNC makinesinin işleme yönüne (bıçak izine) dik bir doğrultuda yapılmıştır. Her bir cep içerisinde 4 defa pürüzlülük ölçümü yapılmış ve bu ölçümlerin ortalama değerleri alınmıştır.



Şekil 2. Test Örneklerinin CNC Makinesinde İşlenmesi (a) Ve Test Örnekleri (b)

Yüzey pürüzlülüğü ve işlem süresi üzerine etkisi araştırılan takım yolu ayarları; 3 farklı bıçak motoru devri, 3 farklı besleme hızı ve 3 farklı bıçak adımıdır. Tablo 1’de verilen tüm gruplar (3 x 3 x 3 = 27 grup) denenmiştir. Takım yolu ayarlarının oluşturulmasında ArtCAM programı kullanılmıştır. Bu çalışma için 27 farklı takım yolu ayarı (27 farklı grup) kodlanmıştır.

Tablo 1. Deneme Planı Takım Yolu Ayarları

Faktör	Seviye 1	Seviye 2	Seviye 3
Bıçak motoru devri	8000 d/dk	12000 d/dk	16000 d/dk
Besleme hızı	1000 mm/dk	1500 mm/dk	2000 mm/dk
Bıçak adımı	1.5 mm	3.0 mm	4.5 mm

BULGULAR VE TARTIŞMA

Bulgular

Bu çalışmada, denemeler sonunda elde edilen bulgular Tablo 2’de gösterilmiştir. Tabloda verilen değerler incelendiğine, besleme hızının artması ile genel olarak pürüzlülük değerlerinde (Ra , Rp , Rv) bir artış olduğu görülmektedir. Ayrıca, daha önce yapılan çalışmalarda (Sofuoğlu 2008; De Deus vd., 2015; Koç vd., 2017; Bal ve Gündes 2020; Singer ve Özşahin 2022) motor devrinin artması ile genel olarak pürüzlülük değerlerinin azaldığı rapor edilmiştir. Fakat masif malzemede ceviz odununda bulunan iğne çizdiği şeklindeki trahelerin fazla olması sebebiyle bazı grupların verilerinde literatüre göre küçük farklılıklar oluşmuştur.

Tablo 2’de verilen değerlere göre; 8000 devirdeki motor hızı dikkate alındığında 2000 mm/dk besleme hızında ve 4.5 mm bıçak adımında Ra değeri 10,53 μm olarak en yüksek değeri verirken, 1000 mm/dk besleme hızı ve 1,5 mm bıçak adımı 6,71 olarak en düşük değeri vermiştir. Rp değeri için 2000 mm/dk besleme hızı ve 4,5 mm bıçak adımı 29,77 ile en yüksek değeri sağlarken, 2000 mm/dk besleme hızı 1,5 mm bıçak adımı 16,85 ortalama ile en düşük değeri vermiştir. Rv değerinde ise 1000 mm/dk besleme hızı ve 3 mm bıçak adımıyla 56,13 μm değeriyle en yüksek sonuç verirken, 1000 mm/dk besleme hızı 4,5 mm bıçak adımıyla 45,32 μm değeriyle en düşük sonucu vermiştir.

Bıçak motor devrinin 12 000 d/dk, olduğu pürüzlülük test sonuçları dikkate alındığında 2000 mm/dk besleme hızında ve 4.5 mm bıçak adımında Ra değeri 8,63 μm olarak en yüksek sonuç verirken, 1000 mm/dk besleme hızı ve 1,5 mm bıçak adımı 4,67 μm olarak en düşük değeri vermiştir. Rp değeri için 2000 mm/dk besleme hızı ve 4,5 mm bıçak adımı 25,87 μm ile en yüksek değeri sağlarken, 1000 mm/dk besleme hızı 1,5 mm bıçak adımı 11,78 μm ortalama ile en düşük değeri vermiştir. Rv değerine bakacak olursak 2000 mm/dk besleme hızı ve 3 mm bıçak adımıyla 50,84 μm değeriyle en yüksek sonuç verirken, 1000 mm/dk besleme hızı 1,5 mm bıçak adımıyla 35,43 μm değeriyle en düşük sonucu vermiştir.

Bıçak motor hızının 16 000 d/dk olduğu gruplarda ise en küçük ortalama pürüzlülük değeri 1000 mm/dk besleme hızında ve 1,5 mm bıçak adımında 4,55 μm olarak ölçüldüğü, en yüksek pürüzlülük değerinin ise 2000 mm/dk besleme hızında ve 4,5 mm bıçak adımında 7,62 μm olarak ölçüldüğü görülmektedir. En küçük R_p değeri 4,55 μm ve en küçük R_v değeri ise 11,20 μm olarak 1,5 mm bıçak adımı ve 1000 mm/dk besleme hızında ölçülmüştür. En büyük R_p değeri 22,40 μm ve R_v değeri ise 62,39 μm olarak 4,5 mm bıçak adımı ve 2000 mm/dk besleme hızında ölçülmüştür.

Tablo 2. Pürüzlülük Ve İşlem Süresine Ait Ortalama Değerler (Kaba, 2022)

Besleme hızı mm/dk	Bıçak adımı mm	Bıçak motoru devri (d/dk)											
		8000				12000				16000			
		R_a	R_p	R_v	Süre	R_a	R_p	R_v	Süre	R_a	R_p	R_v	Süre
			(μm)		(sn)		(μm)		(sn)		(μm)		(sn)
1000	1,5	6,71	17,20	49,12	113,8	4,67	11,78	35,43	113,6	4,55	11,20	34,04	113,5
	3,0	8,57	23,14	56,13	74,2	6,19	16,70	42,90	74,0	6,06	15,96	41,89	74
	4,5	7,43	23,47	45,32	60,8	5,69	17,18	36,63	61,0	5,79	16,30	38,84	60,8
1500	1,5	8,13	20,26	52,74	81,9	5,57	14,69	39,09	81,8	5,11	12,15	37,64	82
	3,0	9,36	26,09	54,47	55,6	7,06	19,64	45,43	55,8	5,82	15,79	38,49	55,5
	4,5	9,31	27,36	51,59	46,6	7,26	21,23	45,49	46,9	6,15	17,94	40,99	46,6
2000	1,5	7,30	16,85	47,89	66,6	6,86	16,89	45,17	66,6	6,07	14,74	43,03	66,3
	3,0	8,99	22,92	52,91	46,6	8,49	24,66	50,84	46,2	7,45	19,17	48,42	46,3
	4,5	10,53	29,77	54,70	39,8	8,63	25,87	50,18	39,8	7,62	22,40	62,39	39,7

Motor devri, bıçak adımı ve besleme hızının R_a , R_p ve R_v pürüzlülük değeri üzerine ve ayrıca işlem süresi üzerine etkisini gösteren ANOVA testi sonuçları aşağıda Tablo 3’de verilmiştir. Çizelge incelendiğinde her üç faktörün de R_a , R_p ve R_v değeri üzerine etkisinin çok önemli ($P < 0.001$) olduğu görülmektedir (R_v değeri üzerine bıçak adımının etkisi hariç). Ayrıca, motor devri ve besleme hızı etkileşiminin de önemli ($P < 0.05$) bir faktör olduğu belirlenmiştir. Diğer etkileşimlerin önemsiz olduğu görülmektedir. Ayrıca, işlem süresi üzerine, motor devrinin etkisinin istatistiksel olarak önemsiz olduğu (NS) ancak besleme hızı ve bıçak adımının etkisinin çok ileri düzeyde ($P < 0.001$) etkili olduğu belirlenmiştir. Ayrıca, etkileşimler incelendiğinde sadece besleme hızı-bıçak adımı etkileşiminin işlem süresi üzerine etkili olduğu ($P < 0.001$) tespit edilmiştir.

Tablo 3. Pürüzlülük Parametreleri Ve Süre İçin ANOVA Testi F Değeri Ve Önem Düzeyi Verileri

Varyans Kaynağı	SD	R_a		R_p		R_v		Süre	
		F değeri	Önem düzeyi	F değeri	Önem düzeyi	F değeri	Önem düzeyi	F değeri	Önem düzeyi
Motor devri (MD)	2	64,0	0,000	79,44	0,000	10,6	0,000	2,469	0,087
Besleme hızı (BH)	2	33,5	0,000	36,20	0,000	8,0	0,000	128699	0,000
Bıçak adımı (BA)	2	29,5	0,000	82,42	0,000	3,7	0,027	193293	0,000
MD * BH	4	3,0	0,020	2,82	0,026	2,1	0,085	0,887	0,472
MD * BA	4	0,2	0,921	1,36	0,247	1,0	0,426	1,121	0,347
BH * BA	4	1,9	0,105	3,13	0,015	1,6	0,175	7746,3	0,000
MD*BH*BA	8	0,7	0,698	0,76	0,642	0,3	0,972	0,92	0,500

Tablo 4’de verilen Duncan testi sonuçlarına göre, motor devri yükseldikçe R_a değerinin de azaldığı tespit edilmiştir. Motor devri ile R_a değeri ters orantılıdır. Bulunan değerlere göre besleme hızı arttıkça R_a değeri de artmaktadır. Besleme hızı ile R_a değeri doğru orantılıdır. Ayrıca, bıçak adımı arttıkça R_a değeri de artmaktadır. Bıçak adımı ile R_a değeri arasında pozitif artan bir ilişki olduğu belirlenmiştir.

Tablo 4. R_a Değerine Etki Eden Motor Devri, Bıçak Adımı Ve Besleme Hızına Dair Duncan Testi Sonuçları

Bıçak Motor devri (dv/dk)			Besleme hızı (mm/dk)			Bıçak adımı (mm)		
	N	R_a (μm)		N	R_a (μm)		N	R_a (μm)
16000	90	6,06A	1000	90	6,18A	1,5	90	6,10A
12000	90	6,71B	1500	90	7,08B	3,0	90	7,55B
8000	90	8,48C	2000	90	7,99C	4,5	90	7,59B

Bıçak motor devri, bıçak adımı ve besleme hızının R_p değeri üzerine etkisine ilişkin gruplar arası farkları gösteren Duncan testi sonuçları Tablo 5’de verilmiştir. Bu sonuçlara göre motor devrinin azaldıkça ve besleme hızı ve bıçak adımı arttıkça R_p değerinin arttığı tespit edilmiştir. R_p değeri ile motor devri ters orantılı, ancak, besleme hızı ve bıçak adımı ile doğru orantılıdır.

Tablo 5. R_p Değerine Etki Eden Motor Devri, Bıçak Adımı Ve Besleme Hızına Dair Duncan Testi Sonuçları

Bıçak Motor devri (d/dk)			Besleme hızı (mm/dk)			Bıçak adımı (mm)		
	N	R_p		N	R_p		N	R_p
16000	90	16.18A	1000	90	16.98A	1,5	90	15.22A
12000	90	18.73B	1500	90	19.46B	3,0	90	20.65B
8000	90	23.62C	2000	90	22.09C	4,5	90	22.67C

Bıçak motoru devri, besleme hızı ve bıçak adımının R_v değeri üzerine etkisine ilişkin gruplar arası farklılıkları gösteren Duncan testi sonuçları aşağıdaki Tablo 6’da gösterilmiştir. Bu sonuçlara göre bıçak motor devri azaldıkça, besleme hızı ve bıçak adımı arttıkça R_v değeri artış göstermektedir. Diğer bir deyişle bıçak motoru devri azaldıkça, besleme hızı arttıkça ve bıçak adımı büyüdükçe işlenen ceviz ağacı kerestesinin yüzeyi daha pürüzlü bir hale gelmektedir.

Tablo 6. R_v Değerine Etki Eden Motor Devri, Bıçak Adımı Ve Besleme Hızına Dair Duncan Testi Sonuçları

Bıçak Motor devri (d/dk)			Besleme hızı (mm/dk)			Bıçak adımı (mm)		
	N	R_v		N	R_v		N	R_v
16000	90	42,86A	1000	90	42,25A	1,5	90	42,68A
12000	90	43,46A	1500	90	45,10A	3,0	90	47,34B
8000	90	51,64B	2000	90	50,61B	4,5	90	47,94B

İşlem süresi üzerine etki eden değişkenlerin çoklu ayırım testi sonuçları Tablo 7’de verilmiştir. Tablo 7 incelendiğinde motor devrinin işlem süresi üzerine etkisine ilişkin çok küçük farklılıklar bulunmaktadır. Tablo incelendiğinde besleme hızı arttıkça işlem süresinin azaldığı belirgin bir şekilde tespit edilmiştir. Bu çizelgeye göre bıçak adımı miktarı arttıkça işlem süresinin istatistiksel olarak önemli derecede azaldığı da belirlenmiştir. Bu çalışma planlanırken, işlem süresi üzerine motor devrinin, etkileri olamayacağı ve bıçak adımı ve besleme hızının ise etkili olabileceği düşünülmüştür. Bu nedenle elde edilen işlem süresi sonuçları beklenen bir sonuçtur. Duncan testi sonuçlarına göre; bu çalışma kapsamında denemeleri yapılan 1.5, 3 ve 4.5 mm bıçak adımı miktarlarının işlem süresi gruplarının hepsi birbirlerinden farklı olmuştur.

Tablo 7. İşlem Süresine Etki Eden Motor Devri, Bıçak Adımı Ve Besleme Hızına Dair Duncan Testi Sonuçları

	Bıçak motoru devri (d/dk)		Besleme hızı (mm/dk)			Bıçak adımı (mm)		
	N	Süre	N	Süre	N	Süre		
8000	90	65,2A	1000	90	83,1A	1,5	90	87,3A
12000	90	65,1A	1500	90	61,4B	3,0	90	58,8B
16000	90	64,9A	2000	90	50,9C	4,5	90	48,9C

Tartışma

CNC makineleri ile yapılan önceki çalışmalarda genel olarak besleme hızı arttığında yüzey pürüzlülük değerlerinin arttığı, motor devrinin artırılmasıyla pürüzlülük değerlerinin azaldığı ve buna bağlı olarak yüzey kalitesinin iyileştiği belirlenmiştir (Davim 2009; Sütçü ve Karagöz 2012; Sofuoğlu 2015a-b; Bal 2018; Bal ve Akçakaya 2018; Bal ve Dumanoglu 2019; Aras ve Sofuoğlu 2021). Ayrıca, Demir vd., (2022) tarafından yapılan çalışmada mobilya sektöründe kullanılan kontrplak, MDF ve yongalevhanın yüzey pürüzlülüğünün CNC makinesi kesme parametrelerinin (bıçak çapı, bıçak motor devri ve besleme hızı) değişmesiyle nasıl değiştiği araştırılmıştır. Ancak, yapılan bu çalışmalar sonunda genel olarak besleme hızının düşük tutulması, motor devrinin yüksek tutulması ve bıçak adımının düşük tutulması önerilmiş ve bu şekilde oluşturulan kod dosyaları ile iyi bir yüzey elde edilebileceği belirtilmiştir. Bu şekilde oluşturulan kod dosyaları ile yapılan işlemler esnasında yüzey pürüzlülüğü düşük ve kaliteli bir yüzey olduğu yapılan bilimsel çalışmalarla ortaya konmuştur (Davim 2009; Karagöz 2010; Deus 2015; Sofuoğlu 2015a-b; Bal 2018; Bal ve Akçakaya 2018; Bal ve Dumanoglu 2019). Ancak, bu şekilde yapılan kodlamalar ile CNC makinelerinin harcadığı elektrik enerjisinin arttığı da belirlenmiştir (Akçakaya 2018; Bal ve Dumanoglu 2019; Dumanoglu ve Bal 2022). Yapılan bu çalışma ile elde edilen verilere göre; düşük besleme hızı ve küçük bıçak adımı ile yapılan kodlamalarda CNC makinesinde her bir parça için işlem süresi uzamaktadır. Her bir parça için harcanan işlem süresinin uzaması o üretimin yapıldığı fabrikadaki günlük üretim miktarını azaltmakta ve dolayısıyla kapasitenin azalmasına neden olmaktadır. Öte yandan, çok kısa işlem süresi elde edebilmek için yapılan kodlamalarda ise yüzey pürüzlülüğü artmakta ve işlenen malzemenin yüzey kalitesi bozulmaktadır. Bu nedenle, seri üretimin yapıldığı fabrikalarda, CNC makinalarının çalıştırılması için gerekli olan kod dosyalarının oluşturulmasında, hem yüzey kalitesi ve hem de işlem süresi göz önünde bulundurulması gereken en önemli iki kriterdir. Bu çalışma ile elde edilen veriler doğrultusunda işlem süresinin önemi ortaya konmuştur. Daha önce yapılan bir çalışmada (Bal ve Dumanoglu 2019) CNC makinesi ile işlenen ve MDF levhalardan hazırlanan gerçek ölçüdeki mutfak dolap kapakları ile ilgili olarak CNC makinesinin işlem yapma süresi belirlenmeye çalışılmış ve bu çalışmaya benzer sonuçlar rapor edilmiştir. Ancak, yapılan bu çalışmada kullanılan materyal masif ağaç malzemedir. MDF levhalar ile masif ağaç malzemenin özellikleri birbirlerinden farklıdır. CNC makinelerinde işlenen MDF levhalar, üst yüzey işlemi şeklinde bir işlem görmeden kullanıma arz edilmez. Bu levhaların yüzeyleri ya boyanır, ya da PVC ile kaplanır. Ancak, CNC makinesinde işlem gören ceviz ağacından elde edilen masif ağaç malzemelerin yüzeyleri üst yüzey işlemi olarak genellikle verniklendikten sonra kullanıma arz edilir. Her iki malzeme arasında bu bakımdan önemli farklar vardır. Sunulan bu çalışmaya, deneme deseni bakımından benzer bir çalışma Çakıroğlu vd., (2022) tarafından da yapılmıştır. Bu çalışmada, CNC makinesi ile işlemede ceviz ve dişbudak ağacı kerestesi kullanılmıştır. Kesme parametrelerinde; üç farklı kesici takım çapı (3 mm, 6 mm ve 8 mm), 3 farklı iş mili hızı (12000 rpm, 15000 rpm ve 18000 rpm) ve 3 farklı ilerleme hızı (3 m/dk, 6 m/dk ve 9 m/dk) kesme koşulları olarak denemeleri yapılmıştır. Bu çalışmada aynı zamanda, CNC işleminden hemen sonra ölçülen enerji tüketimi ve işlem süresi değerleri ile testlerden elde edilen yüzey pürüzlülüğü ve temas açısı değerleri kullanılarak yapay sinir ağı (YSA) analizleri gerçekleştirildi. Çalışma sonunda elde edilen verilere göre; çalışmada kullanılmayan ara kesme koşullarına karşılık gelen çıkış değerleri de başarılı bir şekilde tahmin edilmiştir. Tahmin edilen tüm gruplar arasında, ceviz ağacı kerestesi için en düzgün yüzeyi veren optimum kesici takım çapı 3 mm, bıçak motoru devri 18000 rpm ve besleme hızı 3,8 m/dk olarak belirlenmiştir. Bu çalışma ile bizim sunduğumuz çalışma arasında ki önemli farklılıklar ise şunlardır; bizim çalışmalarımızı yaptığımız CNC makinesi laboratuvar tipi bir makinedir. Makinenin konstrüksiyonu, çalışma sırasında titreşimi absorbe etmesi bakımından önemlidir. Bizim çalışmamızda Ra değeri haricinde Rp ve Rv değerleri de ölçülmüştür. Çalışmada kullanılan ceviz ağacı bünyesinde büyük çaplı traheler bulduran bir ağaç türüdür. Pürüzlülük ölçümlerinde bu traheler maalesef ortalama pürüzlülük değerini olumsuz etkilemektedir. CNC makinesi ile derin ya da sığ hangi derinlikte bir işleme yapılırsa yapılsın ceviz ağacı gibi geniş çaplı trahe bulduran ağaç türlerinin kerestelerinde bu traheler yüzey pürüzlülüğünü artırıcı rol oynamaktadır. Bu nedenle, bizim yaptığımız çalışmada Rv ve Rp değeri de ölçülmüştür. Tablo 5 ve Tablo 6'da verilen değerler incelendiğinde,

pürüzlülük ölçümü yapılan yüzeydeki kesme uzunluğu içerisindeki maksimum vadi ve tepe noktalarının ortalama değerler bakımında farklı olduğu ve R_v (maksimum vadi derinliği) değerinin R_p (maksimum tepe yüksekliği) değerinden çok daha fazla (yaklaşık 2 katı) olduğu rahatlıkla görülebilir.

SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Bu çalışmada, CNC makinelerinde işlenen masif test örneklerinin motor hızı, besleme hızı ve bıçak adımının yüzey pürüzlülüğü üzerine etkileri araştırılmıştır. Elde edilen verilere göre şu sonuçlar söylenebilir; bıçak motor devri arttırıldıkça, yüzey kalitesinin iyileştiği belirlenmiştir. Besleme hızının azaltılması ile yüzey kalitesinin iyileştiği besleme hızının arttırılması ile de yüzey kalitesinin düştüğü ve yüzeyin daha pürüzlü hale geldiği tespit edilmiştir. Besleme hızı ile motor devrinin yüzey kalitesine etkisi ile ilgili elde edilen sonuçların önceki çalışmalarla uyumlu olduğu görülmüştür. Bıçak adımı miktarının artması ile yüzey pürüzlülüğünün arttığı ve işlenen masif test örneğinin yüzeyinin daha pürüzlü hale geldiği belirlenmiştir. Genel olarak besleme hızı arttırdığında yüzey pürüzlülük değerlerinin arttığı, ancak, işlem süresinin azaldığı tespit edilmiştir. Bıçak adımı miktarının artırılması ile yüzey pürüzlülüğünün arttığı ve yüzey kalitesinin kötü etkilendiği, ancak, bıçak adımının artması ile işlem süresinin kısaldığı belirlenmiştir.

CNC makinesi için hazırlanan kod dosyalarında, öncelikle en iyi kalitede yüzey mi elde edilmeye çalışılacağı ya da en kısa işlem süresinin mi hedefleneceğinin belirlenmesi önem arz etmektedir. Yapılan bu çalışma sonucunda önerimiz, kodlama yaparken her iki faktörün göz önünde bulundurulmasıdır.

Teşekkür

Bu çalışmada sunulan veriler Osman Kaba isimli yazarın yüksek lisans tezinden elde edilmiştir. Bu çalışma için herhangi bir kurumdan destek alınmamıştır.

KAYNAKLAR

- Akçakaya E., (2018). Lif levha yüzeylerinin CNC makineleri ile işlenmesinde yüzey pürüzlülüğü üzerine takım yolu ayarlarının etkileri, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Kahramanmaraş.
- Aras, O. & Sofuoğlu, S. D. (2021). Anadolu kestanesi (*Castanea sativa* Mill.) ağaç türünün CNC ile işlenmesinde yüzey pürüzlülüğünün işleme parametreleri ile ilişkisi. *Mobilya ve Ahşap Malzeme Araştırmaları Dergisi*, 4 (2) , 114-125. <https://doi.org/10.33725/mamad.992157>
- Bal B.C. (2018). CNC makinelerinin bazı ayarlarının parça işleme süresi ve lif levhanın yüzey pürüzlülüğü üzerine etkileri, *Mobilya ve Ahşap Malzeme Araştırmaları Dergisi*, 1 (1), 21-30. <https://doi.org/10.33725/mamad.427588>
- Bal B.C., & Akçakaya E, (2018). The effects of step over, feed rate and finish depth on the surface roughness of fiberboard processed with CNC machine, *Mobilya ve Ahşap Malzeme Araştırmaları Dergisi*, 1(2), 86-93. <https://doi.org/10.33725/mamad.481278>
- Bal, B.C., & Dumanoğlu, F. (2019). Surface roughness and processing time of a medium density fiberboard cabinet door processed via CNC Router, and the Energy Consumption of the CNC Router, *BioResources*, 14(4); 9500-9508. <https://doi.org/10.15376/biores.14.4.9500-9508>
- Bal B.C., & Gündeş Z, (2020). Surface roughness of medium-density fiberboard processed with CNC machine, *Measurement*, 153 (2020), 107421. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2019.107421>
- Baykan, İ. (1996). Rendelenmiş ve zımparalanmış masif ağaç malzeme yüzeylerinde yüzey pürüzlülüklerine ilişkin araştırmalar, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Cutri, F., Maycock, K., & Parkin, R. (1991). Surface measurement of planed and moulded timber products, *Sensors and Actuators A: Physical*, 26(1-3), 433-437. [https://doi.org/10.1016/0924-4247\(91\)87027-Z](https://doi.org/10.1016/0924-4247(91)87027-Z)
- Çakıroğlu, E. O., Demir, A., Aydın, İ., & Büyüksarı, Ü. (2022). Prediction of optimum CNC cutting conditions using artificial neural network models for the best wood surface quality, low energy consumption, and Time Savings, *BioResources*, 17(2). 2501-2524, <https://doi.org/10.15376/biores.17.2.2501-2524>

- Davim, J. P., Clemente, V. C., & Silva, S. (2009). Surface roughness aspects in milling MDF (Medium Density FibreBoard), *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 40(1-2), 49-55. <https://doi.org/10.1007/s00170-007-1318-z>
- De Deus, P. R., de SampaioAlves, M. C., & Vieira, F. H. A. (2015). The quality of MDF work pieces machined in CNC milling machine in cutting speeds, feed rate, and depth of cut. *Meccanica*, 50(12), 2899-2906. <https://doi.org/10.1007/s11012-015-0187-z>
- Demir, A., Cakiroglu, E. O., & Aydin, I. (2022). Effects of CNC processing parameters on surface quality of wood-based panels used in furniture industry. *Wood Industry/Drvna Industrija*, 73(4), 363-371 <https://doi.org/10.5552/drvind.2022.2109>
- Dumanoğlu, F., & Bal BC, (2022). CNC makinesi ile işlenmiş lif levhaların yüzey pürüzlülüğü ve işlem süresi üzerine işleme parametrelerinin etkileri, *KSÜ-JES*, 25(4), 615-621. <https://doi.org/10.17780/ksujes.1144224>
- Kaba O., (2022). CNC makinesi kesme parametrelerinin ceviz odununun yüzey pürüzlülüğü üzerine etkisinin araştırılması, Yüksek Lisans Tezi, Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kahramanmaraş.
- Karagöz, Ü., (2010). Ahşap malzemenin CNC ile işlenmesinde yüzey kalitesini etkileyen işleme parametrelerinin belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Isparta.
- Koç, K. H., Erdinler, E. S., Hazir, E., & Öztürk, E. (2017). Effect of CNC application parameters on wooden surface quality, *Measurement* 107, 12-18. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2017.05.001>
- Mitchell, P., & Lemaster, R., (2002). Investigation of machine parameters on the surface quality in routing soft maple, *Forest Products Journal*, Sayı 52(6): s. 85–90.
- Örs, Y., & Baykan, İ., (1999). Masif ağaç malzemede rendeleme ve zımparalamanın yüzey pürüzlülüğüne etkileri, *Turkish J. of Agriculture and Forestry*, Sayı 23: s. 577-582.
- Singer, H., & Özşahin, Ş. (2022). Prioritization of factors affecting surface roughness of wood and wood-based materials in CNC machining: a fuzzy analytic hierarchy process model. *Wood Material Science & Engineering*, 17(2), 63-71. <https://doi.org/10.1080/17480272.2020.1778079>
- Sofuoğlu, S.D., (2008). Bazı yerli ağaç türü odunlarının işleme özelliklerinden yüzey kalitesi üzerine etkileri, Doktora Tezi, İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul
- Sofuoğlu, S.D., (2015a). Determination of optimal machining parameters of massive wooden edge-glued panels made of European larch (*Larix decidua* Mill.) using Taguchi Design Method, *BioResources*, 10(4), s. 6797-6808. <https://doi.org/10.15376/biores.10.4.7772-7781>
- Sofuoğlu, S.D., (2015b). Using artificial neural networks to model the surface roughness of massive wooden edge-glued panels made of scotch pine (*Pinus sylvestris* L.) in a Machining Process with Computer Numerical Control, *BioResources*. 10(4), s. 6797-6808, <https://doi.org/10.15376/biores.10.4.6797-6808>
- Sofuoğlu, S.D., (2016). Determination of optimal machining parameters of massive wooden edge-glued panels which is made of scots pine (*Pinus sylvestris* L.), using Taguchi Design Methods, *European Journal of Wood and Wood Pr.*, 75(2017), 33-42. <https://doi.org/10.1007/s00107-016-1028-z>
- Sütçü, A., & Karagöz, Ü., (2012). Effect of machining parameters on surface quality after face milling of MDF, *Wood Research*, 57 (2): 231-240.
- TS 2471, (1976). Odunda fiziksel ve mekanik deneyler için rutubet miktarı tayini. Türk Standartları Enstitüsü. Ankara.
- TS 2472. (1976). Odunda, fiziksel ve mekanik deneyler için birim hacim ağırlığı tayini. Türk Standartları Enstitüsü. Ankara.
- TS 971, (1988). Yüzey pürüzlülüğünün-parametreler ve pürüzlülük tespiti kuralları, TSE Standardı, Ankara.



Kahramanmaraş Sütçü İmam University

Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 04.09.2023
Kabul Tarihi : 31.10.2023

Received Date : 04.09.2023
Accepted Date : 31.10.2023

A NUMERICAL ANALYSIS ON THE SUBMICRON- AND MICRON-SIZED PARTICLE SEDIMENTATION IN A WIRE-TO-PLATE ELECTROSTATIC PRECIPITATOR

TELDEN-PLAKAYA TÜRDE BİR ELEKTROSTATİK ÇÖKTÜRÜCÜDE MİKRONALTI- VE MİKRON-BOYUTLU PARTİKÜL BİRİKİMİNİN NÜMERİK ANALİZİ

Orçun EKİN^{1*} (ORCID: 0000-0002-6779-885X)

¹ Aydın Adnan Menderes Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Aydın, Türkiye

* Corresponding Author/Sorumlu Yazar: Orçun EKİN, orcun.ekin@adu.edu.tr

ABSTRACT

Electrostatic precipitators (ESPs) are frequently utilized in collecting fine organic and inorganic materials from continuous liquid with few moving parts and high efficiency using electrically charging the particles. In this study, cross-sectional 2D geometry of a wire-to-plate electrostatic precipitator the parametric data of which originally published elsewhere was numerically modeled and validated to investigate submicron-micron particle charging in terms of diffusion and field charging mechanisms and precipitation behavior of particles with detailed electric field properties. Electric field, gas flow, and particle trajectory equations are coupled and solved in a multiphysics solver. Particle tracking is realized with the Lagrangian approach. Results indicate variations in electric field strength and space charge density between corona electrodes, with space charge present in the entire precipitation channel. Between two different charging mechanisms, diffusion charging prevails for charge accumulated on submicron particles, whereas field charging becomes dominant for particles larger than 1µm diameter. However, for the ESP configuration considered in this study, particles reach a charge saturation in less than 0.7 seconds, regardless of their size. Although calculated precipitation efficiencies for micron-sized particles can reach to 100%, efficiencies for submicron particle range drop with increasing particle size, as diffusion charging rapidly loses its effectiveness, in 50-250nm range.

Keywords: Computational Fluid Dynamics, Corona Discharge, Discrete Element Modeling, Electrostatic Precipitation, Particle Trajectories.

ÖZET

Elektrostatik çöktürücüler (ESP), küçük boyutlu organik ve inorganik maddelerin sürekli akışkan içerisinde elektriksel olarak yüklenmeleri suretiyle yüksek hassasiyetle ayrıştırılmalarında yararlanan, yapılarında asgari hareketli aksam bulunduran cihazlardır. Bu çalışmada, deneysel verileri daha önce bir başka kaynakta yayınlanmış olan telden-plakaya tipteki elektrostatik çöktürücü sonlu elemanlar yöntemi ile 2 boyutlu kesit geometri olarak modellenmiş ve mikron- ve mikron-altı partiküllerin alansal ve difüzyon mekanizmaları ile elektriksel olarak yüklenmelerinin, ayrıca partikül çökme davranışlarının detaylı elektrik alan özellikleri kapsamında incelenmesi amacıyla valide edilmiştir. Elektrik alan, gaz akışı ve partikül yörünge denklemleri bağlaşıklı hale getirilerek multifizik ortamında çözdürülmüştür. Partikül takibi Lagrange yaklaşımı ile modellenmiştir. Modelin sonuçları korona elektrotları arasında gerek elektrik alan kuvvetinde gerekse uzay yük yoğunluğunda kayda değer farklılıklar olduğunu ve uzay yükünün tüm çökme kanalına yayıldığını ortaya koymaktadır. İki yüklenme mekanizmasından, difüzyon mekanizmasının mikron-altı partiküllerde oluşan yük birikiminde etkili iken alansal yüklenmenin daha ziyade 1µm'den daha büyük partiküllerde ön planda olmaktadır. Bununla birlikte, çalışma kapsamında dikkate alınmış olan ESP konfigürasyonunda partiküller 0.7 saniyeden kısa süre içerisinde elektriksel yük bakımından doygun hale gelmektedirler. Mikron boyutlu partiküllerin çökme verimleri çapa bağlı olarak %100 mertebesine ulaşmakla

ToCite: EKİN, O., (2024). A NUMERICAL ANALYSIS ON THE SUBMICRON- AND MICRON-SIZED PARTICLE SEDIMENTATION IN A WIRE-TO-PLATE ELECTROSTATIC PRECIPITATOR. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 27(1),78-91.

birlikte mikron-altı partiküllerde artan partikül çapı ile difüzyon yüklenme mekanizması etkisini hızla kaybetmekte, dolayısıyla 50-250nm arasındaki partiküllerin çökeltme verimlerinde önemli düşüş gözlenmektedir.

Anahtar Kelimeler: Ayrık Eleman Modelleme, Elektrostatik Çökeltme, Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği, Korona Deşarjı, Partikül Yörüngeleri.

INTRODUCTION

Electrostatic precipitation (ESP) is a technique, where the electrostatic body forces accumulated on the submicron and micron particles are used for particle sedimentation. ESPs are commonly used in areas and processes in which purifying air, or other gases, is required [1]. One characteristic of the ESP is that very high collection efficiencies are achieved (usually >99%) for micron-sized particles [2], with relatively low-pressure losses through the precipitation channel, typically lower than 1000 Pa. These properties, along with a typically low number of moving parts employed, make these devices a robust and cost-efficient method in particle-laden fluid treatment applications [3]. Precipitation of submicron and micron-sized particles on surfaces by way of electrical manipulation offers is promising for in-line particle sedimentation processes in the industry and many household applications. On the other hand, controlling the parameters that govern high-intensity corona discharges, resulting charge accumulation on particles, and finally the sedimentation characteristics of particles with specific physical properties require a thorough understanding of the process, which implies its multidisciplinary character.

Corona discharge is the principal process in ESP, as the mechanism behind particle charging, hence the high precipitation efficiency is primarily related to the number of ions generated and transported into the domain as a result of corona discharge [4]. Several studies focus on the investigation of temperature effects on discharge characteristics in DC corona configurations [5], [6] and the effects of electric potential on fine aerosol particle precipitation in positive DC corona discharges for cleaning indoor air. The increasing level of temperature negatively affects the energy consumption of the system [7]-[9].

As stated previously, the understanding and design of an ESP with high precipitation efficiency require a detailed understanding of different aspects of the process, such as the electrostatic characteristics of the setup, the effect of the gas composition, and particle properties [10]. Experimental studies are probably the most accurate way to investigate the process, yet they might not be the most time- and resource-efficient way, given the complex character of a typical ESP application. However, as is the case in many modern engineering applications, these difficulties can be overcome using mathematical modelling. In numerical modelling, the collected data, which were first validated, can be used to study different aspects of the process [11].

In the current study, the coupled physics of ESP, namely corona discharge, forced convection of air, charge accumulation on solid particles, particle-laden flow characteristics, and particle tracking are characterized and solved, using the COMSOL Multiphysics commercial software. The model is first validated against a previous experimental study and then the precipitation efficiencies along with the electric field parameters occurring in the solution domain are investigated. The study takes a different perspective and outlines the effects of the two charging mechanisms influencing the particle precipitation. Detailed numerical studies are available on the wire-to-plane configuration, however with the emphasis generally on the electrical field properties and total precipitation figures [10, 12, 13].

MATERIAL AND METHOD

Fluid Flow

Solving the turbulent flow might prove a difficult task, despite the ever-increasing efficiency of the computing methods. The multiphysics nature of the problem requires highly refined discretization schemes, which require a great amount of computational power, even for 2D applications. As usual with systems of high complexity, certain simplifications become necessary in ESP modelling, such as incompressible flow assumption [14]. This is justified by low pressure drop along the precipitation channel [15, 16]. The time-averaged conservation equations for mass and momentum are utilized to express continuous flow of air with electrical body force calculated in a different module.

Conservation of mass is given by:

$$\frac{\partial}{\partial x_k}(\rho u_k) = 0 \quad (1)$$

Conservation of momentum is expressed as:

$$\frac{\partial}{\partial x_k} \left(\rho u_i u_k - (\mu + \mu_t) \frac{\partial u_i}{\partial x_k} \right) = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + f_{D_i} + \rho_{ion} E_i \quad (2)$$

where ρ and ρ_{ion} represent air density and the concentration of ionic charges, respectively, u is the gas velocity, f_D is the drag coefficient, and E_i is the strength of electric field. With the normal process properties of ESPs in air purification applications, the calculated Reynolds numbers usually indicate a turbulent flow scheme [16]. Given its ability to represent turbulence flows in a wide variety of applications, the standard $k - \varepsilon$ turbulence model is used in this study, to calculate the turbulent viscosity, μ_t , therefore, to solve the Reynolds-Averaged Navier Stokes equations for turbulence kinetic energy and turbulence dissipation rate [12, 17, 18].

Particulate Flow and Particle Charging

As customary in computational fluid dynamics-discrete element modeling (CFD-DEM) applications, the particle-laden flow can be described using two principal approaches: the Eulerian and the Lagrangian. The Eulerian approach treats both components of the flow (fluid and particles) as continua, whereas the Lagrangian approach considers only the fluid as continuum and the particles as discrete elements scattered in this continuous fluid. Forces acting on each individual particle are considered and the particle momentum and positions are calculated for every step of the solution. Both approaches have some advantages depending on the application [19, 20]. With the Lagrangian approach, detailed information for each individual particle injected into the solution domain: particle positions and trajectories, particle momentum, and particle fates (trapped on the surfaces, escaped the solution domain, or stagnated), are available. The Lagrangian approach can consider multiple particle types, shapes, and distribution of sizes. On the other hand, the Lagrangian approach brings a limitation on the particle volume fraction, as treating each particle separately demands very high computational capacity. Therefore, the Lagrangian approach is only utilized where the particle phase is ‘dilute’, compared to the continuous fluid. The Eulerian approach has the advantage of configuring mixtures with high particulate content more easily, hence preferred over the Lagrangian approach in certain applications [21, 22, 23]. In the scope of the present study, since the particulate phase is sufficiently dilute and a size-distribution of particles is available, the Lagrangian approach to particulate-phase configuration is preferred.

Particles injected into ESP are exposed to aerodynamic drag and electric body force, therefore their trajectories in the precipitation channel are determined mainly by these two factors. Due to the dispersed character of the Lagrangian particulate flow, the particle-particle interactions are ignored, thus the particle motion equation takes the form:

$$M_p \frac{dv_i}{dt} = q_p E_i + 3\pi\mu d_p (\tilde{u}_i - v_i) (1 + 0.15 Re_p^{0.687}) \quad (3)$$

where M_p is the mass of an individual particle, v_i is the particle velocity, q_p is the particle charge, d_p is the particle diameter, $Re_p = \rho|u - v|d_p/\mu$ is particle Reynolds number. The instantaneous gas velocity, \tilde{u} is a sum of two velocity components, namely the mean and fluctuating velocity. The fluctuating component is calculated through turbulent kinetic energy, as a result of time-averaged conservation equation approach. The two-way turbulence coupling is fully accounted for when the particles affect fluid flow and gas flow affects the particle trajectory. The particle momentum source term is given by [24]:

$$f_{D_i} = \sum_{k=1}^{N_j} \frac{6\dot{m}_p^k}{\pi\rho_p(d_p^k)^3} \frac{\rho\pi(d_p^k)^2}{8} \int_{t_{in}}^{t_{out}} C_D |\tilde{u}_i - v_i^k| (\tilde{u}_i - v_i^k) dt \quad (4)$$

where N_j is the total number of particles within the solution domain, \dot{m}_p is the mass flow rate along the trajectory of a specific particle, ρ_s is the particle density, C_D is the drag coefficient of spherical particles, and t_{in} and t_{out} are the particle entrance and departure to and from the solution domain.

To investigate the gas flow effects on particle trajectories and the precipitator efficiency, several particles are required to be injected into the domain. This number is determined considering the capacity of the computing equipment. Also, the variety in particle sizes should be considered to predict the submicron- and micron-sized particle precipitation efficiencies. In this study, 100 particle injection points with equal spacing along the inlet boundary were defined and 100 particles, each of a different size, were injected at every injection point. This configuration allows for 10,000 trajectories to be generated and investigated.

Calculation of charges accumulated on the particles is an important aspect to be adopted into ESP numerical modeling. Although there are alternative methods available for this task [25, 26], the charging model developed by Lawless [27] is considered in the present study. As a combined charging model, the Lawless approach involves both field and diffusion effects in calculating the total electrical charge accumulated on each particle. These charging rates are defined as:

$$\frac{dv_f}{d\tau} = \begin{cases} f(w) \frac{v - 3w}{\exp(v - 3w) - 1}, & v > 3w \\ \frac{3w}{4} \left(1 - \frac{v}{3w}\right)^2 + f(w), & -3w \leq v \leq 3w \\ -v + f(w) \frac{-v - 3w}{\exp(-v - 3w) - 1}, & v < -3w \end{cases} \quad (5)$$

$$f(w) = \begin{cases} \frac{1}{(w + 0.475)^{0.575}}, & w \geq 0.525 \\ 1, & w < 0.525 \end{cases} \quad (6)$$

$f(w)$ is the fractional area function, $v = qe/2\pi\epsilon_0 d_p kT$ and $w = (K/K + 2)(Ed_p e/2kT)$ are the dimensionless particle charge and the electric field strength respectively, and $\tau = (\rho_i b_i t / \epsilon_0)$ is the dimensionless charging time.

Electric Field and Current Flow

The ionization reactions in the corona discharge are very intricate part of the mathematical model. However, these reactions take place in the very vicinity of the discharge electrode. Considering that fact, many studies involving corona discharges [28, 29, 30] simply ignore the active corona zone; this leads to well-established simplification, which is also utilized in the current work. The electric field is handled via Poisson's equation, which involves ionic-charge density and electric potential:

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x_k^2} = - \frac{\rho_{ion} + \rho_{pc}}{\epsilon_0} \quad (7)$$

where φ is the electric potential (V), ρ_{ion} is the space charge density (C/m^3), ρ_{pc} is the charge density of particles (C/m^3), ϵ_0 is the permittivity of gas ($C/V \cdot m$). Also, the convection-diffusion equation is used to calculate space charge density, ρ_{ion} :

$$E_k = - \frac{\partial \varphi}{\partial x_k} \quad (8)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_k} \left[\rho_{ion} (k_{ion} E_k + u_k) - D_i \frac{\partial \rho_{ion}}{\partial x_k} \right] = 0 \quad (9)$$

where D_i is the ion diffusion coefficient (m^2/s), k_{ion} is the ion mobility ($m^2/s \cdot V$) and E_k is the local electric field strength (V/m).

The boundary conditions to solve convection-diffusion equations are required for the electric potential and space charge density. The electric potential is defined on the discharge electrode surfaces, in this case a positive DC voltage, which has a constant value. The collector electrodes, on the other hand, are grounded. The ion density on the discharge electrode surface is calculated using the current value. For the collector electrodes and the remaining boundaries, a steady-state diffusion condition is defined:

$$\rho_w = \frac{J}{\mu_i E_w} \quad (10)$$

where J is the ionic current density on the discharge electrode surface (A/m), and E_w is electric field strength on the discharge electrode surface (V/m). As stated previously, the modeling approach adopted in this study neither involves direct generation and sustaining plasma, nor the relevant chemical reactions. Instead, the electric strength at the corona onset is calculated from Peek's law:

$$E_0 = E_c \delta \left(1 + \frac{c}{\sqrt{\delta r_c}} \right) \quad (11)$$

where E_c is the electric field strength at corona onset, the value of which was assumed to be $3 \times 10^6 V/m$ in the present study, δ is the relative density compared with the standard condition, c is an empirical constant with a value of 0.0308 and r_c is the discharge electrode radius. Peek's law suggests an iterative approach to solve for the surface electric strength and ion charge density [31]. The iteration is repeated until the electric strength on the wire surface is within a certain tolerance to the value provided by Peek's law. This value is then adopted as the ion charge density on the active electrode on the corona onset. Available numerical studies proved that Peek's law is a successful method of approximating the actual corona discharge conditions [13, 28-30].

Problem Description and Model Discretization

All the above aspects of the numerical modeling, namely electric field calculation, particle charging mechanism, the Lagrangian particle tracking, and the turbulent flow domain for the continuous fluid are calculated with the Comsol Multiphysics software. The multiphysics requirements of ESPs can be handled relatively easily with the software's ability to connect variables of one specific domain to the other, therefore discretizing the problem into multiple branches and multiple study steps, stationary or transient.

The study requires a turbulence scheme to comply with the local Re numbers that may well exceed the laminar flow limitations in the ESP domain. Turbulent flow through ESP is calculated via the Standard $k - \epsilon$ model. The electric field and the ionic charge density, resulting from a steady-state Poisson solver, were imported to the fluid flow interface to handle the particle charging and particle transport. A transient solver with 1ms time steps is considered to obtain particle behavior, particle charging characteristics, and eventually the ESP efficiency. In the current study, the ESP domain is initialized with a set of boundary conditions, providing information on the turbulent flow and electrostatics aspects of the model. The airflow within the domain is solved first, without accounting for the effects of the corona discharge. The electric field strength is calculated via the Poisson equation, which requires the space charge density to be determined (Eqs.s 7 and 8). The initial ion charge density at the active electrode surface is assumed to be zero. From this point, the surface ion density is updated iteratively. When the surface field strength is within a certain tolerance with the iterative result, the final value of the surface charge density is adopted for the remaining of the numerical calculation [32].

Following the turbulent flow and electric field calculations, particles from the precipitator inlet are injected into the domain, where each particle trajectory is calculated based on the Lagrangian scheme, and particle fates are calculated by the software. Because the behavior of charged particles may affect the flow patterns inside the ESP domain, the calculations were repeated multiple times, by using the convergent results of the latest simulation run. This way, the electrical body forces and particle charge densities are updated until the set of equations is conveniently converged. The model is based on a simplified, 2D ESP geometry, containing two planar ground electrodes and 4 active electrodes with 2mm diameter (Fig. 1). A positive DC electrical potential of 43.5 kV is applied to the active electrodes. Due to the mass properties of the particles, the electric field effects on the particles are dominant, compared to gravitational effects, hence the effect of gravity on the particles is neglected. The forced convection of air is defined as a fully developed flow with 1m/s average velocity at the inlet boundary of the model. The geometry

has an active precipitation area of $0.14m^2$ (Fig. 1 (a)), with a channel width (W) of 610mm and a height ($2H$) of 230mm. Expecting an electric field with strong gradient, a triangular mesh with a relatively low growth rate is employed. After discretization, the domain comprises 281,610 elements with an average element quality of 0.89. The overall view of the applied mesh can be seen on Fig. 1 (b). The mesh structure exhibits a densely-packed discretization in the vicinity of the corona electrodes, capturing both electrostatic properties and the particle trajectories reliably, as will be seen in the following pages.

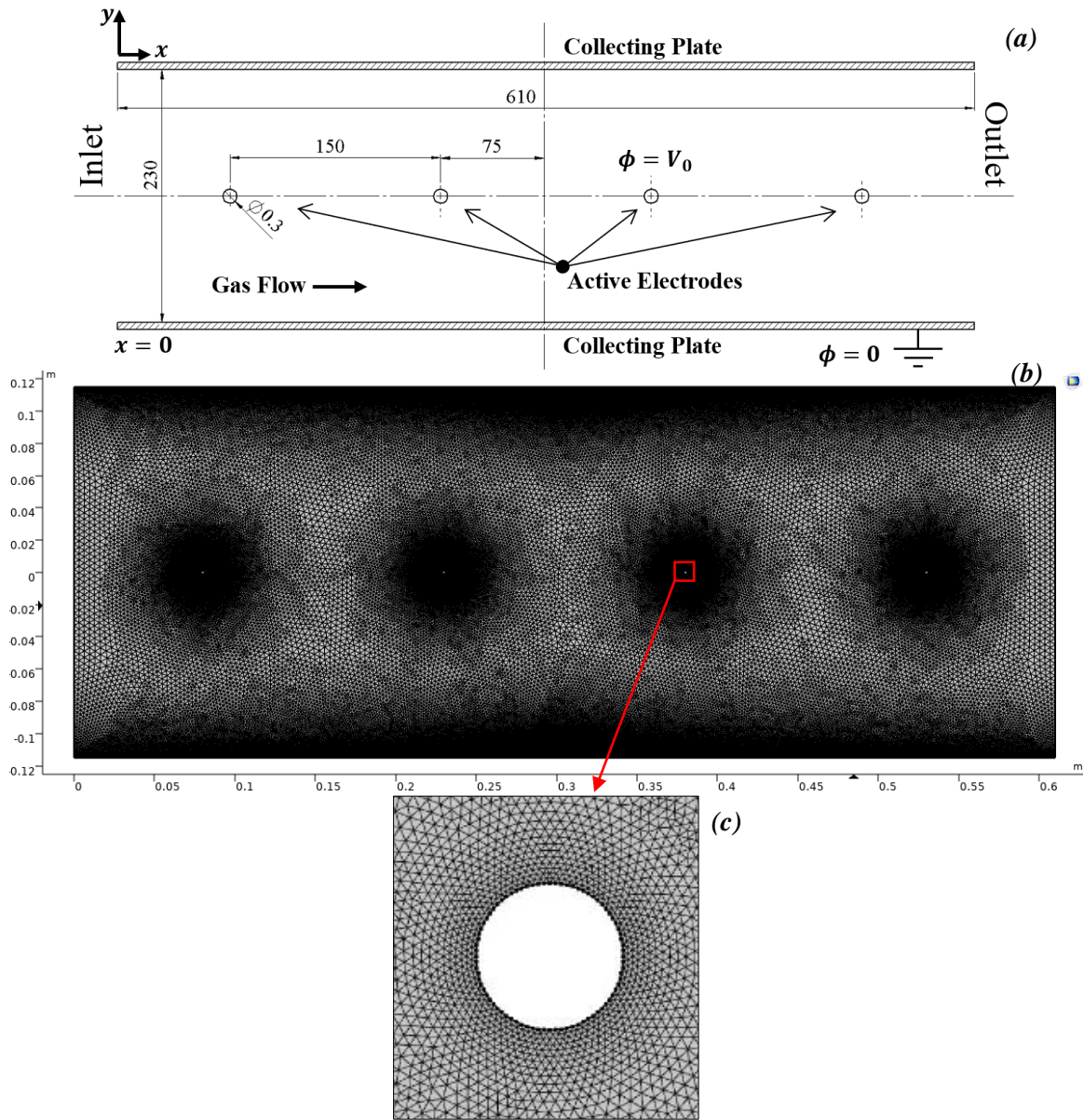


Figure 1. (a) The Model Geometry and (b) Mesh Structure with a Close-up View of Edge Division (c) Near Corona Electrodes.

The boundaries and their values are summarized on Table 1. One important aspect is that, the electric field strength at all active electrode surfaces are the values that satisfy Peek’s law approach employed in this study. The electric potential to commence the ESP process is directly adopted from the commonly-cited work of Penney and Matick [33].

Table 1. Boundaries Conditions for the Simulated ESP Configuration

	<i>Electric Field</i>	<i>Space Charge Density</i>	<i>Fluid Flow</i>	<i>Particle Tracking</i>
Inlet	$\partial\varphi/\partial n = 0$	$\partial\rho_{ion}/\partial n = 0$	$v_x = 1 \text{ m/s}$ $v_y = 0.0 \text{ m/s}$	$u_x = 1 \text{ m/s}$ $u_y = 0.0 \text{ m/s}$
Outlet	$\partial\varphi/\partial n = 0$	$\partial\rho_{ion}/\partial n = 0$	0 Pa (Gage Pressure)	Vanish (Particle Counter)
Ground Electrodes	$\varphi = 0 \text{ kV}$	$\partial\rho_{ion}/\partial n = 0$	No slip.	Freeze
Active Electrodes	$\varphi = 43.5 \text{ kV}$	Determined Iteratively	No slip.	Freeze

Finally, the particles injected from the inlet boundary of ESP domain are of the uniform 1500 kg/m³ density [34]. To properly address the submicron and micron range particle behaviors within the model, a uniform distribution of particles sizes, between 50nm and 10µm containing 100 different diameters is adopted.

RESULTS AND DISCUSSION

The numerical results for the electric potential distribution in the investigated model were compared with the seminal work published by Penney and Matick [33]. The electric potential distribution observed in the present study is in good agreement with the said publication (Fig. 2).

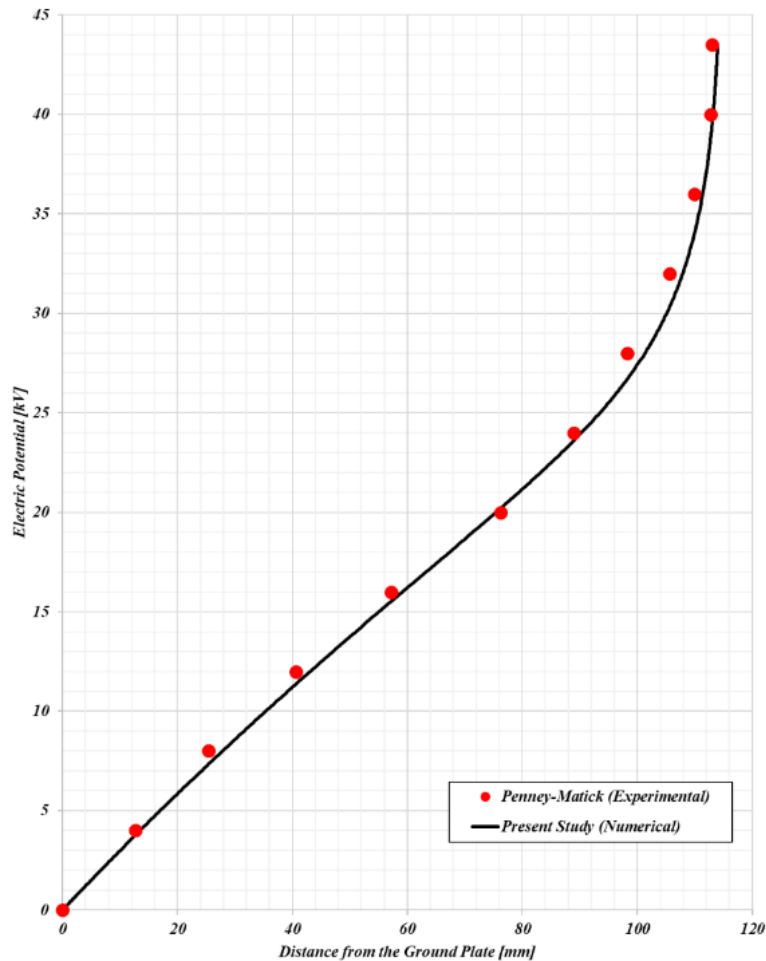


Figure 2. Electric Potential Distribution Calculated Numerically Against the Experimental Results Published by Penney and Matick [33].

Adequate mesh refinement and mesh independence in the numerical study was also an important aspect of model validation. Too coarse a mesh possibly provides a faster solution -even convergence, but the parametric results may not display the best results in terms of model stabilization. Too fine mesh metrics, the model might display redundancy in terms of degrees of freedom, and poor convergence time. To provide a better tradeoff between refinement and model stability, multiple mesh structures with varying metrics were applied. The critical parameter was assumed to be space charge density (C/m^3) in the corona electrode vicinity and the results suggested that the adopted mesh suggests an optimum refinement (Table 2). Fig 3 shows no significant improvement in the parameter with advancing refinement in comparison to the adopted mesh configuration. To note, mesh metrics are scored between 0-1, with 1 (or 100%) being the best possible configuration for a given metric. Skewness penalizes elements with extremely low or high angles compared to an ideal element, whereas volume versus circumradius evaluates the proportion of an element area and the circumscribed circle of the element.

Table 2. Results of Different Mesh Configurations Utilized in Mesh Independence Study.

Mesh Configuration	Space Charge Density [C/m^3]	Maximum Element Size [mm]	Growth Rate	# of Elements	Average Skewness	Volume versus circumradius
Finer 3	3.2190E-05	4	1.03	510948	0.9105	0.9634
Finer 2	3.2184E-05	5	1.04	362484	0.9027	0.9545
Finer 1	3.2185E-05	6	1.045	316534	0.8971	0.9491
Adopted Mesh	3.2187E-05	7.5	1.05	281610	0.8946	0.9456
Coarser 1	3.2219E-05	10	1.1	138774	0.8674	0.9095
Coarser 2	3.2337E-05	15	1.2	76122	0.8365	0.86
Coarser 3	3.2666E-05	20	1.3	56704	0.8249	0.831

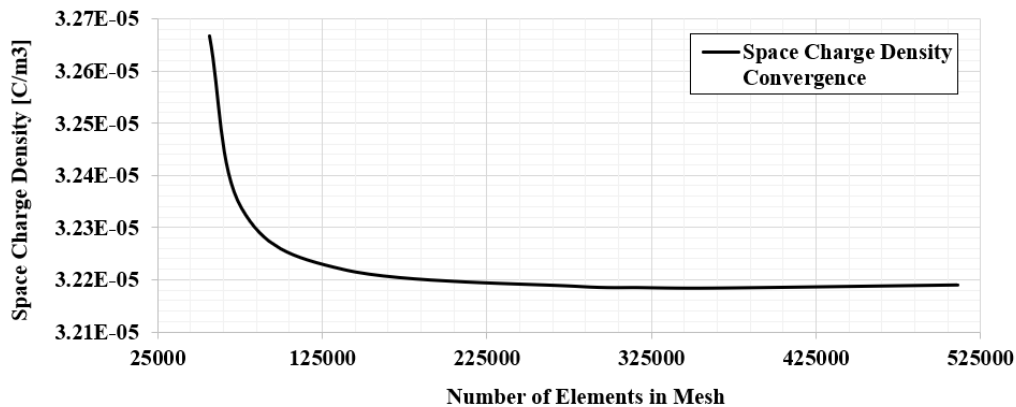


Figure 3: The Optimum Mesh Configuration Was Determined Considering the Largest Maximum Element Size (7.5mm in This Study) That Conforms the Results Calculated via Further-refined Alternatives.

The electric field intensity significantly varies at different points of the precipitation channel (Fig. 4). This variation is much stronger close to the channel symmetry plane and is much milder near the collecting electrodes. As it can be seen on Fig. 5, the electric field variation results in a variable ion charge distribution, which affects the particle charging level.

The ionic density shows a similar behavior to the electric field intensity; it reaches the peak the highest values in the vicinity of discharge electrodes. As it can be seen on Fig. 4, near the first electrode the charge density is about $2.58 \times 10^{-5} C/m^3$. The same can also be observed for other lines along the precipitation channel. Another important aspect of the plot is that the maximum charge densities are observed at both ends of the precipitation channel with smaller values at the center. Ionic charge densities tend to concentrate near the discharge electrodes, but these densities preserve their values along the vertical distance from corona electrodes; namely $5.35 \times 10^{-6} C/m^3$ for H/4, $5.34 \times 10^{-6} C/m^3$ for H/2 and $5.06 \times 10^{-6} C/m^3$ for 3H/4. This mechanism guarantees the diffusion charging of submicron particles along the precipitation channel of the ESP.

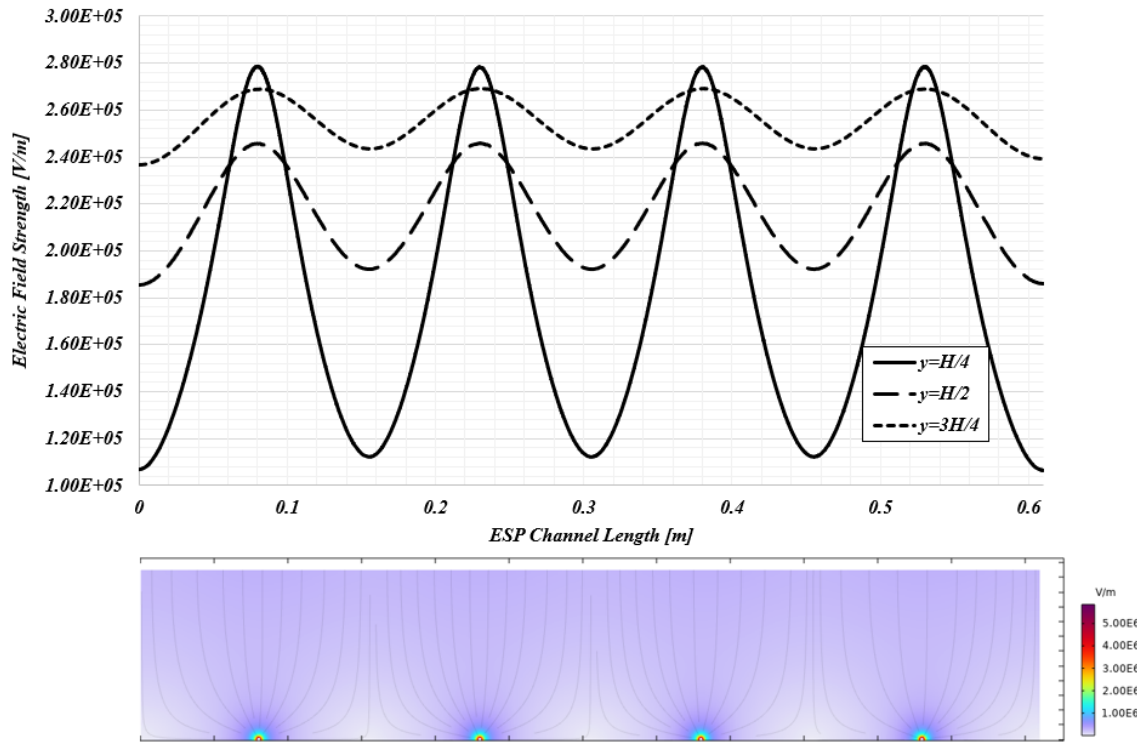


Figure 4. Magnitude of Electric Field at 43.5kV Corona Electrode Voltage. The Plot Shows Field Values on Three Lines Along the ESP Channel (**Top**), Compared to the Contour Graph on Electric Field Magnitude (**Bottom**).

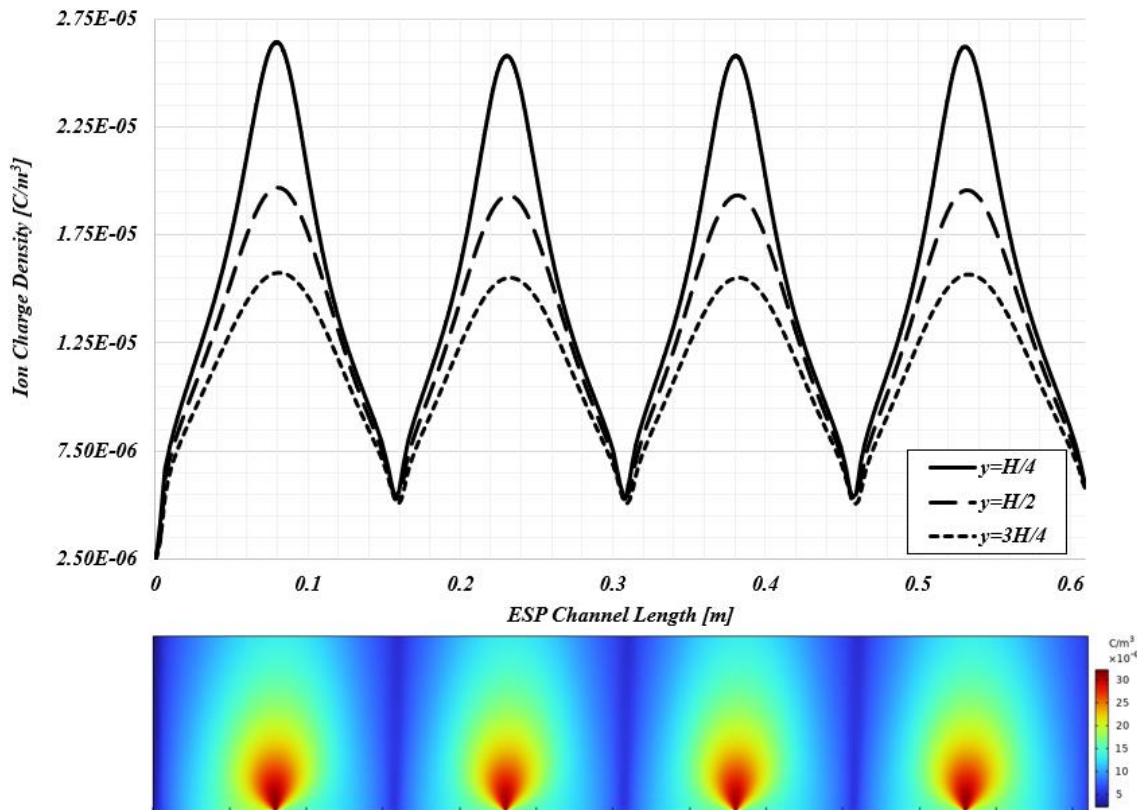


Figure 5. Ionic Charge Density Along Three Different Horizontal Lines (top) and in the Entire Precipitation Channel (bottom).

Despite of the fact that a large variety in particle sizes (50nm-10 μ m) were utilized in this study to investigate precipitation efficiency, three specific particle diameters are picked to demonstrate the field and diffusion charging mechanism effects. When a diameter smaller than 1 μ m is considered, the diffusion effect dominates the charge accumulated on the particles. As seen on Fig. 6(a), diffusion charging practically determines the charge number as particles with a diameter of 50nm travel through ESP domain. However, this scheme changes with the increasing particle size. As particle sizes go from submicron to micron level, field charging mechanism becomes more and more prominent, as seen on Figs. 6(b) and (c). For relatively large particles, the charge accumulated on the particle is largely attributed to the field charging, yet the diffusion part is also still significant [35, 36].

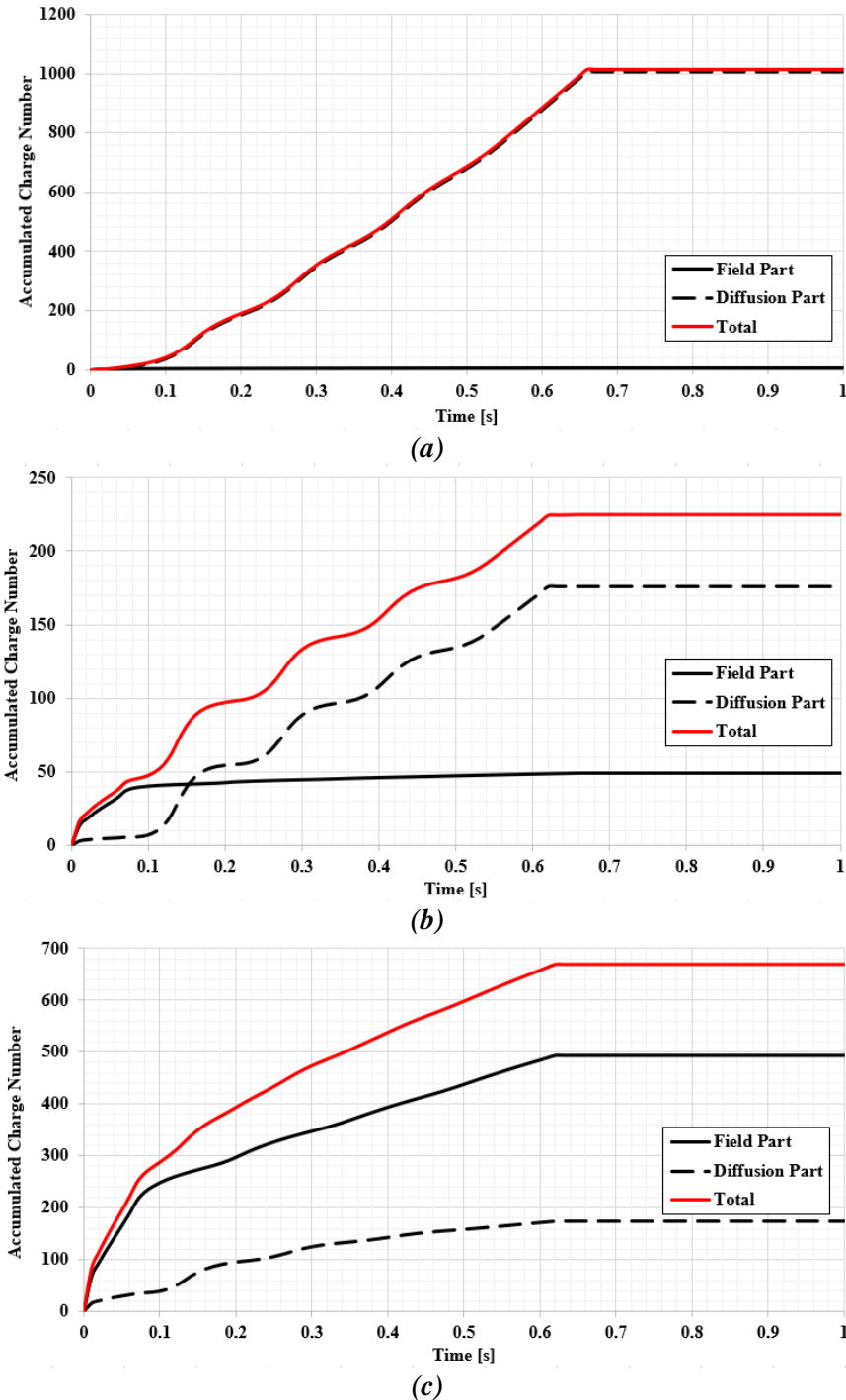


Figure 6. The Dynamics of the Accumulated Charge for the Two Charging Mechanisms (a) 50nm, (b) 1 μ m, (c) 5 μ m Diameter.

The current study assumes a 43.5kV voltage applied to four discharge electrodes and a constant discharge current of 0.475mA. Also, the electrical charging of particles was defined by a dimensionless charge number. The precipitation efficiency of submicron particles sharply decreases for particle diameters between 50nm and 250nm. With an increasing particle size the precipitation efficiency increases to around 18% for 1 μ m diameter particles. This variation is also encountered in previous studies [30, 37] both experimental and numerical, and can be accounted to the charging mechanism that is effective for a given size range of particles. The diffusion charging becomes the dominant mechanism with small particle size, as stated previously. Higher numbers of accumulated charge, combined with the relatively high electric field intensity near the inlet boundary of ESP results in better precipitation efficiencies for 50nm particles (Fig. 6(a)). This property of the process changes and the efficiency drops with increasing particle size for submicron range. However, as field charging mechanism becomes dominant for particles larger than 1 μ m, the efficiencies increase and over 77% of particles with diameters 5 μ m or larger are precipitated (Fig. 7(b)).

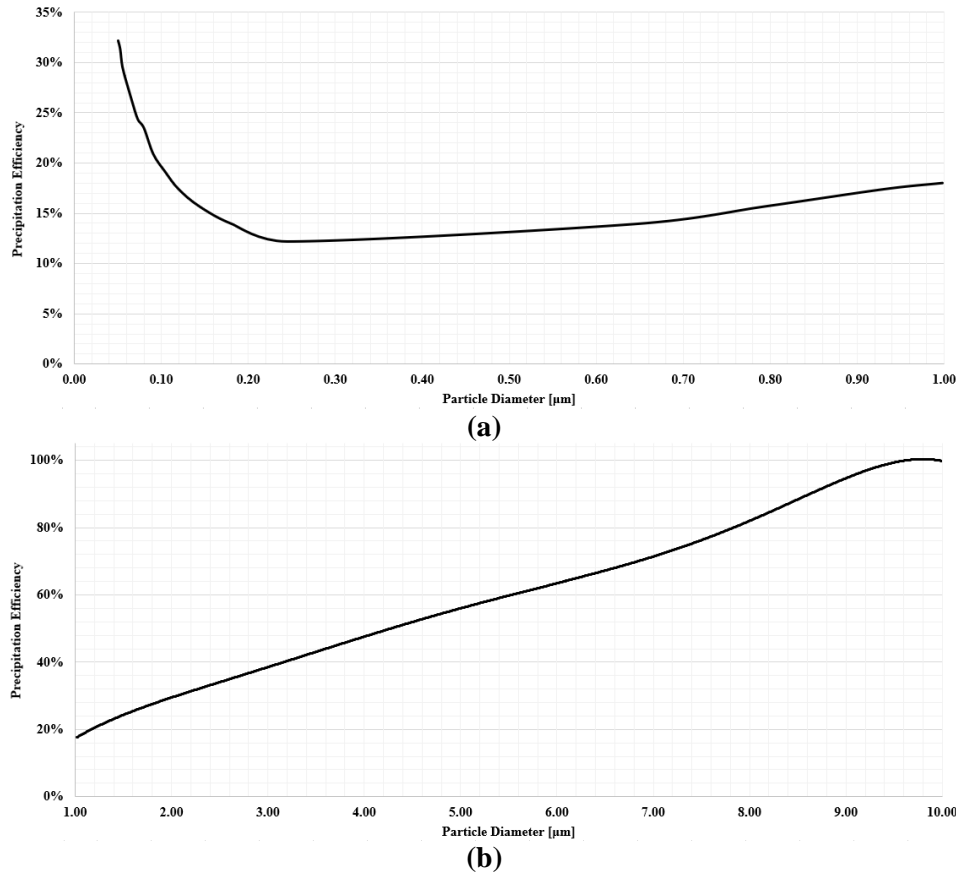


Figure 7. The Relation Between the Precipitation Efficiency and Particle Size: Submicron-sized Particles (a) and Micron-sized Particles (b).

CONCLUSION

In this study, the charging of micron- and submicron-sized particles and particle trajectories were investigated in a wire-to-plate DC electrostatic precipitator by developing a numerical model validated against published experimental data. The effect of different charging mechanisms is discussed using a simplified corona discharge process, along with the characteristics of electric field distribution. Based on the analysis, the following conclusions can be stated. The electric field and ion charge density along the length of precipitation channel displays large variations. However, following the first discharge electrode, the ion charge density remains above a certain level for the entire of channel length. This is a main factor for maintaining particle charge accumulation required for higher precipitation efficiencies, especially for micron-sized particle range.

While submicron particles are mostly affected by the diffusion effects, this mechanism changes with an increasing particle size. For particles with 1 μ m and larger diameters, the field charging mechanism becomes dominant, but with diffusion charging effects still significant. On the other hand, the field charging is largely ineffective when submicron sizes are in question. Finally, an increasing particle diameter results in both charging mechanisms become more effective, thus improving the overall precipitation efficiency within the ESP channel. However, for the submicron

range, efficiencies averaging 21% were observed, because the field charging is nearly absent in charging these particles. The study is distinguishable by the detailed, numerical field investigation of electrical parameters with a model validated against the actual experimental data. A novel perspective to separating the effects of the field and diffusion charging mechanisms on particle precipitation is also suggested in the context.

ACKNOWLEDGMENTS

The author would like to thank TUBITAK-BIDEB for making this work possible, under the roof of 2219-International Postdoctoral Research Fellowship Program (Grant No: 1059B192100001).

CONFLICT OF INTERESTS

The author declares that he has no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

REFERENCES

- [1] White H.J. Industrial electrostatic precipitation, 1st ed. (1963), Reading, MA, USA: Addison-Wesley Pub. Co. ISBN-13: 978-0201086508
- [2] Mizuno, A. Electrostatic precipitation. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 7, no. 5 (2000), pp. 615-624. <https://doi.org/10.1109/94.879357>
- [3] Marquard A., Kasper M., Meyer J., Kasper G. Nanoparticle charging efficiencies and related charging conditions in a wire-tube ESP at DC energization. *Journal of Electrostatics*, vol. 63, no. 1 (2005), pp. 693–698. <http://dx.doi.org/10.1016/j.elstat.2005.03.032>
- [4] Y. Kawada, Y., Kaneko, T., Ito T., Chang, JS. Simultaneous removal of aerosol particles, NO_x and SO₂ from incense smokes by a DC wire-plate electrostatic precipitator under positive coronas. *Journal of Aerosol Science*, vol. 32, no. 1 (2001), pp. 945-946. [http://dx.doi.org/10.1016/S0021-8502\(21\)00425-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0021-8502(21)00425-0)
- [5] Y. P. Raizer, Gas Discharge Physics, 1st ed., Heidelberg, Germany: Springer (1991), pp. 324-375. ISBN-13: 978-3642647604
- [6] Bologna, A., Paur, HR., Seifert, H., Woletz, K. Influence of gas composition, temperature and pressure on corona discharge characteristics. *International Journal of Plasma Environmental Science and Technology*, vol. 5, no.1 (2011), pp. 110–116.
- [7] Xu X., Gao X., Yan P., Zhu W., Zheng, C., Wang, Y. Particle migration and collection in a high-temperature electrostatic precipitator. *Separation and Purification Technology*, vol. 143, no. 1 (2015), pp. 184–191. <http://dx.doi.org/10.1016/j.seppur.2015.01.016>
- [8] Xiao, G., Wang, X., Zhang, J., Ni, M., Gao, X., Cen, K. Characteristics of DC discharge in a wire-cylinder configuration at high ambient temperatures. *Journal of Electrostatics*, vol. 72, no. 1 (2014), pp. 13–21. <http://dx.doi.org/10.1016/j.elstat.2013.10.013>
- [9] Xiao, G., Wang, X., Yang, G., Ni, M., Gao, X., Cen, K. An experimental investigation of electrostatic precipitation in a wire–cylinder configuration at high temperatures. *Powder Technology*, vol. 269, no. 1 (2015), pp. 166–177. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2014.08.063>
- [10] Soldati, A. On The Effects of Electrohydrodynamic Flows and Turbulence on Aerosol Transport and Collection in Wire-Plate Electrostatic Precipitators, *Journal of Aerosol Science*. Vol. 31, No. 3 (2000), pp. 293-305. [http://dx.doi.org/10.1016/S0021-8502\(99\)00055-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0021-8502(99)00055-5)
- [11] Kumar, A., Parihar, S., Hammer, T., Sridhar, G. Development and testing of tube type wet ESP for the removal of particulate matter and tar from producer gas. *Renewable Energy*, vol: 74, no. 1 (2015), pp. 875-883. <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2014.09.006>
- [12] Nikas, KSP., Varonos, AA., Bergeles, GC. Numerical simulation of the flow and the collection mechanisms inside a laboratory scale electrostatic precipitator. *Journal of Electrostatics*, vol 63, no. 5 (2005), pp. 423-443. <http://dx.doi.org/10.1016/j.elstat.2004.12.005>
- [13] Gao, W., Wang, Y., Zhang, H., Guo, B., Zheng, C., Guo, J., Gao, X., Yu, A. Numerical simulation of particle migration in electrostatic precipitator with different electrode configurations. *Powder Technology*, vol. 361, no. 1 (2020), pp. 238-247. <http://dx.doi.org/10.1016/j.powtec.2019.08.046>
- [14] Zhao, L., Adamiak, K. EHD Flow in Air Produced by Electric Corona Discharge in Pin-Plate Configuration. *Journal of Electrostatics*, 63 (2005), pp. 337–350. <https://doi.org/10.1016/j.elstat.2004.06.003>

- [15] Böttner, C.U. The role of the space charge density in particulate processes in the example of the electrostatic precipitator. *Powder Technology*, vol. 136, no. 1 (2003), pp. 285-294. <http://dx.doi.org/10.1016/j.powtec.2003.08.020>
- [16] Wang, X. Effects of corona wire distribution on characteristics of electrostatic precipitator. *Powder Technology*, vol. 366, no. 1 (2020), pp. 36-42. <http://dx.doi.org/10.1016/j.powtec.2020.02.044>
- [17] Blazek, J. Chapter 7 – Turbulence Modeling. in *Computational Fluid Dynamics: Principles and Applications*, 3rd ed., Oxford, UK: Butterworth-Heinemann (2015), pp. 213-252. <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-08-044506-9.X5000-0>
- [18] Gui, N., Jiang, S., Tu, J., Yang, X. Chapter 4 - Application in gas-particle flows. *Gas-Particle and Granular Flow Systems*, 1st ed., Amsterdam, The Netherlands: Elsevier (2020), pp. 123-205. <http://dx.doi.org/10.1016/B978-0-12-816398-6.00013-4>
- [19] Durst, F., Milojevic, D., Schonung, B. Eulerian and Lagrangian predictions of particulate two-phase Flows: A numerical study. *Applied Mathematical Modelling*, vol. 8, no. 1 (1984), pp. 101-115. [https://doi.org/10.1016/0307-904X\(84\)90062-3](https://doi.org/10.1016/0307-904X(84)90062-3)
- [20] Xu, Z., Han, Z., Qu, H. Comparison between Lagrangian and Eulerian approaches for prediction of particle deposition in turbulent flows. *Powder Technology*, vol. 360, no. 1 (2020), pp. 141-150. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2019.09.084>
- [21] Sun, Z., Zhu, J., Zhang, C., Numerical study on the hydrodynamics in high-density gas-solid circulating fluidized bed downer reactors. *Powder Technology*, vol. 370, no. 1 (2020), pp. 184-196. <http://dx.doi.org/10.1016/j.powtec.2020.05.035>
- [22] Ma, C., Zhou, Y., Wang, J., Li, X. Numerical study on solar spouted bed reactor for conversion of biomass into hydrogen-rich gas by steam gasification. *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 45, no. 58 (2020), pp. 33136-33150. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.09.120>
- [23] Yang, S., Dong, R., Du, Y., Wang, S., Wang, H., Numerical study of the biomass pyrolysis process in a spouted bed reactor through computational fluid dynamics. *Energy*, vol. 214, no. 1 (2021), pp. 1-15. <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2020.118839>
- [24] Adeniji-Fashola, A., Chen, CP. Modeling of confined turbulent fluid-particle flows using Eulerian and Lagrangian schemes. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol: 33, no. 1 (1990), pp. 691-701. [https://doi.org/10.1016/0017-9310\(90\)90168-T](https://doi.org/10.1016/0017-9310(90)90168-T)
- [25] Li, L., Gopalakrishnan, R. An experimentally validated model of diffusion charging of arbitrary shaped aerosol particles. *Journal of Aerosol Science*, vol: 151, no. 1 (2021), pp. 1-28. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jaerosci.2020.105678>
- [26] Zhu, Y., Chen, C., Chen, M., Shi, J., Shangguan, W. Numerical simulation of electrostatic field and its influence on submicron particle charging in small-sized charger for consideration of voltage polarity. *Powder Technology*, vol: 380, no. 1 (2021), pp. 183-198. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2020.11.042>
- [27] Lawless, PA. Particle charging bounds, symmetry relations, and an analytic charging rate model for the continuum regime. *Journal of Aerosol Science*, vol. 27, no. 2 (1996), pp. 191-215. [https://doi.org/10.1016/0021-8502\(95\)00541-2](https://doi.org/10.1016/0021-8502(95)00541-2)
- [28] Ramadhan, AA., Kapur, N., Summers, JL., Thompson, HM. Numerical development of EHD cooling systems for laptop applications. *Applied Thermal Engineering*, vol. 139, no. 1 (2018), pp. 144-156. <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.04.119>
- [29] Long, HGZ., Feng, Z., Lin, B., Yu, T. Numerical simulation of the characteristics of oil mist particles deposition in electrostatic precipitator. *Process Safety and Environmental Protection*, vol. 164, no. 1 (2022), pp. 335-344. <http://dx.doi.org/10.1016/j.psep.2022.06.022>

- [30] Lu, Q., Yang, Z., Zheng, C., Li, X., Zhao, C., Xu, X., Gao, X., Luo, Z., Ni, M., Cen, K. Numerical simulation on the fine particle charging and transport behaviors in a wire-plate electrostatic precipitator. *Advanced Powder Technology*, vol. 27, no. 5 (2016), pp. 1905-1911. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apt.2016.06.021>
- [31] Peek, F.W., Dielectric Phenomena in High-voltage Engineering (1929), McGraw-Hill Book Company, Inc. ISBN-13: 978-1443732321
- [32] Cross, J. Electrostatics: Principles, Problems and Applications, 1st ed. (1987), Bristol, UK: CRC Press. ISBN-13: 978-0852745892
- [33] Penney GW., Matick, RE. Potentials in D-C corona fields. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, Part I: Communication and Electronics*, vol. 79, no. 2 (1960), pp. 91-99. <https://doi.org/10.1109/TCE.1960.6368550>
- [34] Choi, BS., Fletcher, CAJ. Turbulent particle dispersion in an electrostatic precipitator. *Applied Mathematical Modelling*, vol. 22, no. 12 (1998), pp. 1009-1021. [https://doi.org/10.1016/S0307-904X\(98\)10034-3](https://doi.org/10.1016/S0307-904X(98)10034-3)
- [35] Lackowski, M., Krupa, A., Jaworek, A. Corona discharge ion sources for fine particle charging. *Journal of Electrostatics*, vol. 72, no. 2 (2010), pp. 377-382. <http://dx.doi.org/10.1140/epjd/e2009-00309-0>
- [36] Zhang, K., Chen, S., Long, T., Xu, M., Zhang, H., Zhang, D. Study on Mechanism and Characteristics of Particle Charging in Electrostatic Precipitator. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 677, no. 1 (2019), pp. 1-8. <http://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/677/3/032109>
- [37] Byeon, JH., Hwang, J., Park, JH., Yoon, KY., Ko, BJ., Kang, SH., Ji, JH. Collection of submicron particles by an electrostatic precipitator using a dielectric barrier discharge. *Journal of Aerosol Science*, vol: 37, no. 11 (2006), pp. 1618-1628. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jaerosci.2006.05.003>



Kahramanmaraş Sütçü İmam University

Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 12.09.2023

Received Date : 12.09.2023

Kabul Tarihi : 24.11.2023

Accepted Date : 24.11.2023

SDA: A NOVEL SKEWED-DEEP-ARCHITECTURE FOR VEHICLE MOTION DETECTION IN DRIVING VIDEOS

EDM: SÜRÜŞ VIDEOLARINDA ARAÇ HAREKET ALGILAMASI İÇİN YENİ BİR EĞİK-DERİN-MIMARI

Tansu TEMEL^{1*} (ORCID: 0000-0002-8359-1146)*Mehmet KILIÇARSLAN*¹ (ORCID: 0000-0002-7212-5262)*Yaşar HOŞCAN*¹ (ORCID: 0000-0003-0789-6025)¹ Eskişehir Technical University, Department of Computer Engineering, Eskişehir, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Tansu TEMEL, tansutemel@eskisehir.edu.tr

ABSTRACT

Collision avoidance mechanisms are important topics for studies in the field of autonomous vehicles. We could obtain prior information about the collision from the movement angles of vehicles. Therefore, it is important issue to learn the movement angles of vehicles in motion. In the study, an architectural model is developed that learns the horizontal movement angles of vehicles to form a base for collision warning systems. YOLOv3 is modified and used on motion profiles. Thanks to the learned angle values, also the bounding boxes match the traces in the motion profiles smoothly. The results obtained have a mAP value of 79% and an operating speed of 36 FPS. These results are better than when trained on motion profiles of the YOLOv3 architecture. In addition, the use of the new architecture on motion profiles and factors such as noise and bad weather in the image do not adversely affect the results. With these features, a fundamental step has been taken for anti-collision systems.

Keywords: anti-collision, deep learning, driving videos, movement angle, skew bounding boxes

ÖZET

Çarpışma önleme mekanizmaları otonom araçlar alanındaki çalışmalar için önemli bir konudur. Araçların hareket açılarından çarpışma hakkında önceden bilgi alma imkanımız olmaktadır. Bu nedenle hareket halindeki araçların hareket açılarının öğrenilmesi önemli bir konudur. Çalışmada çarpışma uyarı sistemlerine temel oluşturmak amacıyla araçların yatay hareket açılarını öğrenen bir mimari model geliştirilmiştir. Başarılı derin öğrenme mimarilerinden biri olan YOLOv3 geliştirilerek elde edilen yeni mimari hareket profilleri üzerinde kullanıldı. Öğrenilen açı değerleri sayesinde sınırlayıcı kutular da, hareket profillerindeki izlerle tam olarak eşleşmektedir. Elde edilen sonuçlar %79 mAP değerine ve 36 FPS çalışma hızına sahiptir. Bu sonuçlar, saf YOLOv3 mimarisinin hareket profilleri üzerinde eğitildiklerinde elde edilen sonuçlardan daha iyidir. Yeni mimarinin hareket profillerinde kullanılması ile görüntüdeki gürültü, kötü hava gibi etkenler sonuçlarımızı olumsuz etkilememektedir. Bu özellikleri ile çarpışma önleyici sistemler için önemli bir adım atılmıştır.

Anahtar Kelimeler: çarpışma önleme, derin öğrenme, sürüş videoları, hareket açısı, eğik sınırlayıcı kutular

ToCite: TEMEL, T., & KILIÇARSLAN, M., & HOŞCAN, Y., (2024). SDA: A NOVEL SKEWED-DEEP-ARCHITECTURE FOR VEHICLE MOTION DETECTION IN DRIVING VIDEOS. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 27(1), 92-104.

INTRODUCTION

With the advancement of autonomous systems, studies on autonomous vehicles are also increasing. At the forefront of these studies are anti-collision systems. In these systems, it is of great importance to detect the surrounding objects and their movements by using images taken from the camera inside the vehicle. Therefore, in addition to detecting moving objects, their direction of movement must be successfully detected. While doing this, it is necessary to have an architecture that produces fast results in order to be used in real-time systems. One of the challenges here is working on images with ever-changing backgrounds. Besides, it is important in terms of the durability of the method to be developed in dealing with external factors such as noise, bad weather conditions, and reflection in the image.

Collision warning mechanisms are an important issue for today's autonomous vehicles. We can have information about whether there will be a collision by looking at the movement angles of the vehicles. To do this, we need to observe both the horizontal and vertical movements of the vehicles. In the study, an architectural model that learns the horizontal movement angles of vehicles has been developed to form a basis for collision warning systems. The probability of collision is much higher at the point where the horizontal movements of the vehicles are close to 0 degrees (Kilicarslan & Zheng, 2018). Therefore, learning the motion angles of moving vehicles is an important issue.

In general, objects are detected first and then the detected objects are tracked to make sense of the movements of moving objects. Shape-based vehicle detection systems only provide the position of the vehicle within a picture frame. For autonomous systems, successful detection of both the vehicle position and the direction of movement is a very important criterion.

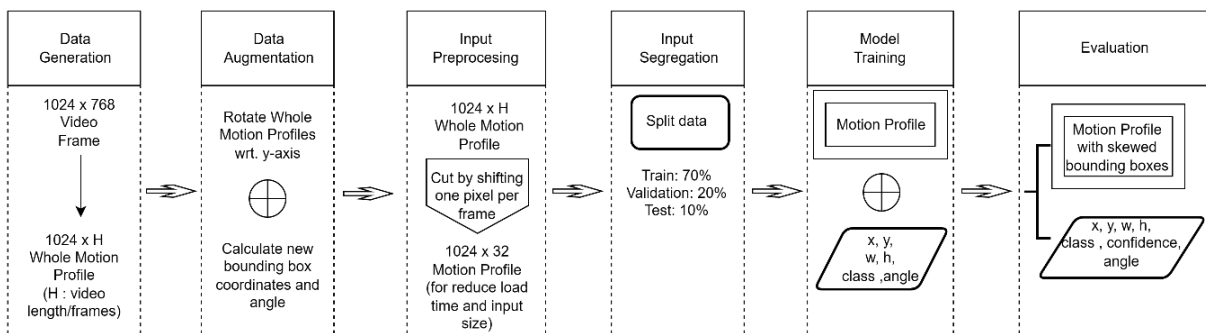


Figure 1. The Figure Illustrates the Overall Framework and Pipeline of the Method

As an alternative to other methods of identifying vehicles in each video frame and monitoring video frames, motion information is extracted and analyzed as smaller-dimensional data. Motion profiles represent picture frames that contain summary information about the motion of moving objects. These profiles have smaller sizes than normal images. In this way, the processing time is shorter. The movements of the vehicles can be seen as certain traces on the movement profiles. These tracks represent information containing relevant movements relative to the current vehicle. When looking at the relative movements of other vehicles from the current vehicle, it is seen that these movements have a certain structure. The traces left by fixed and background objects can be easily distinguished from the structure. Traditional shape-based axis-aligned deep learning architectures have a structure based on the x-axis, y-axis, width, and height values of detected objects. Considering these architectures, it is seen that the traces left by the vehicles on the movement profiles do not fully comply with these structures. Axis-aligned bounding boxes are used in common object detection methods. However, when the movement profiles of the driving videos are examined, it is seen that the traces left by the vehicles on the profile are not in line with the axis and have an inclined structure depending on the movement speed.

The process steps of the developed method from beginning to end are shown in Figure 1. In the first step, the whole motion profiles of the video sequences were created. These profiles are increased by some data augmentation methods. Then, after a preprocessing step, motion profile patches of 1024x32 dimensions were created so that they could be used in the new architecture. For the training process, the dataset was divided into training, validation, and testing at the rate of 70%, 20%, and 10%, respectively. After the model training step, the obtained model was evaluated on the test data, and the results were interpreted.

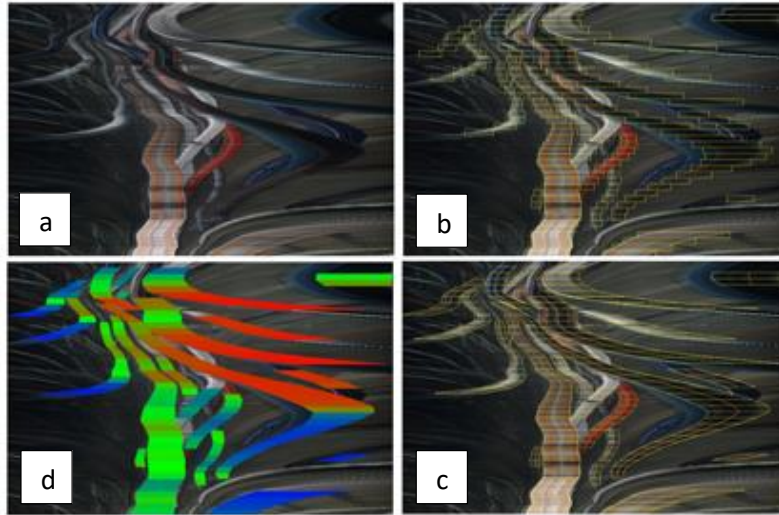


Figure 2. Different Representations of The Motion Profile of the Whole Video

Figure 2 presents the different types of representations of the whole motion profiles. There is a whole motion profile in Figure 2(a), a representation of vehicles with traditional boxes in Figure 2(b), a declaration of vehicles with skew boxes in Figure 2(c), and a colored display according to the angle of movement of vehicles in Figure 2(d).

The remainder of this paper is organized as follows: Section 2 explains the related works. Section 3 presents the proposed SDA algorithm, and Section 4 shows the experiments for a proposed method and accuracy evaluation results. Finally, Section 5 clarifies the results and informs about future works of the paper.

RELATED WORK

Processing video footage is a demanding but challenging task today. With image processing methods, meaningful information can be extracted from moving and fixed camera images. One of the most challenging aspects of working with motion camera images is the objects' location in an ever-changing environment. In addition, being able to deal with noise, reflection, scaling and similar challenges on video images is critical to developing a durable model.

Object detection and recognition, which are essential elements of digital image processing applications, have been struggling for many years. In recent years, thanks to advances in graphics processing units (GPU) and deep learning, object detection, and identification methods have been developed with higher accuracy. Along with these developments, many studies (Zhang et al., 2017; Gordon et al., 2018; Cao et al., 2017) have been conducted on moving objects in video images. These studies are generally on object detection and tracking of detected objects (Behrendt et al., 2017). The first approach using deep learning in multi-object tracking was (Wang et al., 2014), presented in 2014. Another study (Cadieu et al., 2008), proposed a two-layer autoencoder used to improve visual features. Computation of similarities was performed using an SVM after the feature extraction step and it was shown that feature improvement soundly enhanced the model performance. However, the dataset the algorithm tested is not widely used and the results are not comparable to other methods.

In a study (Chen et al., 2018) to calculate a similarity score and a bounding box regression simultaneously, the convolutional portion of ResNet was used to construct a custom model by stacking an LSTM cell on top of convolutions. A visual displacement network was proposed that learns to predict the next position of the object based on the preceding positions of the objects and the effect of an object on other objects in the scene (Zhou et al., 2018). This network was then used to predict the position of the objects in the next frame, taking their past trajectories as input. The network was also competent in extracting visual information from predicted locations and principal detections to calculate a similarity score.

In the method developed based on deep learning to detect and monitor traffic lights in real-time (Behrendt et al., 2017), 2 different neural networks were used to detect and monitor traffic lights based on YOLO architecture. One of the neural networks was trained for traffic light detection and the other one was trained to detect cases where traffic lights are misperceived. In another study (John & Mita, 2019), an image-based semantic interpretation architecture was proposed for the autonomous vehicle. To understand the movements of neighboring vehicles, a view-based vehicle spatio-temporal prediction framework was proposed using YOLOv3 and the new multi-frame semantic segmentation architecture. A rule-based system was used to make sense of the movements of neighboring vehicles by using the estimated vehicle location and movement information.

In the study, which is aimed at real-time in-vehicle video analysis to find and follow the vehicles in front (Jazayeri et al., 2011), the features extracted from the video are continuously projected and followed on a 1D profile. The hidden Markov Model (HMM) was used to separate and track target vehicles from the background. The method is tested in daytime and night-time videos on different road types, where it is robust and effective in dealing with background and lighting changes, as well as working in real time for dash cams. In the method (Li et al., 2020) that detects the rotated objects based on the YOLO architecture, although the rotated state of the object was detected, no information about the rotation angle was accessed. A summary of the above-mentioned studies is given in Table 1.

Image and video processing methods have various application areas mentioned above. One of these application areas is autonomous vehicles and advanced driving support systems. Today, object detection from images has reached high levels of accuracy. However, these methods usually detect objects independent of the temporal dimension and then try to establish relationships between objects by following the objects using models such as LSTM (Hochreiter & Schmidhuber, 1997; Liang & Zhou, 2018). LSTM is a recurrent neural network (RNN) that remembers values at promiscuous intervals. Each sequence requires four linear layers per cell at a time step and for each row. These layers consume large amounts of memory bandwidth. Therefore, most computational units cannot be used when the system does not have sufficient memory bandwidth to feed the computational units. There may be such constraints in the use of LSTMs as it is difficult to add more memory bandwidth. This makes it difficult to use in real-time systems. Detection of vehicles in traffic, which is one of the applications that need to work in real-time, is an important problem for advanced driver support systems (ADAS) and autonomous systems. Therefore, it is necessary to detect the target vehicle and make sense of its movement, both with high accuracy and in real-time. In safe driving systems, to understand the vehicle-vehicle interaction, the direction of movement of the target vehicle relative to the vehicle must be detected instantaneously.

When previous studies were examined, no detailed study was found on learning the direction of movement of vehicles. Therefore, a study was conducted to learn the movement angles of the vehicles. Some angle values are more effective in causing an accident. The importance of this study is that angular movements can be detected instantly at continuous values. In this way, it can be used for autonomous vehicles and collision avoidance systems.

Table 1. Comparative Table of the Literature Works

Authors	Cadiou et al., 2018	Jazayeri et al., 2011	Wang et al., 2014	Behrendt et al., 2017	Chen et al., 2018	Zhou et al., 2018	John & Mita, 2019	Li et al., 2020
---------	---------------------	-----------------------	-------------------	-----------------------	-------------------	-------------------	-------------------	-----------------

Methodology	Two-layer encoder and SVM	Hidden Markov Model	Multi-object tracking	Detect-track approach, two different YOLO architecture	ResNet and LSTM combination	Visual displacement network	YOLOv3, semantic segmentation, and rule-based approach	Rotated object detection using YOLO architecture
--------------------	---------------------------	---------------------	-----------------------	--	-----------------------------	-----------------------------	--	--

SKEWED-YOLO FOR DETECTION ANGLES AND DIRECTIONS

YOLOv3 is an efficient convolutional neural network used for object detection. This architecture splits any input image into the SxS grid system. Each grid in the input image is accountable for object detection. Grid cell estimates the number of bounding boxes of an object (Hui, 2018). There are five items for each boundary box (x, y, w, h, confidence score). (x,y), w and h are the coordinates, width, and height of the object in the input image, respectively. The confidence score is the probability that the box contains objects and how precise the bounding box is. Such algorithms are frequently used in real-time object detection. YOLOv3 has many features we need for real-time object detection by correctly classifying objects. In the study, a new architecture was created by developing the YOLOv3 architecture, which is one of the existing axis-aligned deep learning methods, on learning the angular values of the target vehicles, movement directions, and movements of the vehicles by working with in-vehicle video images.

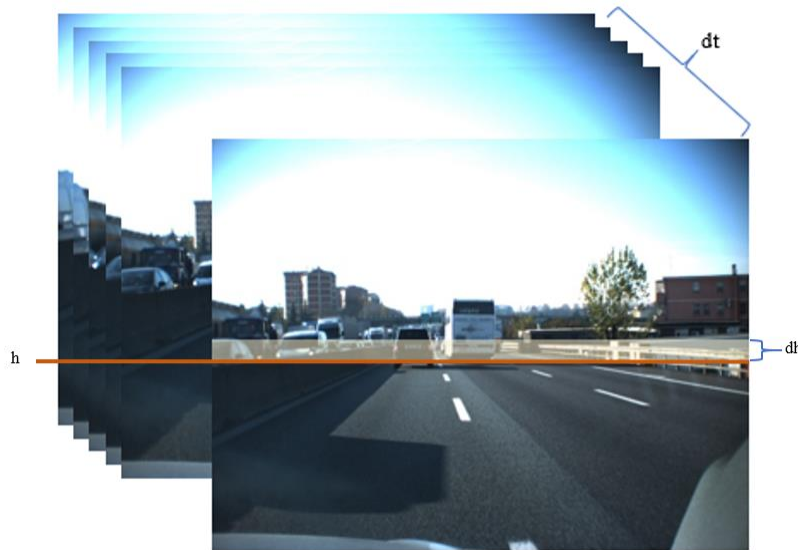


Figure 3. Creating Motion Profiles from Video Frames.

The new architecture seen in Figure 1 was trained on image fragments containing motion information of vehicles, called motion profiles, and a study was conducted to form a basis for anti-collision systems. Thanks to motion profiles, several video frames are combined into a single frame. Thus, the size of the data to be processed is significantly reduced. Since the obtained method works with the smallest size images suitable for the problem, it also improved the FPS value that YOLOv3 obtained on 416x416 images, which can be used in real-time applications. In addition, the method, without the need for an object detection-tracking paradigm, it has been transformed into a single combined image processing as in conventional shape-based object detection methods. In addition, the angle parameter, which is a newly added parameter to architecture different from others, was learned by participating in the training process.

Creation of Motion Profiles

In the training phase of the obtained architecture, picture fragments containing the motion information of the vehicles, called motion profiles, were used. While creating motion profiles, a one-dimensional array is obtained by vertically averaging the pixel values in that area along a certain height from the ground near the horizon according to the camera’s point of view. “dt” of these sequences will be combined sequentially to form the

horizontal movement information of the vehicles. Here, “dt” also denotes the retrospective video frame count used to create the motion profile. The motion profile shows the relative motion relative to another vehicle. The formula (Kılıçarslan & Temel, 2022) for the creation of motion profiles is as in (1).

$$MPI(x; t) = \sum_{y=h}^{h+dh} I(x, y, t) \quad (1)$$

Here “h” represents a point close to the horizon line, and “dh” represents the height of the piece to be taken from the horizon line. An example of this is shown in Figure 3. The yellow cross-section in this picture shows the area used when creating the motion profile, and the orange line shows the “h” point. Movement profiles are in the structure given in Figure 2(a). The boxes on the motion profiles represent vehicles and their motions. Since it is averaged in the “dh” range, smooth transitions and continuity of the tracks are ensured in the driving videos. Also, luminance consistency is not required like in optical flow-based methods. Therefore, interruption in intensity luminosity will not influence the understanding of motion.

Choosing the “dt” value is very important to understand the movements in the movement profiles. When very small “dt” values were selected, the angles could not be learned sufficiently because there was not enough vehicle motion information in the motion profiles. At very large “dt” values, it may contain more than one movement pattern other than the current situation. In this case, an attempt will be made to learn the angle value on a wrong pattern, and this will cause inconsistency.

Taking these considerations into account, “dt” is set to 16 frames (0.8 s) in MPI as the motion profile patch image. However, these patches are resized to 32 pixels to be compatible with YOLOv3 sublayers. In this way, the size of the image to be used as input is reduced by 24 times.

Angles of Moving Objects

After creating motion profile images, angles must be calculated. Bounding boxes in labeled videos were used while performing this process. While calculating the angles, bounding boxes between the current frame and previous dt frames are used. The midpoints of the two bounding boxes are found, then these midpoints are connected with a straight line to find the motion direction. The position of the vehicle we are in does not affect the calculation. Because the angle is calculated depending on the movement of the surrounding vehicles between the previous position of the “dt” frame and the bounding boxes in their current positions. We can test this by making use of the feature of motion profiles providing us with backward motion information.

The calculation of the formula is shown in (2) and Figure 2. While the red boxes in Figure 5 show the bounding box in the previous picture as much as the “dt” video frame, the blue ones show the bounding boxes of the same vehicle in the current video frame. We find the midpoints of both boxes on the horizontal axis and combine them with a line to determine the slope of this line as the angle of the vehicle’s movement. Colored curved lines are the line segments that show the movement angles of the vehicles.

$$\alpha = \text{atan}\left(\frac{X_{\text{center}}(t) - X_{\text{center}}(t - dt)}{dt}\right) \quad (2)$$

X_{center} = midpoint of the horizontal axis of the bounding box

t = current video frame

dt = number of images to be taken backward from the current video frame (time interval)

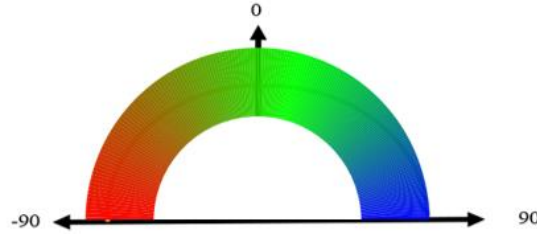


Figure 4. Colored Representation of the Created Angles on the Coordinate System.

In a complicated background, distance background objects may have similar traces to the target vehicles, and empty regions in between two vehicles cause ambiguities. Hence, angles less than minus 85 degrees and greater than 85 degrees were considered as background objects. The visual representation of the coloring of the skewed bounding boxes depending on the angles in the test phase is as in Figure 4.

New IOU

While the results are being obtained, the IOU metric is different from the one used in general object detection, and the angle difference between the learned angles and the real angles is also obtained by participating in the calculation, following the problem. The mentioned formula is shown in (3). In the new architecture created, besides the x-coordinate, y-coordinate, width, and height information of the object, the angle is also included in the calculation as a parameter to be learned.

$$IOU_{new} = \left(\frac{intersectionArea}{box_1Area + box_2Area - intersectionArea} \right) \times \cos(box_1\alpha - box_2\alpha) \quad (3)$$

Loss Function Calculation

In addition to the total loss function used in YOLOv3, the loss function of the angles has also been added. The mean square error method was used while calculating the loss function of the angles and width-height of the boxes. For loss calculation of confidence, class, and x-y coordinates of boxes binary cross entropy was operated. The formula for the calculation is as in (4). Besides, the weight value of \mathcal{L}_x is set larger than the other loss functions to increase the learning rate of the angles.

$$ss = \mathcal{L}_{xy} + \mathcal{L}_{wh} + \mathcal{L}_{confidence} + \mathcal{L}_{class} + \mathcal{L}_{angle} \quad (4)$$

Table 2. Model Training Parameters

	YOLOv3	SDA-YOLOv3
Learning Rate	0.001	0.0001
Batch Size	32	32
Epoch	51	101
Optimizer	Adam	Adam
Anchors (w x h)	[40 x 24]	[10x32] [16x32] [28x32]
	[120 x 24]	[42x32] [62x32] [96x32]
	[350 x 24]	[116x32] [156x32] [337x32]

Image size (w x h)	1024 x 64	1024 x 32
--------------------	-----------	-----------

EXPERIMENTS

In the study, the publicly available Toyota Motor Europe Motorway Dataset (TME) (Caraffi et al., 2012) dataset was used. This dataset consists of image frames with a resolution of 768 x 1024. The number of frames per second is 20. TME dataset consists of a total of 28 videos containing more than 30000 images. 20 of these videos covering different conditions were selected. The TME dataset consists of videos at different times of the day. In this way, data with different lighting conditions are available. Data is taken only from the highway. It includes all possible traffic conditions on the highway. The videos were converted into images and 20600 images were obtained. Images obtained from the videos were increased using the data augmentation method.

The SDA model is developed in Python using Tensorflow Keras API and trained on the Nvidia Tesla T4 graphics card with 16GB memory and with Cuda v12 dependencies for GPU support. Also, 12 GB of memory is enough to handle the model creation and testing task. Experiments and inferences are made on an Ubuntu machine with Intel(R) Xeon(R) CPU 2.20GHz and Tesla T4 GPU hardware. For all the training experiments, the default YOLOv3 parameters are used. different from the default settings, anchors are set to different scales in Table 2. To learn the angles better, the loss values of the angle were multiplied by a larger weight value.

During the training phase, 70% of the dataset was used, while 20% and 10% were used for validation and testing, respectively. The bounding boxes in the existing labeling have been changed to cover only the rear of the vehicles. In addition, vehicles are not labeled in cases where there is no rear view of the vehicles and some parts of them are covered by different vehicles. In addition, the oncoming vehicles were excluded from the data set, since the movements of oncoming vehicles left traces in the motion profiles similar to the background image, and the outgoing and incoming vehicles in the data set were clearly separated by a barrier. Data distributions according to the angles are given in Figure 7. As seen in Figure 7(a), the data in the dataset is not evenly distributed according to the angles. This creates an obstacle to learning the angles that do not have enough numbers. Therefore, the data augmentation process has become mandatory. While increasing the data, the number of data was doubled, and the pictures were rotated to be symmetrical with respect to the y-axis. In addition, the coordinates and angles of the vehicles were recalculated according to the formula (5) and added to the available data, and the training process was repeated under the same conditions.

$$X_{center_{augmented}} = W_i - X_{center}$$

$$Y_{center_{augmented}} = Y_{center}$$

$$Width = Width$$

$$Height = Height$$

$$\alpha_{augmented} = (-1) * \alpha$$

(5)

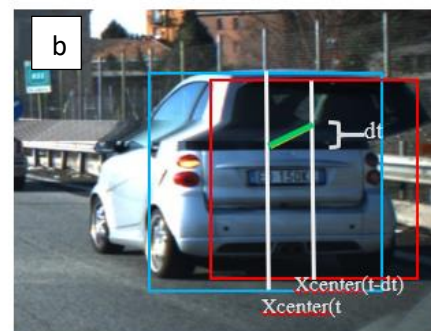
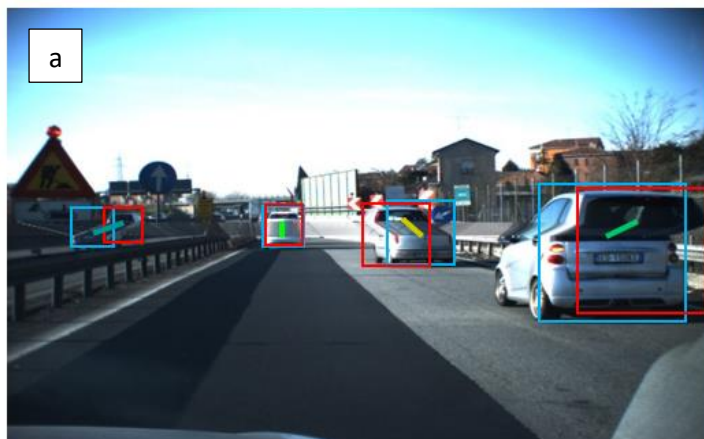


Figure 5. a. Motion Directions are Color Lines, Red Boxes are Current Frame, Blue Boxes are dt Frame Previous **b.** Visualization of Determining the Direction of Movement.

In the study, progress was observed in learning the angle as a new parameter on the YOLOv3 (Muehleemann, 2019) deep learning architecture. Generally, each picture is given separately to the training process. Instead, a single motion profile picture of the video was created, and this whole profile was cut piece by piece in the code (Figure 6) and participated in the training process. In this way, the time taken to read the picture at each step is shortened. The training process has been expedited. Model training time is important for practical implementations. The average training time for SDA-YOLOv3 is 9 hours, this training time with YOLOv3 is approximately 10 hours. While the model size obtained using the YOLOv3 architecture is 246 MB, this value is 236 MB in the SDA-YOLOv3 architecture. While calculating the average precision value, the values produced for each of the test images were compared with the ground truth values. Boxes with an intersection-over-union (3) value above 0.5 were considered TP. The values that should not be in the picture but we found are accepted as FP, and the values that should be but we could not find are accepted as FN. When the results were interpreted, a 79% average precision value, which is better than the average precision value obtained on black padded motion profiles (Kilicarslan & Temel, 2022) of the YOLOv3 architecture used for object detection, was found.

Mean average precision (mAP) is used to evaluate object detection models. mAP compares the ground truth bounding box with the detected box and returns a score. The higher the score, the more accurate the model's determinations. When a model has high recall but low precision, the model correctly classifies most positive examples but has many false positives. When a model has high precision but low recall, the model is accurate when it classifies an example as positive but can classify only a fraction of the positive examples.

Since it is known that there is a general trade-off between precision and recall, a balanced precision-recall graph is required to obtain the best mAP results. Since the mAP metric is used in the testing phase of general object detection algorithms, this metric was used as the accuracy metric for YOLOv3 and SDA-YOLOv3. Thanks to the high mAP value, we can make more accurate determinations. In the proposed method, the 3% difference in mAP value is a significant difference for object detection models.

The angles obtained in the test results were compared with the ground truth data. It can find angles with an average difference of 3 degrees. When the angle differences between ground truth data and predicted data are examined, it is seen that the angle differences of the data, which are very few in number in ground truth data, are much higher. This is clearly seen in Figure 8. Angles can be found with a difference of about 2 degrees in the parts where the data is sufficient.



Figure 6. The Transition from Whole Profile to Motion Profile for the Training Process.

In the test part, the necessary development has been made for the drawing of angular bounding boxes, unlike the normal bounding boxes. In this way, bounding boxes can be drawn on the motion profiles that fully adapt. This shows that the angle can be learned together with the coordinate information of the boxes. This is shown in Figure 9.

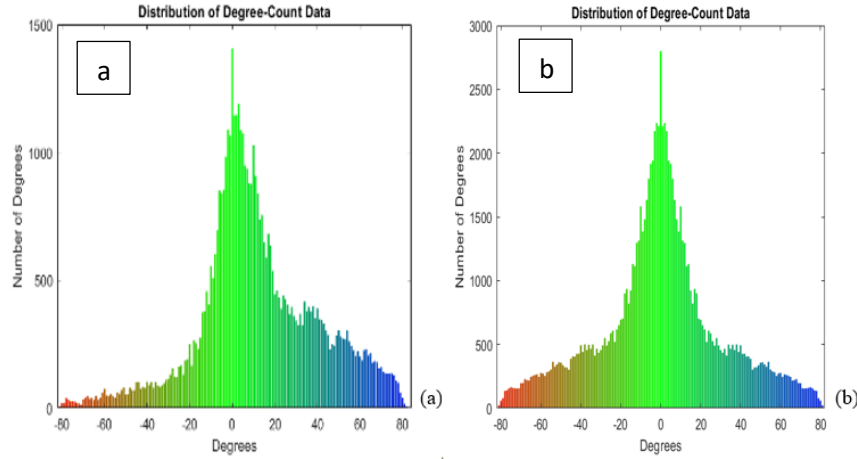


Figure 7. Chart Showing the Distribution of the Data by Angles. (a) Normal Data, (b) Augmented Data)

RESULTS AND FUTURE WORKS

Looking at the results in Table 3, better results were obtained with the normal YOLOv3. In addition, motion angles could be detected with high accuracy. Due to the high number of FP’s in both YOLOv3 architectures, the mAP rate is low. The reason for this is that the background images and vehicle reflections have similar images to the vehicle movement, so even if there is no vehicle there, it can produce results as a vehicle. Therefore, not only the motion information is sufficient, but also the shape information must be added.

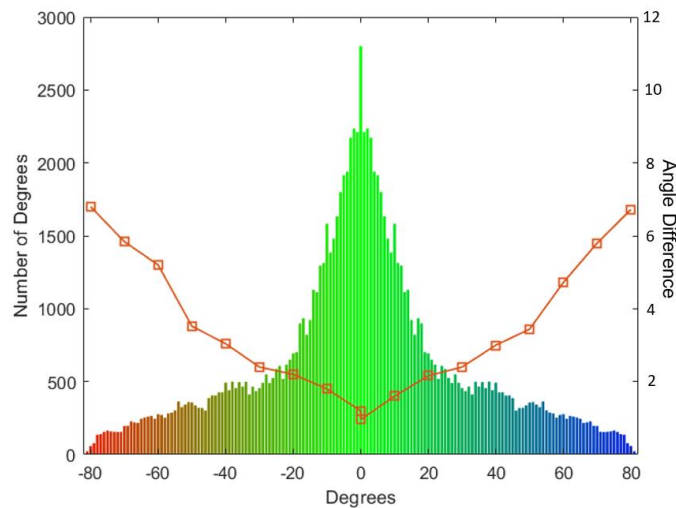


Figure 8. The Average Difference of the Angles Learned According to the Degree Distribution of the Data in the Training Data

The main purpose of the study is to present a new architecture that learns the angle parameter rather than increasing the accuracy of a found method. Therefore, although the mAP value seems low, the results are sufficient to have better results than normal YOLOv3. Learning the movement angles and directions of the vehicles is important in terms of making sense of the movements of the vehicles and thus using them in anti-collision systems. The test results of the presented method and the test results of the YOLOv3 architecture are given in Figure 10. The results obtained by learning the movement angles are more suitable for oblique patterns. The green skewed boxes

represent the results obtained from the SDA-YOLOv3 architecture. The yellow bounding boxes are the test images obtained from the YOLOv3 architecture.

In the method offered, bad weather conditions, noise in the image, etc. factors do not adversely affect the results. Thus, we have obtained a more consistent and durable system.

Table 3. Overall Results and Comparison

	YOLOv3 (Kilicarslan & Temel, 2022)	SDA-YOLOv3 (Proposed)
mAP	73%	79%
FPS	35	36
Angle Difference	No Angle Information	~3 degrees

In such applications, motion information is mostly obtained by using the optical flow method (Liu et al., 2013; Yun et al., 2022). Then, working on sequential data such as LSTM for object tracking recurrent neural networks are used. Since the method we presented does not use methods such as optical flow and LSTM, we have obtained a real-time application that works faster. In addition, by improving on the current deep learning architecture used in object detection, we were able to find the direction and angle of movement of the vehicle on a single image without using any tracking algorithms. In this way, a study that can be the basis of anti-collision systems has been revealed.



Figure 9. Images of Test Results on Motion Profiles (Motion Angles and Colorized Representation)



Figure 10. Comparative results of YOLOv3 and SDA-YOLOv3 architectures on visual example.

In the next study, the sigma parameter, which gives us the approach-divergence ratio of the vehicles, can be added to the training process. In another study, both horizontal and vertical movement information can be obtained by using vertical and horizontal movement profiles together. In this way, both studies can create a method that can be used in collision avoidance systems.

SUPPLEMENTARY MATERIAL

Sample video of test results can be found at the following link:
https://drive.google.com/file/d/1deo4Ct_CKQuNQfgBsX7ljLMEyHa6qkM9/view?usp=sharing

REFERENCES

- Behrendt, K., Novak, L., & Botros, R. (2017, May). A deep learning approach to traffic lights: Detection, tracking, and classification. In *2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)* (pp. 1370-1377). IEEE. <https://doi.org/10.1109/icra.2017.7989163>
- Cadiou, C., & Olshausen, B. (2008). Learning transformational invariants from natural movies. *Advances in neural information processing systems*, 21.
- Cao, Z., Simon, T., Wei, S. E., & Sheikh, Y. (2017). Realtime multi-person 2d pose estimation using part affinity fields. In *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition* (pp. 7291-7299). <https://doi.org/10.1109/cvpr.2017.143>
- Caraffi, C., Vojří, T., Trefný, J., Šochman, J., & Matas, J. (2012, September). A system for real-time detection and tracking of vehicles from a single car-mounted camera. In *2012 15th international IEEE conference on intelligent transportation systems* (pp. 975-982). IEEE. <https://doi.org/10.1109/itsc.2012.6338748>
- Chen, L., Peng, X., & Ren, M. (2018). Recurrent metric networks and batch multiple hypothesis for multi-object tracking. *IEEE Access*, 7, 3093-3105. <https://doi.org/10.1109/access.2018.2889187>
- Gordon, D., Farhadi, A., & Fox, D. (2018). Re3: Real-time recurrent regression networks for visual tracking of generic objects. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 3(2), 788-795. <https://doi.org/10.1109/lra.2018.2792152>
- Hochreiter, S., & Schmidhuber, J. (1997). Long short-term memory. *Neural computation*, 9(8), 1735-1780. <https://doi.org/10.1162/neco.1997.9.8.1735>
- Hui, J. (2018). Real-time object detection with yolo, yolov2, and now yolov3. Available online: medium.com/@jonathan_hui/real-time-object-detection-with-YOLO-YOLOv2-28b1b93e2088 (accessed on 24 February 2019). <https://doi.org/10.22214/ijraset.2021.39044>
- Jazayeri, A., Cai, H., Zheng, J. Y., & Tuceryan, M. (2011). Vehicle detection and tracking in-car video based on motion model. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 12(2), 583-595. <https://doi.org/10.1109/tits.2011.2113340>
- John, V., & Mita, S. (2019). Vehicle semantic understanding for automated driving in multiple-lane urban roads using deep vision-based features. In *International Joint Conferences on Artificial Intelligence; Macao, China* (pp. 1-7).
- Kilicarlan, M., & Temel, T. (2022). Motion-aware vehicle detection in driving videos. *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, 30(1), 63-78. <https://doi.org/10.3906/elk-2101-93>
- Kilicarlan, M., & Zheng, J. Y. (2018). Predict vehicle collision by TTC from motion using a single video camera. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 20(2), 522-533. <https://doi.org/10.1109/tits.2018.2819827>
- Li, L., Zhou, Z., Wang, B., Miao, L., & Zong, H. (2020). A novel CNN-based method for accurate ship detection in HR optical remote sensing images via rotated bounding box. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 59(1), 686-699. <https://doi.org/10.1109/tgrs.2020.2995477>
- Liang, Y., & Zhou, Y. (2018, October). LSTM multiple object tracker combining multiple cues. In *2018 25th IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)* (pp. 2351-2355). IEEE. <https://doi.org/10.1109/icip.2018.8451739>
- Liu, Y., Lu, Y., Shi, Q., & Ding, J. (2013, December). Optical flow-based urban road vehicle tracking. In *2013 ninth international conference on computational intelligence and security* (pp. 391-395). IEEE. <https://doi.org/10.1109/cis.2013.89>

Muehleemann, A. (2019). TrainYourOwnYOLO: Building a Custom Object Detector from Scratch. *Disponibile on-line: <https://github.com/AntonMu/TrainYourOwnYOLO> (Accedido Diciembre 2020).* <https://doi.org/10.5281/zenodo.5112375>

Wang, L., Pham, N. T., Ng, T. T., Wang, G., Chan, K. L., & Leman, K. (2014, October). Learning deep features for multiple object tracking by using a multi-task learning strategy. In *2014 IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)* (pp. 838-842). IEEE. <https://doi.org/10.1109/icip.2014.7025168>

Yun, W. J., Park, S., Kim, J., & Mohaisen, D. (2022). Self-Configurable Stabilized Real-Time Detection Learning for Autonomous Driving Applications. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*. <https://doi.org/10.1109/tits.2022.3211326>

Zhang, D., Maei, H., Wang, X., & Wang, Y. F. (2017). Deep reinforcement learning for visual object tracking in videos. *arXiv preprint [arXiv:1701.08936](https://arxiv.org/abs/1701.08936)*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1701.08936>

Zhou, H., Ouyang, W., Cheng, J., Wang, X., & Li, H. (2018). Deep continuous conditional random fields with asymmetric inter-object constraints for online multi-object tracking. *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*, 29(4), 1011-1022. <https://doi.org/10.1109/tcsvt.2018.2825679>



Kahramanmaraş Sütçü İmam University

Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 14.09.2023
Kabul Tarihi : 31.10.2023

Received Date : 14.09.2023
Accepted Date : 31.10.2023

IMPROVING THE BEHAVIOR OF RC FRAMES BY USING LIGHTWEIGHT CONCRETE PANELS AND METALLIC ELEMENTS

HAFİF BETON PANEL VE METALİK ELEMAN KULLANILARAK BETONARME ÇERÇEVE DAVRANIŞININ İYİLEŞTİRİLMESİ

Hakan KOMAN¹ (ORCID: 0000-0002-7309-7718)

¹ İstanbul Aydın Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Hakan Koman hakankoman@aydin.edu.tr

ABSTRACT

In this study, the effect of two different wall systems which are composed of the structural lightweight concrete panel and metallic elements between the wall and frame on the behaviour of the RC frame is investigated numerically by using the Abaqus software. In the second type of wall system, a polyurethane-based binder was used between the wall and the RC beam. A quasi-static lateral loading was applied to 5 different full scale RC frames with and without walls, and frames were pushed 80mm laterally. In the worst case, the wall system carried 1.52 times the lateral load bare frame carried, whereas in the best case, the frame with the wall system carried 2.12 times the load bare frame carried. When thinner metallic elements were used, the elements yielded. This is promising for increasing damping in structures also. The second type of wall which interacts with the beam increased the initial lateral stiffness of the frame by 156% when compared with the bare frame. All frames conducted a ductile behavior and bare frame results are validated by comparing with previous study.

Keywords: Abaqus, RC frame, numerical analysis, polyurethane binder

ÖZET

Bu çalışmada, yapısal hafif beton panel ve duvar ile çerçeve arasındaki metalik elemanlardan oluşan iki farklı duvar sisteminin betonarme çerçeve davranışına etkisi Abaqus yazılımı kullanılarak sayısal olarak incelenmiştir. İkinci tip duvar sisteminde duvar ile betonarme kiriş arasında poliüretan esaslı bağlayıcı kullanılmıştır. Duvarlı ve duvarsız 5 farklı tam ölçekli betonarme çerçeveye yarı statik yanal yükleme uygulanmıştır ve çerçeveler yanal olarak 80 mm itilmiştir. En kötü durumda duvarlı sistem, çıplak çerçevenin taşıdığı yanal yükün 1.52 katını taşıırken, en iyi durumda duvarlı çerçeve, çıplak çerçevenin 2.12 katını taşımıştır. Daha ince metalik elemanlar kullanıldığında elemanlar akmıştır. Bu aynı zamanda yapılarda sönümün artırılması açısından da ümit vericidir. Kirişle etkileşime giren ikinci tip duvar, çerçevenin başlangıç yanal rijitliğini çıplak çerçeveye göre %156 oranında arttırmıştır. Tüm çerçeveler sünek davranış sergilemiştir ve çıplak çerçeve sonuçları önceki çalışmayla karşılaştırılarak modelin güvenilirliği doğrulanmıştır.

Anahtar Kelimeler: Abaqus, betonarme çerçeve, nümerik analiz, poliüretan bağlayıcı

INTRODUCTION

Strong earthquakes affect structures and cause big damage around the globe. Northridge 1994, Kocaeli 1999, Kahramanmaraş, 2023 earthquakes can be counted as examples of catastrophic damage. It's widely known that Türkiye's building stock consists of problematic, nonductile, reinforced concrete (RC) buildings. The buildings constructed before 1999 are examples of problematic building stock. Also, the recent Kahramanmaraş earthquakes (7.8 magnitude in Pazarcık region and 7.5 magnitude in Ekinözü region) revealed that some of the relatively new buildings that were constructed after the acceptance of regulations in the Turkish Seismic Code (TSC) 2007 and 2018 had severe damage or collapsed.

Modern seismic design philosophy expressed in seismic codes relies on the ductility of structures. Most of the damage is expected to happen in the plastic hinges which will be formed at the ends of beams during strong ground motions. The strong column-weak beam principle in codes aims to provide the ideal collapse mechanism where plastic hinges will be formed at the ends of beams and the bottom of the first story's columns (Bai and Ou, 2012). That principle is one of the explanations for damage that happened in relatively new buildings also. In a preliminary assessment report of Kahramanmaraş earthquakes (Demir et al., 2023), it was stated that the highest ground acceleration of the earthquake experienced on February 6, 2023, was approximately 4-5 times greater than the ground acceleration determined by the Turkey Earthquake Hazard Map for a residential building in Kahramanmaraş region. That means damage was more than expected in the buildings which were built properly. Also, the second earthquake hit the damaged buildings where plastic deformations already occurred due to the previous earthquake, causing collapse.

These earthquakes revealed the importance of increasing the energy consumption capacity and lateral load capacity of the structures once again. New buildings can be designed with a guarantee for extra energy consumption capacity and existing buildings can be seismically retrofitted. However different kinds of seismic retrofitting strategies can be suitable for different kinds of buildings. In practice, adding RC walls to the structures is a popular method. This type of design for retrofitting existing buildings or for construction of the relatively new buildings can be considered to increase the lateral stiffness of the structure. However, this is a time consuming and relatively expensive process and often residents do not want to move away during the retrofitting process.

Another strategy is placing seismic dampers on the structures. In this strategy, the main purpose is to increase the energy consumed by the damping mechanism in structures and thus decrease the energy consumed due to the plastic deformation of structural elements. In a previous study, for the seismic retrofit project of a building in Istanbul, traditional retrofitting methods were compared with placing dampers inside the structures. For that purpose, a kind of hybrid damper that relies on the combined effects of friction forces and viscoelastic behavior was selected. To replace the dampers inside the RC frame, steel diagonals were used. According to the results of the analysis, in the structure without any dampers, 34 of the 124 columns were damaged beyond the "life safety" level and 37 columns were damaged beyond the "before collapse" performance level. In the structure with dampers, only 20 of the 124 columns were damaged beyond the "life safety" level, and no column was damaged in the region of "collapse" or "before collapse". In the structure with dampers, the damping ratio was increased to around 22-23% in X and Y directions and base shear decreased by 13.02% to 24.01%. However, in the structure where RC walls were added, base shear increased by 191% to 230% in two of the directions. It was concluded that the placement of dampers was an economical and alternative method for seismic retrofit purposes (Yıldırım et al., 2014).

In another study, metallic yielding dampers were selected for the analysis. A few kinds of metallic yielding dampers were described. Some dampers relied on shear deformations, on the other hand, others relied on flexural deformations to consume energy. In the analysis of RC buildings with placement of metallic yielding kind of dampers, it was concluded that the building response was decreased by 35%. In this study, dampers were replaced in RC buildings by using steel diagonals (Li et al., 2014).

In another study, steel honeycomb dampers which were used in the automobile industry were implemented to be used in RC buildings for seismic retrofitting process. Honeycomb dampers were placed in the frame between steel diagonals and RC beams. A 15 story RC structure was analyzed by using 7 earthquake records. It was concluded that the placement of dampers decreased the story drifts. When the base shears were compared after a pushover analysis, it was concluded that for the same lateral drift ratio of 0.02, the structure without dampers carried 1000kN lateral load whereas the structure with dampers increased its capacity to 2500kN. Honeycomb dampers not only increased the damping but also increased the stiffness of the system. (Naeem et al., 2015).

In the other study, analysis was performed with friction type of dampers. When the steel braces containing friction dampers were added to the existing frames, the lateral strength and stiffness increased, the moment loads on the columns decreased, but the column axial forces increased. Reinforced concrete walls are rigid in shear and are disadvantageous in using friction dampers as they cannot provide the required displacement. It was stated that the friction load that activates the friction dampers can be selected so that the structure can remain elastic in the expected effects such as wind and small ground movement (Nikam et al., 2014).

On the other hand, the neediness of using steel braces to place dampers inside frames can be problematic for architectural purposes. Because often walls are needed for the separation of rooms inside a structure. To overcome this problem, transforming infill walls into an energy dissipating system by using mortarless blocks were proposed in a previous study (Lin et al., 2016). Experiments showed that a mortarless masonry infill wall increases the energy consumption of the frame without increasing the stiffness of the frame when the frame is in the elastic stage. In the study, the density of the concrete blocks used in the wall is 2250kg/m³, and the compressive strength is 18.3MPa, to reflect the behavior of the mortarless plug-in brick. Its dimensions were 227x113x80mm. The friction coefficient was found to be 0.66 in the experiments (Lin et al., 2016). An axial pressure of 0.3MPa was applied to the reinforced concrete frame beam, representing the weight of the 3-storey residential building. A lateral displacement of 10mm was applied to the frame without wall, 16mm to the frame with mortarless wall, and 20mm to the conventional walled frame. (slip rate around 1%). Bricks made friction movement only with their own weight. For stiffness comparison, secant stiffnesses obtained from the maximum values at various displacements in the hysteresis plot were used. It is compared with the initial stiffness of the empty frame. While the conventional wall increased the initial stiffness of the frame by around 30 times, the wall without mortar increased the stiffness of the frame by about 2 times. According to this result, the mortarless masonry wall can be considered as an energy absorber mechanism. The maximum load carried by the empty frame was 18.05kN, and the energy consumption up to this load was 91.812kNmm, while the energy consumption of the conventional walled frame was 3.07kNmm up to this load. The energy consumption of the mortarless masonry frame was 147.32kNmm up to this load, which is 50 times that of the conventional walled frame (Lin et al., 2016).

Also, in Turkish Seismic Code 2018 (TSC2018), it's emphasized that the interaction of infill walls inside RC frames changes the behaviour of structures, and relative story drift controls are performed differently according to the interaction between frame and infill wall. If stiff joints are used between the wall and frame like using mortar binder, then more rigid RC elements are used in design.

In this study, a new type of wall system is considered. Structural lightweight concrete panels were considered as walls and the effect of placing metallic elements between the wall and RC frame was analyzed numerically. The application of a wall system is practical, so it can be used either in existing buildings for retrofitting purposes or in new building constructions. Two different types of lightweight concrete wall panels are considered. In the first type, the wall height and width were short enough that there was no interaction between the wall and the RC frame. In the second type of wall, the top of the wall interacts with the RC beam inside the frame, whereas, the width of the wall is short enough to cease the interaction between the wall panel and RC columns. Between wall panels and the RC frame, metallic elements are placed and they are considered to be anchored to the RC beam and wall. The thicknesses of elements between the wall and frame were considered to be different. Different thicknesses improved the energy consumption and stiffness of the frame at different levels. Also, the second type is reasonable to make the wall panel contribute to vertical load carrying. The interaction between the panel and RC beam increases the lateral stiffness more than the first type of wall. The reason for selecting a wall rather than steel diagonals is to eliminate the architectural problems mentioned before. Lightweight steel fibered concrete was selected to decrease the total weight and to eliminate the neediness of rebar workmanship. The stress analysis showed the wall can carry the loadings without damage at all. The RC frame used in a previous study (Zhai et al., 2016) was selected for modelling the frame to compare the results with experiments. However equivalent local steel and concrete materials were considered to be used in RC members to represent the structures in Türkiye. The proposed method is advantageous for increasing the stiffness, lateral load capacity, and energy consumption of RC frames with a practical application.

MATERIALS AND METHOD

Modelling of Concrete

The CDP (Concrete Damaged Plasticity) model in Abaqus was used to model the behavior of concrete. The CDP model is one of the theories to predict the plastic deformation state of a material under stress. In some of the failure

theories, the stress tensor is thought to be divided into two parts: the hydrostatic part and the deviatoric part. Von Mises's theory states that hydrostatic stresses can create elastic volume change, but in the hydrostatic stress part, no shear stresses were included. Unlike shear stresses, hydrostatic stresses cannot cause deformation. Therefore, only deforming stresses should be taken into account. For this purpose, it considers the second constant coefficient of the stress tensor (J_2) and suggests that if this constant coefficient exceeds a certain value, then permanent strain begins. J_2 can be seen in equation 1 (Koman, 2021). Here σ indicates normal stresses, τ indicates shear stresses.

$$J_2 = \frac{1}{6} [(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + (\sigma_{yy} - \sigma_{zz})^2 + (\sigma_{xx} - \sigma_{zz})^2] + \tau_{xy}^2 + \tau_{xz}^2 + \tau_{yz}^2 = r^2 \quad (1)$$

In the Drucker-Prager criterion, both the deforming deflection stress tensor as in the Von Mises strain criterion and the volume-changing hydrostatic pressure, which is not taken into account in the Von Mises criterion, are taken into account. It can be expressed as follows (Kuruşçu, 2012):

$$F(I_1, J_2) = \alpha I_1 + \sqrt{J_2} - K \quad (2)$$

In equation 2, I_1 is the first invariant of the stress tensor. J_2 is the second invariant of the deviatoric stress tensor, α and K are coefficients related to cohesion and internal frictional angle. The CDP model is a modification of the Drucker-Prager criterion. It uses the yield surface proposed by Lubliner et al., (1989) and includes modifications proposed in the literature that include differential evolution of tensile and compressive strength. According to the modifications, the yielding (permanent deformation) surface in the deviatoric plane does not have to be a circle and this surface is adjusted with the K parameter (Al Shaikh and Falah, 2014).

The stress-strain relationships for concrete were considered as shown in Figure 1 (Obadiat, 2011) and the d_c parameter (it shows the effects that degrade the elasticity of the concrete in compression) was assumed to be zero. The strain corresponding to the maximum stress is taken as $0.0022(\epsilon_0)$ for C25 and the modulus of elasticity was taken as 31000MPa. The strength of C25 concrete (f_0) was taken as 30MPa because the cubic test result must be used in Abaqus. A previous study in the literature was used to determine the values in the stress-strain graph of concrete. The stress-strain graph was created according to Equation 3 taken from this study (Inclunet, 2016).

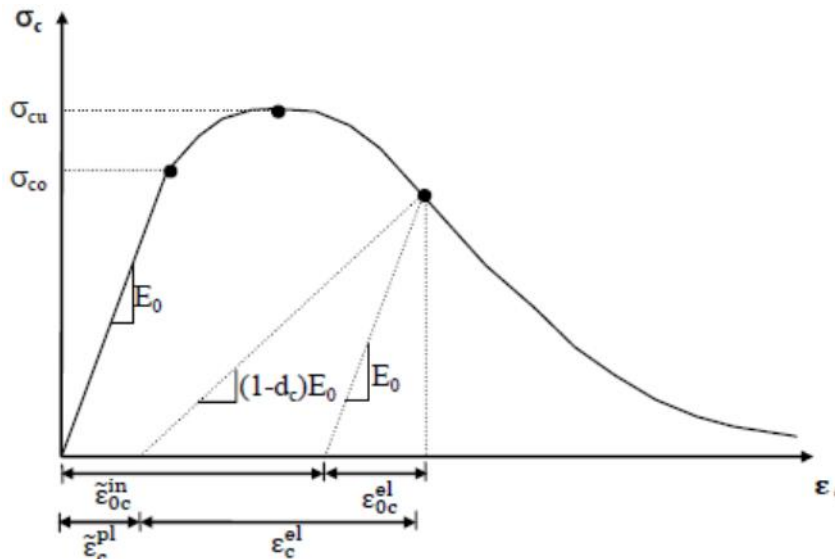


Figure 1. Stress-Strain Relationship of Concrete in Abaqus (Obadiat, 2011)

$$\frac{f}{f_0} = 2.1 \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_0} \right) - 1.33 \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_0} \right)^2 + 0.2 \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_0} \right)^3 \quad (3)$$

In equation 3, the cubic strength of concrete, $f_0=30\text{MPa}$, strain corresponding to maximum stress, $\epsilon_0=0.0022$, maximum strain, $\epsilon_{\text{max}}=0.0035$. In Abaqus, when defining materials, plastic deformation values are used, not the strain (ϵ) values. The tensile strength of concrete is defined by $0.7\sqrt{fck}$. Stress-strain behaviour in the tensile situation was considered to be linear until the strength of the material. Beyond that point, an exponential decrease was considered in the stress-strain graph. Again, the plastic deformation values were used and d_t parameter (it indicates the effects that degrade the elasticity of concrete in tension) was considered to be zero. For the CDP model in Abaqus, other parameters were needed. Dilation angle (the expansion angle in p-q plane), eccentricity, (the ratio between the

tensile strength and the compressive strength of the concrete), f_{bo}/f_{co} ratio (The ratio between the compressive strengths of concrete in two directional loading and unidirectional loading situation) was assumed as 38 degrees, 0.1, 1.16 respectively. These assumptions for parameters were used in a previous experimental and numerical study where numerical simulation gave approximate results to experimental results (Obadiat, 2011).

Modelling of Steel

Two kinds of steel were used in this study. Their mechanical properties were taken from a previous study (Koman, 2021) where mechanical properties of steel materials had been obtained by local producers' tests. For determining stress-strain curves, the approach of Turkish Seismic Code 2018 (for nonlinear analysis) was used in the previous study. The steel for longitudinal rebars had a strength of 491 MPa yield strength and 553MPa tensile strength. Its commercial name was B420C. The steel for stirrups had 277MPa yield strength and 387MPa tensile strength. Its commercial name was SAE steel. The behaviour of steel was assumed to be the same in tension and compression. The steel strain curves of steel materials can be seen in Figure 2. SAE steel is used for metallic elements also.

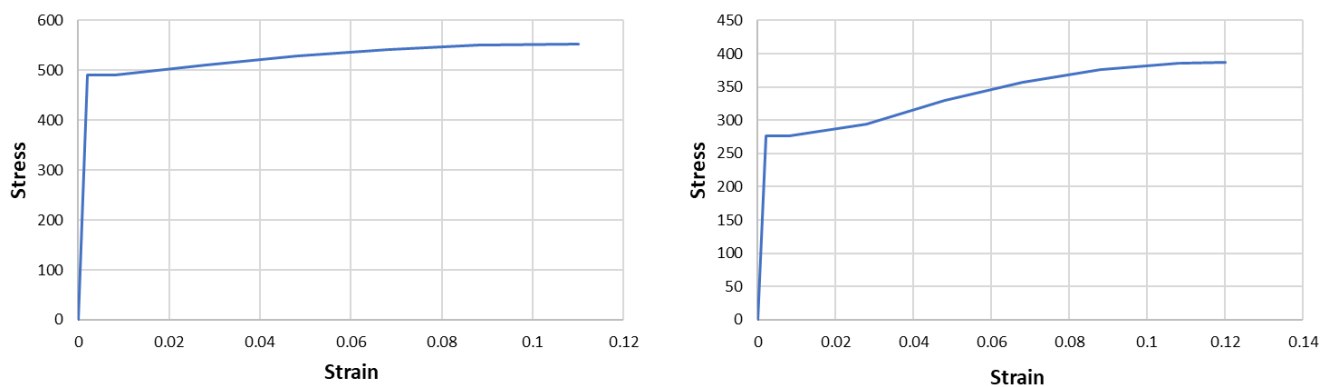


Figure 2. a. Stress-Strain Curve of B420C Steel b. Stress-Strain Curve of SAE Steel

Modelling of Lightweight Concrete

A steel fiber-reinforced lightweight concrete with superior strength properties was employed in the construction of the wall. This concrete, characterized by its high strength, was previously developed through an experimental investigation utilizing expanded clay aggregates. The concrete's specific properties were derived from a prior research study. In this earlier research, various concrete mixtures were formulated to assess the impact of steel fiber quantity on the concrete's compressive strength (Gao et al., 1997). The study concluded that the compressive strength of lightweight concrete could be altered based on factors such as the aspect ratio of the fibers and the volume of fibers used. The test results demonstrated the feasibility of producing lightweight concrete with an impressive compressive strength of 85.4MPa and a tensile strength of 11.8MPa. The density of the concrete measured 1966kg/m³. The study established the concrete's modulus of elasticity at 28000 MPa, and it introduced an equation for calculating this property. Additionally, the Poisson's ratio for this concrete was adopted as 0.16 (Gao et al., 1997)

Other parameters for the CDP model were assumed to be the same as ordinary concrete. Dilation angle, eccentricity, and f_{bo}/f_{co} ratio were assumed as 38 degrees, 0.1, 1.16 respectively. For the stress-strain relationships of the concrete, the Hognestad model was used. As previously mentioned, Abaqus requires the incorporation of plastic strains in the CDP model. Figure 3 illustrates the stress-strain relationships for the high-strength lightweight concrete containing steel fibers in compression. Figure 4 illustrates the stress-strain relationships in tension. The tensile stress behavior of concrete is assumed like an exponentially decreasing graph.

Modelling of Polymer Material

When employing the second type of wall panel, it interacts with the beam. In this area, a polymer binder known as "polymer pm" was selected. Polymer pm is a two-component polyurethane binder, consisting of two distinct components. Upon initial application, it takes on a fluid form but rapidly hardens within a few minutes after mixing with the other component. Once hardened, this binder exhibits rubber-like properties.

In a prior study (Kwicien, 2014), the comparison between epoxy and a polyurethane binder was conducted for seismic retrofitting of masonry structures using fiber-reinforced polymers (FRP). In this previous research, the Mooney Rivlin theory was chosen to model the behavior of the polymer material. The Mooney Rivlin theory is a suitable

approach for modeling hyperelastic materials, such as rubber, as the stress-strain relationship of hyperelastic materials is non-linear. Moreover, there is an increase in stress after experiencing significant strains, which classical theories cannot adequately explain. Instead, the theory relies on a strain energy function that characterizes the area under the stress-strain curve.

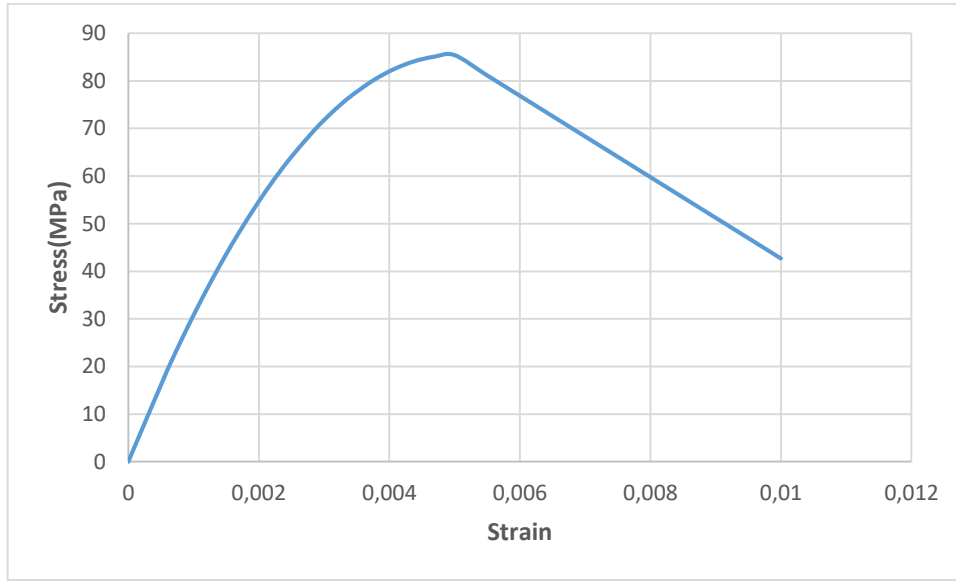


Figure 3. Hognestad Model for Stress Strain Relationship of Lightweight Concrete

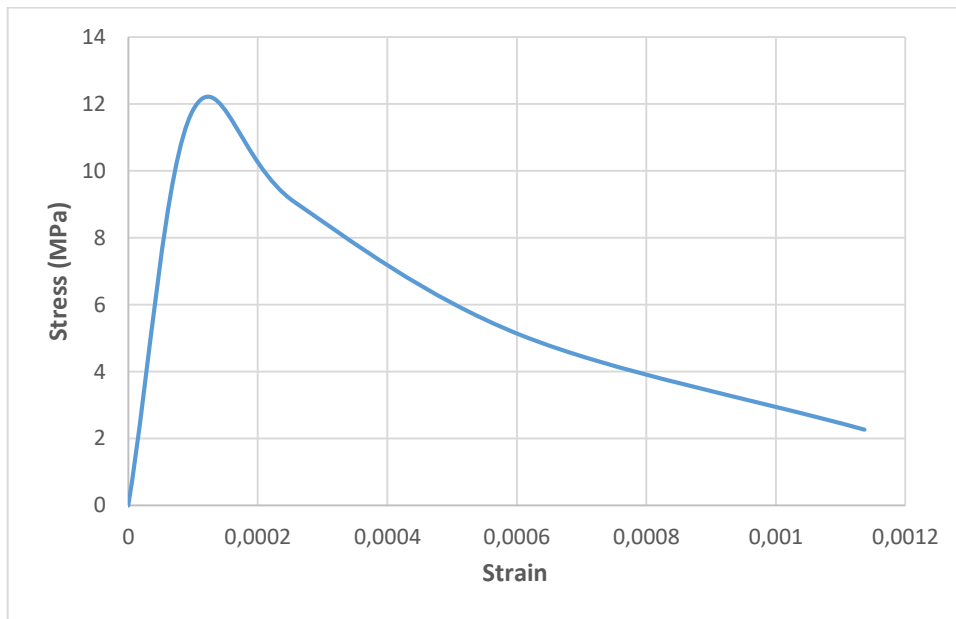


Figure 4. Stress-Strain Relationships of Lightweight Concrete in Tension

The equations for the Mooney Rivlin theory are detailed in equations (3-7), as described in the aforementioned prior study (Kwiecien, A., 2014):

$$W^{M-R} = C_{10} \left(\Delta^2 + \frac{2}{\Delta} - 3 \right) + C_{01} \left(\frac{1}{\Delta^2} + 2\Delta - 3 \right) \quad (3)$$

$$S_1 = \frac{F}{A_0} = \frac{dW^{M-R}}{d\Delta} = 2(C_{10} \left(\Delta - \frac{1}{\Delta^2} \right) + C_{01} \left(1 - \frac{1}{\Delta^3} \right)) = 2 \left(1 - \frac{1}{\Delta^3} \right) (\Delta C_{10} + C_{01}) \quad (4)$$

$$E_0 = 3G_0 = 6(C_{10} + C_{01}) \quad (5)$$

$$G_0 = 2(C_{10} + C_{01}) \quad (6)$$

$$\Delta = \frac{L}{L_0} = \varepsilon + 1 \quad (7)$$

in this context, W^{M-R} represents the strain energy function for the hyperelastic material. S_1 denotes the stress, while E_0 represents the Young's modulus, and G_0 is the shear modulus. ε stands for the strain, L signifies the length after loading, and L_0 is the initial length. The coefficients C_{10} and C_{01} are specific to the Mooney-Rivlin Theory. C_{01} was determined to be -0.05, and C_{10} was calculated as 0.47, relying on experimental data obtained from a prior study (Ksiel, 2018).

Modelling of The Interaction Between Polymer and Other Materials

Surface based cohesive behavior is one method for modeling the interaction between binders and materials in Abaqus. Using the traction separation constitutive model, surface-based cohesive behavior makes it possible to model connections with interface thicknesses that are barely noticeable. The formulae for surface based cohesive behaviour are very similar to the formulae used for cohesive elements with traction separation. To describe the behavior of joints in tension and shear failure modes, traction separation laws are used. In Figure 5, traction separation is described. When the assembly is first loaded, the joint behaves linearly elastically, and K_n , K_s , and K_t express the stiffness of the joint. Following the peak traction value, the joint's plastic response begins. According to Figure 4, the maximum stress values are t_n^{max} , t_s^{max} , t_t^{max} , the separation values corresponding to the maximum stresses are δ_n^{max} , δ_s^{max} , δ_t^{max} respectively, and the separations at failure are δ_n^f , δ_s^f , δ_t^f (Abaqus Guide).

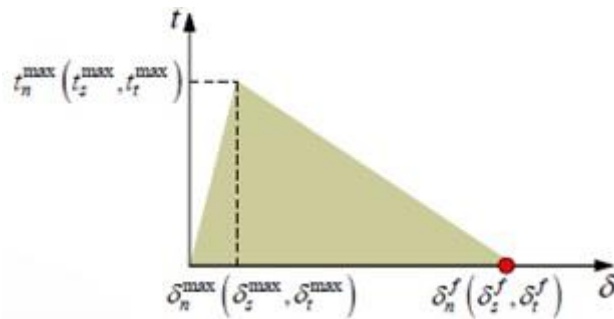


Figure 5. Traction Separation Laws (Abaqus Guide)

Damage initiation was determined using the maximum nominal stress criterion available in Abaqus. To characterize the behavior after joint failure, a Mohr-Coulomb shear sliding model was established with a friction coefficient of 0.66. Consequently, when the shear stress exceeds a critical threshold, the joint experiences sliding. The fracture energies of the joints were determined based on experimental results. In a previous study conducted by Viskovic et al. in 2017, experiments were conducted to ascertain these fracture energies. For flexible joints constructed with a polymer binder, the modified fracture energy was found to be 4.22 N/mm for failure mode mod 1 (tension) and 10.93 N/mm for failure mode mod 2 (shear). These values were utilized in the numerical analysis. Both the formulas used for cohesive elements with traction-separation behavior and those employed for surface-based cohesive behavior were found to be remarkably similar, as documented in the Abaqus manual. Consequently, the region beneath the traction-separation graph, commonly referred to as the fracture energy, was assumed to be constant. To capture mixed-mode behavior, the Benzeggagh-Kenane rule was applied in Abaqus. Previous research indicates that the Benzeggagh-Kenane mode is the optimal choice for capturing the critical mixed-mode fracture energy in cases where the critical fracture energies for second and third mode shear failures are equal. Furthermore, an exponent of 2 for the Benzeggagh-Kenane rule was selected by recommendations from the same study for brittle behavior (Abdulla et al., 2017).

Frame Properties and Loading Conditions

The frame properties were taken from a previous study where experimental and numerical analysis with Abaqus was performed (Zhai et al, 2016). That way, the results written here can be compared with the experimental and numerical results obtained previously. However, the steel and concrete materials were changed with the local equivalents. The difference between the strength of materials was in an acceptable range. In the previous study, the compressive strength of concrete used in Abaqus was 27.74MPa whereas here it was taken as 30MPa in Abaqus (cubic strength). Full scale single story RC frames were used for analysis. For the steel used in experimental and numerical analysis in the previous study, the yield and tensile strength of the material were 472MPa and 656MPa respectively whereas here, the yielding and tensile strength values were 491MPa, 553MPa respectively (steel for longitudinal rebars). In confinement rebars, in the previous study, a steel with a yielding strength of 308 MPa was used whereas in this study the yielding strength of the material was 277MPa as explained before.

The height of the columns was taken as 2600mm (measured till the bottom of the beam), and the bay length was 2800mm. Column cross section was assumed to be 350mm x350mm, beam cross section was assumed to be 350mm x 400 mm. The longitudinal rebars of the column were assumed to be $8\phi 16$, and the longitudinal rebars for the beam were $4\phi 16$. For confinement rebars of beams and columns $\phi 8/100/150$ mm was used. The base of each column was assumed to be fixed support in numerical analysis, which was why no foundation beam was modelled separately. Axial forces of 700kN (5.71 MPa to column surface) were applied to the columns as a vertical loading. Later, a second specimen was prepared with a wall panel and metallic elements inside the frame. The properties and rebars of the RC frames which are taken from previous studies can be seen in Figure 6 (Zhai et al., 2016). All the measurements are given in mm. Figure 6 also shows the proposed wall system with polymer material.

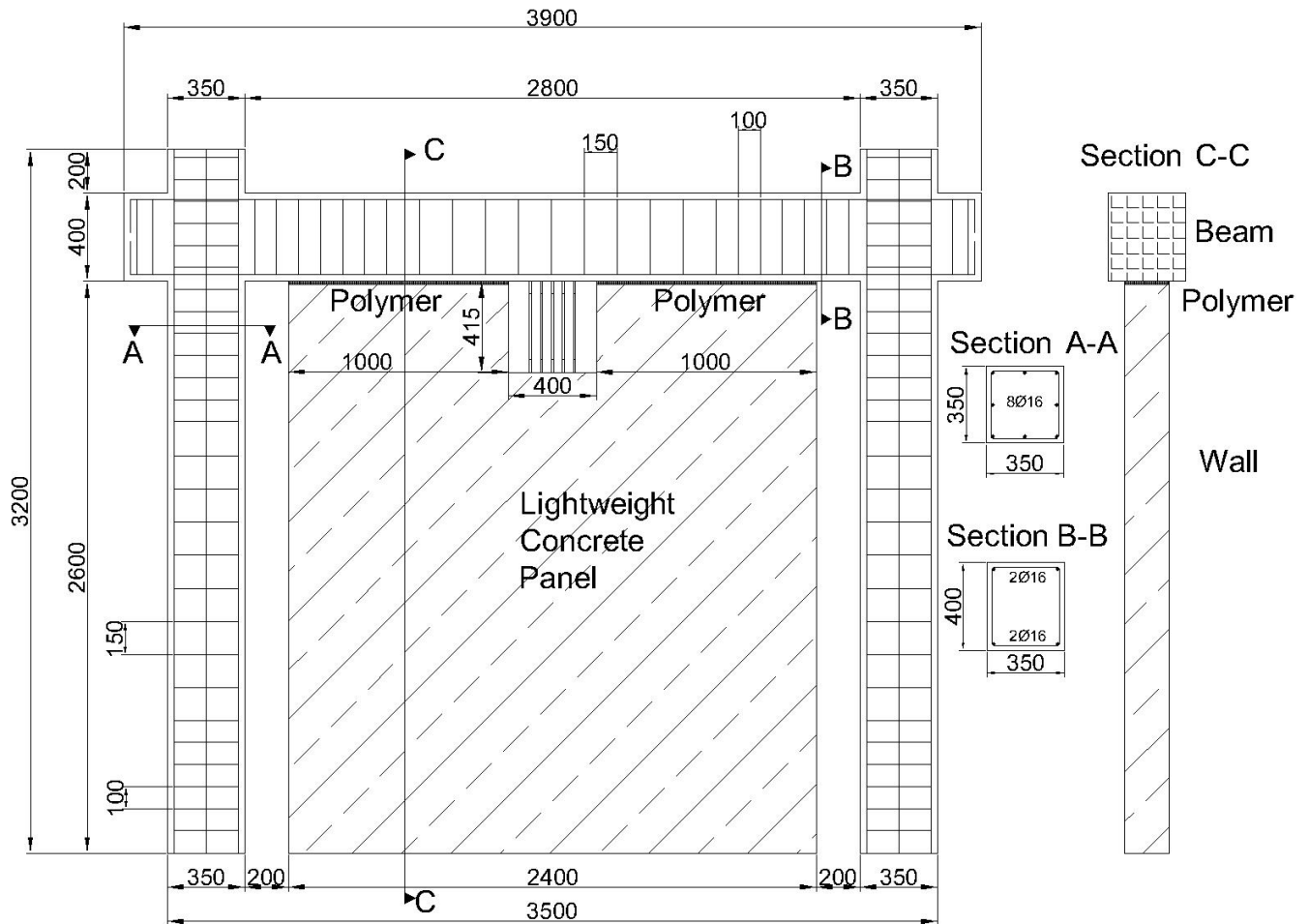


Figure 6. Dimensions of Frame with 2nd Type of Wall and Rebars of RC Frame

Two different kinds of walls were modelled to implement metallic elements inside the frames. In the first type of wall which is constructed by using structural lightweight concrete, the wall height and width were considered as 2185mm and 2400mm respectively. The metallic elements were replaced in the gap between the wall and the beam. In the second type of wall, the height was extended to 2585mm at the left and right regions of metallic elements. A polymer binder with a thickness of 15mm was implemented between the wall and frame. In this type of frame, compressive strut behaviour due to the application of the wall was expected. Therefore, an increase in the lateral stiffness of the frame was expected. This type of wall can be also useful for carrying vertical loads of the system if columns fail due to shear forces.

The metallic elements were considered as π -shaped elements as seen in Figure 7. Five steel elements with a height of 400mm, and width of 200mm were placed between walls and frames. The thickness of these elements was considered as 10mm in the first group of analysis where proposed wall types were compared with each other. Later a second group of analysis was conducted. In the second group of analysis metallic elements with 5mm and 3mm thicknesses were used. The cross-section of metallic elements can be seen in Figure 7. All of the measurements shown are given in mm.

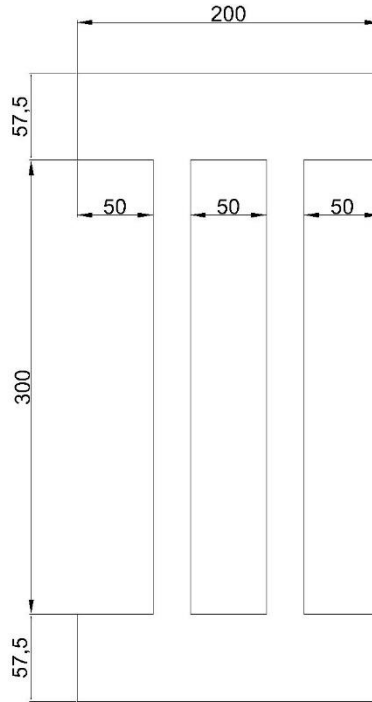


Figure 7. Cross Section of Metallic Elements

All of the materials except rebars were modelled by using C3D8R elements. This is a three dimensional, 8 noded element with reduced integration. The size of elements was selected as 50mm for frame and wall, 20mm for the metallic elements, and 10mm for polymer material. However, because the thickness of the polymer material in Abaqus is 15mm, the software used an element with sizes 10mm x 10mm x 7.5 mm for polymer material. The software modifies the mesh size when needed. The rebars of the frame were modelled using wire elements in the software. This kind of element is implemented for solid elements whose length is relatively much longer when compared with the dimensions of their cross sections. The rebars were embedded inside the concrete in software. That indicates that adherence between concrete and rebars was taken into account and the assembly can be assumed as reinforced concrete. For the analysis, explicit dynamic analysis was used. The frame was pushed up to 80mm lateral displacement in 8 seconds. By using the finite element method, Abaqus forms the system stiffness, mass, and damping matrices first. For the numerical solution of the equation of motion, in explicit analysis, the central difference method is used in Abaqus. In the central difference method, stiffness, mass, and damping matrices are not re-built in every step and the displacements at the step of I+1, are found by using the displacements at steps of I and I-1 (Demir, 2012). The equation of motion can be written as follows in the central difference method (Ramancharla):

$$m \left[\frac{u_{i+1} - 2u_i + u_{i-1}}{\Delta t^2} \right] + c \left[\frac{u_{i+1} - u_{i-1}}{2\Delta t} \right] + ku_i = p_i \quad (4)$$

In Abaqus, in explicit dynamic analysis, the computational cost is low. A big power is not needed, most of the computational power is used for finding the internal forces of elements. If quasi-static analysis will be performed by using explicit dynamic analysis, the analysis must be performed under some circumstances. Because a static problem was transformed into a dynamic problem in such a case. If inertial forces were kept under a level, the problem can be assumed as static. To control this kinetic energy/total internal energy ratio must be controlled after the analysis. If this ratio is smaller than 0.10 then the analysis can be assumed to be quasi-static (Demir, 2012). The finite elements (mesh) of the system can be seen in Figure 8.

RESULTS AND DISCUSSION

Load Displacement Curves of First Group of Frames

In the first group of frames, two different types of walls and 10mm thick metallic elements were used. The frames were subjected to 80mm lateral displacement which indicates 0.026 lateral drift ratio. This ratio was selected because, for most of the buildings that were constructed after TSC 2007, 0.02 drift ratio was a limit value for the control of relative drift of one story according to others. The bare frame carried a 269632.53N maximum load. The initial stiffness of the bare frame can be considered as 21886.06 N/mm from the graph if the first point where linear elastic

behaviour is finished is taken into account. The initial stiffness of the frame with the first type of wall is nearly the same as the bare frame but it carried 435997.46N maximum load. However, if a second type of wall is used, the initial stiffness of the wall increases to 56198.27N/mm. This type of frame carried a 571437.7N maximum load. All

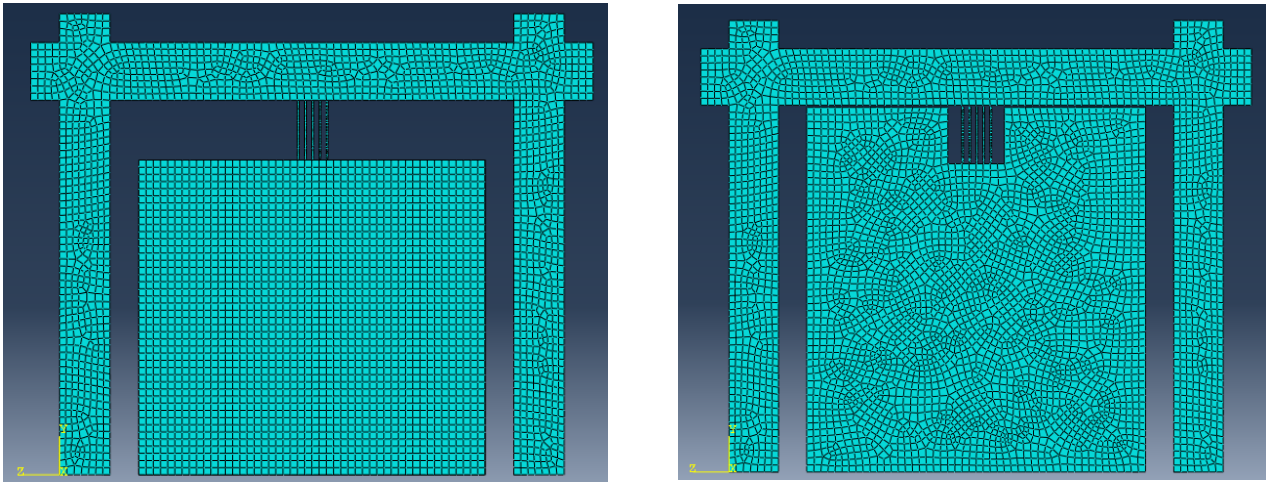


Figure 8. a. The Mesh of the Frame with 1st Type of Wall b. The Mesh of the Frame with 2nd Type of Wall

types of frames showed ductile behaviour until 0.026 drift ratio, however, the ductility of the frame with the second type of wall was the least one. The results of the bare frame were compared with the experimental and numerical study done before (Zhai et al., 2016). An acceptable discrepancy was seen between the results. In the previous study, according to experimental results, bare frame specimens carried 225000N maximum load. A small discrepancy can occur due to the differences in material class for concrete and rebar. Also in finite element modelling, factors like mesh size, element type, and analysis type can affect the results. The results of the previous study can be seen in Figure 9.

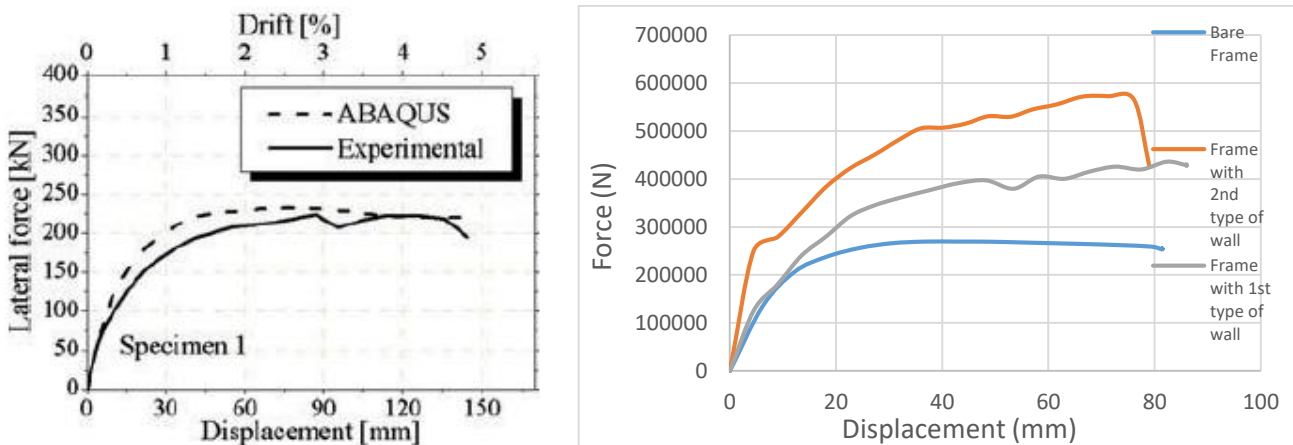


Figure 9. a. Force Displacement Curve of Bare Frame in Previous Study (Zhai et al., 2016) b. Force Displacement Curves of Frames with 10mm Thick Metallic Elements

Stress Analysis of the First Group of Frames

In Abaqus, equivalent Von Mises Stresses can be observed for materials after analysis. If von Mises stress exceeds the strength of material in a uniaxial stress situation, yielding of material is expected. Equivalent Von Mises stress can be written as the following equation if principal stresses exist only (Anonymous).

$$\sigma_{eq} = \sqrt{\left[\left(\frac{1}{2} \right) \cdot (\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 \right]} \quad (5)$$

Also, for different components of frame assembly (wall, frame, metallic elements, etc.) the stresses can be seen separately in the menu in the software. In bare frame analysis, when the bare frame was pushed to 80 mm lateral displacement, in the concrete of the frame Mises stresses changed between values of 34.53MPa to 51.77MPa in damaged zones as seen in Figure 10. These values are already bigger than the strength of the material. This result is consistent with the results of the bare frame in the previous study where plastic hinges were formed at the column

ends and damage happened in the beam-column conjunction zone (Zhai et al., 2016). Because in beams in these zones, Mises stresses exceeded the tensile strength of the concrete material. As seen in Figure 11, in rebars Mises stresses exceeded the yield stress limit of steel material and reached the level of 517MPa maximum in plastic hinge zones. The results are consistent with previous study (Zhai et al., 2016).

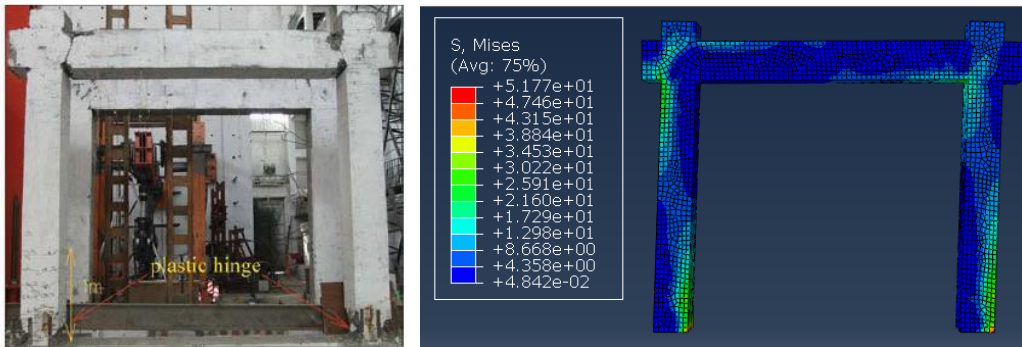


Figure 10. a. The Damage in Bare Frame in Previous Study (Zhai et al., 2016) **b.** The Mises Stress Distribution in Bare Frame

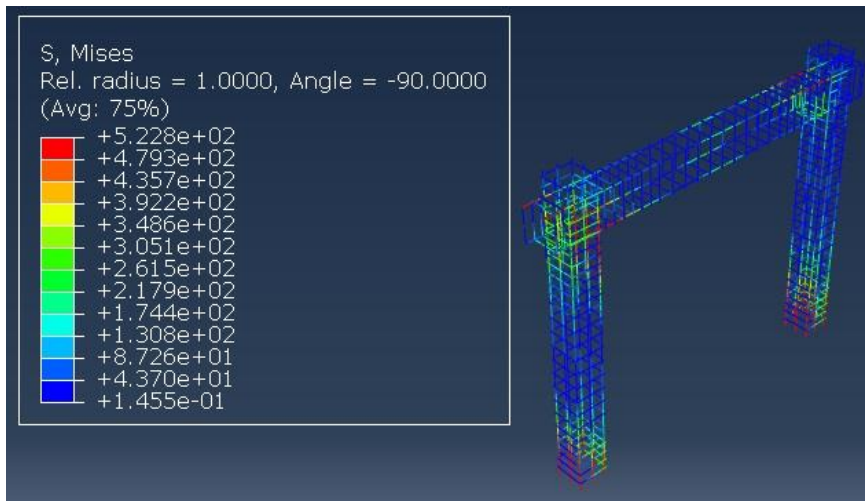


Figure 11. a. The Mises Stress Distribution in Rebars of Bare Frame

If Mises stresses in the walls of frames with first and second type of frame is observed, it can be concluded that damage can only be expected in a small region which is a conjunction joint of metallic elements and the wall. In this small region, Mises stresses varied between 15-22MPa for the first type of wall and 15-26 MPa for the second type of wall. However, in most of the walls, Mises Stresses were around 2-6.66 MPa. The results are seen in Figure 12.

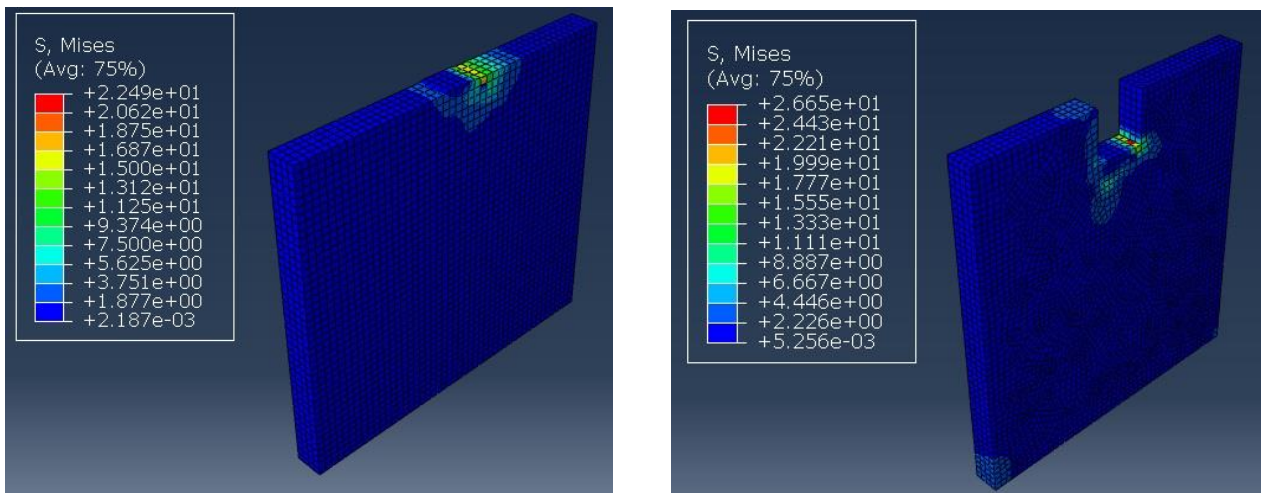


Figure 12. a. The Mises Stresses in 1st Type of Wall **b.** The Mises Stresses in 2nd Type of Wall

Observing max principal stresses shows that around the connection region between metallic elements and wall, max principal stresses are around 7.36MPa in 1st type of wall and around 6.86 MPa in 2nd type of wall as seen in Figure 13. Only in very small areas, it reaches 11.35-11.16MPa stress levels. From the stress analysis, it can be concluded that the 20cm thickness of the wall and the high strength of lightweight concrete material are capable of resisting the forces in most of the regions of the wall.

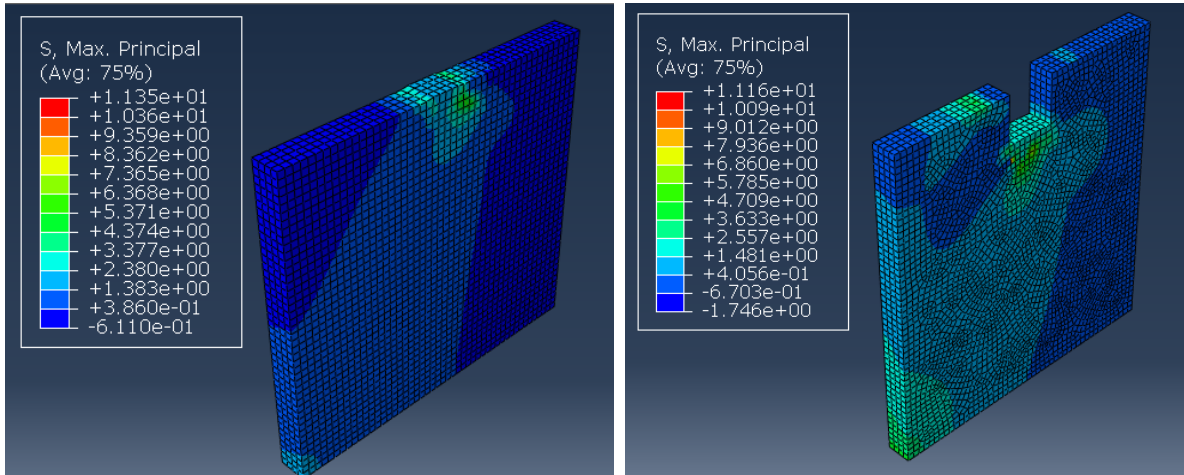


Figure 13. a. The Max. Principal Stresses in 1st Type of Wall **b.** The Max. Principal Stresses in 2nd Type of Wall

When the Mises Stresses in Metallic elements with 10cm is observed, both for the analysis with the first type of wall and for the analysis with the second type of wall, it is seen that in most of the regions of elements, the material has not reached the yield stress of the material (277 MPa). Only in conjunction joints with the elements and the RC Frame’s beam, yielding has just started in metallic elements when the frame reached 80mm lateral displacement. For most of the regions, Mises stresses varied between 60 to 126 MPa in metallic elements in the case where the first type of wall is used and between 76 to 187 MPa in the metallic elements in the case where the second type of wall is used. The results can be seen in Figure 14. The average Mises stresses in the metallic elements with the second type of frame are higher than the average Mises stresses in the metallic elements with the first type of wall. The connection between the wall and frame in the second type causes an imaginary compressive strut behavior even though there is a gap between the wall and columns. Due to this, the stiffness of the frame increased, and behavior was changed as seen in Figure 9. Thus additional stresses affected the metallic elements and changed the Mises stress distribution in metallic elements in the frame with a second type of wall.

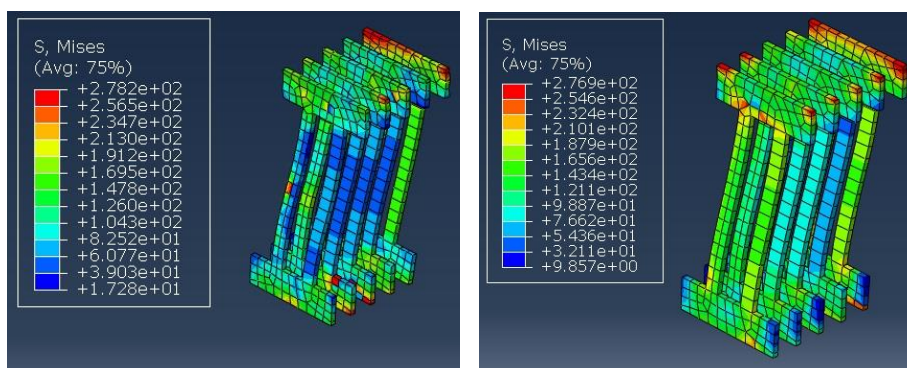


Figure 14. a. The Mises Stresses in Metallic Elements (10mm thick) with 1st Type of Wall **b.** The Mises Stresses in Metallic Elements (10mm thick) with 2nd Type of Wall

This type of strengthening increases the lateral rigidity of the frame. Also, by using less rigid steel elements, the yielding mechanism can be achieved and energy consumption can be achieved. For that purpose, analysis was renewed for the frame with 2nd type of wall, and elements with 5mm and 3mm thickness were implemented. The second type of wall is chosen for the analysis of less rigid elements in the light of the result analysis.

Load Displacement Curves of Second Group of Frames

In Figure 13, lateral load displacement values are given for frames with thinner metallic elements. The frame with 5mm thick elements carried a maximum load of 511kN when the displacement was 91.5mm, whereas the frame with 3mm thick elements carried 409.5kN when the lateral displacement was 71,5mm. If the results are compared with the first group of analysis where 10mm thick elements were used, it can be seen that by increasing the thickness of metallic elements from 5mm to 10mm, only 11,7% increase in lateral load capacity is achieved. The initial stiffness of a frame with 5mm thick elements is 61694.4N/mm, and the initial stiffness of a frame with 3mm thick elements is 29352.97 N/mm according to the point where linear elastic behaviour has been lost in Figure 15. The frames showed ductile behaviour.

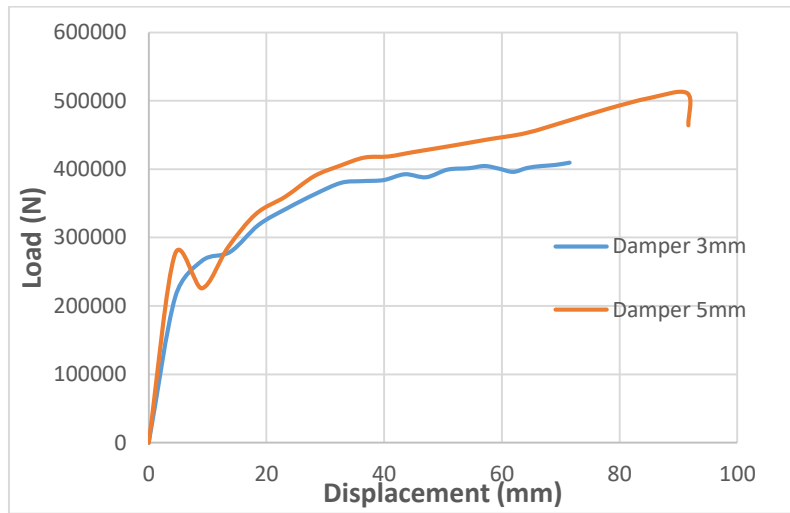


Figure 15. Load Displacement Curves of Frames with Second Type of Wall and Metallic Elements

The results of the proposed wall system can be compared with the results of the same frame with a traditional infill wall. The results taken from the previous experimental and numerical study are shown in Figure 16 (Zhai et al., 2016). If these results are compared in the best case, the proposed wall model in this study carried 72% more load than the traditionally infilled RC frame. In the worst case, the proposed wall with 3mm thick metallic elements carried 23% more load than the traditionally infilled frame. Even though some discrepancy is expected from bare frame comparison due to the differences in materials, still it can be concluded that the proposed wall is better than the traditional infill wall in terms of increasing lateral load capacity.

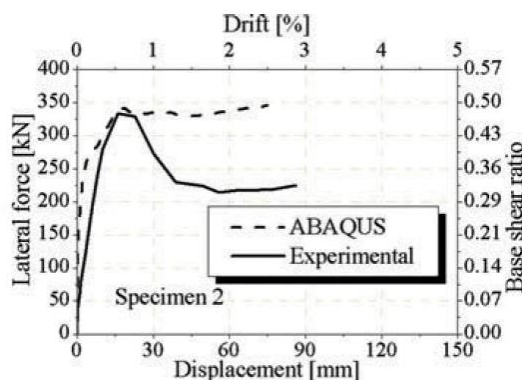


Figure 16. The Load-Displacement Curve of same RC Frame with Traditional Infill Wall from Previous Study (Zhai et al., 2016)

Stress Analysis of Metallic Elements in Second Group of Frames

If the Mises stress distribution in metallic elements is observed after the analysis, unlike the 10mm thick elements of group 1, it's seen that yielding occurred in the elements. Then the elements can be modelled as nonlinear elements in finite element based software for a more practical approach. Alternatively, instead of modelling the elements nonlinearly, an equivalent damping ratio can be calculated for the linear analysis of structures. The Mises Stresses can be observed in Figure 17.

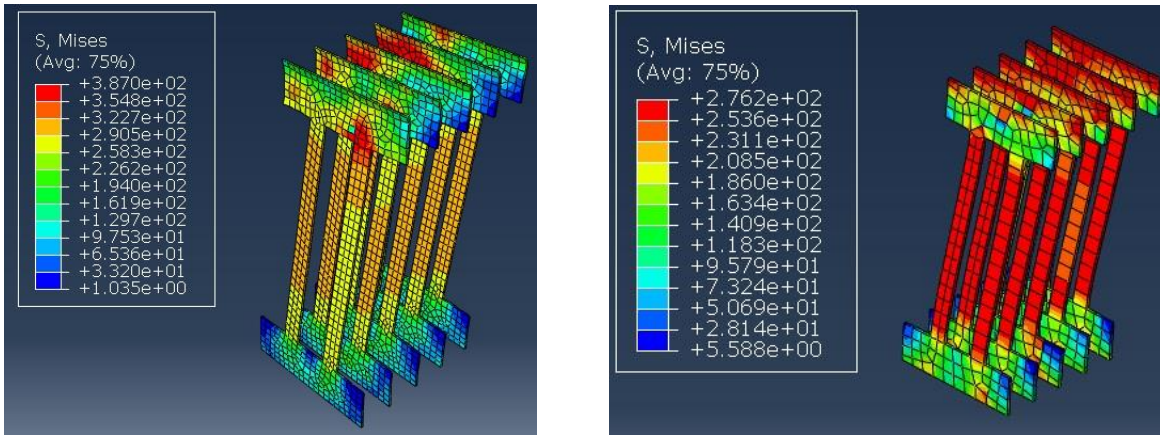


Figure 17. a. The Mises Stresses in 3mm Metallic Elements **b.** The Mises Stresses in 5mm Metallic Elements

Energy Ratios in the Frames

In Abaqus, dynamic explicit analysis was performed. In a previous study where a quasi-static loading of a historical wall was performed, the energy balance of the system in Abaqus was explained. Internal energy (E_I) (Total strain energy of the material), energy absorbed by viscous damping (E_v), kinetic energy of deforming material (E_{KE}), energy absorbed by frictional forces (E_{FD}), work done by external forces (E_w), and the total energy of the system can be written in the same equation as follows (Demir, 2012):

$$(E_I) + (E_v) + (E_{KE}) + (E_{FD}) + (E_w) = (E_I) \quad (6)$$

As stated earlier, in equation 6, “the kinetic energy of deforming material” / “total internal energy” ratio must be observed after analysis to check if the analysis can be accepted or not. In Abaqus after the analysis, the energy values for the whole model during the loading process can be seen. Typically, it is advisable to ensure that the kinetic energy does not surpass 5% to 10% of the internal energy during the majority of the process. As seen in Figure 18, throughout the loading, kinetic energy values are very low for the frame with 10mm panels and 2nd type of wall when compared with the total strain energy needed to push the frame. Also, for other frames, the ratio is checked and it’s concluded that the analysis can be accepted as a quasi-static loading. In other words, the whole frame models were not accelerated enough to be accepted as a dynamic loading. So, the results can be compared with a quasi-static experiment.

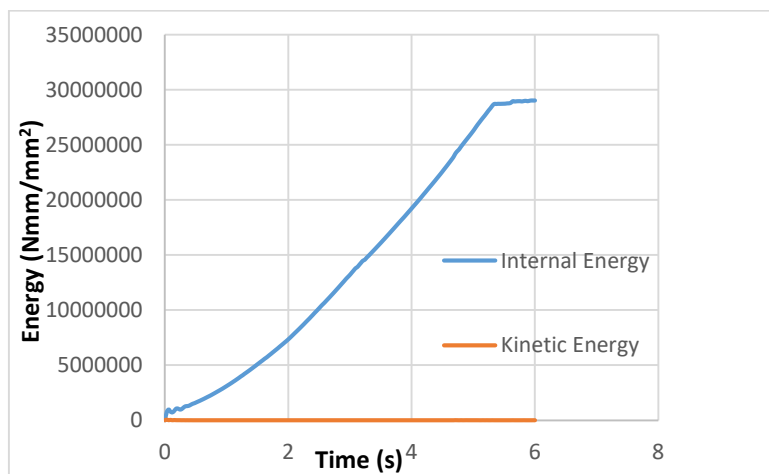


Figure 18. Internal Energy and Kinetic Energy of the Whole Frame

CONCLUSION

In this study, a practical wall system was proposed to improve the behaviour of RC frames. The results of the bare frame can be compared with a previous experimental study. In the previous study (Zhai et al., 2016) where the same dimensions of the RC frame were constructed with Chinese local steel and concrete materials, the bare frame carried 225kN load. The good agreement between the results of this study and the previous one shows that the results are trustable.

The first type of wall with 10mm metallic elements increased the lateral load carrying capacity of the frame from 269kN to 435kN. This indicates a 61% increase. If a second type of wall is used the interaction between wall and frame increases the lateral load capacity to 571kN. This indicates a 112% increase when compared with the bare frame, and a 31% increase with the analysis of the first type of wall. If 5mm thick metallic elements are used, the lateral load capacity increases to 511kN. This indicates a 10% decrease only if compared with the situation with 10mm thick elements. However, if 3mm thick elements are used with the second type of wall maximum load is 409.5kN which is 28% less than the strength of the frame with the second type of wall and 10mm thick elements. If these results are compared with the previous study (Zhai et al., 2016) where the RC frame is modelled with a traditional infill wall, in the best case, the proposed wall model in this study carried 72% more load than the traditionally infilled RC frame. In the worst case, the proposed wall with 3mm thick metallic elements carried 23% more load than the traditionally infilled frame.

The proposed wall increases the stiffness of the frame. The initial stiffness of the bare frame was 21886.06N/mm. If a second type of wall with 10mm thick elements is used, the initial stiffness of the frame increases to 56198.27N/mm which indicates a 156% increase. However, 3mm thick elements increase the stiffness only to 29352.97N/mm which indicates a 34% increase. The results show that different types of walls and metallic elements can be used for different design purposes.

In this study, it was observed that there was no serious damage at all in the lightweight concrete wall panel. Also, the usage of polymer material between the wall and beam in the second type of wall prevented local damage in the conjunction zone. This can be related to the fact that the high deformation ability of polymer material eliminates the stress concentrations as indicated by a previous study (Kwiecien, 2014). Unlike the 10mm thick elements of group 1, it's seen that yielding occurred in the elements with 5mm and 3mm thickness. Mises stresses reached around 354-387MPa in 3mm thick elements. This result indicates that thinner elements also can work as nonlinear yielding metallic dampers increasing the damping in the structure.

REFERENCES

- Al-Shaikh, I., & Falah, N. (2014). Numerical analysis of masonry infilled RC frames, *Journal of Science and Technology*, 19:2. <https://doi.org/10.20428/jst.v19i2.772>
- Abdulla, K., F., Cunningham, L., S., & Gillie, M. (2017). Simulating masonry behaviour using a simplified micro model approach. *Engineering Structures*, 151, 349-365
- Bai, J., & Ou, J., (2012, September). Plastic limit state design of frame structures based on the strong column weak beam failure mechanism. In 2012 15th World Conference on Earthquake Engineering. WCEE
- Demir, C. (2012). Seismic Behaviour of Historical stone masonry. Phd Thesis. Istanbul Technical University Civil Engineering.
- Dassault Systems Simula ABAQUS, Modelling fracture and Failure, Lecture 6
- Gao, J., Sun, W., & Morino, K. (1997). Mechanical properties of steel fiber-reinforced high-strength lightweight concrete. *Cement and Concrete Composites*, 19, 307-313. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(97\)00023-1](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(97)00023-1)
- Inculet, V. (2016) Nonlinear analysis of earthquake induced vibrations. Master Thesis. Aalborg University School of Engineering and Science, 79s.
- Kuruşçu, A., O. (2012) Yığma duvar ve temellerde doğrusal olmayan modelleme. Doktora Tezi. Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, 171 s.
- Kwiecien, A. (2014). Shear bond of composites to brick applied highly deformable in relation to resin epoxy interface materials. *Materials and Structures*, 47, 2005-2020, <https://doi.org/10.1617/s11527-014-0363-y>
- Ksiel, P. (2018). Model approach for polymer flexible joints in precast elements joints for concrete pavements. Phd Thesis. Krakow University of Technology Civil Engineering.
- Koman, H. (2021). Harçsız bloklar kullanılarak yapıların deprem davranışının iyileştirilmesi. Doktora Tezi. Manisa Celal Bayar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Manisa 142s.
- Kahramanmaraş Depremlerine ait ön değerlendirme raporu. (2023). <https://insaatmuh.mcbu.edu.tr/> Accessed 12.06.23.

- Li, H., Li, G., & Wang, S. (2014, July). Study and Application of Metallic Yielding Energy Dissipation Devices in Buildings. In 10th National Conference on Earthquake Engineering (pp. 21-25).
- Lin, K., Totoev, Y.Z., Liu, H., & Guo, T. (2016). In plane behaviour of a reinforcement concrete frame with a dry stack masonry panel, *Mdpi Materials*, 9, 108. <https://doi.org/10.3390/ma9020108>
- Nikam, S., Waghlikar, S., & Patil, G., (2014). Seismic energy dissipation of a building using friction damper. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering*, 10, 2278-3075.
- Naeem, A., Lee, M., & Kim, J., (2015, April) Steel Honeycomb Dampers for Seismic Retrofit of Structures. In 2015 International Conference on Environment and Civil Engineering.
- Obaidat, Y., T. (2011) Structural retrofitting of concrete beams using FRP. Phd Thesis. Lund University Civil Engineering.
- Ramancharla, P., K. Nptel Online Course, Indian Institute of Technology, Madras, India
- Viskovic, A., Zuccarino, L., Kwiecien, A., Zajac, B., & Gams, M. (2017) Quick seismic protection of weak masonry infilling in filled frame structures using flexible joints. *Key Engineering Materials*, 747, 628-637, <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.747.628>
- Yıldırım, S., Aşık, G., Erkuş, B., Yetimoğlu, Y., Tonguç, Y., & Mualla, I., (2014 Ağustos). Retrofit of a reinforced concrete building with friction dampers. In Second European Conference on Earthquake Engineering And Seismology, (pp. 25-29).
- Zhai C., Kong, J., Wang, X., & Chen, Z., (2016). Experimental and finite element analytical investigation of seismic behavior of full-scale masonry infilled RC frames, *Journal of Earthquake Engineering*, 20:7, 1171-1198. <https://doi.org/10.1080/13632469.2016.1138171>



Kahramanmaraş Sütçü İmam University

Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 19.09.2023
Kabul Tarihi : 29.11.2023

Received Date : 19.09.2023
Accepted Date : 29.11.2023

ÖZNETELİK ENTEGRASYONUNA DAYALI ESA MİMARİSİ KULLANILARAK ENDOSKOPIK GÖRÜNTÜLERİN SINIFLANDIRILMASI

CLASSIFICATION OF ENDOSCOPIC IMAGES USING CNN ARCHITECTURE BASED ON FEATURE INTEGRATION

Hüseyin ÜZEN¹ (ORCID: 0000-0002-0998-2130)
Hüseyin FIRAT^{2*} (ORCID: 0000-0002-1257-8518)

¹ Bingöl Üniversitesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Bingöl, Türkiye
² Dicle Üniversitesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Diyarbakır, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Hüseyin FIRAT, huseyin.firat@dicle.edu.tr

ÖZET

Derin öğrenme (DL) tekniklerindeki son gelişmeler, tıbbi görüntüler kullanılarak gastrointestinal (GI) hastalıkların sınıflandırılmasını otomatikleştirmek için umut verici bir potansiyel göstermektedir. Zamanında ve kesin teşhis, tedavi etkinliğini önemli ölçüde etkilemektedir. Bu araştırma, GI hastalıklarını tanımlamak için yeni bir DL tabanlı model tanıtmaktadır. Bu model, önceden eğitilmiş ağ mimarilerinin ara katmanlarından elde edilen öznetelikleri birleştirerek sınıflandırma işlemini gerçekleştirmektedir. Öznetelik entegrasyonuna dayalı evrimsel sinir ağı (ESA) olarak adlandırılan bu modelde, endoskopik görüntüleri sınıflandırmak için önceden eğitilmiş ağ mimarilerinin yüksek ve düşük seviyeli öznetelikleri birleştirilerek nihai öznetelik haritası elde edilmektedir. Daha sonra bu öznetelik haritası sınıflandırma için kullanılmaktadır. Kvasirv2 veri seti kullanılarak yapılan deneysel analizler sonucunda, önerilen model ile başarılı bir performans elde edilmiştir. Özellikle, DenseNet201 modelinin ara katmanlarındaki özelliklerin birleştirilmesi, sırasıyla %94.25, %94.28, %94.24 ve %94.24 doğruluk, kesinlik, duyarlılık ve F1 puanı ile sonuçlanmıştır. Diğer ESA tabanlı önceden eğitilmiş modellerle ve son çalışmalarla yapılan karşılaştırmalı analizler, önerilen modelin üstünlüğünü ortaya koymuş ve doğruluğu %94.25'e yükseltmiştir. Bu, endoskopik görüntülerden GI hastalık tespitinde gelişmiş sınıflandırma doğruluğu için DenseNet201'in ara katmanlarındaki özelliklerden yararlanma potansiyelinin altını çizmektedir.

Anahtar Kelimeler: DenseNet201, endoskopik görüntü sınıflandırma, evrimsel sinir ağı, kvasirv2 veri seti

ABSTRACT

Recent developments in deep learning (DL) techniques show promising potential for automating the classification of gastrointestinal (GI) diseases using medical images. Timely and accurate diagnosis significantly impacts treatment effectiveness. This research introduces a new DL-based model for identifying GI diseases. This model performs classification by combining features extracted from intermediate layers of pretrained network architectures. In this model, named CNN based on feature integration, high and low-level features from pretrained network architectures are combined to obtain a final feature map for classifying endoscopic images. This feature map is then utilized for classification. Experimental analyses conducted using the Kvasirv2 dataset resulted in successful performance with the proposed model. Specifically, combining features from the intermediate layers of the DenseNet201 model resulted in accuracies, precision, recall, and F1 scores of 94.25%, 94.28%, 94.24%, and 94.24%, respectively. Comparative analyses against other CNN-based pretrained models and recent studies highlighted the superiority of the proposed model, elevating the accuracy to 94.25%. This underscores the potential of leveraging features from the intermediate layers of DenseNet201 for enhanced classification accuracy in detecting GI diseases from endoscopic images.

Keywords: DenseNet201, endoscopic image classification, convolutional neural network, kvasirv2 dataset

ToCite: ÜZEN, H., & FIRAT, H., (2024). ÖZNETELİK ENTEGRASYONUNA DAYALI ESA MİMARİSİ KULLANILARAK ENDOSKOPIK GÖRÜNTÜLERİN SINIFLANDIRILMASI. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 27(1), 121-132.

GİRİŞ

İnsan gastrointestinal (GI) sistemi, vücudun sindirim işlevini yerine getiren karmaşık bir sistemdir. Bu sistem, besinlerin ağızdan başlayarak mide, ince bağırsak ve kalın bağırsak boyunca işlenmesini ve besin maddelerinin emilmesini sağlamaktadır. GI hastalıklar söz konusu olduğunda, GI sistemi bu işlevleri başarılı bir şekilde yerine getirememektedir. GI hastalıklar arasında kabızlık, irritabl bağırsak sendromu, hemoroid, anal fissür, anorektal apseler, anal fistüller, perianal enfeksiyonlar, divertiküler hastalıklar, kolit, kolon polipleri ve kanser vb. gibi hastalıklar yer almaktadır (Iqbal vd., 2022). Bu hastalıkların birçoğu, insan yaşam kalitesini düşüren ve hayatı tehdit eden hastalıklara kadar çeşitli anormal sonuçlar doğurabilmektedir. Bundan dolayı, GI hastalıklar ve kanser günümüz dünyasında ciddi bir endişe kaynağıdır. GI hastalıklar insan sindirim sisteminde yaygındır. İnsanlarda yüksek ölüm oranlarının önemli bir nedeni, sindirim sistemi ile ilgili çeşitli bulaşıcı hastalıklardan kaynaklanmaktadır. Ülser, mide kanaması, polipler, Crohn hastalığı, kolorektal kanser, tümör ve diğer ilgili hastalıklar gibi GI sistem hastalıkları bugün dünya çapında iyi bilinmektedir (Mohapatra vd., 2023; Haile vd., 2022). Uluslararası Kanser Araştırmaları Ajansı, 2018 yılında dünya genelinde GI kanser oranının 4,8 milyon yeni vaka olarak tahmin edildiğini, bunun dünya genelindeki tüm kanser vakalarının %26' sını oluşturduğunu ve GI kanserle ilişkili ölümlerin sayısının dünya genelinde kansere bağlı tüm ölümlerin %35' i olarak tahmin edildiğini bildirmiştir (Naz vd., 2021).

Çeşitli GI hastalıkların erken teşhisi etkili tedaviye neden olabilmekte ve ölüm riskini azaltabilmektedir. Ancak mide-bağırsak gibi bazı hastalıkların saptanmasında zorluklar oluşturması veya önemli ayrıntıları gizleyen görüntü parazitlerinin varlığı nedeniyle tıbbi tarama sırasında belirsizlik oluşturması hastalığın tespit edilememesine veya karışıklık oluşturmaya neden olabilmektedir (Borgli vd., 2020). Endoskopi ve kolonoskopi şu anda GI hastalıklarının araştırılması için uygulanan standart prosedürlerdir. Endoskopi ve kolonoskopi, GI kanal organlarının içini incelemek ve polipler, ülserler veya kanser gibi herhangi bir anomaliyi araştırmak için bir doktor tarafından kapsamlı bir inceleme gerektiren, ağızdan veya rektal olarak küçük bir kamera takılı bir tüpün yerleştirilmesini içeren müdahaleci prosedürlerdir. Polipleri belirleme yeteneği, kanserin gelişme olasılığını etkilemektedir. Poliplerin %20 kadarı muayene sırasında tespit edilememektedir (Kaminski vd., 2010). Ayrıca, endoskopi görüntülerinin subjektif olarak yorumlanması zaman alıcı ve minimal düzeyde tekrarlayıcı olabilmekte ve potansiyel olarak yanlış tanıya yol açabilmektedir. İnsan hatası ve diğer sınırlamaların bir sonucu olarak doktorlar tarafından tanıda yanlışlık potansiyeli göz önüne alındığında, bilgisayar destekli otomatik bir sistemin kullanılması, GI poliplerin ve kanserlerin erken evrelerinde tespit edilmesinde avantajlı olabilmektedir. Bu doğrultuda, yapay zekanın çeşitli GI endoskopik uygulamalarda kullanılması, klinik uygulamayı iyileştirme ve mevcut tanı yöntemlerinin verimliliğini ve hassasiyetini iyileştirme potansiyeline sahiptir. Son yıllarda, yapay zekanın bir alt dalı olan ve makine öğrenme yöntemlerinin alternatif bir formunu temsil eden derin öğrenme yöntemleri, kolorektal polip tespiti ve sınıflandırması, helicobacter pylori enfeksiyonunun teşhisi için endoskopik görüntülerin analizi ve erken mide kanserinin derinlik değerlendirmesi ve kablosuz kapsül endoskopi görüntülerinde çeşitli anormalliklerin tespiti gibi GI endoskopinin birçok alanında başarılı bir şekilde uygulanmıştır (Su vd., 2022; Majid vd., 2020; Khan vd., 2020). Derin öğrenmenin avantajlarını göz önünde bulunduran araştırmacılar, kablosuz kapsül endoskopi tarafından üretilen verilerin özellik çıkarımı ve sınıflandırılması için evrişimli sinir ağı (ESA) tabanlı yöntemleri kullandılar. Yapılan deneysel çalışmaların sonuçları, diğer görüntü tanıma teknikleri ve tıp uzmanları tarafından yapılan tanıma teknikleri ile karşılaştırıldığında, ESA tabanlı yöntemlerin daha iyi performans elde ettiğini göstermektedir (Su vd., 2022; Soffer vd., 2020).

Gunasekaran vd. (2023) GI sistem hastalıklarını sınıflandırmak için GIT-NET adı verilen bir topluluk modeli önerdiler. Topluluk modeli DenseNet201, InceptionV3 ve ResNet50 olmak üzere üç temel modelden oluşmaktadır. Öncelikle, sınıflandırma için bireysel modeller kullanıldığında, tüm sınıfların özelliklerini yeterince öğrenemeyebilecekleri için genellikle yanlış sınıflandırmaya eğilimli olduğunu gördüler. Bunun nedeni, her modelin belirli sınıfların özelliklerini diğer sınıflardan daha verimli bir şekilde öğrenebilmesidir. Daha sonra bu üç modelden oluşan topluluk öğrenimini kullanarak deneysel çalışmalarını gerçekleştirdiler. Modeli sekiz sınıflı bir Kvasirv2 veri seti üzerinde değerlendirdiler. Önerilen bu topluluk modeli %92.96 sınıflandırma doğruluğu ile sonuçlanmıştır. Lonseko vd. (2021) sınıflandırma performansını iyileştirmek için uzamsal faktörlerin uygulanmasını önermektedir. Spesifik olarak, GI hastalıklarının sınıflandırılması için kodlayıcı-kod çözücü katmanlarla uygulanan derin ESA tabanlı bir uzamsal dikkat mekanizması önerdiler. Veri dengesizliği sorununun üstesinden gelmek için veri büyütme tekniklerini uyarladılar. Kvasirv2 veri seti üzerinde gerçekleştirilen deneysel çalışmalar sonucunda %93.19 sınıflandırma doğruluk sonucu bulunmuştur. Xing vd. (2020) kablosuz kapsül endoskopi görüntü sınıflandırması için iki dallı bir dikkat kılavuzlu deformasyon ağı önerdiler. Özellikle, birinci dalın dikkat haritaları, ikinci dalın giriş görüntülerindeki lezyon bölgelerinin büyütülmesine rehberlik etmek için kullanıldı, böylece küçük lezyonların daha

iyi temsil edilmesine ve incelenmesine yol açtı. Ayrıca, ağa üçüncü dereceden uzun menzilli özellik toplama modülleri eklendi. Bu modüller, uzun menzilli bağımlılıkları yakalayarak ve bağlamsal özellikleri bir araya getirerek ağa küresel bir bağlamsal görünüm ve daha güçlü özellik temsili ve ayırt etme kabiliyeti kazandırdı. Dahası, dikkat haritalarını rafine etmek ve iki dalın karşılıklı terfisini sağlamak için yeni bir deformasyona dayalı dikkat tutarlılığı kaybı önerildi. Son olarak, iki daldan gelen global özellik yerleştirmeleri, görüntü etiketi tahminleri yapmak için birleştirildi. Kvasirv2 veri seti üzerinde gerçekleştirilen deneysel çalışmalar sonucunda %91.33 doğruluk sonucu elde ettiler. Pozdeev vd. (2019) otomatik iki aşamalı sınıflandırma kullanarak polip segmentasyon görevini ve çözümünü tartışmaktadır. İlk aşama, ilk endoskopik görüntülerden alınan genel özelliklere dayalı ikili sınıflandırmadır. İkinci aşama, segmentasyon için evrişimli sinir ağlarının kullanımını içermektedir. Yöntemin başarısını test etmek için Kvasirv2 veri seti ile gerçekleştirilen deneysel çalışmalar sonucunda %88 doğruluk sonucu elde edilmiştir. Agrawa vd. (2017) endoskopik görüntülerle GI sistem anormalliklerinin sınıflandırılması için VGG ve InceptionV3 mimarilerinden oluşan bir yöntem geliştirmiştir. Geliştirilen yöntemi test etmek için Kvasirv2 üzerinde yapılan deneysel çalışmalar sonucunda %83.8 sınıflandırma doğruluğu ve %84.7 F1 skor değeri elde ettiler. Pogorelov vd. (2017) altı katmandan oluşan bir ESA modeli kullanarak endoskopik görüntü sınıflandırmasını gerçekleştirdiler. Kvasirv2 veri seti kullanılarak gerçekleştirilen deneysel çalışmalar sonucunda %91.4 sınıflandırma doğruluğu elde ettiler. Ucan vd. (2022) endoskopik görüntülerin sınıflandırılması için EfficientNetB0 modelini kullandılar. Kvasirv2 veri seti kullanılarak gerçekleştirilen deneysel çalışmalar sonucunda %93.5 doğruluk değeri elde ettiler. Kahsaygebressie vd. (2019) endoskopik görüntülerde farklı GI sistem hastalıklarını tanımlamak ve sınıflandırmak için DenseNet121 ve ResNet50 yaklaşımlarını kullandı. Sekiz farklı sınıfa ait GI endoskopik görüntüleri içeren halka açık Kvasirv2 veri seti kullanılarak gerçekleştirilen deneysel çalışmalar sonucunda sırasıyla %86.9 ve %87.8 sınıflandırma doğruluk sonucu elde ettiler. Du vd. (2020) GI görüntülerden oluşan veri seti üzerinde transfer öğrenme yöntemlerinden ince ayarlı ResNet152, EfficientNetB7 ve DenseNet161 yöntemlerini uyguladılar. Kvasirv2 veri setinden üç sınıftan oluşan GI görüntüleri üzerinde gerçekleştirilen deneysel çalışmalar sonucunda, sırasıyla %90.17, %89.17 ve %89.50 doğruluk değeri elde ettiler. Du vd. (2022) küçük etiketli GI görüntü veri setlerinde sınıflandırma yeteneğini geliştirmek için özofagus hastalığı için yeni bir yarı denetimli bilimsel kontrast öğrenme sınıflandırma yöntemi önerdiler. Önerdikleri yöntemde, ilk olarak, aynı lezyondan alınan görüntülerin yüksek benzerlik özelliklerinden yararlanarak verimli kontrast çiftleri oluşturmak için verimli bir kontrast çifti oluşturma modülü geliştirdiler. Ardından, özofagus GI görüntülerinin genel özelliklerini içeren denetimsiz bir görsel özellik temsili, denetimsiz bilimsel kontrast öğrenme ile öğrenilmiştir. Son olarak, özellik temsili alt akış özofagus hastalığı sınıflandırma görevine aktarılmıştır. Önerdikleri yöntem ile gerçekleştirilen deneysel çalışmalar sonucunda sınıflandırma performansını %92.57 olarak buldular. Owais vd. (2019) endoskopik videolar kullanılarak çoklu GI hastalıklarının sınıflandırılması için uzamsal-zamansal özelliklere dayalı yeni bir ESA ve LSTM tabanlı sınıflandırma çerçevesi önerdiler. Önerilen yöntem, yalnızca uzamsal bilgilerden öğrenilen özelliklere kıyasla çoklu endoskopi taramalarının daha ayırt edici temsillerini kodlayabilmektedir. Bu nedenle, hem uzamsal hem de zamansal bilgi daha iyi sınıflandırma ve geri getirme performansı ile sonuçlanmaktadır. Önerilen yöntemin performansı, GastroLab ve kvasir veritabanından kamuya açık bir veri seti kullanılarak kapsamlı bir şekilde değerlendirilmiştir. Değerlendirmeler sonucunda ortalama %92.57 doğruluk değeri elde ettiler. Poudel vd. (2020) endoskopik görüntü sınıflandırması için etkili bir derin öğrenme yaklaşımı geliştirmiştir. Önerdikleri yaklaşım, uzamsal ayrıntıları korumak için ESA'larda dilatasyon kullanarak benzer görünümlü görüntülerin ve poliplerin yanlış sınıflandırılmasını önlemektedir. Ayrıca, aşırı öğrenme ve gürültüyle mücadele etmek için DropBlock düzenlemesi getirmişlerdir. Önerdikleri yaklaşımları ile gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda Kvasir veri seti için %88 ve Kolorektal veri seti için %93 F1 puanı elde ettiler.

Derin öğrenme, özellikle ESA tabanlı yöntemler kullanılarak endoskopi görüntülerinden GI hastalıklarının otomatik sınıflandırılması, literatürde yapılan çalışmalarda başarılı bir şekilde gerçekleştirilebileceğini göstermektedir. Ancak, incelenen çalışmalarda, Kvasirv2 veri seti üzerinde gerçekleştirilen deneysel çalışmalar sonucunda sınıflandırma doğruluk sonuçlarının düşük olduğu tespit edilmiştir. Bu nedenle, sınıflandırma doğruluğunu arttırmak için yeni ESA tabanlı yöntemlerin geliştirilmesi gerekmektedir.

Literatürde var olan birçok çalışmada VGG16, ResNet, DenseNet gibi ağ mimarilerine transfer öğrenme uygulanarak sınıflandırma çalışmaları yapılmıştır. Ayrıca bazı çalışmalarda bu mimarilerin son katmanlarında destek vektör makineleri gibi geleneksel yöntemler uygulanmıştır. Bu uygulamaların temel amacı, önceden eğitilmiş ağ mimarilerinden elde edilen güçlü öznitelikleri kullanmaktır. Fakat etkili bir ESA mimarisinin ara katmanlarında da önemli detayları içeren öznitelikler mevcuttur. Bu bakış açısıyla geliştirilen UNet ve özellik piramid ağı (feature pyramid network-FPN) modelleri etkili sonuçlar vermiştir. Buradan yola çıkarak, bu çalışmada önceden eğitilmiş mimarilerin ara katmanlarından elde edilen öznitelikleri birleştirerek sınıflandırma için yeni bir model önerilmiştir.

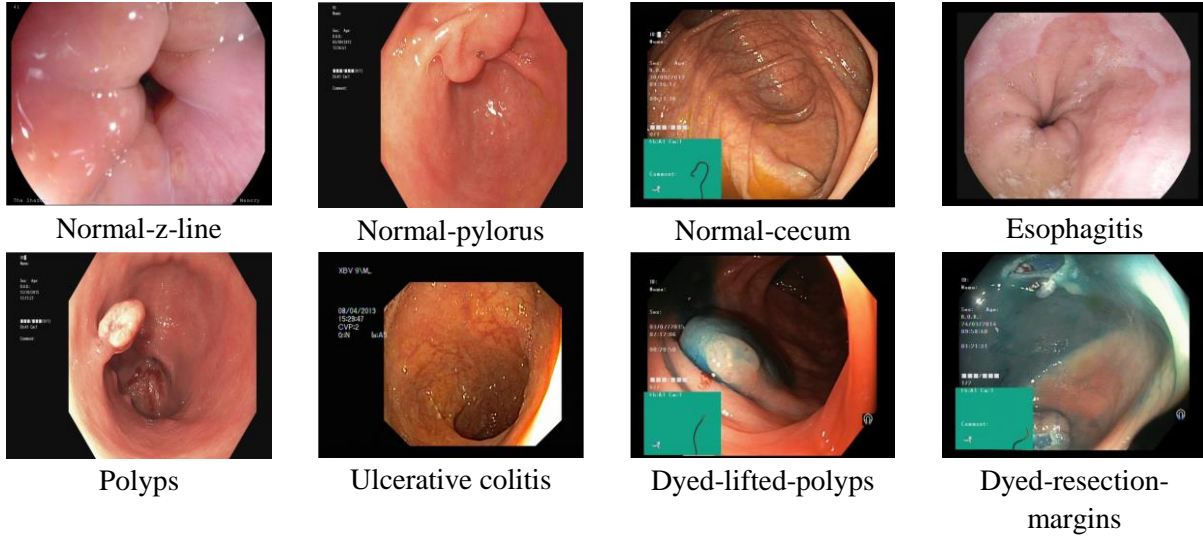
Öznitelik Entegrasyonuna dayalı Evrişimsel Sinir Ağ (ÖE-ESA) olarak adlandırılan bu mimaride, endoskopik görüntüleri sınıflandırmak için önceden eğitilmiş ağ mimarilerinin yüksek ve düşük seviyeli öznitelikleri birleştirilerek nihai öznitelik haritası elde edilmektedir. Daha sonra bu öznitelik haritası sınıflandırma için kullanılmaktadır. Kvasirv2 veri seti için ESA mimarisi kullanılarak kapsamlı deneysel çalışmalar yapılmıştır. Yapılan deneysel çalışmalarda, önceden eğitilmiş VGG, ResNet, DenseNet ve InceptionV3 modelleri uygulanmıştır. Deneysel çalışmaların sonucunda DenseNet201 modeli kullanılarak %94.25 doğruluk değeri elde edilmiştir. Son teknoloji modellerle karşılaştırıldığında, DenseNet201 modeliyle daha başarılı sınıflandırma sonuçlarının sağlandığı görülmüştür.

Bu çalışmanın geri kalanı şu şekilde düzenlenmiştir. Veri seti, önerilen yöntem ve önerilen yöntemin arka planında kullanılan yöntemler materyal ve metot bölümü olan Bölüm 2’de yer almaktadır. Kvasirv2 veri seti kullanılarak yapılan deneysel çalışmalar ve bu çalışmaların sonuçları Bölüm 3’te tartışılmıştır. Son olarak sonuç bölümü olan Bölüm 4’te çalışmanın genel bir özetine yer verilmiştir.

MATERYAL VE METOT

Veri Seti

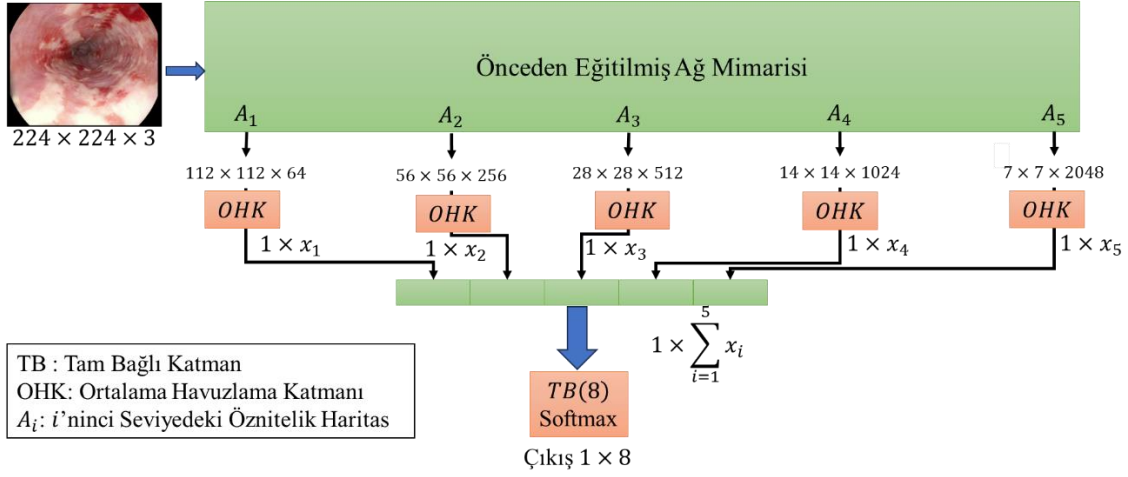
Önerilen yöntem Kvasirv2 veri seti üzerinde değerlendirilmiştir (Pogorelov vd., 2017). Kvasirv2 veri setindeki görüntüler, çözünürlükleri 720x576 ile 1920x1072 piksel arasında değişen endoskopik görüntülerden oluşmaktadır. Veri setindeki her görüntü, endoskopik hastalıkların bilgisayar destekli tespit yöntemlerini değerlendirmek, yani endoskopik hastalık içeren kareleri normal olanlardan ayırt etmek için deneyimli endoskopistler tarafından görüntü düzeyinde açıklanmıştır. Kvasirv2, üç önemli anatomik işaret, üç tür sindirim sistemi hastalığı ve endoskopik polipektomi ile ilgili iki görüntü sınıfı dahil olmak üzere sekiz görüntü sınıfı içermektedir. Üç tip anatomik işaret Normal-z-çizgisi (Normal-z-line), Normal-pilor (Normal-pylorus), Normal-çekum (Normal-cecum)’ dur. Üç hastalık sınıfı Özofajit (Esophagitis), Ülseratif kolit (Ulcerative colitis) ve Polipleri (Polyps) içermektedir. Son sınıflar ise, Boyalı-rezeksiyon-kenarları (Dyed-resection-margins) ve Boyalı-kaldırılmış-polipler (Dyed-lifted-polyps)’ dir. Bu veri setinde her sınıftan 1000 adet görüntü olmak üzere toplam 8000 görüntü bulunmaktadır. Şekil 1, deneylerimizde kullanılan sekiz endoskopik görüntü sınıfının örnek görüntülerini göstermektedir.



Şekil 1. Kvasirv2 Veri Setindeki Örnek Görüntüler

Önerilen Yöntem

Bu çalışmada endoskopik görüntülerin sınıflandırılması için Öznitelik Entegrasyonuna Dayalı Evrişimsel Sinir Ağı (ÖE-ESA) modeli önerilmiştir. Önerilen modelin temel amacı VGG16, InceptionV3, ResNet101, DenseNet121, DenseNet169 ve DenseNet201 gibi önceden eğitilmiş ağ mimarilerinden olabildiğince fazla özniteliklerin çıkarılmasıdır. Bu sayede geleneksel ESA mimarilerinden farklı olarak nihai öznitelik haritası için daha kapsamlı bir öznitelik haritası elde edilmiştir. Bu öznitelik haritası ile önceden eğitilmiş ağ mimarilerinden düşük ve yüksek seviyeli öznitelikleri bir araya getirerek nihai öznitelik haritası elde edilmiştir. UNet (Ronneberger vd., 2015) ve FPNet (Lin vd., 2017) modellerinde ele alındığı gibi bu öznitelik haritaları hem mekânsal hem de anlamsal detaylar içermektedir. Önerilen model Şekil 2’ de verilmiştir.



Şekil 2. Önerilen Öznitelik Entegrasyonuna Dayalı ESA Mimarisi

Şekil 2' de görüleceği üzere $224 \times 224 \times 3$ boyutunda girdi görüntüsü önceden eğitilmiş ağ mimarilerinin girişine verilmiştir. Önceden eğitilmiş ağ mimarisi seçimi için deneysel çalışmalarda VGG16, InceptionV3, ResNet101, DenseNet121, DenseNet169 ve DenseNet201 gibi ağ mimarileri kullanılmıştır. Kullanılan herhangi bir önceden eğitilmiş ağ mimarisinden 5 farklı öznitelik haritası alınmıştır. Bu öznitelik haritaları önceden eğitilmiş ağ mimarilerinin ara katmanlarından elde edilmiştir. Bu öznitelik haritalarının yüksekliği ve genişliği 224×224 boyutlu boyutlu bir girdi için sırası ile 112×112 , 56×56 , 28×28 , 14×14 ve 7×7 ' dir. Diğer bir ifadeyle, girdi görüntüsünün spektral boyutlarının yarıya düştüğü bölgelerden bir öznitelik haritası alınmıştır. Sonuç olarak nihai öznitelik haritası için 5 farklı boyutta mekansal ve anlamsal detaylar içeren öznitelikler alınmıştır. Öznitelik haritasının elde edilme işlemi Algoritma 1' de verilmiştir.

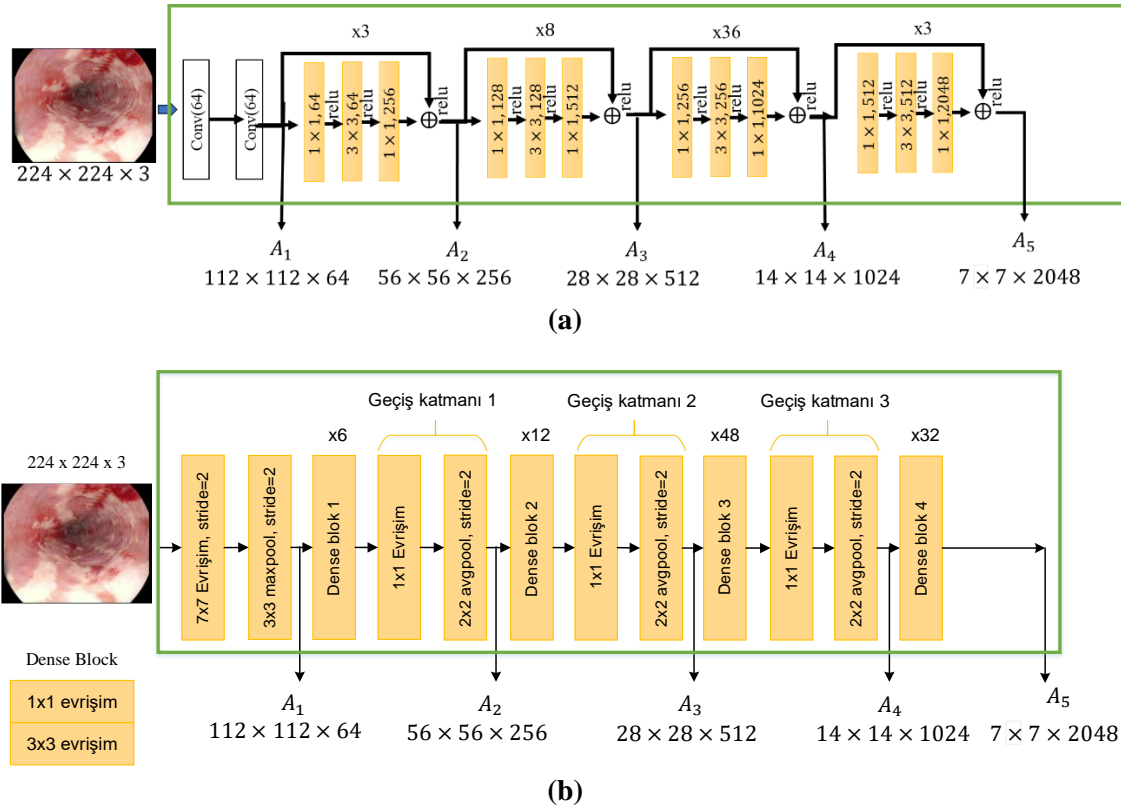
Algoritma 1. Öznitelik Haritası Seçim Algoritması

Giriş: Önceden eğitilmiş ağ mimarilerin katmanlarının çıktı dizisi (L)

Çıkış: Seçilmiş Katman Çıktı Dizisi ($SK = [A_1, A_2, A_3, A_4, A_5]$)

1. $IB = [112, 56, 28, 14, 7]$, IB : İstenilen Boyut
2. Katman çıktıları IB boyut dizisine göre Gruplandırılmış Katmanlar (GK) dizisine ata.
 $GK(IB_i) = L[\text{size}(L) == IB_i]$, $GK(.)$:
3. Seçilen Katmanlar (SK) dizisi için IB dizindeki elemanlara göre $GK(.)$ dizisinin son elemanını seç.
 $SK(i) = GK(IB_i)[-1]$

Algoritma 1' deki birinci adımda istenilen boyut (IB) vektörü ile tanımlanmıştır. Adım 2' de önceden eğitilmiş mimarinin tüm katman çıktıları L dizisinde toplanmıştır. Bu L dizisini gruplandırma için IB vektörü temel alınmıştır. Bu sayede L dizisi boyutlarına göre 5 gruba $GK(i)$ ayrılmıştır. Adım 3' te elde edilen 5 grubun en etkili özniteliğini seçmek için $GK(i)$ grupları arasındaki en yüksek dereceli (en yüksek indeksli) eleman alınmıştır. Bu sayede SK matrisinde $[A_1, A_2, A_3, A_4, A_5]$ katman çıktısı elde edilmiştir. Örnek olarak, ResNet101 ve DenseNet201 mimarilerine Algoritma 1 uygulanarak elde edilen $[A_1, A_2, A_3, A_4, A_5]$ katman çıktıları Şekil 3' te verilmiştir.



Şekil 3. (a) Resnet101 ve (b) Densenet201 Tabanlı Öznitelik Entegrasyonuna Dayalı ESA Mimarisinin Gösterimi

Şekil 2 ve Şekil 3' te önerilen modelin ikinci bölümde önceden eğitilmiş mimariden 5 farklı $[A_1, A_2, A_3, A_4, A_5]$ seviyeden öznitelikler çıkartılmıştır. Geleneksel bir ESA mimarisinde düşük seviyeli öznitelik haritaları renk, şekil ve doku gibi mekânsal detaylar içerirken yüksek seviyeli öznitelik haritalarında anlamsal detaylar içermektedir. Önerilen ÖE-ESA mimarisinde farklı seviyedeki öznitelikleri bir araya getirerek zengin bir öznitelik haritası elde edilmiştir. Öznitelikleri birleştirmek için öncelikle Ortalama Havuzlama Katmanı (OHK) uygulanarak öznitelik haritaları vektörlere dönüştürülmüştür. Daha sonra bu öznitelik vektörleri birleştirilerek sınıflandırma için kullanılan nihai öznitelik vektörü elde edilmiştir. Önerilen modelin son katmanında elde edilen nihai öznitelik vektörüne (F) Softmax sınıflandırıcısı uygulanarak sınıflandırma çıktısı elde edilmiştir. Bu işlem Denklem (1)' de gösterilmiştir.

$$P = softmax(PB^n(F))$$

$$softmax(x_i) = \frac{e^{x_i}}{\sum_{j=1}^n e^{x_j}} \quad (1)$$

Denklem (1)' de gösterilen P tahmin vektörünü ifade etmektedir. P tahmin vektörünü elde etmek için öncelikle nihai öznitelik haritasına 8 nöronlu bir Tam Bağlı (TB) katman uygulanmıştır. Burada verilen n değeri sınıf sayısıdır. TB katmanının çıktısında 8 boyutlu bir vektör elde edilmiştir. Bu vektörden olasılıksal tahmin dağılımını (P) elde etmek için softmax katmanı uygulanmıştır. Denklem (1)' in çıktısında elde edilen tahmin vektörünün en yüksek olasılık değerini temsil eden indeks sınıflandırma çıktısı olarak kabul edilmiştir. Önerilen ağ modelinin eğitiminde Kategorik Çapraz Entropi (Categorical Cross Entropy) kayıp fonksiyonu kullanılmıştır. Kategorik Çapraz Entropi kayıp fonksiyonu, sınıflandırma modellerinin eğitiminde ve değerlendirilmesinde kullanılan temel bir araçtır. Bu kayıp fonksiyonunun kullanım amacı, çok sınıflı bir sınıflandırma probleminde tahmin edilen sınıf olasılıkları ile gerçek sınıf etiketleri arasındaki farklılığı ölçmektir. Bu sayede modelin öğrenme sürecine rehberlik etmekte ve modelin daha iyi ve daha doğru tahminler yapmasına yardımcı olmaktadır. Bu kayıp fonksiyonu Denklem (2)' deki gibi tanımlanmaktadır.

$$L = -\frac{1}{n} \sum_i y_i \log(P_i) \quad (2)$$

Denklem (2)' de, y ve P değeri sırası ile beklenen çıktı ve tahmin çıktısı vektörlerini temsil etmektedir. i ise n (sınıf sayısı) boyutlu çıktı vektörlerin indeksidir. L değeri ise sınıflandırma çıktısının ortalama hata değerini göstermektedir.

DENEYSEL ÇALIŞMALAR VE SONUÇLARI

Önerdiğimiz yöntemin sınıflandırma doğruluğunu detaylı olarak incelemek için birçok deneysel çalışma yapılmıştır. Bu bölümde, öncelikle parametre ayarları hakkında bilgi verilecektir. Daha sonra deneysel çalışmalarda kullanılan değerlendirme ölçütleri açıklanacaktır. Son olarak Kvasırv2 veri seti kullanılarak elde edilen sınıflandırma doğruluk sonuçları ve literatürden aynı veri setini kullanan son yıllarda yapılmış çalışmalar ile karşılaştırma sonuçları yer alacaktır.

Parametre Ayarları ve Değerlendirme Ölçütleri

Deneysel çalışmalar intel i9 işlemci, 64GB ram RTX 3080 ti ekran kartına sahip bir bilgisayarda gerçekleştirilmiştir. Derin öğrenme modelinin tasarımında Python programlama dili ve keras-tensorflow kütüphanesi kullanılmıştır. Kullanılan hiperparametreler arasında batch size, görüntü boyutu, eğitim-test-doğrulama ayrımı, epoch sayısı yer almaktadır. Önerilen yöntemi eğitmek için batch size değeri olarak 16, 224x224x3' lük bir görüntü boyutu ve %80-%10-%10' luk bir eğitim-test-doğrulama ayrımı kullanılmıştır. 8000 görüntüden 6400 görüntü eğitim, 800 görüntü doğrulama ve 800 görüntü test için kullanılmıştır. Ek olarak, model 100 epoch için eğitilmiştir. Kayıp fonksiyonunu en aza indirmek ve modeli optimize etmek için Adam optimizier kullanılmıştır.

Önerilen yöntemin verimliliği, kesinlik (precision), F1-puanı (F1-score), duyarlılık (recall) ve sınıflandırma doğruluğu (accuracy) gibi değerlendirme ölçütleri kullanılarak belirlenmektedir. Değerlendirme ölçütleri, bir modelin tahminlerinin etkinliğinin niceliksel ve nesnel bir ölçüsünü sağlamaktadır. Ayrıca sınıflandırma performansını değerlendirmek için gereklidir. Bu ölçütler, her birinin kendine özgü güçlü yanları ve sınırlamaları olan, modelin performansı hakkında farklı bakış açıları sağlamaktadır. Bu ölçütlerin detaylı açıklaması şu şekildedir. Temel bir performans değerlendirme ölçütü olan doğruluk, yöntem tarafından üretilen doğru tahminlerin yüzdesini ölçer. Bu ölçüt, doğru tahmin sayısının yapılan toplam tahmin sayısına bölünmesiyle hesaplanmaktadır. Doğruluk değerinin hesaplanması Denklem (3)' teki gibidir. Önerilen yöntemle yapılan tüm pozitif tahminlerdeki gerçek pozitiflerin oranını ölçen bir ölçüm olan kesinlik, gerçek pozitif sayısının, gerçek pozitif ve yanlış pozitiflerin toplamına bölünmesiyle hesaplanmaktadır. Kesinlik değerinin hesaplanması Denklem (4)' teki gibidir. Veri setindeki tüm gerçek pozitif örnekler arasında gerçek pozitif oranını ölçen bir metrik olan duyarlılık, gerçek pozitif sayısının gerçek pozitif ve yanlış negatiflerin toplamına bölünmesiyle hesaplanmaktadır. Duyarlılık değeri Denklem (5)' teki gibi formülize edilmektedir. Duyarlılık ve kesinliğin harmonik ortalaması olan F1 puanı, özellikle sınıfların dengesiz olduğu durumlarda kesinlik ve duyarlılığı dengelemek için vazgeçilmez bir ölçüttür. Hem kesinliği hem de duyarlılığı yakalayan tek bir puan sağlayarak, onu genel model performans değerlendirmesi için güçlü bir ölçü haline getirir (Ha vd., 2022; Naseri vd., 2021; Shahin vd., 2019). F1 puanı Denklem (6)' daki gibi hesaplanmaktadır.

$$\text{Doğruluk} = \frac{TP + TN}{TP + FP + TN + FN} \quad (3)$$

$$\text{Kesinlik} = \frac{TP}{TP + FP} \quad (4)$$

$$\text{Duyarlılık} = \frac{TP}{TP + FN} \quad (5)$$

$$\text{F1 - puanı} = 2 * \frac{\text{Kesinlik} \times \text{Duyarlılık}}{\text{Kesinlik} + \text{Duyarlılık}} \quad (6)$$

Denklem (3), (4), (5) ve (6)' daki gerçek negatifler (TN), yanlış negatifler (FN), yanlış pozitifler (FP) ve gerçek pozitifler (TP) değerleri karışıklık matrisinden elde edilmektedir. Bu değerler şu şekildedir: TP, her sınıf için doğru sınıflandırılmış girdi görüntülerinin sayısını tanımlar. FP, sınıftaki yanlış sınıflandırılmış görüntülerin sayısını gösterir. TN, sınıfa ait olmadığı için doğru sınıflandırılan görüntülerin sayısını temsil eden gerçek negatiftir. FN yanlış negatiftir ve sınıftan yanlış sınıflandırılan görüntüleri temsil etmektedir.

Sınıflandırma Performans Sonuçları

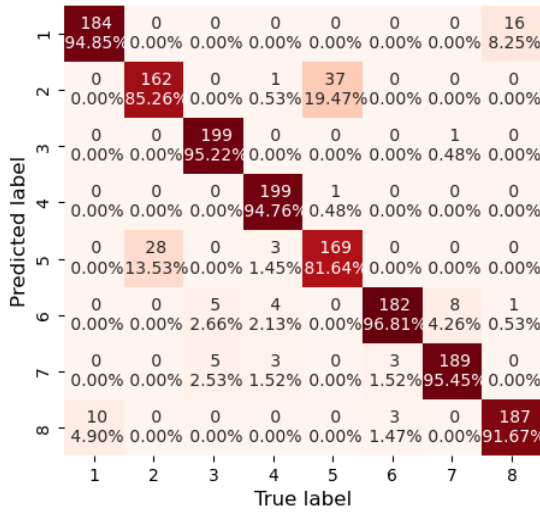
Deneysel çalışmalarda endoskopik görüntülerden GI hastalıklarının tespiti için Kvasirv2 veri seti kullanılmıştır. Çalışmalarda önceden eğitilmiş altı farklı mimari kullanılmıştır. Bu mimariler, VGG16, InceptionV3, ResNet101, DenseNet121, DenseNet169 ve DenseNet201' dir. Standart önceden eğitilmiş bu altı mimari ile önerilen ÖE-ESA mimarilerinin sınıflandırma sonuçları Tablo 1' de verilmiştir. Tablo 1 incelendiğinde, standart önceden eğitilmiş mimariler ile elde edilen sınıflandırma sonuçları şu şekildedir: VGG16 ile %86.68 doğruluk, %86.93 F1 skor, %88.18 kesinlik, %86.68 duyarlılık, InceptionV3 ile %92.68 doğruluk, %92.66 F1 skor, %92.78 kesinlik, %92.68 duyarlılık, ResNet101 ile %91.93 doğruluk, %91.90 F1 skor, %91.95 kesinlik, %91.93 duyarlılık, DenseNet121 ile %92 doğruluk, %91.95 F1 skor, %92.21 kesinlik, %92 duyarlılık, DenseNet169 ile %92.37 doğruluk, %92.35 F1 skor, %92.42 kesinlik, %92.37 duyarlılık, DenseNet201 ile %92.31 doğruluk, %92.30 F1 skor, %92.43 kesinlik ve %92.31 duyarlılık. Standart önceden eğitilmiş bu altı mimari karşılaştırıldığında en başarılı sonuçların InceptionV3 mimarisi ile elde edildiği görülmektedir. Önceden eğitilmiş bu altı mimariye dayalı önerilen ÖE ESA modeli kullanıldığında elde edilen sınıflandırma sonuçları şu şekildedir: VGG16 - ÖE ESA modeli ile %90.75 doğruluk, %90.68 F1 skor, %90.89 kesinlik, %90.75 duyarlılık, InceptionV3 - ÖE ESA modeli ile %92.37 doğruluk, %92.37 F1 skor, %92.50 kesinlik, %92.37 duyarlılık, ResNet101 - ÖE ESA modeli ile %93.12 doğruluk, %93.10 F1 skor, %93.18 kesinlik, %93.12 duyarlılık, DenseNet121 - ÖE ESA modeli ile %93.87 doğruluk, %93.86 F1 skor, %94.01 kesinlik, %93.87 duyarlılık, DenseNet169 - ÖE ESA modeli ile %93.62 doğruluk, %93.60 F1 skor, %93.75 kesinlik, %93.62 duyarlılık ve son olarak DenseNet201 mimarisine dayalı ÖE ESA modeli ile %94.25 doğruluk, %94.24 F1-skor, %94.28 kesinlik ve %94.24 duyarlılık değerlerinin elde edildiği görülmüştür. Tüm sonuçlar dikkate alındığında, standart önceden eğitilmiş ağ modellerinin bireysel kullanımları yerine bu modellere ÖE ESA' nın eklenmesi ile sınıflandırma doğruluk sonuçlarının arttığı gözlemlenmiştir. Özellikle ÖE ESA ile DenseNet modellerinin kullanımının daha başarılı sonuçlar elde ettiği görülmektedir. En başarılı sınıflandırma sonuçlarının ise DenseNet201 – ÖE ESA modeli ile elde edildiği açıkça görülmektedir. DenseNet201 – ÖE ESA modeli kendisine en yakın doğruluk sonucunu elde eden DenseNet121 – ÖE ESA modelinden %0.38, benzer şekilde DenseNet169-ÖE ESA modelinden %0.63 daha başarılı sonuçlar elde etmiştir. Hem bireysel model kullanımında hem de ÖE ESA ile birlikte kullanımda en düşük doğruluk sonuçları VGG16 modeli ile elde edilmiştir. Bunun yanı sıra DenseNet201-ÖE ESA modeli, ResNet101-ÖE ESA modelinden %1.13 ve InceptionV3 – ÖE ESA modelinden %1.88 daha başarılı doğruluk değeri elde etmiştir. Tüm sonuçlardan önerilen DenseNet201-ÖE ESA modelinin GI hastalık sınıflandırması için başarılı olduğu açıkça görülmektedir. Ayrıca, standart önceden eğitilmiş ESA modelleri ile ÖE ESA tabanlı modellerden bazılarının karışıklık matrisleri Şekil 4' te verilmiştir. Şekil 4 incelendiğinde önerilen ÖE ESA' nın kullanımının başarıyı arttırdığı görülmektedir. Önerilen DenseNet201-ÖE ESA modeli 2, 5 ve 6 nolu sınıflar haricinde diğer beş sınıfta en iyi doğruluk değerlerini elde etmiştir. 2,5 ve 6 nolu sınıflarda ise en iyi doğruluk değerleri DenseNet121-ÖE ESA modeli ile bulunmuştur.

Tablo 1. Önerilen Öznitelik Entegrasyonuna Dayalı ESA Modelleri ile Standart Önceden Eğitilmiş Modellerin Karşılaştırılması (%)

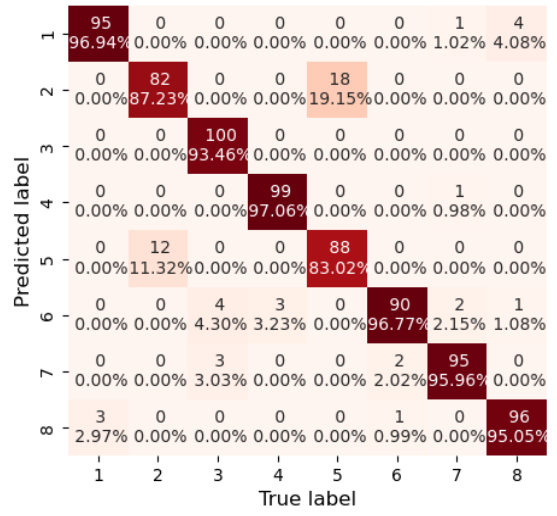
Model	Doğruluk	F1-skor	Kesinlik	Duyarlılık
VGG16	86,68	86,93	88,18	86,68
InceptionV3	92,68	92,66	92,78	92,68
ResNet101	91,93	91,90	91,95	91,93
DenseNet121	92,00	91,95	92,21	92,00
DenseNet169	92,37	92,35	92,42	92,37
DenseNet201	92,31	92,30	92,43	92,31
VGG16 – ÖE ESA	90,75	90,68	90,89	90,75
InceptionV3 – ÖE ESA	92,37	92,37	92,50	92,37
ResNet101 – ÖE ESA	93,12	93,10	93,18	93,12
DenseNet121 – ÖE ESA	93,87	93,86	94,01	93,87
DenseNet169 – ÖE ESA	93,62	93,60	93,75	93,62
DenseNet201 – ÖE ESA	94,25	94,24	94,28	94,24

Standart Önceden Eğitilmiş Modeller

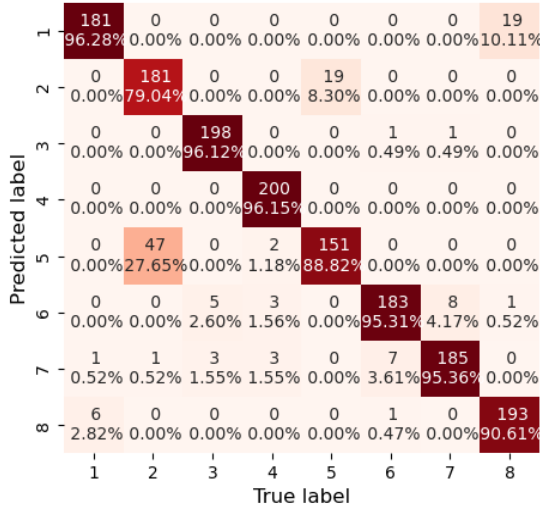
**Önerilen Öz nitelik Entegrasyonuna Dayalı
 ESA Modelleri**



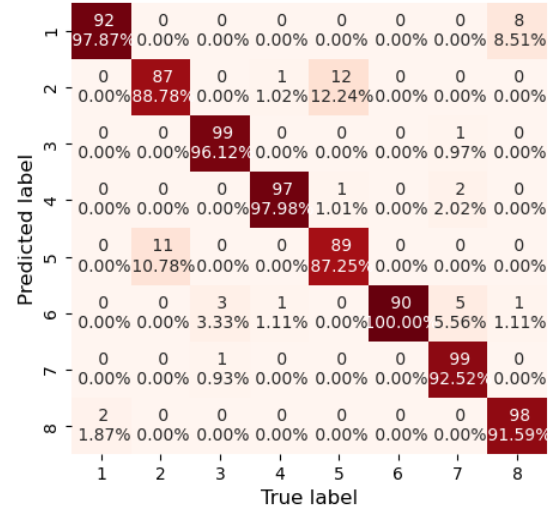
ResNet101



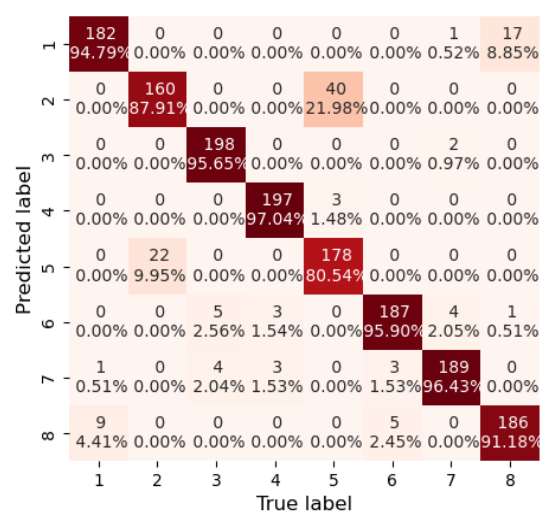
ResNet101



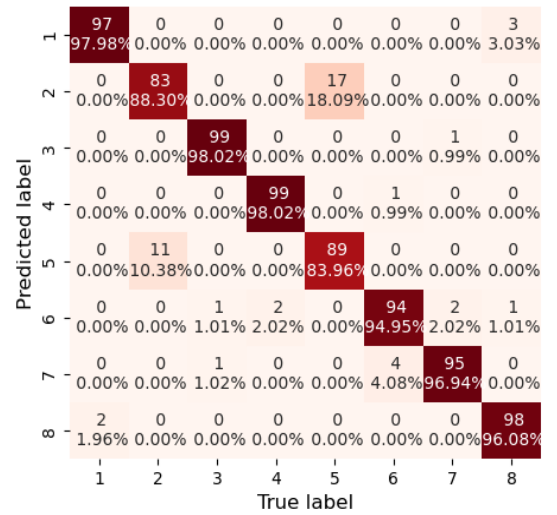
DenseNet121



DenseNet121



DenseNet201



DenseNet201

Şekil 4. Karışıklık Matrisleri

Tablo 1’ de, önerilen ÖE ESA modelinin DenseNet201 mimarisi ile birlikte kullanımının en başarılı sonuçları verdiği görülmüştür. DenseNet201 – ÖE ESA modelinin etkinliğini görmek için literatürden aynı veri setini kullanan son yıllarda yapılan çalışmaların karşılaştırılması Tablo 2’ de verilmiştir. Tablo 2’ ye göre, önerilen DenseNet201 – ÖE ESA modeli ile %94.25 sınıflandırma doğruluk değeri elde edilmiştir. Önerilen modele en yakın doğruluk değeri Lonseko vd. (2021) tarafından geliştirilen derin ESA tabanlı uzamsal dikkat mekanizması yöntemi ile bulunmuştur. Önerilen DenseNet201-ÖE ESA modeli, Lonseko vd. (2021) tarafından önerilen modelden %1.06 daha başarılı doğruluk değeri elde etmiştir. Bunun yanı sıra, önerilen DenseNet201- ÖE ESA modeli, Gunasekaran vd. (2023) tarafından geliştirilen topluluk modeli (DenseNet201, InceptionV3 ve ResNet50) yönteminden %1.29, Liu vd. (2017) tarafından geliştirilen çift yönlü marjinal fisher analizi + destek vektör makinesi yönteminden %1.65, Du vd. (2022) tarafından geliştirilen yeni yarı denetimli verimli karşılaştırmalı öğrenme yönteminden %1.68, Owais vd. (2019) tarafından geliştirilen ESA (ResNet) + LSTM yönteminden %1.68 daha başarılı doğruluk değeri elde etmiştir. Bu yöntemlerin yanı sıra, Du vd. (2020) tarafından geliştirilen ince ayar yapılmış ResNet152 modelinden %4.08, Xing vd. (2020) tarafından geliştirilen iki dallı yeni bir dikkat kılavuzlu deformasyon ağından %2.92, Pogorelov vd. (2017) tarafından önerilen altı katmanlı ESA modelinden %2.85, Pozdeev vd. (2019) tarafından önerilen ikili sınıflandırma ve ESA modelinden %6.25 daha başarılı doğruluk değeri elde edilmiştir. En düşük doğruluk değeri %83.8 ile Agrawa vd. (2017) tarafından geliştirilen VGG + InceptionV3 modelinde bulunmuştur. Daha sonra Kahsaygebreslassie vd. (2019) tarafından geliştirilen DenseNet121 ve ResNet50 modelleri ile %86.9 ve %87.8 doğruluk değerleri bulunmuştur. Tüm yöntemler göz önüne alındığında önerilen DenseNet201 – ÖE ESA modelinin diğer modellerden başarılı doğruluk değeri elde ettiği açıkça görülmektedir.

Tablo 2. Literatürde Kvasirv2 Veri Setini Kullanan Çalışmalarla Karşılaştırma Sonuçları (%)

Literatürdeki Çalışma	Yöntem	Doğruluk
(Gunasekaran vd., 2023)	Topluluk modeli (DenseNet201, InceptionV3 ve ResNet50)	92,96
(Lonseko vd., 2021)	Derin ESA tabanlı uzamsal dikkat mekanizması	93,19
(Xing vd., 2020)	İki dallı yeni bir dikkat kılavuzlu deformasyon ağ	91,33
(Pozdeev vd., 2019)	İkili sınıflandırma + ESA	88
(Agrawa vd., 2017)	VGG + InceptionV3	83,8
(Pogorelov vd., 2017)	Altı katmanlı ESA	91,4
(Kahsaygebreslassie vd., 2019)	DenseNet121 ve ResNet50	86,9 - 87,8
(Liu vd., 2017)	Çift yönlü marjinal Fisher analizi + Destek vektör makinesi	92,6
(Du vd., 2020)	İnce ayar yapılmış ResNet152	90,17
(Du vd., 2022)	Yeni yarı denetimli verimli karşılaştırmalı öğrenme	92,57
(Owais vd., 2019)	ESA (ResNet) + LSTM	92,57
Önerilen Yöntem	DenseNet201 – ÖE ESA	94,25

SONUÇ

GI hastalıklar insan sindirim sisteminde yaygındır ve halk sağlığı için önemli bir tehdit oluşturmaktadır. GI hastalıklarının erken dönemde taranması çok önemlidir ve endoskopi görüntüleri GI hastalık tespitinde önemli rol oynamaktadır. Endoskopi şu anda GI sisteminin incelenmesi için tercih edilen yöntemdir; bununla birlikte, etkinliği, modellerin performansındaki farklılıklar nedeniyle ciddi şekilde sınırlıdır. Endoskopi ile ilgili sorunlardan biri, zaman alıcı olması ve büyük miktarda görüntü verisinin analizinin tıp uzmanları tarafından uzun vadeli çaba gerektirmesidir. Ayrıca, bazı hastalık belirtileri görüntü kalitesi nedeniyle net bir şekilde görülemez, bu nedenle tıp uzmanları bile kritik hastalık alanlarını gözden kaçırabilmektedir. GI sistem hastalığının endoskopik görüntülerden otomatik olarak teşhis edilmesi, yani bir çerçevenin hastalık içerip içermediğinin sınıflandırılması, klinik uygulamada etkinliğin ve doğruluğun artırılması açısından büyük önem taşımaktadır. Bu doğrultuda, son yıllarda derin öğrenme ve özellikle ESA tabanlı çalışmalar yapılmaya başlanmıştır. Bu çalışma, derin öğrenme tekniklerinin GI hastalıkları tespit etmeye yardımcı olma konusundaki büyük potansiyelini göstermeyi amaçlamaktadır. Bu amaç doğrultusunda, bu çalışmada önceden eğitilmiş mimarilerin ara katmanlarından elde edilen öznetelikleri birleştirerek sınıflandırma için yeni bir model önerilmiştir. Öznetelik Entegrasyonuna dayalı Evrişimsel Sinir Ağ (ÖE-ESA) olarak adlandırılan bu mimaride, endoskopik görüntüleri sınıflandırmak için önceden eğitilmiş ağ mimarilerinin yüksek ve düşük

seviyeli öznetelikleri birleştirilerek nihai öznetelik haritası elde edilmektedir. Önerilen yöntemin etkinliğini analiz etmek için Kvasirv2 veri seti üzerinde deneysel çalışmalar gerçekleştirilmiştir. Önerilen DenseNet201-ÖE ESA modeli, bu veri setinde, değerlendirme için kullanılan mevcut yöntemlerden daha başarılı olan %94.25' lik bir doğruluk oranına ulaşmıştır. Bu sonuçlar göz önüne alındığında, önerilen DenseNet201-ÖE ESA modeli, çeşitli GI hastalıklarının klinik teşhisine yardımcı olma potansiyeline sahiptir. Aynı zamanda, bu çalışmanın sonuçları, evrişimli sinir ağlarına ve entegre çerçevemize dayalı bilgisayar görme modellerinin, GI hastalıkları tespit etmek için tıp alanında pratik olarak uygulanabileceğini doğrulamaktadır. Gelecek çalışmalarda, (i) GI hastalıkların sınıflandırmasında doğruluğu arttırmak için yeni derin ESA modellerinin tasarlanması ve (ii) modelin performansını arttırmak ve hastalık yerinin tespiti için derin öğrenmede segmentasyon modellerinin kullanılması planlanmaktadır.

KAYNAKLAR

- Agrawa, T., Gupta, R., Sahu, S., & Wilson, C. E. (2017). SCL-UMD at the medico task-mediaeval 2017: Transfer learning based classification of medical images. *CEUR Workshop Proceedings, 1984*, 3–5.
- Borgli, H., Thambawita, V., Smedsrud, P. H., Hicks, S., Jha, D., Eskeland, S. L., ... de Lange, T. (2020). HyperKvasir, a comprehensive multi-class image and video dataset for gastrointestinal endoscopy. *Scientific Data*, 7(1), 1–14. <https://doi.org/10.1038/s41597-020-00622-y>
- Du, W., Rao, N., Wang, Y., Hu, D., & Yong, J. (2020). Efficient Transfer Learning Used in the Classification of Gastroscopic Images with Small Dataset. *2020 17th International Computer Conference on Wavelet Active Media Technology and Information Processing, ICCWAMTIP 2020*, 73–76. <https://doi.org/10.1109/ICCWAMTIP51612.2020.9317450>
- Du, W., Rao, N., Yong, J., Wang, Y., Hu, D., Gan, T., ... Zeng, B. (2022). Improving the Classification Performance of Esophageal Disease on Small Dataset by Semi-supervised Efficient Contrastive Learning. *Journal of Medical Systems*, 46(1). <https://doi.org/10.1007/s10916-021-01782-z>
- Gunasekaran, H., Ramalakshmi, K., & Swaminathan, D. K. (2023). GIT-Net : An Ensemble Deep Learning-Based GI Tract Classification of Endoscopic Images. *Bioengineering*, 10(809).
- Ha, Y., Du, Z., & Tian, J. (2022). Fine-grained interactive attention learning for semi-supervised white blood cell classification. *Biomedical Signal Processing and Control*, 75(September 2021), 103611. <https://doi.org/10.1016/j.bspc.2022.103611>
- Haile, M. B., Salau, A. O., Enyew, B., Belay, A. J., & Jin, Z. (2022). Detection and classification of gastrointestinal disease using convolutional neural network and SVM Detection and classification of gastrointestinal disease using convolutional neural network and. *Cogent Engineering*, 9(1). <https://doi.org/10.1080/23311916.2022.2084878>
- Iqbal, I., Walayat, K., Kakar, M. U., & Ma, J. (2022). Automated identification of human gastrointestinal tract abnormalities based on deep convolutional neural network with endoscopic images. *Intelligent Systems with Applications*, 16(November), 200149. <https://doi.org/10.1016/j.iswa.2022.200149>
- Kahsaygebressie, A., Yaacobgirmaygezahegn, Hagos, M. T., Achimibenthal, & Pooja. (2019). Automated Gastrointestinal Disease Recognition for Endoscopic Images. *Proceedings - 2019 International Conference on Computing, Communication, and Intelligent Systems, ICCIS 2019, 2019-Janua*, 312–316. <https://doi.org/10.1109/ICCIS48478.2019.8974458>
- Kaminski, M. F., Regula, J., Kraszewska, E., Polkowski, M., Wojciechowska, U., Didkowska, J., ... Butruk, E. (2010). Quality indicators for colonoscopy and the risk of interval cancer. *The New England Journal of Medicine*, 362(19), 1795–1803. <https://doi.org/10.1056/NEJMoa0907667>
- Khan, M. A., Sarfraz, M. S., Alhaisoni, M., Albeshier, A. A., Wang, S., & Ashraf, I. (2020). StomachNet: Optimal deep learning features fusion for stomach abnormalities classification. *IEEE Access*, 8, 197969–197981. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3034217>
- Lin, T., Doll, P., Girshick, R., He, K., Hariharan, B., Belongie, S., & Ai, F. (2017). Feature Pyramid Networks for Object Detection.
- Liu, Y., Gu, Z., & Cheung, W. K. (2017). HKBU at mediaeval 2017 medico: Medical multimedia task. *CEUR Workshop Proceedings, 1984*, 1–3.
- Lonseko, Z. M., Adjei, P. E., Du, W., Luo, C., Hu, D., Zhu, L., ... Rao, N. (2021). Gastrointestinal disease

- classification in endoscopic images using attention-guided convolutional neural networks. *Applied Sciences (Switzerland)*, 11(23). <https://doi.org/10.3390/app112311136>
- Majid, A., Khan, M. A., Yasmin, M., Rehman, A., Yousafzai, A., & Tariq, U. (2020). Classification of stomach infections: A paradigm of convolutional neural network along with classical features fusion and selection. *Microscopy Research and Technique*, 83(5), 562–576. <https://doi.org/10.1002/jemt.23447>
- Mohapatra, S., Kumar Pati, G., Mishra, M., & Swarnkar, T. (2023). Gastrointestinal abnormality detection and classification using empirical wavelet transform and deep convolutional neural network from endoscopic images. *Ain Shams Engineering Journal*, 14(4), 101942. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2022.101942>
- Naz, J., Sharif, M., Yasmin, M., Raza, M., & Khan, M. A. (2021). Detection and Classification of Gastrointestinal Diseases using Machine Learning. *Current Medical Imaging*, 17(4), 479–490. <https://doi.org/10.2174/1573405616666200928144626>
- Owais, M., Arsalan, M., Choi, J., Mahmood, T., & Park, K. R. (2019). Artificial intelligence-based classification of multiple gastrointestinal diseases using endoscopy videos for clinical diagnosis. *Journal of Clinical Medicine*, 8(7). <https://doi.org/10.3390/jcm8070986>
- Pogorelov, K., Randel, K. R., Griwodz, C., Eskeland, S. L., De Lange, T., Johansen, D., ... Halvorsen, P. (2017). Kvasir: A multi-class image dataset for computer aided gastrointestinal disease detection. *Proceedings of the 8th ACM Multimedia Systems Conference, MMSys 2017*, 164–169. <https://doi.org/10.1145/3083187.3083212>
- Poudel, S., Kim, Y. J., Vo, D. M., & Lee, S. W. (2020). Colorectal Disease Classification Using Efficiently Scaled Dilation in Convolutional Neural Network. *IEEE Access*, 8, 99227–99238. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2996770>
- Pozdeev, A. A., Obukhova, N. A., & Motyko, A. A. (2019). Automatic Analysis of Endoscopic Images for Polyps Detection and Segmentation. In *2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus)* (pp. 1216–1220). <https://doi.org/10.1109/EIConRus.2019.8657018>
- Ronneberger, O., Fischer, P., & Brox, T. (2015). U-Net: Convolutional Networks for Biomedical Image Segmentation. In N. Navab, J. Hornegger, W. M. Wells, & A. F. Frangi (Eds.), *Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention -- MICCAI 2015* (pp. 234–241). Cham: Springer International Publishing.
- Shahin, A. I., Guo, Y., Amin, K. M., & Sharawi, A. A. (2019). White blood cells identification system based on convolutional deep neural learning networks. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, 168, 69–80. <https://doi.org/10.1016/j.cmpb.2017.11.015>
- Soffer, S., Klang, E., Shimon, O., Nachmias, N., Eliakim, R., Ben-Horin, S., ... Barash, Y. (2020). Deep learning for wireless capsule endoscopy: a systematic review and meta-analysis. *Gastrointestinal Endoscopy*, 92(4), 831-839.e8. <https://doi.org/10.1016/j.gie.2020.04.039>
- Su, Q., Wang, F., Chen, D., Chen, G., Li, C., & Wei, L. (2022). Deep convolutional neural networks with ensemble learning and transfer learning for automated detection of gastrointestinal diseases. *Computers in Biology and Medicine*, 150(July), 106054. <https://doi.org/10.1016/j.compbimed.2022.106054>
- Ucan, M., Kaya, B., & Kaya, M. (2022). Multi-Class Gastrointestinal Images Classification Using EfficientNet-B0 CNN Model. *2022 International Conference on Data Analytics for Business and Industry, ICDABI 2022*, 146–150. <https://doi.org/10.1109/ICDABI56818.2022.10041447>
- Xing, X., Yuan, Y., & Meng, M. Q. H. (2020). Zoom in Lesions for Better Diagnosis: Attention Guided Deformation Network for WCE Image Classification. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 39(12), 4047–4059. <https://doi.org/10.1109/TMI.2020.3010102>



Kahramanmaraş Sütçü İmam University

Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 24.09.2023
Kabul Tarihi : 12.10.2023

Received Date : 24.09.2023
Accepted Date : 12.10.2023

THE APPLICATION OF THE TAGUCHI METHOD FOR OPTIMIZING THE COMPRESSION STRENGTH OF PLA SAMPLES PRODUCED USING FDM

FDM KULLANILARAK ÜRETİLEN PLA NUMUNELERİNİN BASMA MUKAVEMETİNİ OPTİMİZE ETMEK İÇİN TAGUCHİ YÖNTEMİ UYGULAMASI

Oğuz TUNÇEL¹ (ORCID: 0000-0002-6886-6367)
Mehmet Said BAYRAKLILAR^{2*} (ORCID: 0000-0002-5365-4441)

¹ Siirt University, Engineering Faculty, Mechanical Engineering Department, Siirt, Türkiye

² Siirt University, Engineering Faculty, Civil Engineering Department, Siirt, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Oğuz TUNÇEL, oguz.tuncel@siirt.edu.tr

ABSTRACT

In this study, the Taguchi method was applied to optimize the compressive strength of PLA samples produced using Fused Deposition Modelling (FDM). The study used Taguchi L9 experimental design to optimize three different process parameters (wall thickness, filling pattern, and printing speed). S/N ratios and ANOVA methods were used to analyze the experiments. The results of the experiments using the Taguchi technique were analyzed according to S/N ratios and the parameter levels with the best results were determined. The best levels for wall thickness, filling pattern, and print speed parameters were determined and the effects of these parameters were analyzed. It was concluded that wall thickness was the most effective parameter and filling pattern and print speed were less effective. ANOVA analysis confirmed the influence of the parameters on the compressive strength. It was observed that wall thickness contributed the most (70.20%) and filling pattern contributed the second most (29.11%).

Keywords: Fdm, pla, compression strength, taguchi, anova

ÖZET

Bu çalışmada, Eriyik yığıma modelleme (EYM) kullanarak üretilen PLA numunelerinin basma mukavemetini optimize etmek amacıyla Taguchi yöntemi uygulanmıştır. Çalışma, üç farklı işlem parametresini (duvar kalınlığı, dolgu deseni ve baskı hızı) optimize etmek için Taguchi L9 deney tasarımını kullanmıştır. Deneylerin analizi için S/N oranları ve ANOVA yöntemleri kullanılmıştır. Taguchi tekniği kullanılarak yapılan deneylerin sonuçları, S/N oranlarına göre analiz edilmiş ve en iyi sonuçlar elde edilen parametre seviyeleri belirlenmiştir. Duvar kalınlığı, dolgu deseni ve yazdırma hızı parametreleri için en iyi seviyeler belirlenmiş ve bu parametrelerin etkileri incelenmiştir. Duvar kalınlığının en etkili parametre olduğu ve dolgu deseni ile baskı hızının ise daha az etkili olduğu sonucuna varılmıştır. ANOVA analizi, parametrelerin basma mukavemeti üzerindeki etkisini doğrulamıştır. Duvar kalınlığının en fazla katkı sağladığı (%70.20) ve dolgu deseninin ikinci yüksek katkı sağladığı (%29.11) görülmüştür.

Anahtar kelimeler: Eym, pla, basma dayanımı, taguchi, anova

ToCite: TUNÇEL, O., & BAYRAKLILAR, M.S., (2024). THE APPLICATION OF THE TAGUCHI METHOD FOR OPTIMIZING THE COMPRESSION STRENGTH OF PLA SAMPLES PRODUCED USING FDM . *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 27(1), 133-141.

INTRODUCTION

Over the past twenty years, there has been a surging fascination with additive manufacturing (AM). Thanks to the swift progress of technology, AM has presented numerous prospects like heightened manufacturing velocity, the capacity to craft intricate structural designs, and diminished resource wastage (Kafshgar et al., 2021). AM, also known as 3D printing, involves the creation of components through a layer-by-layer production method using 3D model information. It is frequently the antithesis of subtractive manufacturing, where material is removed to shape objects (Hikmat et al., 2021). Numerous commercial additive manufacturing systems are currently available, including fused deposition modeling (FDM), direct metal deposition (DMD), 3D printing, selective laser sintering (SLS), inkjet modeling (IJM), and stereolithography (SLA). These systems vary in their layering techniques and the range of materials suitable for safe production (Mohamed et al., 2015)

FDM stands as a prominent illustration of additive manufacturing technology due to its capability to effortlessly produce intricate thermoplastic components within office settings. Stratasys Inc., located in the United States, pioneered FDM during the 1990s (Bakar et al., 2010). In recent times, the convenience of operation, affordability of machinery, and the robustness of components have contributed significantly to the advancement of FDM has the capability to fabricate prototypes using materials like acrylonitrile butadiene styrene (ABS) or polylactic acid (PLA) and similar plastics. In the FDM process, a heated, molten filament material is extruded after reaching its melting point, with the extrusion head maneuverable both horizontally and vertically via a numerically controlled mechanism. The nozzle adheres to a computer-aided manufacturing (CAM) software-controlled tool path, constructing the part layer by layer, starting from the bottom and working upward (Liu et al., 2017; Torres et al., 2015; Mohan et al., 2017). The capability of additive manufacturing technologies to allow the production of complex designs and thus to produce lightweight parts with several features and high specific strengths at the same time, has made their use widespread, especially in the aerospace industry, where the reduction of fuel consumption and emission characteristics is important (Başçı & Yamanoglu, 2021).

Studies on the compressive strength of PLA materials with FDM technology and optimization techniques are listed below. The study by Sai et al. (Sai et al., 2020) concluded that the combined ANFIS-WOA methodology accurately determines the optimal FDM process parameters for PLA biomedical implant parts. This approach addresses critical concerns in additive manufacturing for customized biomedical applications by maximizing compressive strength while effectively minimizing surface roughness and build time. The study conducted by Sood et al. (Sood et al., 2012) elucidated that the optimization of process variables, such as layer thickness, part orientation during formation, scanning angle, scanning width, and air gap, has a substantial impact on the enhancement of compressive stress resistance in the domain of FDM manufacturing. They developed a validated prediction equation and used quantum behavior particle swarm optimization (QPSO) to determine the optimal parameter settings. In addition, artificial neural networks (ANN) were used to predict the compressive stress, and the complex non-linear relationship between process parameters and results was demonstrated. Darbar and Patel's study (Darbar & Patel, 2017) concluded that in FDM for rapid prototyping, the quality of prototypes is significantly influenced by key process parameters, specifically layer thickness, part build orientation, and raster width. They utilized Taguchi's method, ANOVA, and Artificial Neural Networks (ANN) to assess these parameters. The research confirmed that increasing layer thickness and decreasing part build orientation led to improved mechanical properties and surface quality. They attributed the weakness in FDM parts' strength to potential distortion within or between layers caused by temperature gradients during the printing process. Lee et al.'s research (Lee et al., 2007) highlighted the significance of material property measurements in predicting the mechanical behavior of Rapid Prototyping (RP) parts. They characterized each RP process, including FDM, 3D printing, and the nanocomposite deposition system (NCDS), based on specific process parameters. Their study involved fabricating specimens to assess compressive strengths, revealing anisotropic properties in most cases. Dixit and Jain's study (Dixit & Jain, 2022) concluded that in the context of Fused Filament Fabrication (FFF) for lattice structure fabrication, optimizing process parameters is crucial for enhancing compressive strength. They employed the Taguchi method and examined two different materials (TPU and PLA). Their research revealed that a layer thickness of 0.1 mm, infill density of 100%, and a printing speed of 40 mm/s represented the optimal parameter combination for maximizing compressive strength. Hsueh et al. (Hsueh et al., 2021) concluded that PLA and PETG materials in FDM exhibit distinct mechanical behavior under different loading conditions, temperatures, and speeds. Higher printing temperatures generally enhance mechanical properties (tension, compression, bending) for both materials, though speed impacts vary. While PLA generally exhibits superior mechanical properties compared to PETG, PETG fares better in terms of thermal deformation.

In the literature review, the insufficiency of studies especially related to the wall thickness parameter drew attention. The focus of this research revolves around the optimization of process variables to achieve the highest compressive strength for cylindrical components produced in accordance with the ASTM D695-15 standard. The Taguchi orthogonal array technique has been employed for experiment design, while the analysis of experiment accuracy is conducted through Signal-to-Noise (S/N) ratio and Analysis of Variance (ANOVA). Three distinct process variables have been chosen for this study, namely wall thickness, filling pattern, and printing speed.

MATERIAL & METHOD

In this research, we utilized Creality's CR-PLA filament in a vibrant red hue as our testing material. The filament's diameter measured 1.75 mm. Printing procedures were executed using the Creality Ender-3 S1 Pro 3D printer, which operates on the Fused Deposition Modeling (FDM) technology. This 3D printer boasts a printing volume of 220 x 220 x 270 mm. The printer is equipped with a maximum nozzle temperature of 300 °C, and a maximum bed temperature of 110 °C, and can achieve a maximum printing speed of 150 mm/s. The printing operations were conducted using a 0.4 mm diameter nozzle.

The Taguchi method was the chosen approach for optimizing parameters in this investigation. Following Taguchi's L9 design, we established three variable parameters, each with three different levels. These selected parameters encompass wall thickness, filling pattern, and printing speed, with a comprehensive breakdown of their values provided in Table 1. Additionally, Table 2 outlines the parameters that remained consistent throughout the experimental procedures.

Table 1. Printing Parameters and Levels

Factors	Unit	DoF	Level 1	Level 2	Level 3
Wall Thickness	mm	2	0.4	0.8	1.2
Filling Pattern	---	2	Cubic	Gyroid	Zig Zag
Print Speed	mm/s	2	25	50	75
Total DoF	---	6	---	---	---

Table 2. Constant Experimental Parameters

Layer Height (mm)	0.2
Top/Bottom Thickness (mm)	0.4
Infill Density (%)	30
Printing Temperature (°C)	210
Built Plate Temperature (°C)	60
Fan Speed (%)	100

Minitab 20.3 software was used in the experimental design and application of the Taguchi method. The L9 experimental design with three parameters and three levels is shown in Table 3. Taguchi analyses and variance (ANOVA) analyses were performed in Minitab 20.3. Taguchi analyses were performed using equation 1 according to the larger is better principle (Demir & Yüksel, 2023).

Table 3. Taguchi L9 Orthogonal Experiment Design

Experiment Number	Wall Thickness (mm)	Filling Pattern	Print Speed (mm/s)
1	0.4	Cubic	25
2	0.4	Gyroid	50
3	0.4	Zig Zag	75
4	0.8	Cubic	50
5	0.8	Gyroid	75
6	0.8	Zig Zag	25
7	1.2	Cubic	75
8	1.2	Gyroid	25
9	1.2	Zig Zag	50

$$\frac{S}{N_{max}} = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \right) \quad (1)$$

It was designed in the Solidworks 2020 drawing programme with compression specimens in accordance with ASTM D695-15 standard (Nathaphan & Trutassanawin, 2021). The cylindrical specimens produced according to this standard have a diameter of 12.7 mm and a length of 25.4 mm. The designed specimens were transferred to the Ultimaker Cura 5.4.0 slicing programme. This programme helps us to set the printing parameters precisely. Three samples were printed for each experimental group. UTEST brand tensile-compression device was used in compression tests. The experiments were carried out at room temperature with a constant feed rate of 5 mm/min. The experimental results were calculated as the average of three specimens for each group and standard deviations were also considered. Printing specimens and specimens applied compression test in the compression device are shown in Figure 1.

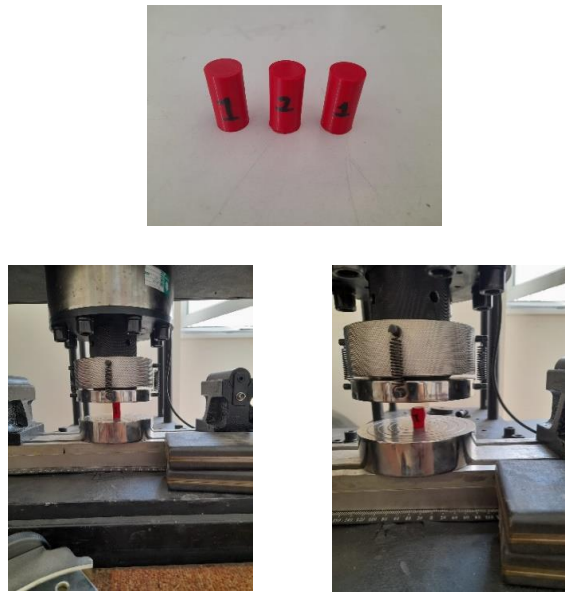


Figure 1. Compression Specimens Used in the Experiments

RESULTS & DISCUSSION

The compressive strengths and standard deviations obtained following the compression test are given in Table 4. Compressive strengths were determined by averaging three specimens. Signal to noise ratios (S/N) calculated according to Taguchi analysis are also given in Table 4. When Table 4 is analyzed, it is seen that the lowest compressive strength is 11.4 MPa in sample 1 and the highest compressive strength is 34.5 MPa in sample 9. The compressive strength of sample 9 with the highest compressive strength is 202.6% higher than that of sample 1 with the lowest compressive strength. Such a high rate of change in compressive strength with parameter variation shows that the variation of the selected parameters has a very effective role in compressive strength.

Table 4. Compression Strength Values with the Calculated S/N Ratios

No	Compression Strength (MPa)	Standard Deviation	S/N Ratio
1	11.4	0.21	21.12
2	13.6	0.51	22.67
3	20.0	0.39	26.02
4	21.5	0.12	26.63
5	20.5	0.44	26.23
6	28.6	0.44	29.13
7	26.2	0.16	28.36
8	26.2	0.59	28.36
9	34.5	0.48	30.76

According to the S/N ratios, the response table created according to the larger is better principle is shown in Table 5. In the table, the largest values selected within three levels for each parameter give the optimum parameter levels. In this case, level 3 is the optimum parameter for all parameters. The values given with delta in the table give the importance of the parameters. Parameters with higher delta values were more effective. The values shown with rank give the order of importance of the parameters. In this direction, it is seen that the most effective parameter is wall thickness. The order of importance of the parameters is as follows: wall thickness, filling pattern, and print speed. The variation of S/N ratios with parameters and levels is also displayed in Figure 2.

Table 5. Table of Results Showing the S/N Ratios for Compressive Strength (Larger Is Better)

Level	Wall Thickness	Filling Pattern	Print Speed
1	23.27	25.37	26.20
2	27.33	25.75	26.69
3	29.16*	28.64*	26.87*
Delta	5.89	3.27	0.67
Rank	1	2	3

*Optimum level

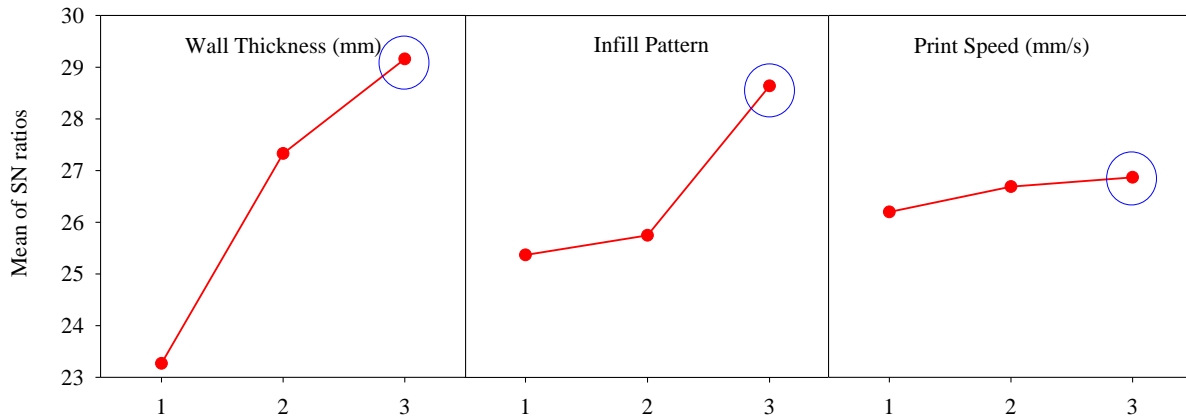


Figure 2. S/N Ratio Graph of Parameters for Compression Strength

Analysis of variance (ANOVA) was performed to understand the effect of the parameters on the compressive strength, which is the output of the experiment. ANOVA analyses were performed at a 95% confidence interval. Table 6 shows the results of the ANOVA analysis. When the P-Value is less than 0.05, it means that the parameters are effective. According to the contribution rates in Table 6, the most effective parameter was wall thickness with 70.20% and the second effective parameter was filling pattern with 29.11%. The contribution of print speed was very low only 0.53%. The residual error is 0.16%. The fact that the residual error is so low shows the reliability of the results. In addition, the pie chart in Figure 3 is also given for a better understanding of the contribution of the parameters on the compressive strength.

Table 6. ANOVA Findings for Compression Strength S/N Ratios

Source	(DoF)	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value	Contribution (%)
Wall Thickness	2	296.996	148.498	429.290	0.002	70.20
Filling Pattern	2	123.153	61.576	178.010	0.006	29.11
Print Speed	2	2.262	1.131	3.270	0.234	0.53
Residual Error	2	0.692	0.346	---	---	0.16
Total	8	---	---	---	---	100

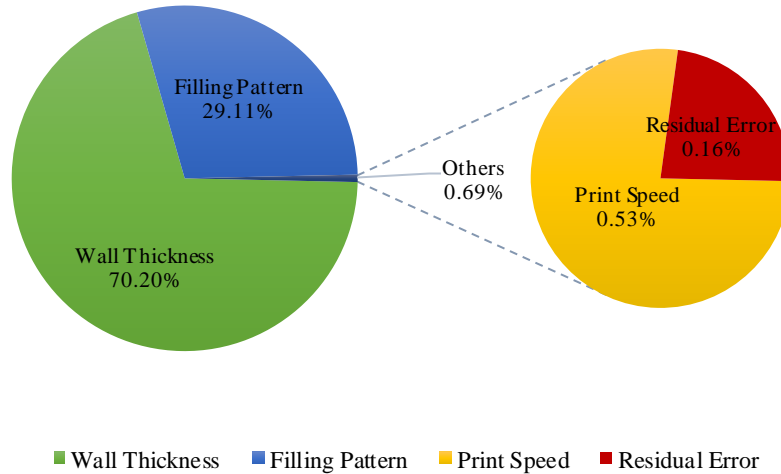


Figure 3. Effect of Parameters on Compression Strength as a Percentage

The optimum experiment was determined as wall thickness: 1.2 mm, filling pattern: Zig Zag, and printing speed: 75 mm/s. The prediction obtained using the Taguchi technique was made by the Minitab program, which provides this effect (Table 7). The estimated compressive pressure remains constant at 33.91 MPa. Samples were produced according to the optimum effect and their compressive strength was also tested. According to the experimental value, the compression limit is 34.74 MPa. This value differed from the predicted value by 2.45%. The compressive strength value of 34.74 MPa tested according to the optimum effect is 0.7% higher than the 34.5 MPa tested in sample number 9 in previous tests.

Table 7. Optimal Outcomes and Validation Experiment Findings.

Optimum Level:	Predicted Value (MPa)	Experimental Result (MPa)
Wall Thickness 3	33.91	34.74
Filling Pattern 3		
Print Speed 3		
Prediction Error (%)	2.45	

Table 8 shows the regression equations created for the prediction of compressive strength. While wall thickness and print speed are continuous predictors, filling pattern is a categorical predictor. For this reason, three different linear regression equations were created with the change of the filling pattern. The purpose of creating these equations is to provide the opportunity to make predictions for intermediate values without experimenting. The R² value of the equations is a very high value of 98.17%. This shows that the predictive ability of the equations is very high.

Table 8. Equations for Prediction of Compression Strength

	Compression Strength (MPa)
Cubic	Compression Strength = 5.56 + 17.43*wall thickness + 0.0033*print speed
Gyroid	Compression Strength = 5.99 + 17.43*wall thickness + 0.0033*print speed
Zig Zag	Compression Strength = 13.60 + 17.43*wall thickness + 0.0033*print speed
R-sq= 98.17%	

The linear regression equation showing the relationship between the predicted compressive strengths (Table 8) and the compressive strength values obtained from the tests are shown in Table 4. In Figure 4, CI indicates confidence interval and PI indicates predict interval. The R² value of the equation is very high as 98.2%. This shows that the predicted values and experimental values are consistent.

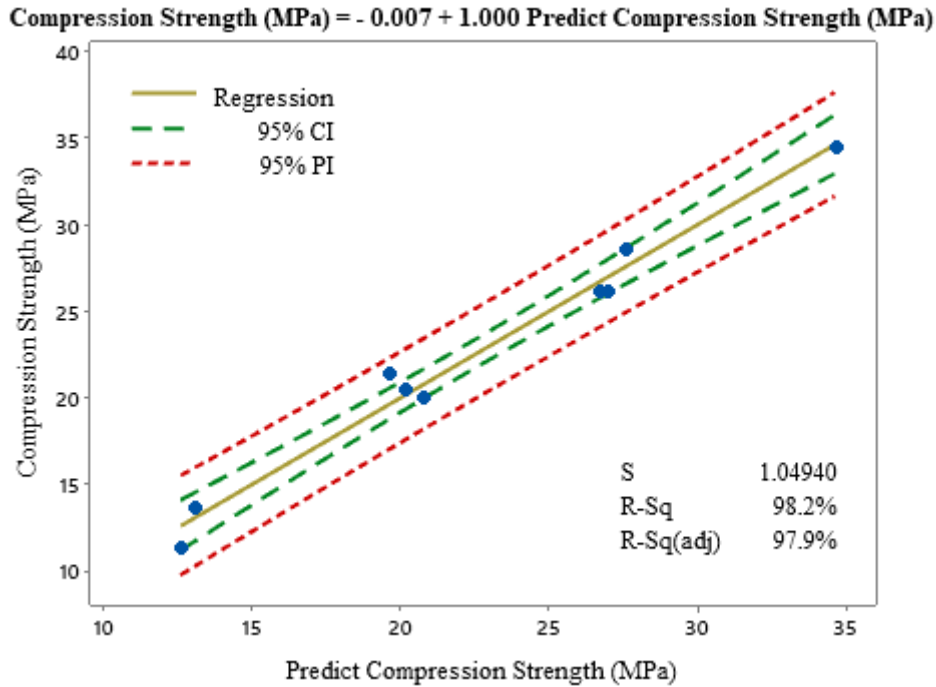


Figure 4. Linear Regression Model Compared with Experimental Results for Compression Strength

CONCLUSIONS

In summary, this study thoroughly investigated the influence of various parameters on compressive strength in 3D printing. The analysis revealed a substantial variation in compressive strength across samples, with the highest strength in sample 9 surpassing the lowest in sample 1 by a remarkable 202.6%. The Taguchi analysis and S/N ratios identified optimal parameter levels at level 3 for all factors, with wall thickness emerging as the most influential, followed by filling pattern and print speed.

ANOVA analysis confirmed the significance of these parameters, with wall thickness contributing the most (70.20%), followed by filling pattern (29.11%), while print speed had minimal impact (0.53%). The low residual error underscored the results' reliability. The Taguchi technique led to the determination of the optimum parameters: wall thickness (1.2 mm), filling pattern (Zig Zag), and printing speed (75 mm/s), resulting in a predicted compressive strength of 33.91 MPa. Experimental testing validated this prediction at 34.74 MPa, deviating by only 2.45%.

Highly accurate regression equations were developed ($R^2 = 98.17\%$), allowing predictions for various parameters without further experimentation. The strong correlation ($R^2 = 98.2\%$) between predicted and experimental values underscores the validity of our models. This research provides crucial insights into optimizing 3D printing processes for desired material strength.

REFERENCES

- Bakar, N. S. A., Alkahari, M. R., & Boejang, H. (2010). Analysis on fused deposition modelling performance. *Journal of Zhejiang University: Science A*, 11(12), 972–977. <https://doi.org/10.1631/jzus.A1001365>
- Demir, S., & Yüksel, C. (2023). Evaluation of effect and optimizing of process parameters for fused deposition modeling parts on tensile properties via Taguchi method. *Rapid Prototyping Journal*, 29(4), 720–730. <https://doi.org/10.1108/RPJ-06-2022-0201>
- Dixit, N., & Jain, P. K. (2022). Effect of Fused Filament Fabrication Process Parameters on Compressive Strength of Thermoplastic Polyurethane and Polylactic Acid Lattice Structures. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 31(7), 5973–5982. <https://doi.org/10.1007/s11665-022-06664-0>

- Hikmat, M., Rostam, S., & Ahmed, Y. M. (2021). Investigation of tensile property-based Taguchi method of PLA parts fabricated by FDM 3D printing technology. *Results in Engineering*, 11, 100264. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2021.100264>
- Hsueh, M. H., Lai, C. J., Wang, S. H., Zeng, Y. S., Hsieh, C. H., Pan, C. Y., & Huang, W. C. (2021). Effect of printing parameters on the thermal and mechanical properties of 3d-printed pla and petg, using fused deposition modeling. *Polymers*, 13(11). <https://doi.org/10.3390/polym13111758>
- Kafshgar, A. R., Rostami, S., Aliha, M. R. M., & Berto, F. (2021). Optimization of Properties for 3D Printed PLA Material Using Taguchi, ANOVA and Multi-Objective Methodologies. *Procedia Structural Integrity*, 34, 71–77. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2021.12.011>
- Lee, C. S., Kim, S. G., Kim, H. J., & Ahn, S. H. (2007). Measurement of anisotropic compressive strength of rapid prototyping parts. *Journal of Materials Processing Technology*, 187–188, 627–630. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2006.11.095>
- Liu, X., Zhang, M., Li, S., Si, L., Peng, J., & Hu, Y. (2017). Mechanical property parametric appraisal of fused deposition modeling parts based on the gray Taguchi method. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 89(5–8), 2387–2397. <https://doi.org/10.1007/s00170-016-9263-3>
- Mohamed, O. A., Masood, S. H., & Bhowmik, J. L. (2015). Optimization of fused deposition modeling process parameters: a review of current research and future prospects. *Advances in Manufacturing*, 3(1), 42–53. <https://doi.org/10.1007/s40436-014-0097-7>
- Mohan, N., Senthil, P., Vinodh, S., & Jayanth, N. (2017). A review on composite materials and process parameters optimisation for the fused deposition modelling process. *Virtual and Physical Prototyping*, 12(1), 47–59. <https://doi.org/10.1080/17452759.2016.1274490>
- Nathaphan, S., & Trutassanawin, W. (2021). Effects of process parameters on compressive property of FDM with ABS. *Rapid Prototyping Journal*, 27(5), 905–917. <https://doi.org/10.1108/RPJ-12-2019-0309>
- Darbar, R., & Patel, P.M. (2017). Optimization of Fused Deposition Modeling Process Parameter for Better Mechanical Strength and Surface Roughness. *International Journal of Mechanical Engineering (IJME)*, 6(6), 7–18.
- Sai, T., Pathak, V. K., & Srivastava, A. K. (2020). Modeling and optimization of fused deposition modeling (FDM) process through printing PLA implants using adaptive neuro-fuzzy inference system (ANFIS) model and whale optimization algorithm. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 42(12), 1–19. <https://doi.org/10.1007/s40430-020-02699-3>
- Sood, A. K., Ohdar, R. K., & Mahapatra, S. S. (2012). Experimental investigation and empirical modelling of FDM process for compressive strength improvement. *Journal of Advanced Research*, 3(1), 81–90. <https://doi.org/10.1016/j.jare.2011.05.001>
- Torres, J., Coteló, J., Karl, J., & Gordon, A. P. (2015). Mechanical property optimization of FDM PLA in shear with multiple objectives. *Jom*, 67(5), 1183–1193. <https://doi.org/10.1007/s11837-015-1367-y>



Kahramanmaraş Sütçü İmam University

Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 26.09.2023
Kabul Tarihi : 06.11.2023

Received Date : 26.09.2023
Accepted Date : 06.11.2023

EXPERIMENTAL AND ANALYTICAL INVESTIGATION OF THE EFFECT OF LAYER NUMBER AND THICKNESS ON THE BENDING PROPERTIES OF GLULAM BEAMS

TABAKA SAYISI VE KALINLIĞININ GLULAM KİRİŞLERİN EĞİLME ÖZELLİKLERİ ÜZERİNE ETKİSİNİN DENEYSEL VE NÜMERİK OLARAK İNCELENMESİ

Yasemin ŞİMŞEK TÜRKER^{1*} (ORCID: 0000-0002-3080-0215)
Şemsettin KILINÇARSLAN¹ (ORCID: 0000-0001-8253-9357)

¹ Suleyman Demirel University, Department of Civil Engineering, Isparta, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Yasemin ŞİMŞEK TÜRKER, yaseminturker@sdu.edu.tr

ABSTRACT

Wooden material is used in structural elements due to its many positive properties. Recent years have witnessed a surge in research directed toward enhancing the mechanical properties of wooden beams through the utilization of materials like steel plates and fiber reinforced polymers (FRP). Layered laminated timber, a composite material crafted from wood, serves as a testament to this endeavor. These laminated timbers constitute intricate engineering elements, fashioned from layers of wood characterized by distinct levels of strength and hardness, systematically arranged as per established guidelines. The present study is geared toward a comprehensive examination of the bending characteristics exhibited by glued beams, fashioned from spruce trees, encompassing six distinct sizes and varying layer counts. The manufacturing process yields beams with diverse cross-sectional profiles, including 3-layer and 7-layer variants. By performing 4-point bending tests of the beams, maximum load carrying capacity, bending strength, and elasticity modulus values were obtained experimentally. In addition to the experimental analyses, numerical models of the produced beams were created using the finite element analysis program, and static analyses were performed. In the experimental results, it was observed that the bending properties of the beams increased as the number and size of layers increased. It was determined that the maximum load carrying capacity, bending strength, and elasticity modulus values obtained as a result of experimental and numerical analysis were very close to each other. Numerical analysis results showed that beams produced with various number of layers and thicknesses can be simulated. It has been determined that the results obtained by creating numerical models instead of experimental analyses for this type of wooden beam may be sufficient.

Keywords: Wood structure, FRP, reinforcement, glulam, finite element analysis

ÖZET

Ahşap malzeme, birçok olumlu özelliği sebebiyle yapısal elemanlarda kullanılmaktadır. Son yıllarda ahşap kirişlerin mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi için çelik levha ve fiber takviyeli polimerler (FRP) gibi malzemelerin kullanımı üzerine araştırmalar yapılmaktadır. Tabakalı lamine keresteler ahşap malzeden üretilmiş bir kompozit malzemedir. Tabakalı lamine keresteler, tabakaları belirli kurula göre konumlandırılmış, değişen mukavemet ve sertlikteki ahşap katmanlarından yapılmış karmaşık mühendislik bileşenleridir. Bu çalışmanın amacı, altı farklı boyuttaki ve çeşitli katman sayılarındaki ladin ağaçlarından yapılan tutkalı kirişlerin bükülme özelliklerinin araştırılmasıdır. Farklı kesitli kirişler 3 katlı ve 7 katlı olarak üretilmektedir. Kirişlerin 4 nokta eğilme testleri yapılarak maksimum yük taşıma kapasitesi, eğilme mukavemeti ve elastisite modülü değerleri deneysel olarak elde edilmiştir. Yapılan deneysel analizlerin yanısıra üretilen kirişlerin sonlu elemanlar analiz programı kullanılarak sayısal modelleri oluşturulmuş ve statik analizleri yapılmıştır. Deneysel sonuçlarda, tabaka sayısı ve boyutu arttıkça kirişlerin eğilme özelliklerinin

ToCite: ŞİMŞEK TÜRKER, Y., & KILINÇARSLAN, Ş., (2024). EXPERIMENTAL AND ANALYTICAL INVESTIGATION OF THE EFFECT OF LAYER NUMBER AND THICKNESS ON THE BENDING PROPERTIES OF GLULAM BEAMS. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 27(1), 141-150.

arttığı gözlemlenmiştir. Deneysel analiz ve nümerik analiz sonucunda elde edilen maksimum yük taşıma kapasitesi, eğilme dayanımı ve elastisite modülü değerlerinin birbirine çok yakın değerler verdiği belirlenmiştir. Sayısal analiz sonuçları, çeşitli katman sayısı ve kalınlıklarda üretilen kirişlerin simülasyonunun yapılabileceğini göstermiştir. Bu tip ahşap kirişler için deneysel analizler yerine nümerik modeller oluşturularak elde edilecek sonuçların yeterli olabileceği belirlenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Ahşap yapı, FRP, güçlendirme, glulam, sonlu eleman analizi

INTRODUCTION

Timber is a material with a variety of colors and fiber structures that has excellent thermal and acoustic insulation qualities (Sahin et al., 2011; Kılınçarslan and Şimşek Türker, 2020a; Sahin and Onay, 2020; Sahin et al., 2020). It has been used for centuries because of its superior durability compared to other building materials, high strength/weight ratio, aesthetic qualities, ease of processing, fiber structure, and excellent thermal and sound insulation (Kermani, 1999; Kılınçarslan and Şimşek Türker, 2020b). Additionally, it has a lot of advantageous environmental characteristics, such as low buried energy (Falk, 2010). Timber is a material used to make beams, columns, roof trusses, poles, and construction systems like piles, slab elements, and railroad bases, as well as to shape concrete because of these qualities (Kılınçarslan and Şimşek Türker, 2021). Modern timber structural materials are used to construct homes, light commercial buildings, and industrial structures today (Di et al., 2022; Li et al., 2022; Moody and TenWolde, 1999). The use of wood in residential, commercial, and industrial structures as well as scaffolding, bridges, retaining walls, and transmission towers is still prevalent today (Nunnally, 2007). Nowadays, wood-based composite materials are preferred to using wood directly. To meet the growing demand for high quality timber and to reduce the consumption of forest resources, structural composite timber has been developed. To obtain higher engineering design values than those provided by raw timber, structural composite timber is used in place of raw timber in the production of engineering wood products like prefabricated wooden I-beams and other various applications (Stark et al., 2010). For roofs with spans up to 100.0 m, structural systems based on flat and sloping glue laminates have been developed. For large-scale timber constructions, many other wood-based products are used, including laminated veneer lumber (LVL) and parallel strip lumber (PSL). Similar to how these products, like flat glued laminate timber elements, are appropriate for longer spans (Thelandersson et al., 2003). The use of glue laminated timber began in the late 1800s. It saw extensive use both during and following World War II. The use of glue laminated beams has increased for both new construction and bridges. The fact that structures cannot be built entirely out of sawn wood demonstrated the usefulness and effectiveness of glued laminated beams (Stalnakar et al., 1999). The use of wooden building components has increased in a variety of application fields, such as bridges, sports facilities, and industrial facilities, in addition to the size growth of wooden structures. The adhesion of the laminated elements to one another is the most significant factor affecting the load bearing capacity and general behavior of the timber laminated beams. Numerous studies have been conducted on this topic (Tran et al., 2015; Dietsch and Tannert, 2015; Sena-Cruz et al., 2013). Kılınçarslan and Şimşek Türker (2019) tested laminated wooden beams with the same height and width of h by dividing them into 3 different groups. The stiffness and flexural strengths were not significantly affected by variations in the laminate layer thicknesses ($h/4$, $h/6$, or $h/8$), but there were differences in the modulus of elasticity. Even though the beams with the thickest laminate layers had the lowest elastic modulus values, the samples with the thickest layer had roughly the same outcome. The beam with the medium laminate layer thickness had the highest elasticity modulus. In this situation, choosing samples with thicker laminate layers may be more advantageous. Because there are fewer layers, less glue needs to be used, which saves labor, time, and money. Beceren Öztürk and Arıoğlu (2006) used various types of glue to create laminated timber from scotch pine wood and conducted static bending tests. According to the findings of the study, laminated timbers can produce the best results if the wood material is brought to the desired equilibrium humidity and the right glue material is used. In general, they claimed that laminated timbers made with polyvinyl acetate glue and having a bending strength of 75.24 MPa produced the best results, while layered laminated timbers made with urea formaldehyde glue and having a bending strength of 55.80 MPa produced the worst results. Using a 2.5 mm thick peeling veneer, Güray et al. (2003) investigated the effects of glue type and force direction on bending resistance in laminated wood material made from stemmed oak (*Quercus Robur* L.) wood. To create laminates for this purpose, polyvinylacetate (PVAc) and polyurethane (PU) glues were preferred. Two force directions-parallel and perpendicular to the glue line were used in the experiment. Eighty test specimens in total were bent in directions perpendicular and parallel to the glue line. These specimens were bent in accordance with the TS 2474 standard. They discovered that samples adhered with polyurethane (PU) glue had the highest bending strength (121 MPa), while samples adhered with polyvinylacetate (PVAc) glue had the lowest bending strength (90.6 MPa). Kılınçarslan and Şimşek Türker (2022) strengthened 20x20x360 mm ash beams with basalt-based fiber-reinforced polymers. Bending test of the reference and reinforced

beams was carried out. It was determined that the beams reinforced with basalt-based fiber reinforced polymer fabric have flexural strength (117.11 MPa) and modulus of elasticity (12845 MPa). It was determined that the reference beams had flexural strength (99.34 MPa) and modulus of elasticity (10320 MPa). It was determined that the flexural strength value of the reinforced beam increased by 18% and the elasticity modulus value increased by 25% compared to the reference beam.

In recent years, considering many factors such as cost and time loss, it has been observed that experimental studies have gradually been replaced by numerical analyses. Literature studies, especially modeling studies of wooden beams are carried out with finite element software program. This study aims to experimentally and numerically investigate the bending properties of glued beams produced from spruce tree species in three different sizes and various numbers of layers. As a result of the study, the maximum load carrying capacity, bending strength, and elasticity modulus values obtained through experimental and numerical analysis were compared.

MATERIAL AND METHODS

Material

Glulam beams were provided by Nasreddin Forest Products (Naswood) in Antalya. By laminating spruce timbers with melamine formaldehyde glue and a balanced humidity of 11–12%, glulam beams are created. The GL 24h resistance class applies to the factory-made spruce glulam beams. The codes and properties of the beams tested in the study are given in Table 1.

Table 1. Codes and Properties of the Beams

Beam Code	Beams Width (mm)	Beams Height (mm)	Beams Length (mm)	Number of layers	Moisture Content (%)
S1212	120	120	3000	3	11.26
S1224	120	240	4500	7	11.10
S1414	140	140	3000	3	11.62
S1428	140	280	5300	7	11.21
S1616	160	160	3000	3	11.66
S1632	160	320	6000	7	11.45

Six different wooden beams were produced in 3 and 7 layers. S1212, S1414 and S1616 were produced as 3 layers, S1224, S1428 and S1632 as 7 layers. In Figure 1, the properties and layer thicknesses of the layers are given.

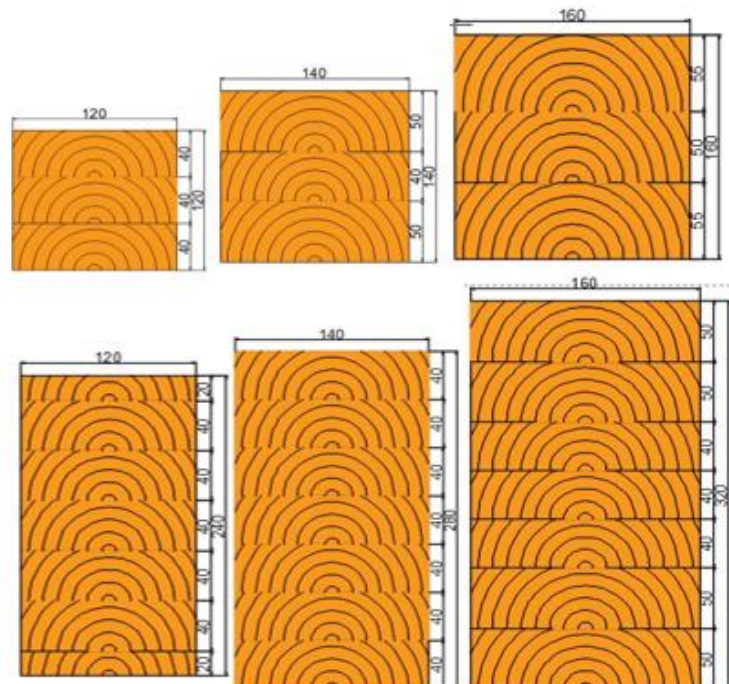


Figure 1. Properties and Layer Thicknesses of the Beam Layers

Table 2 lists the mechanical characteristics of glulam GL24 h in accordance with DIN 1052:2008 (Fosetti et al., 2015).

Table 2. According to DIN 1052:2008, Glulam GL24 h has the Following Mechanical Properties (MPa)

Properties	Glulam GL 24h
Bending	24
Tension parallel	16.5
Tension rectangular	0.5
Pressure parallel	24
Pressure rectangular	2.5-3
Shear and torsion	2.5
Modulus of elasticity parallel	11.600
Modulus of elasticity rectangular	390
Shear modulus	720

Experimental Test

In this study, 4 point bending tests of 6 different layered laminated timber were performed. Flexural tests were carried out at Suleyman Demirel University Civil Engineering Structure and Earthquake Laboratory. Based on GB/T 26899-2011, a static four-point load bending test (bending test Method A) was conducted with a loading speed of 8 mm/min. Each specimen had an LVDT (Linear Variable Differential Transformer) sensor installed in the middle, as shown in Figure 2.

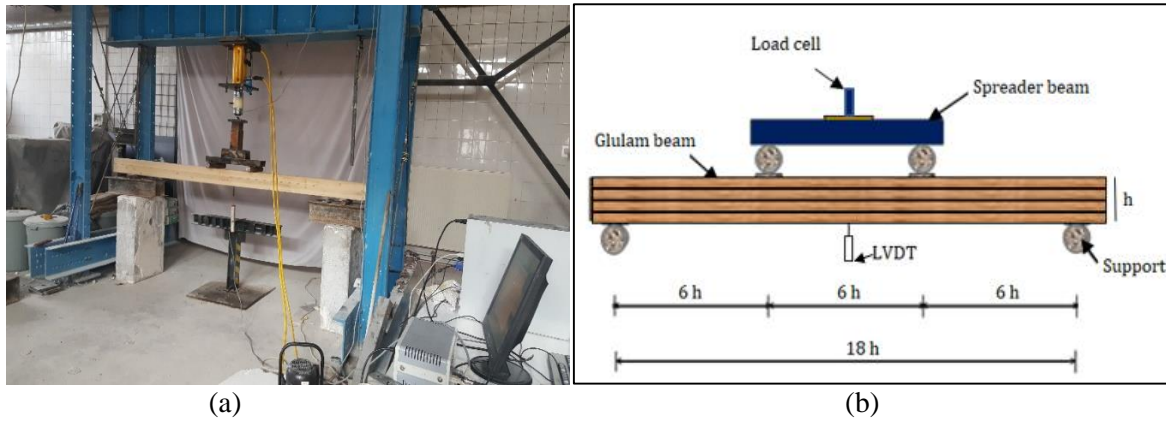


Figure 2. Experimental Setup Image (a) Experimental Setup Real Image, (b) Schematic View of the Experimental Setup

The following Equation is used to determine the modulus of elasticity (MOE) for bending and modulus of rupture (MOR) (Gao et al., 2015):

$$MOE = \frac{\Delta P (l-s)(2l^2 + 2ls - s^2)}{8\Delta y b h^3} \quad (1)$$

$$MOR = \frac{3P_{max}(l-s)}{2bh^2} \quad (2)$$

where Δy is the corresponding midspan deflection of ΔP , b is the specimen's width, h is the depth, P_{max} is the maximum load, l is the specimen's span between supports, s is the span between loading sites, and ΔP is the difference between the upper and lower loads at the proportional limit.

Finite Element Model

The software package ANSYS 2022 R1 Standard Solver is used for the numerical analysis. The model's geometry and loading configurations are chosen to match the experimentally tested beams. The end conditions, which limit the vertical movement of the beam, are modelled as pinned and roller supports. A 25mm rectangular mesh is used in the modelling process. The timber is modelled by using the SOLID45 element, which is used for the 3-D modelling of solid components (Hsissou et al., 2018). The solid element includes eight nodes with three degrees of freedom in the

x, y, and z directions. SOLID45 has plasticity, stress stiffening, large deflection, large strain nodes, and various other capabilities. However, precise modelling of the complicated anisotropic behaviour of timber is impractical. To simulate the wood's behaviour, the timber's elastic characteristics are specified in an orthogonal format in the software. Figure 3 depicts the attributes of the material employed in the simulation technique (DIN 1052:2008).

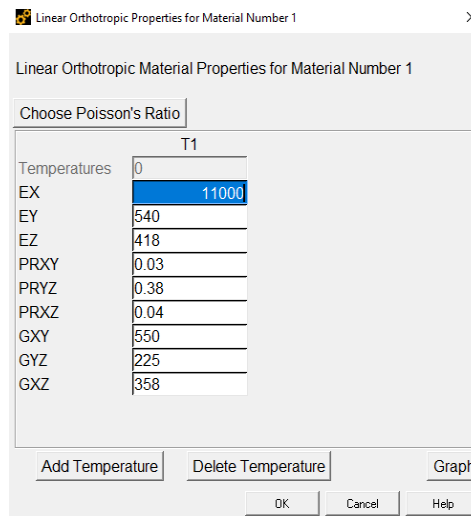


Figure 3. Linear Orthotropic Material Properties of Spruce Timber, in MPa

Since glulam beams' wood laminations are modelled as separate components, all material features can be considered. Because the previous research had demonstrated a perfect connection between laminations, the melamine formaldehyde adhesive layer was not modelled due to its extremely thin thickness. Note that, as a line load is applied across the beam's width, a series of vertical displacement increments are used to perform the static small displacement analysis until the predetermined failure condition is attained.

RESULTS AND DISCUSSION

Experimental and Numerical Analysis Results

First of all, load-displacement graphs were obtained as a result of the bending test. A total of 12 experiments were carried out, 2 replications of 6 different sizes of glulam beams. Numerical analysis results are given in Figure 4. The data obtained as a result of experimental and numerical analysis are given in Figure 6 and Table 3.

The highest load carrying capacity value belongs to the S1632 coded beam (Experimental: 124.99 kN, Numerical: 125.81 kN). The lowest load carrying capacity value belongs to the S1212 coded beam (Experimental: 27.15 kN, Numerical: 27.40 kN). The maximum load carrying capacity value of the S1632 coded beam is 104% higher than the S1616 coded beam. The maximum load carrying capacity value of the S1428 coded beam is 49.21% higher than the S1414 coded beam. The maximum load carrying capacity of the S1224 coded beam is 35% higher than the S1212 coded beam. The carrying capacity of the S1616 coded beam is 11% higher than the S1414 coded beam and 34% higher than the S1212 coded beam. The load bearing capacity value of the S1632 coded beam is 40% higher than the S1428 coded beam, and 50,34% higher than the S1224 coded beam.

Table 3. Experimental and Numerical Analysis Results

Beams Code	Experimental				Numerical Analysis			
	Max Load (kN)	Max Deflection (mm)	MOE (MPa)	MOR (MPa)	Max Load (kN)	Max Deflection (mm)	MOE (MPa)	MOR (MPa)
S1212	27.15	31.15	9806	36.15	27.40	31.35	9833	36.49
S1414	50.21	34.02	10826	41.17	51.20	34.62	10849	41.98
S1616	61.10	40.35	10944	46.14	61.46	40.52	10962	42.68
S1224	62.06	69.85	15987	46.46	62.73	70.15	16090	46.97
S1428	74.92	70.00	17639	49.15	76.22	70.25	16496	50.00
S1632	124.99	70.15	17763	58.36	125.81	70.28	17846	58.74

The highest amount of displacement was seen in the S1632 coded beam (70.15 mm). The lowest displacement amount was observed in the S1212 coded beam (31,15 mm). As a result of modeling with the ANSYS software program, it

was determined that it gave results in parallel with the experimental results. With the increase in section size, the load carrying capacity and displacement amounts also increased. Flexural strength and modulus of elasticity values are given in Figure 5.

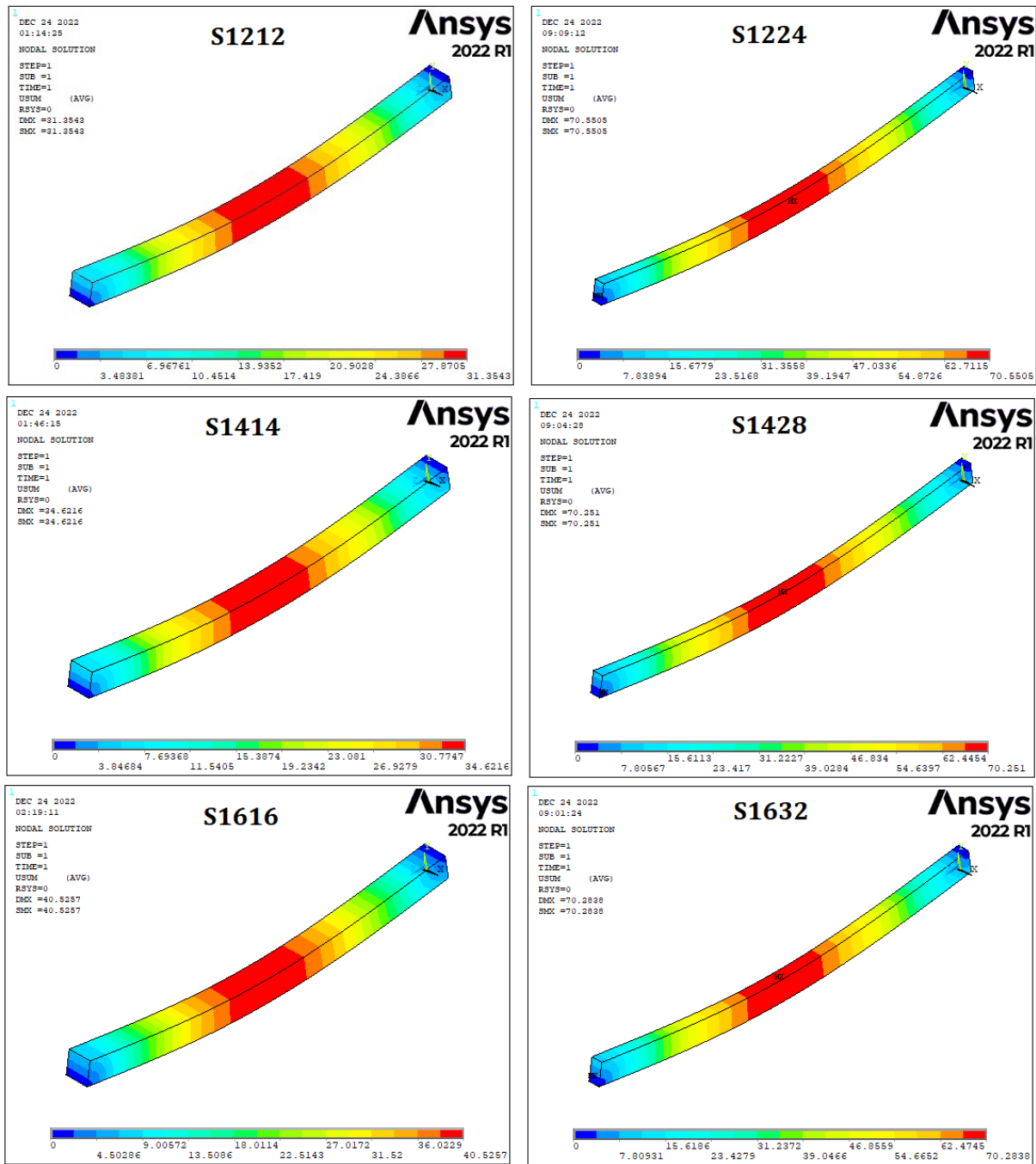


Figure 4. ANSYS Software Program Analysis Images

The highest flexural strength (Experimental: 58.36 MPa, Numerical: 58.74 MPa) and modulus of elasticity (Experimental: 17763 MPa, Numerical: 17846 MPa) belong to the S1632 coded beam. The lowest flexural strength (Experimental: 36.15 MPa, Numerical: 36.49 MPa) and elasticity modulus (Experimental: 9806, Numerical: 9833) values belong to the S1212 coded beam. The flexural strength value of the S1632 coded beam is approximately 20-27% higher than the S1616 coded beam. The flexural strength value of the S1428 coded beam is approximately 16% higher than the S1414 coded beam. The flexural strength value of the S1224 coded beam is approximately 22% higher than the S1212 coded beam. The modulus of elasticity value of the S1632 coded beam is approximately 23-38% higher than the S1616 coded beam. The modulus of elasticity value of the S1428 coded beam is approximately

34-38% higher than the S1414 coded beam. The modulus of elasticity of the S1224 coded beam is approximately 34% higher than the S1212 coded beam.

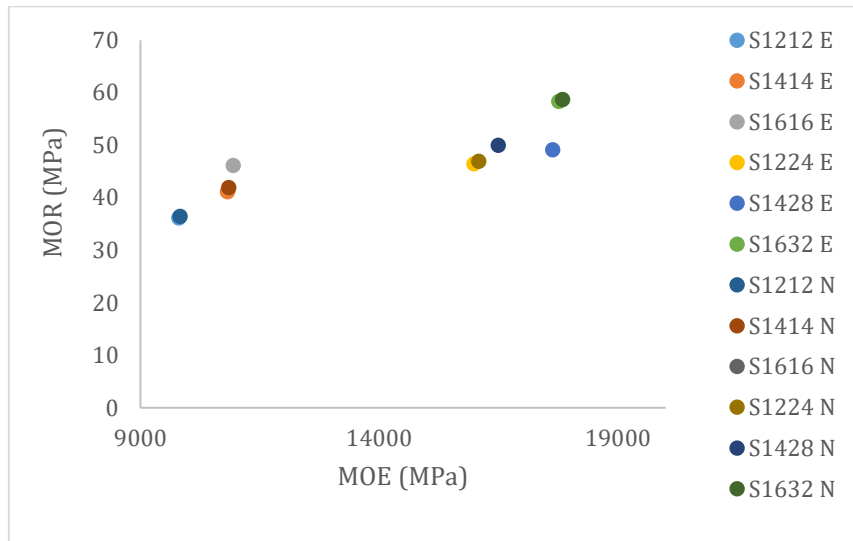


Figure 5. MOE and MOR Experimental (E) and Numerical (N) Results

The modulus of elasticity (Experimental: $R^2=0,89$, Numerical: $R^2=0,90$) and modulus of rupture (Experimental: $R^2=0,92$, Numerical: $R^2=0,96$) values obtained as a result of numerical and experimental analysis gave close results, as shown in Figure 6.

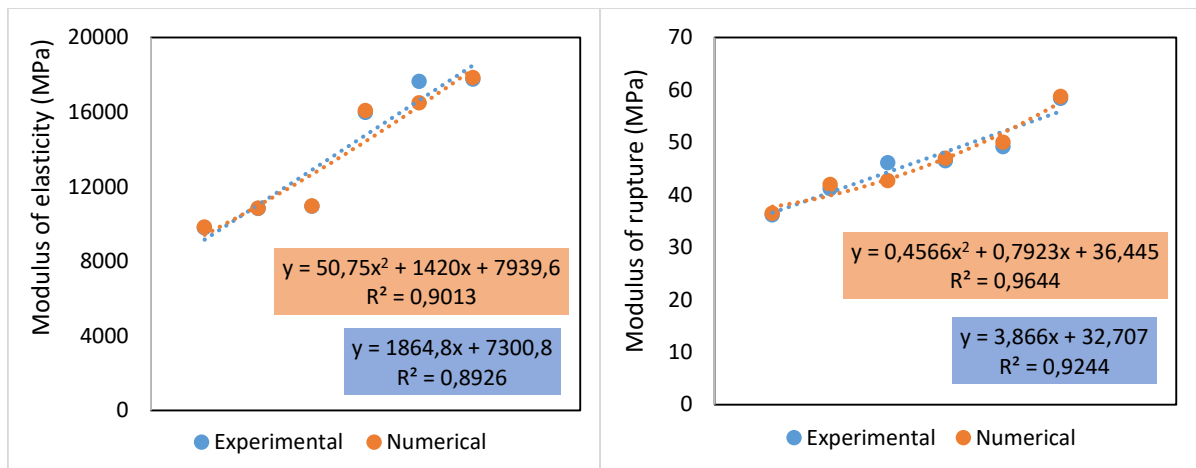


Figure 6. Numerical Analysis and Experimental Analysis Results

Failure Modes

During the initial phase of loading, the specimens underwent elastic deformation. As the load increased, plastic deformation occurred in the specimens. At this point, the specimens started to exhibit numerous minor compression wrinkles. The bending rigidity of the specimen decreased marginally, and the deformations increased significantly. The bottom laminates eventually experienced their maximum tensile stresses. Figure 7 shows three typical failure modes noticed in final displacement.

Ohuchi et al., (2009) and Ouchi et al., (2013) reached a conclusion in terms of experimental research based on bending tests of hinoki (*Chamaecyparis obtusa*) and sugi finger-jointed laminae. In these studies, block specimens that assumed the finger-joint part and were glued under various adhesive conditions were used in block shear tests to examine the ideal adhesive condition in the finger-joint part that influences the strength properties of the large-scale finger-jointed laminae. In conclusion, evaluating finger-joint properties is crucial for glulam with good strength properties.



Figure 7. Typical Failure Modes of Specimens (A) Shear Failure of Splitting of Timber (B) Splitting of Timber (C) Shear Failure of Splitting of Timber

CONCLUSIONS

Bending properties of beams produced in 6 different cross-sections, different layer numbers, and thicknesses, were investigated experimentally and analytically. The specimens experienced elastic deformation during the initial loading stage. The specimens underwent plastic deformation as the load increased. The specimens now began to show numerous small compression wrinkles. The specimen's slight reduction in bending rigidity was accompanied by a marked increase in deformations. Maximum tensile stresses eventually reached the bottom laminates.

The load bearing capacity of 7-layer beams is approximately 35-104%, flexural strength is 20-27%, and the modulus of elasticity is 23-38% higher than 3-layer beams. Therefore, the load carrying capacity values of 7-layer beams increased compared to 3-layer beams. The lowest flexural strength and elasticity modulus values belong to the S1212 coded beam, and the highest flexural strength and elasticity modulus values belong to the S1632 coded beam. The bending properties increased with the increase in size. It was determined that the maximum load carrying capacity, bending strength, and elasticity modulus values obtained as a result of experimental and numerical analysis were very close to each other. Numerical analysis results showed that beams produced with various number of layers and thicknesses can be simulated. It has been determined that the results obtained by creating numerical models instead of experimental analyses for this type of wooden beams may be sufficient.

REFERENCES

- Beceren Oztürk, R. and Arioglu, N. (2010). Mechanical properties of laminated wood beams produced from Turkish pinus silvestris. *ITU Journal/a*, 5(2).
- Di, J., Zuo, H., and Li, Y. (2022). Flexural performance of glulam strengthened with flax-fiber reinforced polymer composites. *Wood Material Science & Engineering*, 1-10.
- Dietsch, P. and Tannert, T. (2015). Assessing the integrity of glued-laminated timber elements, *Construction and Building Materials*, 101, 1259–1270.
- Falk, R.H. (2010). Wood as a sustainable building material, in: R.J. Ross (Ed.), *Wood handbook-Wood as an engineering material*. Centennial Edition, Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, Madison, WI: U.S., p. 1.
- Fossetti, M., Minafò, G. and Papia, M. (2015). Flexural behaviour of glulam timber beams reinforced with FRP cords. *Construction and Building Materials*, 95, 54-64.

- Gao, Y., Wu, Y., Zhu, X., Zhu, L., Yu, Z., and Wu, Y. (2015). Numerical analysis of the bending properties of cathay poplar glulam. *Materials*, 8(10), 7059-7073.
- Güray, A., Kilic, M., Doğru, G. and Özer, M. (2003). The effects of applying force direction and glue types on the bending strength of laminated wood material produced from brown oak (*Quercus Robur L.*), *Thecnoloji*, 6(1), (1-9).
- Hsissou, R., Benzidia, B., Hajjaji, N., Elharfi, A. (2018). Elaboration and electrochemical studies of the coating behavior of new pentafunctional epoxy polymer (pentaglycidyl ether pentabispheol phosphorus) on E24 carbon steel in 3.5% NaCl. *J Chem Technol Metall*, 53, 898–905.
- Kermani, A.. (1999). *Structural Timber Design*, Blackwell Science Ltd., Cambridge, pp. 82–83.
- Kılınçarslan, Ş. and Simsek Turker, Y. (2019). The Effect of Different Parameters on Strength Properties of Glulam Timber Beams. *ICCESEN-2019, Antalya-Turkey*, 23-27.
- Kilincarslan, Ş. and Simsek Türker, Y. (2020a). Physical-Mechanical Properties Variation with Strengthening Polymers. *Acta Physica Polonica, A.*, 137.
- Kılınçarslan, Ş. and Simsek Turker, Y. (2020b) Evaluation in terms of Sustainability of Wood Materials Reinforced with FRP. *Journal of Technical Sciences*, 10(1), 23-30. doi: 10.35354/tbed.615101
- Kılınçarslan, Ş. and Simsek Turker, Y. (2022). Strengthening of solid beam with fiber reinforced polymers. *Turkish Journal of Engineering*, 7(3), 166-171. Doi: 10.31127/tuje.1026075
- Kilincarslan, S., and Turker, Y. S. (2021). Experimental investigation of the rotational behaviour of glulam column-beam joints reinforced with fiber reinforced polymer composites. *Composite Structures*, 262, 113612.
- Li, G., Zhao, R. and Zhang, W. (2022). Experimental research on axial compression performance of glulam columns reinforced by steel strips. *Wood Material Science & Engineering*, 1-14.
- Moody, R.C. and TenWolde, A. (1999). *Use of Wood in Buildings and Bridges Wood Handbook – Wood as an Engineering Material*, U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory Madison, pp. 16.
- Nunnally, S.W. (2007). *Construction Methods and Management*, seventh ed., Pearson Prentice Hall, New Jersey, p. 295.
- Ohuchi, T., Hermawan, A. and Fujimoto, N. (2013). An Experimental Study on Adhesive Condition with Sugi Block Specimen which Assumed Finger-joint by Block Shear Test. *Journal of the Faculty of Agriculture ,Kyushu University*, 58, 99–102.
- Ohuchi, T., Murakami, Y. and Fujimoto, N. (2009). Evaluation of finger-jointed laminae for glulam timber by acoustic emission I. Development of jig for acoustic emission sensor installed to production line and its verification test. *Journal of the Faculty of Agriculture ,Kyushu University*, 54, 467–470.
- Sahin, C. K. And Onay, B. (2020). Alternative WoodSpecies for Playgrounds Wood from Fruit Trees. *Wood Research*, 65(1), 149- 160.
- Sahin, C., Topay, M. And Var, A. A. (2020). A Study onSome Wood Species for Landscape Applications:Surface Color, Hardness and Roughness Changes atOutdoor Conditions. *WoodResearch*,65(3),395-404
- Sahin, H. T., Arslan, M. B., Korkut, S. And Sahin, C. (2011). Colour Changes of Heat-Treated Woods of Red-BudMaple, European Hophornbeam and Oak. *ColorResearch & Application*, 36(6), 462-466.
- Sena-Cruz, J., Jorge, M., Branco, J.M. and Cunha, V.M.C.F. (2013). Bond between glulam and NSM CFRP laminates, *Construction and Building Materials*, 40, 260–269.
- Stalnaker, J.J. and Harris, E.C. (1999). *Structural Design in Wood*, second ed., Massachusetts: Kluwer Academic Publishers, 11-12, 17-18, 157- 159,305.
- Stark, N.M., Cai, Z. and Carll, C. (2010). Wood-based composite materials, panel products, glued-laminated timber, structural composite lumber, and wood–nonwood composite materials, in: R.J. Ross (Ed.), *Wood handbook—Wood as an Engineering Material*, Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, Madison, WI, U.S., pp. 11-1,11-2,11-17,11-20.
- Thelandersson, S. (2003). *Timber Engineering - General Introduction*, in: S. Thelandersson, H.J. Larsen (Eds.), *Timber Engineering*, John Wiley & Sons Ltd., West Sussex, p. 7.

Tran, V.D. Oudjene, M. and Méausoone, P.J. (2015). Experimental and numerical analyses of the structural response of adhesively reconstituted beech timber beams, *Composite Structures*, 119, 206–217.



Kahramanmaraş Sütçü İmam University

Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 27.09.2023
Kabul Tarihi : 25.12.2023

Received Date : 27.09.2023
Accepted Date : 25.12.2023

İHA TABANLI RAY KONTROLÜ İÇİN EVRİŞİMLİ SİNİR AĞLARI İLE RAY GÖRÜNTÜLERİNİN GERÇEK ZAMANLI SEGMENTASYONU

REAL-TIME SEGMENTATION OF RAIL IMAGES WITH CONVOLUTIONAL NEURAL NETWORKS FOR UAV BASED RAIL INSPECTION

Selçuk Sinan KIRAT¹ (ORCID: 0000-0003-0106-6995)
İlhan AYDIN^{2*} (ORCID: 0000-0001-6880-4935)

¹Milli Eğitim Bakanlığı, İl Milli Eğitim Müdürlüğü, Elazığ, Türkiye
²Fırat Üniversitesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Elazığ, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: İlhan AYDIN, iaydin@firat.edu.tr

ÖZET

Demiryolları insan ve yükünü taşır. Güvenli bir demiryolu seyahati için rayların kontrol edilmesi önemlidir. Raylar genelde insanlar tarafından manuel olarak kontrol edilmektedir. Gelişen teknolojiyle artık İHA'lar birçok görevde insanın yerini almaktadır. Rayların manuel olarak kontrol edilmesi zaman alıcı ve maliyetli bir iştir. Bu nedenle raylar İHA'lar tarafından kontrol edilebilir. İHA'ların rayları kontrol edebilmesi için rayların üzerinde otonom olarak uçuşması gerekir. Bunu yapabilmesi için ray görüntüleri üzerinde segmentasyon yapılmalıdır. Görüntü segmentasyonu bilgisayarlı görü alanında yapılan çalışmalardandır. Bu çalışmalarda derin öğrenmeden faydalanılmaktadır. Derin öğrenme tabanlı evrışimsel sinir ağlarından olan UNet, ICNet ve BiSeNet V2, bilgisayarlı görü uygulamalarında kullanılmaktadırlar. Literatürde gerçek zamanlı görüntü segmentasyonu görevlerinde kullanılan bu ağlar halka açık olarak paylaşılan Railsem19 veri seti özelleştirilerek eğitilmiştir. 1024×512 piksel çözünürlüğündeki görüntüler üzerinde %98 segmentasyon doğruluğuna ulaşan ağlar İHA ile demiryolundan alınan gerçek zamanlı görüntülerde yaklaşık 15 fps hıza ulaşmışlardır. Ağların gerçek zamanlı segmentasyon videosu <https://youtu.be/piVTdsDPzfg> bağlantısından izlenebilir. Çalışmada ayrıca otonom İHA uçuşu bir PID uçuş kontrol sistemi önerilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Bilgisayarlı görü, derin öğrenme, evrışimsel sinir ağı, gerçek zamanlı segmentasyon

ABSTRACT

Railways carry people and their cargo. Checking the rails is important for safe rail travel. Rails are usually controlled manually by humans. With the developing technology, UAVs are now replacing humans in many tasks. Manually checking the rails is time consuming and costly. Therefore, the rails can be controlled by UAVs. In order for UAVs to control the rails, they must fly autonomously on the rails. In order to do this, segmentation must be done on the ray images. Image segmentation is one of the studies in the field of computer vision. Deep learning is used in these studies. UNet, ICNet and BiSeNet V2, which are deep learning-based convolutional neural networks, are used in computer vision applications. These networks, which are used in real-time image segmentation tasks in the literature, were trained by customizing the publicly shared Railsem19 dataset. Networks, which reached 98% segmentation accuracy on 1024×512 pixel resolution images, reached approximately 15 fps on real-time images taken from the railway by UAV. Real-time segmentation video of the networks can be viewed at <https://youtu.be/piVTdsDPzfg>. A PID flight control system for autonomous UAV flight is also proposed in the study.

Keywords: Computer vision, deep learning, convolutional neural network, real-time segmentation

GİRİŞ

Trenler insanlığın ulaşım ve yük taşıma ihtiyacını sağlamak için yüzlerce yıldır demiryollarında ilerlemeye devam etmekte. 21. yy'daki teknolojik gelişmeler, nüfusun artması, şehirlerin büyümesi, insanların daha fazla seyahat ediyor olması, elektrikli hatların ekonomik ve çevreci olması gibi nedenlerden ötürü demiryollarına talep günden güne artmaktadır (Kupriyanovsky vd., 2020). Artık insanlar demiryollarını bazen sadece turistik bir gezi, unutamayacakları farklı bir yolculuk yapma amaçlı olarak da tercih etmekte (Çakmak ve Altaş, 2018). Demiryolları, savaş durumunda mültecilerin ve yaralıların taşınması, mahrumiyet bölgelerine yardım götürülebilmesi gibi görevlerde de insanoğluna büyük katkı sunuyor. Rusya – Ukrayna savaşında mültecilerin %9'u seyahat için demiryollarını kullanmıştır. Savaşın şartları en zorladığı zamanlarda bile demiryolları ile günde 200.000 insan taşınmıştır (International Union of Railways, 2022).

Nüfusu hızla artan ve gelişen ülkemizde özellikle büyük şehirlerde karayolu trafik problemleri ortaya çıkmaktadır. Demiryolları büyük şehirlerin bu problemlerinin çözümüne katkı sunabilmektedir. Ankara-Eskişehir yüksek hızlı tren hattının devreye girmesi ile bu güzergâhta demiryolu yolcu taşıma payı %8'den %72'ye çıkmıştır. 2053 ulaştırma ve lojistik ana planındaki çevreci (sürdürülebilir) senaryoya göre 2053 yılına kadar demiryollarının yük taşımadaki payının %5,08'den %21,93'e, yolcu taşımadaki payının %0,96'dan %6,20'ye çıkarılması hedeflenmektedir. Söz konusu planda 2035 yılına kadar demiryollarında taşınan yük miktarının (ton) %457, yolculuk sayısının ise %645 artması ön görülmektedir (T.C. Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı, 2023). Bu rakamlar diğer tüm ulaşım araçlarında hedeflenen artış miktarından oransal olarak daha yüksektir.

Birbirine traversler ile bağlanmış demir ray çifti üzerinde ilerleyen bir aracın güvenle seyredebilmesi için demiryollarının planlı olarak denetlenmesi gerekir. Demiryolu üzerindeki yapısal bozukluklar, ray kusurları, travers ve bağlantı elemanı kusurlarının tespit edilmesi önemlidir. Ayrıca izinsiz giriş olarak kabul edilen ray üzerine devrilmiş bir ağaç, yuvarlanmış bir kaya, ray üzerinde otomobil gibi bir kara aracı ya da bir yayanın olması demiryolu ulaşımı açısından büyük risk oluşturmaktadır. Tüm bu kusur ve izinsiz girişlerin tren raylardan geçmeden önce tespit edilebilmesi açısından demiryolu denetimlerinin ideal bir sıklıkta ve hassasiyetle yapılması gerekir. Günümüz teknolojisi ile saatte 250km hızı rahatlıkla aşabilen yüksek hızlı trenlerin raylar üzerinde ilerlediği düşünüldüğünde en küçük bir hatanın ciddi can ve mal kayıplarına sebep olabileceği ortadadır. Şekil 1'de ülkemizde 6 Şubat 2023 tarihinde meydana gelen Kahramanmaraş merkezli deprem sonucunda raylarda meydana gelen bükülme görülmektedir.



Şekil 1. Kahramanmaraş Depremi Sonrası Raylardaki Bükülme (Anadolu Ajansı, 2023)

Şekil 1'de Kahramanmaraş depremi sonrasında raylarda meydana gelen bükülme iki farklı açıdan görülmektedir. Görülen konvansiyonel demiryolu hattında meydana gelen bükülme neticesinde ilgili güzergâhtaki seferler raylar düzeltilene kadar iptal edilmiştir.

Demiryollarının denetimi genellikle demiryolu işletmesi personeli tarafından manuel olarak yapılmaktadır. Bu durum gereğinden fazla insan gücü, aşırı zaman ve maliyet sorunlarını ortaya çıkarmaktadır (Ni vd., 2022). Ülkemizde de TCDD personeli tarafından raylar denetlenmektedir. Son yıllarda donanım alanındaki gelişmelerle beraber görüntü işleme alanında derin öğrenme teknikleri rahatlıkla kullanılabilir olmuştur. Bunun neticesinde araştırmacılar otonom ray denetimi için çeşitli bilgisayarlı görü uygulamaları geliştirip önermişlerdir.

İnsansız Hava Aracı (İHA), kendisine verilen uçuş programına göre rotasında otonom ilerleyebilen ya da pilot tarafından uzaktan kontrol edilen hava aracı olarak ifade edilmektedir. Askeri ya da sivil amaçlı olarak kullanılabilen

bu araçlar, günlük hayatta birçok alanda kullanılmaktadır. Gözetleme, keşif gibi askeri görevleri yerine getirmenin yanı sıra sivil alanda bazı e-ticaret firmalarının kargo dağıtım işlerinde dahi kullanılabilir (Murat, 2021). İHA'ların yolların, petrol boru hatlarının ve elektrik hatlarının denetiminde de yaygın olarak kullanıldığı görülmektedir (Yang vd., 2022a). Çalışan personelin can güvenliği açısından erişimi zor olan bölgelerde görev alabilen İHA'lar sayesinde maliyetler azalmaktadır. İHA, üzerinde taşıdığı donanım sayesinde demiryollarını denetlemek için derin öğrenme tabanlı görüntü işleme uygulamalarında da kullanılabilir (Güçlü vd., 2022).

İHA'lar demiryollarını denetlemek için raylar üzerinde ilerlediğinde, kamera tarafından alınan anlık görüntülerin gerçek zamanlı olarak işlenmesi gerekmektedir. İHA'nın rayları takip ederek ilerleyebilmesi, ray görüntülerinin İHA tarafından anlamlandırılması ile mümkün olabilmektedir. Bu bağlamda İHA, içerisinde ray olan bir görüntüdeki ray çiftini, rayların arasında kalan bölgeyi, rayların dışında kalan alanları ayırt edebilmelidir. Bu sayede ray takibi yaparak rotasında ilerleyebilir.

Görüntü anlamlandırma için derin öğrenme tabanlı segmentasyon ağları kullanılmaktadır. Bu ağlar görüntüyü oluşturan her bir pikselin bir sınıfa atanması prensibine göre çalışmaktadır. Bir görüntü milyonlarca pikselden meydana geldiğinden derin ağlarının saniyede onlarca resim içerisindeki pikselleri sınıflandırma görevinde hız sorunu ortaya çıkarmaktadır. Araştırmacılar bu sorunu çözümü için farklı mimaride ağlar tasarlamakta, ağı parametre sayısını azaltarak, boyutunu küçülterek ağı hızlandırmaktadırlar.

Literatürde ray görüntülerinin anlamlandırılması ile ilgili çeşitli çalışmalar yapılmıştır. Rahman ve Mammeri (2021) demiryolu rayları üzeri ve etrafındaki bitki örtüsünün otonom denetimi için İHA ile şehir içinden toplanan hava görüntülerini derin evrimsel sinir ağlarını kullanarak anlamlandırmıştır. Yazarlar şehir görüntülerindeki bitki örtüsünü anlamlandırabildikleri çalışmalarını gelecekte demiryolu görüntüleri üzerinde uygulayacaklarını ifade etmektedirler. Mammeri vd. (2021) İHA ile demiryollarından toplanmış görüntü verilerini dört farklı derin evrimsel sinir ağı ile anlamlandırmış ve modellerin başarılarını karşılaştırmıştır. Yazar farklı demiryollarının kesişim noktalarının anlamlandırılmasında sıkıntı yaşandığını, bunun nedeninin kesişim noktası içeren görüntü verilerinin az olmasından kaynaklandığını belirtmiştir. Guclu vd. (2021) demiryollarında otonom denetim için görüntü verisine ihtiyaç olduğunu, veri toplamak için İHA kullanılabileceğini ifade etmiştir. Çalışmalarında İHA'nın rayları sabit bir yükseklikten sabit bir hızda takip edip görüntü toplayabilmesi için görüntü işleme tekniklerini kullanmışlardır. Gabor filtresi ile ray hatlarını belirginleştirip Hough dönüşümü yapan yazarlar, rayların ufukta kesiştiği noktayı bularak İHA'nın kendisini bu noktaya göre konumlandırarak ilerlemesini sağlamışlardır. Bojarczak ve Lesiak (2021) İHA ile demiryolu üzerinden alınan görüntülerde ezilme, pullanma vb. ray kusurlarını tespit etmişlerdir. Çalışmalarında İHA ile tepeden aşağı doğru dik açı ile çekilmiş ray görüntülerinde rayların konumu belirlenerek derin evrimsel sinir ağı ile anlamlandırılıp kusurun konumu işaretlenmiştir. Aydın vd. (2021) İHA ile ray yüzey kusurlarının tespiti için önerdiği çalışmada, ön ve alt kameraya sahip İHA kullanmıştır. Ön kameradan alınan görüntüleri içerisinde Hough dönüşümü bulunan derin evrimsel sinir ağını kullanarak ray hatlarını anlamlandırmış, hatların kesişim noktasını bulup İHA'nın bu noktaya göre hareket etmesini sağlamıştır. Aynı anda alt kameradan toplanan ray görüntülerini derin evrimsel sinir ağlarını kullanarak anlamlandırmış ve kusur tespiti yapmıştır. Sevi ve Aydın (2022) Gazebo adı verilen simülasyon ortamında İHA'nın rayları takip etmesi için derin evrimsel sinir ağını kullanmıştır. Simülasyon ortamındaki ray görüntülerinin anlamlandırıldığı çalışmada %99 segmentasyon doğruluk oranına ulaşılmıştır. Grandio vd. (2022) mobil haritalama sistemi tarafından demiryolu altyapısından elde edilen nokta bulutu biçimindeki 3B görüntüleri derin evrimsel sinir ağlarında kullanarak anlamlandırmaya çalışmıştır. Yang vd. (2022b) trenler ve İHA'larda bulunan yerleşik kameralardan toplayarak görüntülerle segmentasyon görevi için veri seti (iRailway) hazırlamışlardır. Bu veri seti üzerinde derin evrimsel sinir ağı modellerinden biri olan GAN türündeki RT-GAN ağını kullanarak ray görüntülerini anlamlandırmaya çalışmışlardır. Katar ve Duman (2022) ray görüntülerini anlamlandırmak için derin evrimsel sinir ağı modeli olan U-Net'i farklı versiyonlarla farklı anlamlandırma senaryoları için kullanmıştır. Chen vd. (2022) yüksek hızlı demiryollarından İHA ile alınan görüntüleri anlamlandırmak ve izinsiz giriş tespiti yapmak için derin evrimsel sinir ağı modeli olan All-in-One YOLO'yu kullanmışlardır. Tong vd. (2022) İHA ile toplanan demiryolu görüntülerini gerçek zamanlı anlamlandırma için yeni bir derin evrimsel sinir ağı modeli önermişlerdir. Önerdikleri modelde parametre sayısı ve hesaplama maliyetinin 2 kata kadar azaldığını belirtmişlerdir. Çalışmada düşük donanıma sahip İHA'larda gerçek zamanlı ray anlamlandırma yapılabileceğini göstermişlerdir. Yang vd. (2022a) İHA ile alınan demiryolu görüntüleri anlamlandırma ve takip için ayrıklaştırma-filtreleme-yeniden yapılandırma (Discretization Filtering Reconstruction - DFR) adımlarından oluşan bir yöntem önermişlerdir. DRF yöntemi ile kullanılan hafif bir derin evrimsel sinir ağı sayesinde görüntüler bütünüyle segmente edilmekte, demiryolu olma ihtimali olan bölümleri yamuklarla işaretlenmekte, ray hattının olduğu en uzun yamuk serisi birleştirilerek hat çıkarılmakta ve bu alan ikili olarak tekrar

segmente edilmektedir. Önerdikleri model 640×480'lik giriş görüntülerini gerçek zamanlı anlamlandırma görevinde 12 fps değerini yakalamıştır. Weng vd. (2023) İHA'lerden elde edilen ray görüntülerini anlamlandırmak için derin evrimsel sinir ağı modeli olan DeepLabV3+'nın ana hat çıkarma kısmında sırasıyla MobileNetV2 ve MobileNet3'ü kullanarak segmentasyon başarılarını karşılaştırmıştır. Tong vd. (2023) İHA ile alınan ray görüntülerini gerçek zamanlı anlamlandırmak için yeni bir derin evrimsel sinir ağı modeli geliştirmişlerdir. ARTNet adını verdikleri model 512×512'lik giriş görüntülerini anlamlandırma görevinde 50 fps değerini yakalamıştır. Wu vd. (2023) yüksek hızlı demiryollarındaki potansiyel tehlikelerin tespit edilmesi için İHA ile yüksek mesafelerden alınan görüntüleri kendi geliştirdikleri derin sinir ağı ile anlamlandırmaya çalışmışlardır. YOLARC adını verdikleri ağı gerçek zamanlı segmentasyon görevi için 520×520'lik giriş görüntülerinde 35,9 fps değerini yakalamıştır.

Literatürdeki çalışmalar incelendiğinde araştırmacıların demiryolu denetimlerini otonom olarak sağlamak için İHA'lara odaklandıklarını, özellikle İHA'ların rayı takip edebilmesi için görüntünün anlamlandırılması üzerine gayret ettikleri anlaşılmaktadır. Ayrıca araştırmacıların son zamanlarda gerçek zamanlı görüntü bölütleme görevlerine odaklandıkları görülmektedir. Çünkü İHA'lar bataryasının imkân verdiği ölçüde havada kalabilen ve sınırlı donanım kaynaklarına sahip araçlardır. Bu araçlar üzerinde çok fazla parametre ve hesaplama maliyetine sahip derin evrim ağılarının çalıştırılması iyi sonuçlar vermemektedir. Araştırmacılar bu problemi çözmek ve yüksek çözünürlükte görüntü alabilen İHA üzerinde derin evrim ağılarını çalıştırmak için daha az parametre içeren hafif ağı tasarlama yoluna gitmektedirler (Wu vd., 2023; Chakravarthy vd., 2022).

Bu çalışmada İHA'nın rayları takip edebilmesi için 3 farklı derin evrimsel sinir ağı performansları ray görüntülerini gerçek zamanlı anlamlandırma görevinde karşılaştırılmıştır. Çalışmada hafif bir UNet ile ICNet ve BiseNetV2 ağı kullanılmış olup, halka açık olarak paylaşılan Railsem19 veri seti özelleştirilerek söz konusu ağı eğitilmiştir. Çalışma İHA ile ülkemizde otonom ray denetimi sistemlerinin geliştirilmesine katkı sunabilir. Gerçek zamanlı anlamlandırma görevlerinde çalışacak araştırmacılara fikir verebilir.

METOT

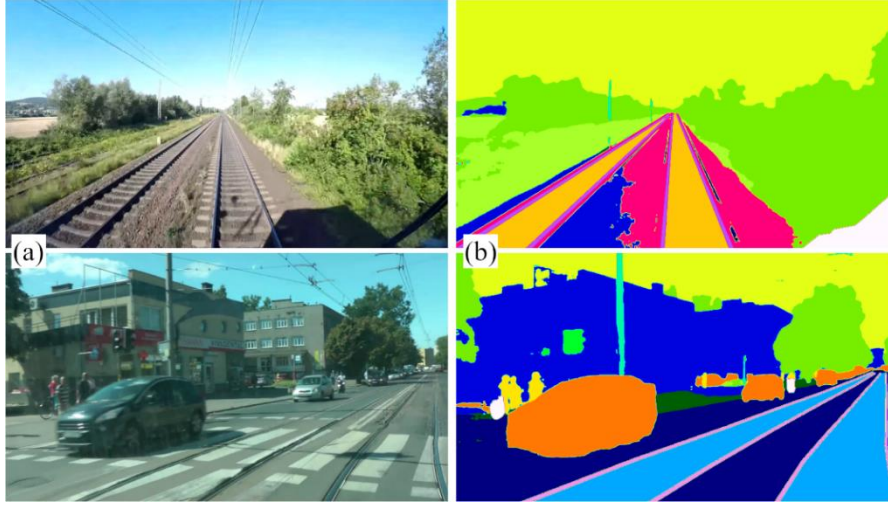
Çalışmada halka açık olarak paylaşılan Railsem19 veri seti kullanılmıştır. Veri seti düzenlenerek belirlenen UNet, ICNet ve BiseNetV2 ağı eğitilmiştir. İHA ile ray takibi için demiryolu üzerinden alınan görüntülerde gerçek zamanlı olarak ağı görüntü anlamlandırma performansları test edilmiştir.

Veri Setinin Hazırlanması

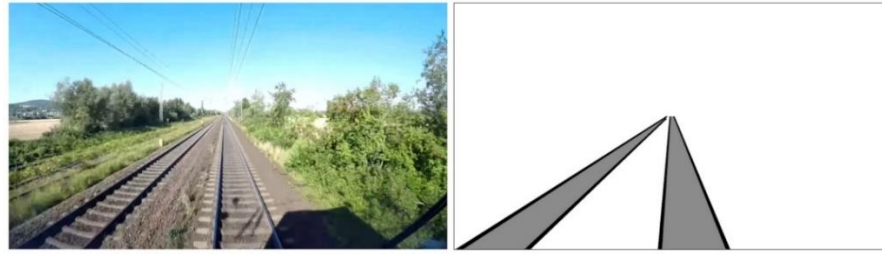
Railsem19 veri seti trenler ve tramvayların ön perspektifinden alınan 1920×1080 piksel en/boy oranındaki 8500 farklı görüntü ve maskelerinden oluşmaktadır. Bu görüntüler, içerisinde karmaşık demiryolu görüntüleri, yetersiz aydınlatma koşulları, şehir içi sahneler gibi zorlukları barındırmaktadır. Railsem19 veri seti görüntüleri maskelerinde yol, kaldırım, yapı, tramvay hattı, çit, direk, trafik ışığı, trafik işareti, bitki örtüsü, arazi, insan, gökyüzü, tren yolu hattı, araba, kamyon, tren yolu ray zemini, ray üzerindeki araç, tren yolu rayları, tramvay rayları yüzeyi olmak üzere 19 sınıf piksel düzeyinde etiketlenmiştir. Piksel düzeyinde etiketleme, bu veri setindeki örnekler için görüntüyü oluşturan tüm piksellerin 1 ile 19 arasındaki değerler ile ifade edilmesi anlamına gelmektedir. Her görüntü bu sınıflardan bazılarını içerisinde barındırmaktadır (Zendel vd., 2019). Şekil 2'de Railsem19 veri setinden 2 örnek görüntü ve maskeleri görülmektedir.

Şekil 2-a'da tren yolu görülmektedir. Şekil 2-b'de ise şehir içi trafikteki tramvay yolu görülmektedir. En sağdaki renkli kısımlar ise gerçek görüntülerdeki sınıfları ifade eden maskelerdir. Maskeler uzmanlar tarafından gerçek görüntülerdeki çeşitli piksel alanlarına belirlenen sınıf etiket numarasının atanmasıyla oluşturulmuştur. Söz konusu etiket numarasına göre ilgili pikseller farklı renklerde görülmektedir. Şekil 2-b'deki görüntü maskesinde otomobil sınıfının turuncu renkle ifade edildiği görülmektedir. Bu çalışma İHA'nın tren raylarında ilerlemesine katkı sunmayı amaçladığından, Railsem19 içerisinde tramvay yolu görüntüsü içerenler gereksizdir. Ayrıca İHA'nın ilerlemesi için ray yüzeyi ile raylar arasında kalan bölgenin (tren yolu hattı) anlamlandırılması yeterlidir. Bu nedenle Railsem19 veri seti içerisindeki şehir içi tramvay görüntüleri çıkarılmış, geriye kalan tren yolu görüntü maskeleri sadece ray yüzeyi ve tren yolu hattı kalacak şekilde yeniden yapılandırılmıştır. Son durumda çalışmada kullanılan veri setinde 7773 adet tren yolu içeren görüntü ile bu görüntülerin 3 sınıflı maskeleri kalmıştır. Şekil 3'te çalışmada kullanılan bir örneğe ait görüntü ile maskesi görülmektedir.

Şekil 3'te görüldüğü gibi maskeler 3 sınıf kalacak şekilde yeniden etiketlenmiştir. İHA'nın ray takibi için ray yüzeyi ve ray hattının olması yeterlidir. Geriye kalan tüm pikseller "diğer" sınıfı olarak kabul edilebilir.



Şekil 2. a. Railsem19 Veri Seti Görüntüleri b. Görüntülerin Maskeleri



Şekil 3. Çalışmada Kullanılan Bir Görüntü ve Maskesi

Şekil 3'te görüntü maskesinin çizgi izleyen robotların ilerlediği parkura kısmen benzediği söylenebilir. Çizgi izleyen robotun parkurunda sadece beyaz bir alan ve üzerinde siyah çizgi ya da tam tersinin olduğu 2 sınıflı bir yüzey vardır. Robot sadece çizgiye odaklanmaktadır, geriye kalan alanlar aslında robotun ilgilenmediği kısımlardır. Bu çalışmada da benzer biçimde İHA kamerasından alınan görüntü Şekil 3'teki maskeye benzer bir şekilde segmente edildiğinde, İHA çizgi izleyen robot mantığı ile rayı takip edecektir. Dolayısıyla “diğer” sınıfı esasında İHA'yı bu görev bağlamında ilgilendirmeyen tüm alanlardır. Çizgi izleyen robot parkurunda sadece tek bir çizgi varken bu görevde ray yüzeyi ve ray hatları da görülmektedir. Bunun nedeni İHA'nın kendi konumunu ray yüzeyi sınıfına göre ray hattının üzerinde ortalaması gerekliliğidir. Ayrıca demiryollarında çim, bitki örtüsü, çakıl fazlalığı gibi nedenlerle ray hattı bazen görünmeyebilir. Bu gibi durumlarda İHA'nın rotasını kaybetmemesi için ray yüzeyine göre kendini konumlandırması daha etkili bir çözüm olacaktır. Maskelerde kullanılan renkler istenildiği gibi değiştirilebilir. Burada önemli olan görüntü içerisindeki tüm piksellerin belirli kategorik renklerle ifade edilebilmesidir.

Derin Evrimsel Sinir Ağlarının Seçimi ve Parametre Ayarları

Bölütleme amaçlı kullanılan ağlarda çoğunlukla klasik kodlayıcı – kod çözücü mimarisine sahip UNet ağı omurga olarak kullanılmaktadır. Bu nedenle bu çalışmada da UNet'in kullanımı uygun görülmüştür. Ek olarak literatürde gerçek zamanlı görüntü bölütleme görevlerinde kullanılmış BiseNetV2 ile ICNet ağları da çalışma kapsamına alınmıştır. Seçilen bu ağlara Tablo 1'deki parametreler verilerek derlenmiş, hazırlanan verilerle eğitilmiştir.

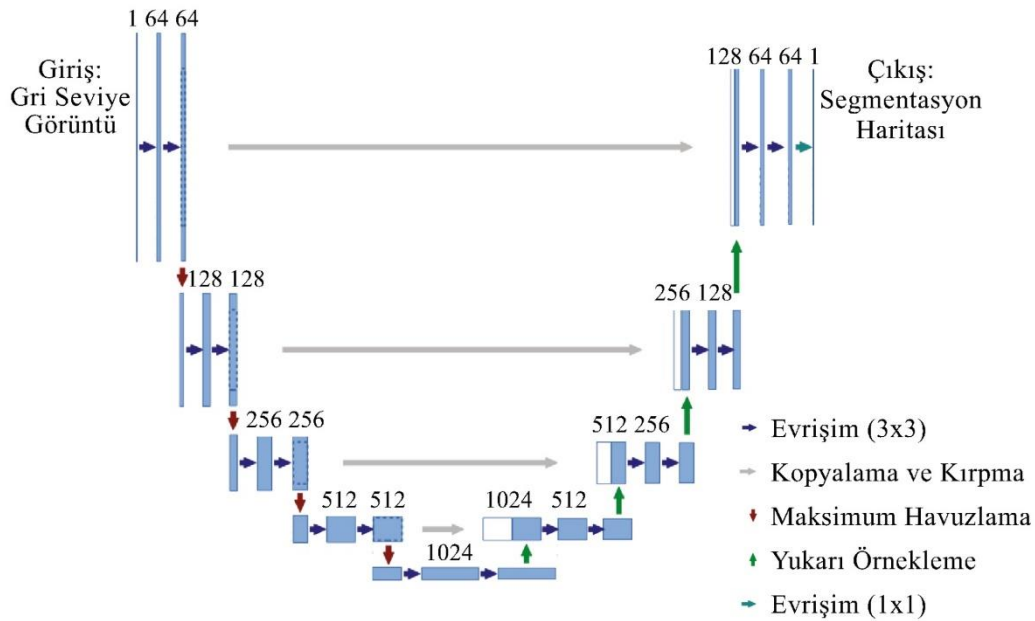
Tablo 1. Ağlar İçin Tercih Edilen Parametreler

Parametre Adı	Parametre Değeri
Giriş Görüntüsü Genişliği	1024
Giriş Görüntüsü Yüksekliği	512
Sınıf Sayısı	3
Yığın Boyutu	16
Dönem	100
Erken Durdurma için Bekleme Dönemi	16
Öğrenme Oranı	0,001
Öğrenme Oranı Bekleme Dönemi	4
Öğrenme Oranı Çarpanı	0,85
Optimize Edici	Adam

Tablo 1’den anlaşılacağı gibi veri setindeki 1920×1080 ölçülerine sahip görüntüler, 1024×512 ölçülerinde tekrar boyutlandırılarak ağlara verilmiştir. Hatayı en aza indirmek için başta 0,001 olarak belirlenen öğrenme oranı, eğitimdeki 4 dönem boyunca hatada azalma olmaz ise 0,85 ile çarpılarak azaltılmaktadır. Bu sayede eğitimin daha iyiye gitmediği her 4 dönemde bir, daha küçük öğrenme oranı ile eğitim yapılmaktadır. Daha küçük öğrenme oranı hatayı azaltmak için ağı daha hassas öğrenmesini sağlayacaktır. Ayrıca eğitim sürecinde eğer 16 dönem boyunca hata azalmaz ise eğitim otomatik olarak durdurulacaktır. Bu durumda gereksiz yere 100 dönem eğitim yapılmadan da eğitim sonlandırılabilir. Tablo 1’de görülen parametreler deneysel olarak iyi sonuç alındığı için tercih edilmişlerdir. Tüm ağlar için giriş ve çıkış görüntüsü $1024 \times 512 \times 3$ olarak ayarlanmıştır.

U-Net Mimarisi

Ronneberger vd. (2015) biyomedikal görüntü segmentasyonu görevindeki başarılı performansı ile U-Net’i tanıtmışlardır. U-Net, mikroskop görüntülerindeki hücre izleme yarışmasını büyük farkla kazanmıştır. U-Net, U harfine benzeyen şekli nedeni ile bu ismi almış olup ağı mimarisi Şekil 4’te görülmektedir.



Şekil 4. U-Net Mimarisi (Ronneberger vd., 2015)

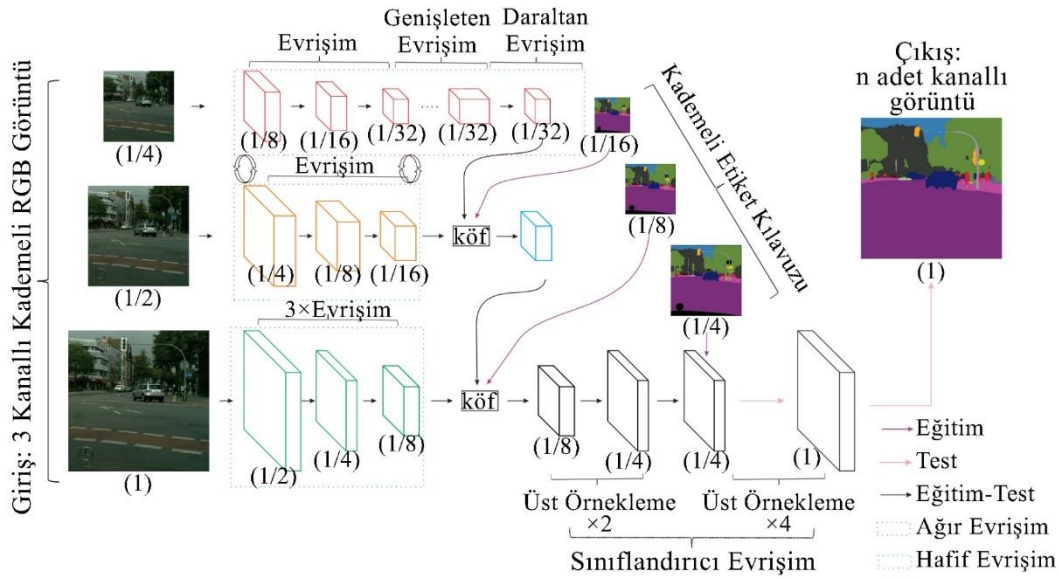
Şekil 4’te görülen U-Net mimarisine göre mavi dikdörtgenler üzerinde yazan sayılar görüntünün kanal sayısını ifade etmektedir. Giriş görüntüsünün evrişim operatörleri (mavi ok) ile kanal sayısı artırılmakta, maksimum havuzlama (kırmızı ok) ile boyutu yarıya düşmektedir. Bu kısım daralma yolu olarak ifade edilmektedir. Mimarinin en alt kısımda iyice boyutu küçülen görüntüler yukarı örneklemeye (yeşil ok) yapılarak boyutu tekrar iki katına çıkarılmaktadır. Bu kısım ise genişleme yolu olarak ifade edilmektedir.

Küçültülen bir görüntüde veri kayıpları meydana gelmektedir. U-Net veri kaybının dezavantajını kopyalama ve kırpma operatörleri yardımı ile azaltmaktadır. Kopyalama ve kırpma adımı, daralma yolundaki her aşamada evrişim işlemlerinden hemen en sonra kopyası alınmakta, gereksiz kısımları kırılarak genişleme yolunda tam karşıya eklenmektedir. Bu sayede ağı çıkışından önce genişleme yolundaki her seviyede daralma yolundaki yüksek çözünürlüklü görüntü bilgileri de kullanılabilir.

ICNet Mimarisi

Zhao vd. (2018) şehir manzaraları, CamVid, COCO-Stuff gibi veri setlerinde gerçek zamanlı segmentasyon görevini yerine getirmek için ICNet (Image Cascade Network) adını verdikleri ağı tanıtmışlardır. Şehir manzaraları veri setinde %69,5 segmentasyon doğruluğu ve 30,3 fps hızı, CamVid veri setinde %67,1 segmentasyon doğruluğu ve 27,8 fps hızı, COCO-Stuff veri setinde ise %29,1 doğruluğa ve 35,7 fps hızı ulaşmıştır. Ağı mimarisi Şekil 5’te görülmektedir.

Şekil 5’te görülen ICNet mimarisinde adından da anlaşılacağı üzere ağı girişindeki görüntü kademeli bir şekilde 1, 1/2 ve 1/4 oranlarına ölçeklenerek birbirine paralel evrişim operatörlerinden oluşan dallarda işlenmektedir. Parantez



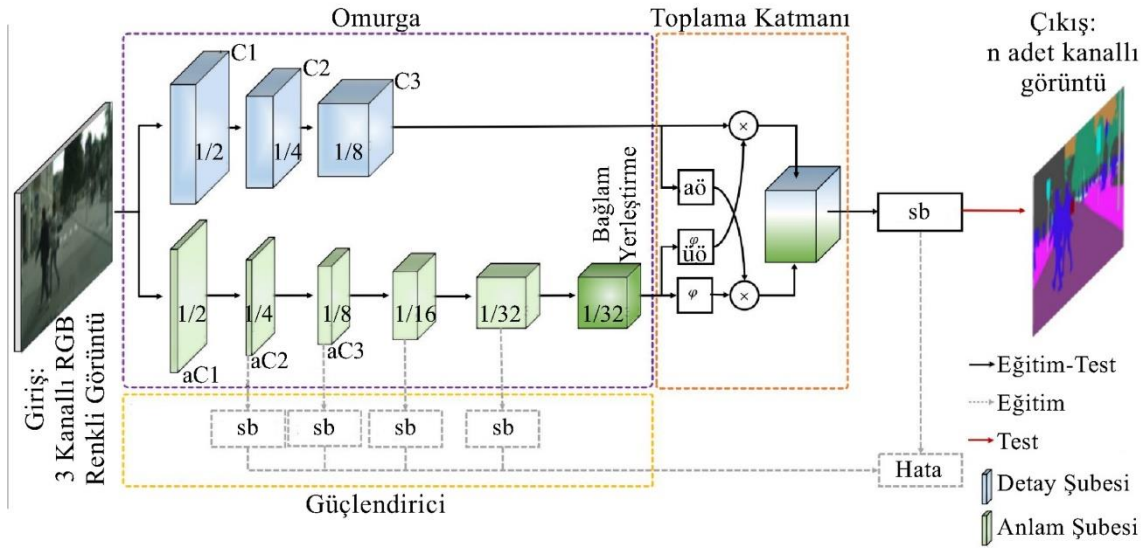
Şekil 5. ICNet Mimarisi (Zhao vd., 2018)

içerisindeki sayılar her katmandaki görüntünün giriş görüntüsüne oranını ifade etmektedir. Ağda yüksek çözünürlüklü görüntülerin işlenmesi hesaplama karmaşıklığını artırmaktadır. Düşük çözünürlüklü görüntülerde ise hesaplama karmaşıklığı azalırken çok kaba segmentasyon sonuçları ortaya çıkmaktadır. Hız ve doğruluk arasında ideal bir denge kurmayı amaçlayan ICNet geliştiricileri, tasarladıkları ağır mimarilerinde görüntünün yüksek, orta ve düşük çözünürlüklü ölçeklerini birbirine paralel dallarda birlikte kullanmakta, kademeli özellik füzyonu (köf) adımı verdikleri yapılarda ise farklı çözünürlük ölçeklerindeki görüntülerden elde edilen özellikleri birleştirmektedir. Hesaplama karmaşıklığını azaltmak adına ICNet'te en üst daldaki derin katmanlı evrişimlerde görüntünün düşük çözünürlüklü hali kullanılarak anlamsal çıkarımlar yapılmaktadır. Orta ve yüksek çözünürlüklü görüntülerin kullanıldığı dallarda ise daha ayrıntılı bilgiler toplanmaktadır. Tüm dalların çıkışındaki özellik haritaları ve bu haritalarla aynı boyutlara sahip kademeli etiket kılavuzları sistematik olarak köf birimlerinde bir araya getirilmektedir. Üst örnekleme yapılarak modelin çıktısında görüntü istenilen boyutlara tekrar ölçeklenmektedir.

BiSeNet V2 Mimarisi

Yu vd. (2021) halka açık olarak paylaşılan şehir manzaraları veri seti ile segmentasyon görevinde yüksek doğruluk ve hıza ulaşan BiSeNet V2 (Bilateral Segmentation Network Version 2) ağını tanıtmışlardır. Söz konusu veri setinde 2048×1024 çözünürlüğündeki görüntülerde %72.6 segmentasyon başarısına ve 156 fps hıza ulaşabilmıştır. Şekil 6'da BiSeNet V2 mimarisi görülmektedir.

Şekil 6'da görüldüğü gibi BiSeNet V2, omurga, toplama katmanı ve güçlendirici olmak üzere üç ana bölüme oluşmaktadır. Şubeler içerisinde yazan sayılar o şubedeki görüntünün giriş görüntüsüne oranını ifade etmektedir. C1, C2 ve C3 kanal sayısını ifade ederken, aC1, aC2 ve aC3 ise detay şubelerindeki kanal sayılarının bir a katsayısı ile çarpılarak elde edilen yeni kanal sayısını ifade etmektedir. Geliştiriciler mevcut yaklaşımların görüntülerdeki düşük seviyeli detayları ihmal ettiğini, bu durumun doğruluk düşüşüne neden olduğunu ifade etmişlerdir. Gerçek zamanlı anlamsal bölütleme görevinde yüksek doğruluk elde edebilmek için görüntülerdeki uzamsal detayların ve kategorik anlamların ayrı ele alındığı BiSeNet V2'de omurga bölümü detay şubeleri ve anlam şubelerini içerisinde barındırmaktadır. Omurga bölümünün amacı geniş kanallara ve sık katmanlara sahip detay şubeleri ile görüntüdeki düşük seviyeli detayları, dar kanallara ve derin katmanlara sahip anlam şubeleri ile görüntüdeki üst düzey anlamsal bağlamı yakalamaktır. Toplama katmanında detay ve bağlam şubelerinden gelen görüntü temsilleri bir araya getirilir. Anlam şubeleri daha derin olduğu için görüntü son şubede detay şubesine göre daha küçüktür. Bu nedenle toplama katmanında alt örnekleme (aö) ve üst örnekleme (üö) ile şubelerden gelen görüntü boyutları eşitlenerek element bazında çarpma işlemi yapılarak bir araya getirilir. Segmentasyon başlıklarından (sb) alınan bilgiler ile hata ölçülür. Güçlendirici olarak adlandırılan bölümde anlam şubelerine bağlanmış segmentasyon başlıkları hatayı daha hassas ölçmek ve azaltmaya katkı sağlamak için kullanılmaktadır. Bu bölüm sadece eğitim aşamasında kullanıldığından test aşamasında ağırlık performansını olumsuz etkilememektedir.

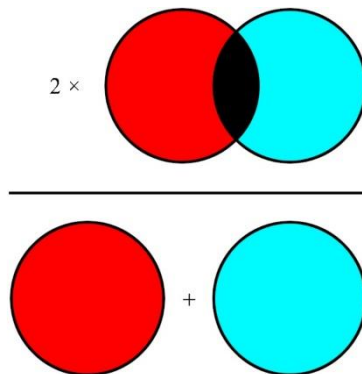


Şekil 6. BiSeNet V2 Mimarisi (Yu vd., 2021)

Değerlendirme Metriği

Segmentasyon görevi klasik görüntü sınıflandırma görevinden farklıdır. Görüntü sınıflandırma görevinde araştırmacı, eğittiği ağın örnek bir çiçek görüntüsü için doğru etiket tahmini yapmasını amaçlar. Bu durumda her bir çiçek görüntüsü için tek bir etiket tahmini yapılır. Segmentasyon görevinde ise bir görüntünün etiketini tahmin etmek yerine içerisindeki tüm pikselleri belirlenen sınıflar için seçilmiş sayılar ile etiketlemek gerekir. Dolayısıyla bu görev daha karmaşık bir süreçtir ve bir görüntü içerisindeki bitki örtüsü, hayvan, insan, araç, bina vb. nesnelere oluşan piksellerin o nesne için seçilmiş sayı ile etiketlenmesini amaçlar. Süreç tamamlandığında ortaya çıkan görüntü belirlenen sınıf sayısı kadar renk çeşitliliğine sahiptir. Ortaya çıkan bu renklerle makine için dış dünyadan alınan görüntü anlam kazanır. Bu sayede otonom sürüş yapacak araçlar için karar verme süreci kolaylaşır.

Klasik görüntü etiketleme görevinde ağ, her bir görüntü için doğru ve yanlış etiket tahminlerini yapar. Yapılan tahminlerdeki doğru ve yanlış sayıları arasındaki çeşitli oransal hesaplamalarla ağın doğruluk, hassasiyet gibi metrikleri ölçülür. Ölçülen metriklere göre ağın başarısı değerlendirilir. Segmentasyon görevinde ise görüntü içerisindeki pikseller etiketlendiği için, ağın çıkışında segmente edilmiş görüntü içerisindeki etiketlenmiş piksel gruplarının gerçekte olması gerekenle (maske görüntüleri) alansal olarak ne kadar örtüştüğü ölçülmeye çalışılır. Bu metriklerden birisi de zar katsayısı (dice coefficient) olarak adlandırılmaktadır. Zar katsayısı Şekil 7’de gösterilmeye çalışılmıştır.



Şekil 7. Zar Katsayısı Gösterimi (Tiu, 2019)

Şekil 7’de gösterilmeye çalışına zar katsayısı, her bir sınıf için maske görüntüsü ile ağ tarafından tahmin edilen görüntüde örtüşen piksel sayısının iki katının, maske ve tahmin görüntülerindeki toplam piksel sayısına oranı bulunarak hesaplanır. Her bir sınıf için hesaplama yapıldıktan sonra tüm sınıfların ortalaması alınarak tek bir görüntü için zar katsayısı bulunmuş olur. Şekil 7’ye göre mavi alan ağın tahmin ettiği sınıf piksellerini, kırmızı alan maskede gösterilen sınıfın gerçek piksellerini ifade ediyor olsun. Buna göre zar katsayısı Denklem 1 ile hesaplanabilir:

$$DC = 2 \times |X \cap Y| / (|X| + |Y|) \quad (1)$$

Denklem 1'e göre tahmin edilen sınıf bölgesindeki pikseller ile gerçekteki sınıf pikselleri örtüştükçe (küme kesişimi büyüdükçe) zar katsayısı da artmaktadır. Görüntüdeki nesnelere için tahmin ile gerçeğin örtüşmesi tam olduğunda zar katsayısı 1, örtüşme olmadığında 0 değerini almaktadır. Dolayısıyla zar kat sayısı 0 ile 1 arasında değer alabilmektedir

Demiryolundan Görüntü Toplama

Parrot Anafi4K İHA ile Elazığ merkezden geçen demiryolu üzerinden görüntü alınmıştır. Parrot Anafi4K maksimum 15 m/s yatay hızda ilerleyebilmekte, toplam 25 dk havada kalabilmektedir. Görüntü alınırken İHA ve kamerası evrişimsel sinir ağlarının eğitildiği özelleştirilmiş Railsem19 veri setindeki görüntülere uygun şekilde, yaklaşık 3m yükseklikten karşı perspektife bakacak bir açıyla konumlandırılmıştır. 5 m/s hızla uçurulmuştur. Şekil 8'de bu süreç görülmektedir.

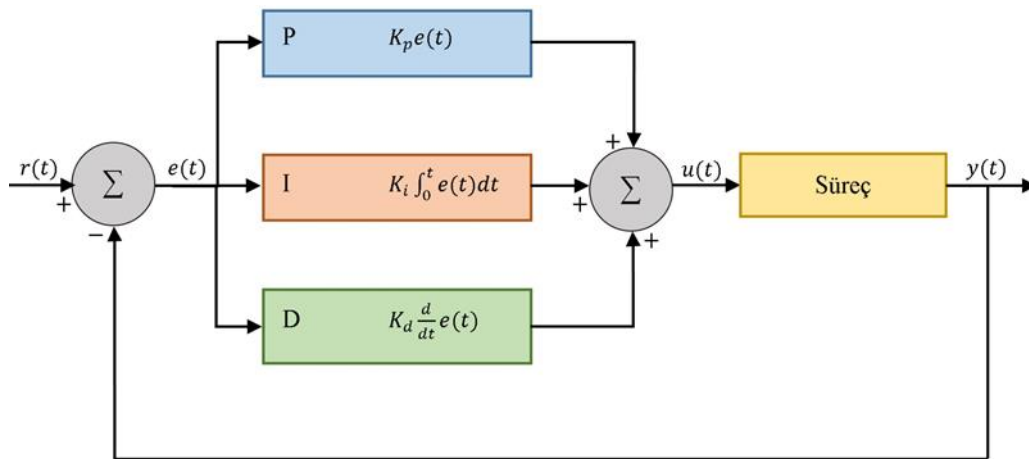


Şekil 8. İHA ile Elazığ Demiryolundan Görüntü Toplama

Demiryolundan alınan video, eğitilen ağların görüntü segmentasyon görevi için kullanılmıştır. Ayrıca bu çalışma kapsamında tasarlanan PID uçuş kontrol sisteminin test edilmesinde kullanılmıştır. Parrot Anafi4K 180 derece dönüş açısına sahip 4K görüntü alabilen kamera, bilgisayara anlık görüntü aktarabilme, SDK'sı aracılığı ile bilgisayardan uçuş komutu alabilme gibi avantajlara sahiptir

PID Uçuş Kontrolü Tasarımı

Oransal integral türev kontrolcüsü (Proportional Integral Derivative - PID) İHA'ların otonom olarak hareket etmesi için motorların kontrol edilmesinde kullanılmaktadır. Adından anlaşılacağı üzere oran, integral ve türev hesabı yapılarak motorlar için çıkış üretilir. Üretilen çıkış ile istenilen değer arasındaki fark hata olarak PID kontrolcüsüne tekrar verilerek tekrar çıkış hesaplanır. Söz konusu döngü hata sıfır olana kadar devam eder. Bir PID kontrolcüsünün yapısı Şekil 9'da görülmektedir.

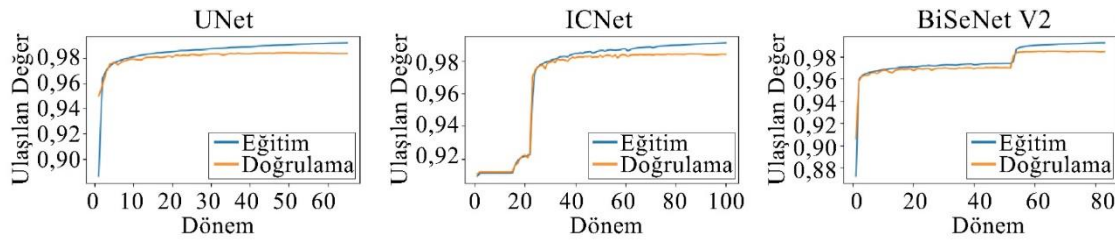


Şekil 9. PID Kontrol Sistemi

Şekil 9'da görüldüğü gibi PID sisteminde P, I ve D olmak üzere 3 ana bileşen mevcuttur. Sisteme t anında $r(t)$ referans değeri girer. Sistemin çıkış sinyali $y(t)$ bu referans değerden çıkarılarak hata $e(t)$ bulunur. Sistemin P bileşeninde $e(t)$, bir K_p katsayısı ile çarpılır. I bileşeninde bir K_i katsayısı, $e(t)$ 'nin integrali ile çarpılır. D bileşeninde ise K_d katsayısı $e(t)$ 'nin t 'ye göre alınan türevi ile çarpılmaktadır. Bu çarpımlardan elde edilen sonuçlar toplandığında $u(t)$ kontrol çıkışı ve buna bağlı sistem çıkış sinyali $y(t)$ bulunur. P bileşeni çıkışa sadece belirtilen katsayı ile mevcut hatanın çarpımı kadar etki eder. I bileşeni ise en baştan o ana kadarki tüm hataları integral işleminin doğası gereği hesaba katar ve belirlenen katsayı ölçüsünde çıkışa etki eder. D bileşeni gelecekteki hatayı yordamaya çalışır. Bunu yapabilmek için bir önceki hata ile o anki hatanın zamana göre türevini bulup belirlenen katsayı ile çarpılarak çıkışa etki eder (Bayati, 2019).

BULGULAR

Çalışmada NVIDIA RTX A5000 GPU donanımı kullanılmıştır. Ağlar Python TensorFlow ile hazırlanmıştır. Tablo 1'deki parametreler verilerek derlenip eğitilen ağların zar katsayılarının eğitim dönemine bağlı grafikleri Şekil 10'da görülmektedir.



Şekil 10. Seçilen Ağların Eğitim Grafikleri

Şekil 10'a göre UNet ile BiSeNet V2'nin daha ilk eğitim dönemlerinde yüksek segmentasyon doğruluğuna (zar katsayısı) ulaşabildikleri dikkat çekmektedir. Tablo 1'de ağların gereksiz dönem eğitimi sürdürmemesi için erken durdurma kullanıldığı görülmektedir. Ağların eğitim sonucunda Tablo 2'deki verilere ulaşılmıştır.

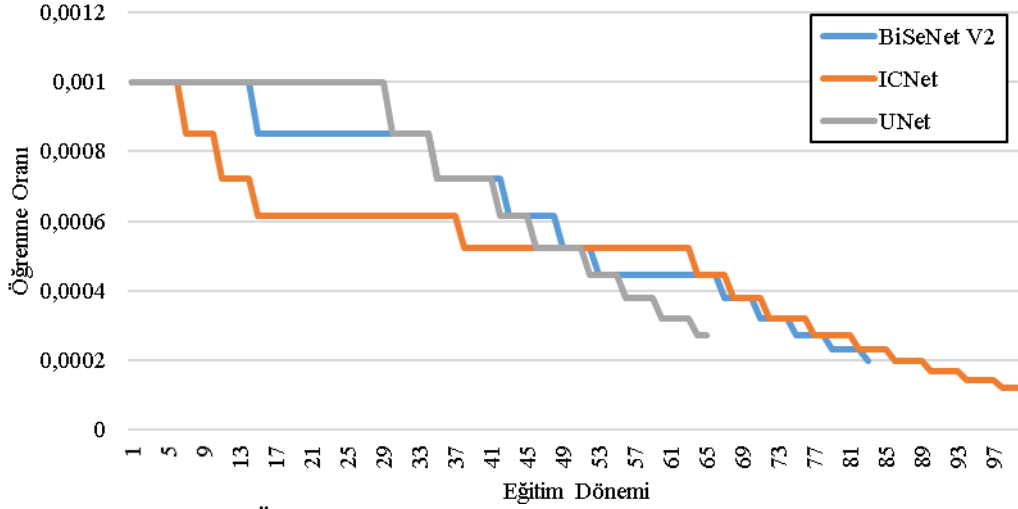
Tablo 2. Seçilen Ağların Eğitim Sürecine Dair Veriler

Elde edilen veriler	UNet	ICNet	BiSeNet V2
Segmentasyon doğruluk oranı (Zar katsayısı)	0,9837	0,9835	0,9843
Eğitim dönemi sayısı	65	100	83
Eğitilebilir parametre sayısı	1.944.083	6.713.353	3.087.675
Bir eğitim döneminin ortalama gerçekleşme süresi	280s	180,9s	378,3s

Tablo 2'ye göre tüm ağların segmentasyon başarısını ifade eden zar katsayısı sonuçları birbirine çok yakındır. En yüksek başarıyı %98,43 oranı ile BiSeNet V2 elde etmiştir. ICNet'in %98,35'lik segmentasyon başarısına ulaşmak için 100 dönem eğitim yaptığı görülmektedir. UNet ile BiSeNet V2'nin ise çok daha erken dönemlerde maksimum segmentasyon başarılarına ulaştığı dikkat çekmektedir. Ağların eğitilebilir parametre sayısına göre bir eğitim döneminin ortalama gerçekleşme süresi incelendiğinde ICNet'in 6 milyondan fazla eğitilebilir parametreyi sadece 180,9 saniyede tamamlayabildiği görülmektedir.

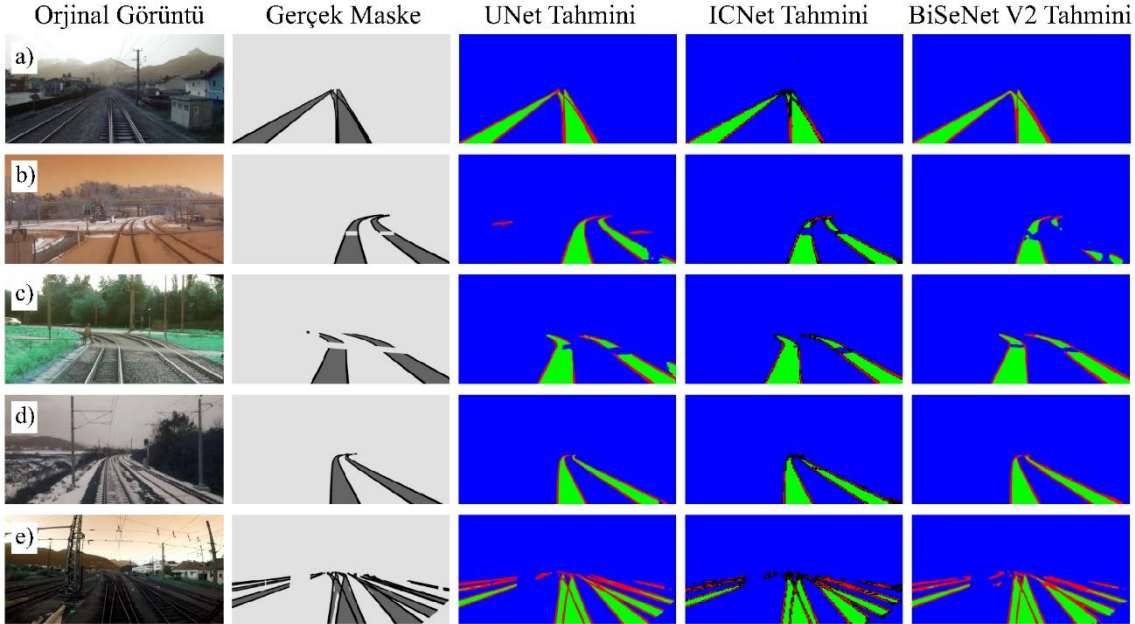
UNet'in parametre sayısının az olmasında her katman için belirlenen çekirdek sayılarının küçük seçilmiş olması etkili olmuştur. Şekil 4'teki orijinal mimaride her katmandaki kanal sayıları sırasıyla 64, 128, 256, 512, 1024 olarak görülmektedir. Orijinal mimariye göre model kullanıldığında eğitilebilir parametre sayısı 31.043.651 olduğundan dolayı donanım kaynakları yetersiz kalmıştır. Bu denklemler deneysel olarak en ideal sonucun alınabileceği çekirdek sayısı belirlenerek UNet'in katmanlarındaki görüntü kanalı sayıları 16, 32, 64, 128, 256'ya düşürülmüştür. Ağlardaki eğitilebilir parametre sayısı katmanlardaki çekirdek ve buna bağlı kanal sayıları dışında giriş görüntüsünün boyutuyla da ilgilidir. Bu çalışmada kullanılan giriş görüntüleri 3 kanallı 1024×512 piksel ölçülerindedir. Bunun anlamı 1024×512×3 adet (1.572.864) pikselin sayı değeri ağların girişinde işleme alınacaktır. Eğitilebilir parametre sayısının azaltılması için görüntü boyutlarının küçültülmesi denenebilir. Fakat bu durumda da görüntülerde veri kaybı olacak, ağlar ray konumunu öğrenmekte zorlanacaktır. Bu da deneysel olarak araştırmacının kullandığı donanım kaynaklarına göre belirlemesi gereken bir parametredir. Donanımsal gelişmelere paralel olarak araştırmacılar daha büyük görüntüleri ağına girişine verebilmektedirler.

Tablo 1’de öğrenme oranının eğitimde 4 dönem boyunca daha iyi bir sonuç alınmadığında 0,85 katsayısı ile çarpılarak küçültüldüğü belirtilmiştir. Buna göre seçilen ağların eğitim dönemleri boyunca öğrenme oranlarındaki değişimi gösteren grafik Şekil 11’de görülmektedir.



Şekil 11. Öğrenme Oranlarının Eğitim Dönemlerinde Değişimi

Şekil 11’e göre ICNet’in öğrenme oranı 13 kez, BiSeNet V2’nin öğrenme oranı 10 kez azalmıştır. Grafik dikkatli incelendiğinde aslında ICNet ile BiSeNet V2’nin 62-68. dönemlerden sonra kayda değer bir öğrenme gerçekleştiremedikleri için öğrenme oranının sürekli düşürülerek daha hassas öğrenme denemeleri yaptığı göze çarpmaktadır. UNet ise eğitimin daha ilk dönemlerinde çok süratli öğrenmiş, yaklaşık 50. dönemden sonra daha küçük öğrenme oranı ile daha hassas öğrenme denemeleri yapıp segmentasyon doğruluğunu artırmayı denemiştir. Şekil 12’de hazırlanan veri setindeki bazı test görüntüleri için ağların tahminleri görülmektedir.



Şekil 12. Seçilen Ağların Segmentasyon Tahminleri

Şekil 12’de görüldüğü gibi BiSeNet V2 ile UNet genel olarak daha iyi segmentasyon tahminleri ortaya çıkarmışlardır. Şekil 12-b’deki görüntüde ise ICNet’in daha başarılı olduğu görülmektedir. Dünyanın farklı yerlerinde, farklı mevsimlerde, günün farklı zamanlarında alınan görüntüler çeşitli zorluklar barındırmaktadır. Derin evrimsel sinir ağları ise mimarilerine göre görüntülerde istenileni öğrenme kabiliyetine sahiptirler. Şekil 12-b da görülen aydınlatma ve hava koşulları durumunda ICNet rayların görüntü üzerindeki konumunu daha iyi öğrenmiştir.

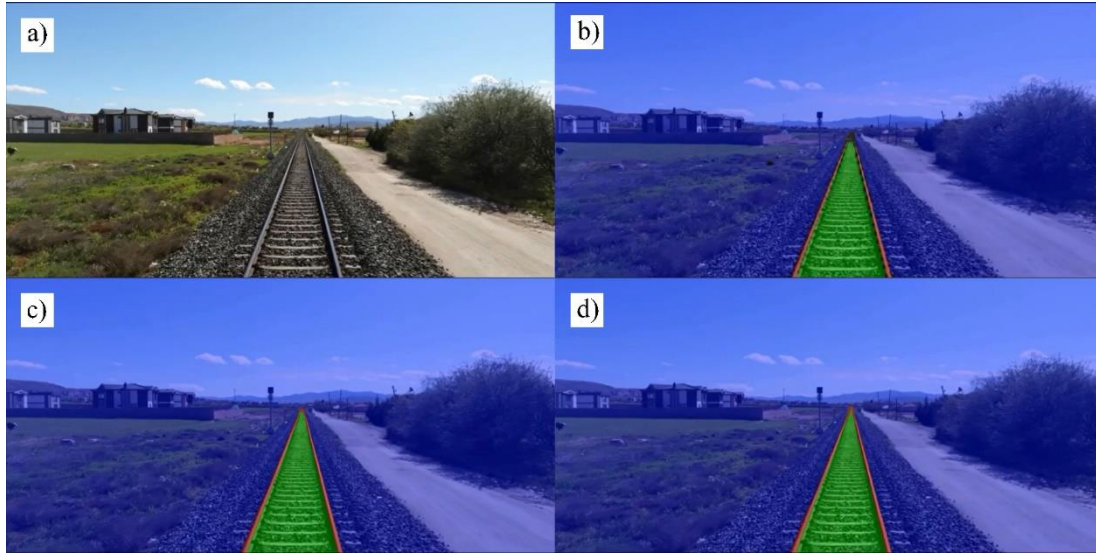
Katar ve Duman (2022) otonom demiryolu araçları için UNet'i Railsem19 veri setini özelleştirerek eğitmişlerdir. Söz konusu çalışmada her görüntü 256×256 piksellik parçalara ayrılarak UNet'e segmente ettirilmiştir. Çalışmada UNet'in gerçek zamanlı segmentasyon performansı belirtilmemiştir. Otonom araçlar ve İHA görevleri için ağların gerçek zamanlı segmentasyon başarıları büyük önem arz etmektedir. Bu nedenle çalışmamızda görüntüler dilimlenmemiş, gerçek zamanlı segmentasyon için UNet'in çekirdek sayısı azaltılmış, BiSeNet V2 ve ICNet ağı da kullanılarak karşılaştırmalar yapılmıştır.

İHA yardımı ile Elazığ merkezden geçen demiryolu üzerinde 3m yükseklikten sabit uçuş ile 5m/s yatay hız ve 30fps görüntü yakalama hızında alınan bir video için ağların segmentasyon hızları Tablo 3'te verilmiştir.

Tablo 3. Ağların Video Görüntülerindeki Segmentasyon Performansları

Karşılaştırılan Nitelik	UNet	ICNet	BiSeNet V2
Gerçek zamanlı segmentasyonu hızı	13 FPS	15 FPS	14 FPS

Tablo 3'e göre ICNet'in 1024×512 piksellik görüntülerde 15 FPS'ye kadar ulaştığı görülmektedir. Tablo 2'ye göre ICNet en fazla eğitilebilir parametreye sahipken gerçek zamanlı segmentasyon görevinde diğerlerine göre daha hızlı olduğu görülmüştür. Ağların Elazığ demiryolu videosu için segmentasyon sonuçları Şekil 13'te görülmektedir.



Şekil 13. Elazığ Demiryolu Görüntüsünün Anlamlandırılması **a.** Orijinal Görüntü **b.** ICNet Segmentasyonu **c.** BiSeNet V2 Segmentasyonu **d.** UNet Segmentasyonu

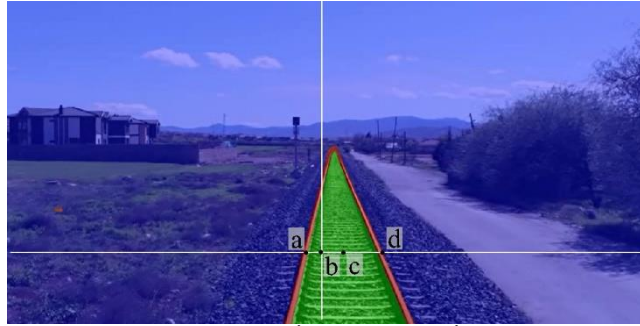
Şekil 13.a Elazığ demiryolu videosundaki anlık bir görüntüdür. Bu görüntü çalışmada seçilen ağlar tarafından segmente edilmiştir. Segmentasyon renkleri Şekil 10'dakine uygun olup, gerçek görüntü üzerine şeffaflaştırılarak bindirilmiştir. Çalışma videosuna YouTube linkinden ulaşılabilir (Kırat, 2023). Genel olarak ICNet daha stabil bir segmentasyon sağlamaktadır. BiSeNet V2 ile UNet ise ara sıra ray dışındaki çok küçük bölgeleri de ray varmış gibi segmente etmektedir. Paylaşılan video bağlantısından söz konusu durum gözlemlenebilir. Tablo 4'te bu çalışmadan elde edilen sonuçlar ile literatürdeki bazı çalışmaların sonuçları görülmektedir.

Tablo 4. Literatürdeki Çalışmalarla Karşılaştırma

Çalışma	Model	Giriş boyutu	Donanım	Segmentasyon Başarısı	FPS
(Yang vd., 2022a)	DFR Xception	640×480	-	0,8650	6,9
	DFR CSPDarkNet-S			0,8590	12,5
(Mammeri vd., 2021)	Rail UNet	832×832	RTX 2080 GPU	0,9594	25,85
(Yang vd., 2022b)	RT-GAN	720×560	Tesla V100 GPU	0,8807	34,66
(Tong vd., 2022)	FDRNet	1024×512	RTX 2060 GPU	0,5882	32,3
(Tong vd., 2023)	ARTNet	512×512	RTX 3090 GPU	0,7612	>50
(Wu vd., 2023)	YOLARC	520×520	RTX 3080 Ti GPU	-	35,9
	ICNet			0,9835	14,8
Çalışmamız	BiSeNet V2	1024×512	RTX A5000 GPU	0,9843	14,5
	UNet			0,9837	13,3

Tablo 12'ye göre gerçek zamanlı segmentasyon görevinde kullanılan evrişimli sinir ağı modeli, giriş görüntüsü boyutu, kullanılan donanım, segmentasyon başarısı ve saniyede işlenen kare sayısı (fps) değerleri görülmektedir. Özellikle giriş görüntü boyutunun büyümesi saniyede işlenen kare sayısını düşürmektedir. Aynı giriş görüntülerinde farklı fps değerleri model mimarilerine ve kullanılan donanıma göre de değişmektedir. Aynı giriş görüntüsündeki yüksek fps değerinde segmentasyon başarısının düşük olabildiği dikkat çekmektedir.

PID sistemine veri sağlamak için bir dizi görüntü işleme tekniği kullanmak gerekir. Ağlardan alınan segmente edilmiş görüntülerdeki renkler bu iş için kullanılmaktadır. Şekil 14'te İHA ile alınan video görüntüsündeki ICNet ağı çıktısındaki bir an için görüntü işleme adımlarının yapılacağı noktalar gösterilmektedir.



Şekil 14. PID Kontrolü İçin Görüntü İşleme Noktaları

Şekil 14'te görülen dikey beyaz çizgi 1024×512 ölçüsündeki giriş görüntüsünün yataydaki simetri merkezi olup soldan sağa 512. piksellerin bulunduğu sütundur. İHA'nın rayı ortalaması için bu çizgiye göre kendini ayarlaması gerekir. Yatay beyaz çizgi ise görüntünün yukarıdan aşağıya 412. sıradaki piksellerinden oluşan satırdır. Dikey eksenin simetri merkezi perspektif bakışa göre uzakta kaldığından daha yakın bir nokta olan 412. satır seçilmiştir. Bu referans satırı daha yukarıda seçmek, daha uzak bir noktayı seçmek anlamına geleceğinden İHA'nın çok hızlı ilerlemesine neden olabilir. Deneysel olarak bu satır uygun görülmüştür. a noktası kırmızı renkle segmente edilmiş sol ray ile yatay beyaz çizginin kesişimini, d noktası sağ ray ile yatay beyaz çizginin kesişimini ifade etmektedir. b noktası beyaz renkte belirlenen satır ve sütunun kesişim noktasıdır. c noktası ise a ve d noktasının tam ortasını ifade etmektedir. İHA'nın o anki konumu b noktasına göre olup, istenilen durum c ile b noktasını mümkün olduğunca çakışacak hale getirmektir. b ve c noktaları arasındaki fark ise hatadır. Şekil 14'e göre hesaplanacak hata sonucunda İHA'nın hafif sağa yönelerek c noktasını b noktasına bindirmesi gerekmektedir. c noktası Denklem 2 ile, hata ise Denklem 3 ile kolaylıkla hesaplanabilir.

$$c = a + (d - a)/2 \quad (2)$$

$$e(t) = 512 - c \quad (3)$$

Denklem. 2'de görülen 512 değeri, Denklem 1'de kullanılacak olan $r(t)$ referans değerdir. Denklem 2'deki c değeri ise Denklem 1'deki $y(t)$ 'ye karşılık gelmektedir. Buna göre İHA tarafından alınan video görüntüsünün her karesinde PID sistemi çalışarak hata hesaplanır ve İHA'ya gerekli hareketi yapması için komut gönderilir. Bu sayede İHA ray üzerinde otonom olarak ilerleyebilir.

SONUÇLAR

Demiryolu görüntüsündeki ray hatları, bakış perspektifine göre aşağıdan yukarıya daralan birer çizgi çifti olarak görülmektedir. Derin öğrenme alanında yapılan görüntü segmentasyonu görevlerinde donanım kaynaklarının sınırlı olması nedeni ile genelde giriş görüntüleri çok küçük boyutlara ölçeklenmektedir. Bu durumda görüntüde veri kaybı olmakta, ray hatları küçülen resimde incecik iki çizgi haline gelmektedir. Rayları otonom olarak takip edecek bir İHA'nın aynı anda ray yüzeyindeki kusurları da tespit edebilmesi için daha yüksek çözünürlükteki görüntülerin kullanılması önem taşımaktadır. Gelişen teknoloji ile donanım kaynakları gittikçe artmakta, görüntü alan cihazlar daha yüksek çözünürlükte görüntü alabilmekte, bilgisayarların GPU'ları daha büyük kapasitelere ulaşmaktadır. Evrişimsel sinir ağları ise esnek yapıları ile çok farklı mimarilerde tasarlanabilmektedir. Gerçek zamanlı segmentasyon görevlerinde daha yüksek görüntülerde daha iyi FPS değerlerine ulaşabilmek için araştırmacıların güçlenen donanımlar ile farklı evrişimsel sinir ağlarını denemeye devam etmeleri gerekmektedir.

Bu çalışmada demiryolu işletmelerinin ray kontrollerini İHA ile otonom yapabilmesi için gereken görüntü anlamlandırma görevi 3 farklı evrimsel sinir ağı ile denenmiştir. Railsem19 veri seti çalışmaya uygun biçimde yeniden düzenlenerek literatürde görüntü segmentasyonu görevinde kullanılan UNet, ICNet, BiSeNet V2 ağları eğitilmiş ve Elazığ demiryolundan İHA ile alınan gerçek görüntüler üzerinde denenmiştir. Çalışmada kullanılan ağlar veri setindeki test görüntülerinde %98 segmentasyon doğruluğuna, 1024×512 çözünürlüğüne sahip video görüntülerinin segmentasyonunda yaklaşık 15 fps değerine ulaşılmıştır. Ayrıca çalışmada otonom sürüş için bir PID sistemi önerilmiştir. Çalışma, görüntü anlamlandırma görevinin demiryollarında uygulanması açısından önem taşımakta, alternatif bir ray kontrolörü olarak İHA'ların işe koşulması ile otonom ray kontrolü açısından demiryolu işletmelerine katkı sağlamakta, bu alanda çalışacak araştırmacılara fikir vermektedir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma Fırat Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri tarafından ADEP.22.02 proje numarası ile desteklenmiştir.

KAYNAKLAR

- Anadolu Ajansı. (2023). Deprem tren raylarını tel gibi büktü. https://www.ntv.com.tr/galeri/turkiye/deprem-tren-raylarini-tel-gibi-buktu,j6Y22jcDNk2TPmVE6ZCoA/JUO5LUJ0SkyT_r2jLbTUWg Erişim: 17.04.2023.
- Aydın, I., Sevi, M., Sahbaz, K., & Karakose, M. (2021). Detection of Rail Defects with Deep Learning Controlled Autonomous UAV. *2021 International Conference on Data Analytics for Business and Industry, ICDABI 2021*, 500–504. <https://doi.org/10.1109/ICDABI53623.2021.9655796>
- Bayati, A. M. A. (2019). *Evrimsel Sinir Ağları Kullanarak Drone Tarafından Elde Edilen Görüntülerde Nesne Tanıma*. Yüksek Lisans Tezi. Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Bilgisayar Müh. A.B.D., Konya 72s.
- Bojarczak, P., & Lesiak, P. (2021). UAVs in rail damage image diagnostics supported by deep-learning networks. *Open Engineering*, *11*(1), 339–348. <https://doi.org/10.1515/eng-2021-0033>
- Çakmak, V., & Altaş, A. (2018). Sosyal Medya Etkileşiminde Tren Yolculukları: DOĞU EKSPRESİ İle İlgili Youtube Paylaşım Videolarının Analizi. *Journal of Tourism and Gastronomy Studies*, *6*(1), 390–408. <https://doi.org/10.21325/jotags.2018.194>
- Chakravarthy, A. S., Sinha, S., Narang, P., Mandal, M., Chamola, V., & Yu, F. R. (2022). DroneSegNet: Robust Aerial Semantic Segmentation for UAV-Based IoT Applications. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, *71*(4), 4277–4286. <https://doi.org/10.1109/TVT.2022.3144358>
- Chen, P., Wu, Y., Qin, Y., & Yang, H. (2022). All-in-One YOLO Architecture for safety Hazard Detection of Environment along High-Speed Railway. *2022 Global Reliability and Prognostics and Health Management (PHM-Yantai)*, 1–7. IEEE. <https://doi.org/10.1109/PHM-Yantai55411.2022.9941973>
- Grandio, J., Riveiro, B., Soilán, M., & Arias, P. (2022). Point cloud semantic segmentation of complex railway environments using deep learning. *Automation in Construction*, *141*. <https://doi.org/10.1016/J.AUTCON.2022.104425>
- Guclu, E., Aydın, I., & Akin, E. (2021). Development of Vision-Based Autonomous UAV for Railway Tracking. *2021 International Conference on Innovation and Intelligence for Informatics, Computing, and Technologies, 3ICT 2021*, 120–125. <https://doi.org/10.1109/3ICT53449.2021.9581919>
- Güçlü, E., Aydın, İ., & Akin, E. (2022). Mask R-CNN Algoritmasını Kullanarak Demiryolu Travers Eksikliklerinin Tespiti İçin Otonom İHA Tasarımı. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, *34*(1), 409–420. <https://doi.org/10.35234/fumbd.1039995>
- International Union of Railways. (2022). 8th UIC Refugee Task Force meeting held on 6 May 2022. <https://uic.org/com/enews/article/8th-uic-refugee-task-force-meeting-held-on-6-may-2022> Accessed: 10.05.2022.
- Katar, O., & Duman, E. (2022). Automated Semantic Segmentation for Autonomous Railway Vehicles. *TECHNICAL JOURNAL*, *16*, 484–490. <https://doi.org/10.31803/tg-20220329114254>
- Kırat, S. S. (2023). Elazığ Demiryolu Segmentasyonu. <https://youtu.be/piVTdsDPzfg> Erişim: 09.04.2023.
- Kupriyanovsky, V., Pokusaev, O., Klimov, A., Dobrynin, A., Lazutkina, V., & Potapov, I. (2020). BIM on the world's railways-development, examples, and standards. *International Journal of Open Information Technologies*, *8*(5), 57–80.

- Mammeri, A., Jabbar Siddiqui, A., & Zhao, Y. (2021). UAV-assisted Railway Track Segmentation based on Convolutional Neural Networks. *IEEE Vehicular Technology Conference, 2021-April*, 1–7. IEEE. <https://doi.org/10.1109/VTC2021-Spring51267.2021.9448887>
- Murat, S. (2021). *İnsansız Hava Aracı Görüntülerinden Derin Öğrenme ile Nesne Tanıma*. Yüksek Lisans Tezi. Maltepe Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Bilgisayar Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul 108.
- Ni, X., Liu, H., Ma, Z., Wang, C., & Liu, J. (2022). Detection for Rail Surface Defects via Partitioned Edge Feature. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 23(6), 5806–5822. <https://doi.org/10.1109/TITS.2021.3058635>
- Rahman, M. A., & Mammeri, A. (2021). Vegetation Detection in UAV Imagery for Railway Monitoring. *Proceedings of the 7th International Conference on Vehicle Technology and Intelligent Transport Systems*, 457–464. SCITEPRESS - Science and Technology Publications. <https://doi.org/10.5220/0010439904570464>
- Ronneberger, O., Fischer, P., & Brox, T. (2015). U-Net: Convolutional Networks for Biomedical Image Segmentation. İçinde N. Navab, J. Hornegger, W. M. Wells, & A. F. Frangi (Ed.), *Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention – MICCAI 2015*. Cham: Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-24574-4>
- Sevi, M., & Aydın, I. (2022). Rail Tracking and Detection with Drone in Gazebo Environment. *2022 International Conference on Decision Aid Sciences and Applications (DASA)*, 1450–1454. IEEE. <https://doi.org/10.1109/DASA54658.2022.9765014>
- T.C. Ulaştırma ve Altyapı Bakanlığı. (2023). 2053 Ulaştırma ve Lojistik Ana Planı <https://www.uab.gov.tr/uploads/pages/bakanlik-yayinlari/20221025-2053-ulasirma-ve-lojistik-ana-planı-tr.pdf>
Erişim: 05.04.2023.
- Tiu, E. (2019). Metrics to Evaluate your Semantic Segmentation Model. <https://towardsdatascience.com/metrics-to-evaluate-your-semantic-segmentation-model-6bcb99639aa2> Accessed: 17.01.2022
- Tong, L., Jia, L., Geng, Y., Liu, K., Qin, Y., & Wang, Z. (2023). Anchor-adaptive railway track detection from unmanned aerial vehicle images. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 1–19. <https://doi.org/10.1111/mice.13004>
- Tong, L., Wang, Z., Jia, L., Qin, Y., Wei, Y., Yang, H., & Geng, Y. (2022). Fully Decoupled Residual ConvNet for Real-Time Railway Scene Parsing of UAV Aerial Images. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 23(9), 14806–14819. <https://doi.org/10.1109/TITS.2021.3134318>
- Weng, Y., Li, Z., Huang, X., & Chen, X. (2023). *Improved DeepLabV3+ based Railway Track Extraction to Enhance Railway Transportation Safety*. https://doi.org/10.1007/978-981-99-0272-9_16
- Wu, Y., Meng, F., Qin, Y., Qian, Y., Xu, F., & Jia, L. (2023). UAV imagery based potential safety hazard evaluation for high-speed railroad using Real-time instance segmentation. *Advanced Engineering Informatics*, 55(May 2022), 101819. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2022.101819>
- Yang, H., Li, X., Guo, Y., & Jia, L. (2022a). Discretization–Filtering–Reconstruction: Railway Detection in Images for Navigation of Inspection UAV. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 71, 1–13. <https://doi.org/10.1109/TIM.2022.3220295>
- Yang, H., Li, X., Guo, Y., & Jia, L. (2022b). RT-GAN: GAN Based Architecture for Precise Segmentation of Railway Tracks. *Applied Sciences*, 12(23), 12044. <https://doi.org/10.3390/app122312044>
- Yu, C., Gao, C., Wang, J., Yu, G., Shen, C., & Sang, N. (2021). BiSeNet V2: Bilateral Network with Guided Aggregation for Real-Time Semantic Segmentation. *International Journal of Computer Vision*, 129(11), 3051–3068. <https://doi.org/10.1007/s11263-021-01515-2>
- Zendel, O., Murschitz, M., Zeilinger, M., Steininger, D., Abbasi, S., & Beleznaï, C. (2019). RailSem19: A Dataset for Semantic Rail Scene Understanding. *Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition Workshops*. Vienna: Austrian Institute of Technology.
- Zhao, H., Qi, X., Shen, X., Shi, J., & Jia, J. (2018). ICNet for Real-Time Semantic Segmentation on High-Resolution Images. İçinde *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)*: C. 11207 LNCS (ss. 418–434). https://doi.org/10.1007/978-3-030-01219-9_25



Kahramanmaraş Sütçü İmam University

Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 02.10.2023

Kabul Tarihi : 06.12.2023

Received Date : 02.10.2023

Accepted Date : 06.12.2023

ZAMAN SERİLERİ TAHMİNLEME ALGORİTMALARI İLE KONTÖR TÜKETİM TAHMİNLEMESİ VE KARŞILAŞTIRMALI UYGULAMASI

CREDIT CONSUMPTION ESTIMATION AND COMPARATIVE APPLICATION WITH TIME SERIES ESTIMATION ALGORITHMS

*Hakan AKÇAY*¹ (ORCID: 0000-0001-9004-8179)*Derya YILTAS-KAPLAN*^{1*} (ORCID: 0000-0001-8370-8941)¹ İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Derya YILTAS-KAPLAN, dyiltas@iuc.edu.tr

ÖZET

Dijital dönüşümün hızla yaygınlaşması ile işlenen verilerin boyutları ve hacimleri de artmıştır. Büyük verileri işlemek, doğruluğu yüksek analizleri kısa sürede ve daha az kaynak kullanarak yapmak için yeni yöntem ve algoritmalar geliştirilmiştir. Bu çalışmada makine öğrenmesi ve derin öğrenme tekniklerinden ARIMA (Oto regresif Entegre Hareketli Ortalama), SARIMA (Mevsimsel ARIMA), Prophet (Facebook), XGBoost (En Büyük Eğitim Artırma), LSTM (Uzun-Kısa Süreli Bellek), RNN (Yinelemeli Sinir Ağı) ve GRU (Geçitli Tekrarlayan Birim) algoritmaları kullanılarak tüketicilerin kontör tüketimleri zaman serileri yardımıyla tahmin edilmeye çalışılmıştır. Modelleri karşılaştırmak için MAE (Ortalama Mutlak Hata), MAPE (Ortalama Mutlak Yüzde Hata), RMSE (Kök Ortalama Kare Hata) ve Determinasyon Katsayısı (R^2) kullanılmıştır. Elde edilen ölçüm sonuçlarına göre zaman serileri tahminlemede derin öğrenme tekniklerinin makine öğrenmesi yöntemlerine göre daha iyi sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir. Çalışmada zaman serileri tahminlemesi üzerine dokuz farklı makine ve derin öğrenme yöntemi kullanılarak kapsamlı bir inceleme yapılmıştır. Literatürdeki benzer çalışmalar ile kıyaslandığında bu çalışmada konu oldukça geniş bir perspektiften incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: Derin öğrenme, gru, lstm, makine öğrenmesi, zaman serileri tahminleme

ABSTRACT

With the rapid spread of digital transformation, the sizes and volumes of the processed data have also increased. New methods and algorithms have been developed to process big data and perform high-accuracy analyzes in a short time and using less resources. In this study, by using machine learning and deep learning techniques such as ARIMA (Autoregressive Integrated Moving Average), SARIMA (Seasonal ARIMA), Prophet (Facebook), XGBoost (Extreme Gradient Boosting), LSTM (Long-Short Term Memory), RNN (Recurrent Neural Network) and GRU (Gated Recurrent Unit), it has been tried to estimate the credit consumption of consumers with the help of time series. Also, three hybrid models were implemented by using RNN, LSTM and GRU. MAE (Mean Absolute Error), MAPE (Mean Absolute Percentage Error), RMSE (Root Mean Squared Error) and Coefficient of Determination (R^2) were used to compare the model performances. According to the results, it has been observed that deep learning gives better results than machine learning. This study is a comprehensive review of time series forecasting using nine different machine and deep learning methods. Compared to similar studies in the literature, this study examined the subject from a very broad perspective.

Keywords: Deep learning, gru, lstm, machine learning, time series forecasting

GİRİŞ

Veri bilimcileri büyük ve karmaşık veri kümelerini analiz etmek, videolardan, seslerden, metinlerden veya resim verilerinden yararlanarak genellikle insanlardan daha hızlı çıktı üretmek için çeşitli yapay zekâ yöntemlerini ayrı ayrı veya birlikte kullanabilirler. Bu yöntemler arasında makine öğrenmesi ve derin öğrenme teknikleri önemli yer tutmaktadır. Verilerin boyutu ve hacmi arttıkça, günümüzdeki bilgisayarların maliyetleri ucuzladıkça ve veri işleme kapasiteleri arttıkça şirketler de perakende, sağlık, finans, üretim, lojistik gibi tüm sektörlerde yeni fırsatlar elde etmek, veriden değer üreterek rakiplerinin karşısında bir adım öne geçmek için yapay zekâ tekniklerini daha fazla kullanmakta ve bu alana yapılan yatırımlar gün geçtikçe artmaktadır. Makine öğrenmesi ve derin öğrenme, veri işleme ve analiz algoritmalarını kapsayan yapay zekânın alt çalışma alanlarındandır.

Zaman serileri verileri, makine öğrenmesi ve derin öğrenme algoritmalarının kullanıldığı ve tahminleme çalışmaları için uygun olan veri türlerindedir. Zamana göre belirli bir düzende sıralanan, periyodik zaman aralıkları boyunca dağılmış, eşit aralıklarla sıralanmış (saat, gün vb.) verilere zaman serileri verisi denir. Zaman serilerinde bilinmesi gereken bazı kavramlar vardır. Bunlar trend, mevsimsellik, döngüsel bileşen, durağanlık, fark alma, bağımlılık ve gürültüdür. Trend, serinin zaman içerisindeki artan veya azalan davranışını (eğilimini) gösterir. Trend eğilimi, artan, azalan veya durağan olabilir. Mevsimsellik, bir yıllık zaman aralığında tekrarlayan bir eğilim gösteren zaman serilerinde bulunur. Mevsimselliğe örnek olarak ısınma maliyetlerinin yazın düşerken kışın artması gösterilebilir. Hisse senedi fiyatlarındaki değişimler, artış ve düşüşler, ya da günlük yayımlanan döviz kuru oranları örnek olarak verilebilir. Döngüsel bileşenler ise mevsimsel bileşenler gibi belirli bir dönemde oluşurlar, ancak döngüsel bileşenlerin gerçekleştikleri dönemler sabit olmayan periyotlar şeklindedir. Durağanlık, serinin periyot boyunca artmadığını ve ortalama değerinin sabit kaldığını gösterir. Kısaca zaman içinde belirli bir değere doğru yaklaşan sabit ortalamaya, sabit otokorelasyon yapısına ve sabit varyansa sahip olan seriler durağan serilerdir. Zaman serileri genellikle durağan değildir ve bu nedenle durağan hale getirmek için veriler üzerinden fark alma işlemine ihtiyaç duyulabilir. Çünkü durağan olmayan bir seri, zamanla farklı örüntüler sergileyebilir. Bu durumda serinin davranışı diğer dönemlere genellenemez ve tahminleme başarısını olumsuz etkiler.

Bu çalışmada geçmiş yıllara ait müşteri kontör tüketim verileri üzerinde makine öğrenmesi ve derin öğrenme algoritmaları çalıştırılarak kontör tüketim tahminlemesi yapılmıştır. ARIMA (Oto-regresif Entegre Hareketli Ortalama), SARIMA (Mevsimsel ARIMA), Prophet (Facebook), XGBoost (En Büyük Eğitim Artırma), LSTM (Uzun-Kısa Süreli Bellek), RNN (Yinelemeli Sinir Ağı) ve GRU (Geçitli Tekrarlayan Birim) algoritmaları kullanılarak tahminleme yapılmış, makine öğrenmesi ile derin öğrenme algoritmaları kıyaslanarak performans karşılaştırmasının yapılması amaçlanmıştır.

Çalışmanın devamı şöyle tasarlanmıştır: Derin öğrenme ile ilgili genel bilgi verildikten sonra zaman serileri tahminleme ile ilgili mevcut literatür çalışmalarından örnekler anlatılmaktadır. Yöntem bölümünde bu çalışma içerisinde kullanılan algoritmalar, veri seti, yazılım ve donanım bilgileri yer almaktadır. Bulgular bölümünde çalışma sonuçları ve elde edilen karşılaştırmalı grafikler gösterilmiştir. Son olarak Sonuç bölümünde ise çalışmanın sonuçlarının etkileri analiz edilmektedir.

Kapsam ve Literatür İncelemesi

Veri bilimi, teknik analiz yöntemlerini ve veri algoritmalarını kullanan birden fazla disiplini içeren bir alandır (Al-Asadi, 2019). Depolama sistemlerinin hacmi arttıkça, fiyatları düştükçe ve bilgisayarlar kapasite olarak daha güçlü ve fiyat olarak daha ucuz oldukça, büyük hacimli veriler de daha kolay saklanabilir hale gelmiştir (Amazon, 2023). Endüstriyel sektörler, finans, üretim, perakende, sağlık, taşıma, teknoloji sektörlerindeki gibi şirketler yenilik yapmak, yeni fırsatları yakalamak ve rakiplerini geçmek için derin öğrenmeye ihtiyaç duymaya başladılar ve yatırımlarını bu alana da kaydırmaya başladılar. Bu nedenlerden dolayı derin öğrenmenin hem popülerliği arttı hem de kullanım alanları genişledi (Dinçoğlu, 2022). Derin öğrenme temelde kendi içinde katmanları olan insan beynine benzer çalışan Yapay Sinir Ağı (YSA) ve makine öğrenme ile ilgili algoritmaları kapsar. YSA kullanılarak akıllı sistemlerin mevcut verilerden farklı veriler elde etmesi sağlanır (Güdelek, 2019).

Tahminleme, geçmişe dayalı verilerin analiz edilerek gelecek hakkındaki eğilimlerini ve değişim olasılıklarını belirleyen öngörü tekniğidir. İşletmeler, teknoloji şirketleri, bankalar, reklam şirketleri, finansal kuruluşlar ve e-ticaret platformları gibi kurumlar satış hacimlerini arttırmak için satış tahminlemesi yaparlar. Satış dışında, müşteri artışlarını, üretim hacimlerini, bütçelerini planlamak için tahminleme yöntemlerini kullanırlar (Microsoft, 2023). Tahminleme metodu, yöneticilerin işlerinde doğru kararlar almasına ve tüm planlamalarını doğru verilere dayanarak yapmasına olanak sağlar. Tahminler, analitik veriler üzerinden kararlar almalarına yardımcı olur. Yöntemler ve

veriler, çok değişkendir (Yaşar, 2019). Tahminleme süreçleri şirketlerin gelecek planlamasını etkilemesi açısından çok kritik öneme sahiptir.

Zaman serileri birçok alanda görülebilen verilerdir. Sinyal işlemeden ekonometriye ve istatistikten matematiksel finansa kadar birçok alandaki periyodik veriler zaman serileri formatındadır. Zaman serileri zamana göre değişen verileri içerir ve belirli bir formatta ve düzendedir. Zaman serisi üzerinde yapılan tahminleme ise geçmişte bilinen veriler ve olaylar üzerinde analizler yaparak gelecekteki olayları ve verileri tahmin etmek demektir (Kaya vd., 2020; Baş, 2019).

Bu bölümde son birkaç yılda yapılmış literatür uygulamaları incelenmiştir. Çalışmalar kronolojik sıraya göre ele alınmıştır. 2017 yılında yapılan bu çalışmada (Yang vd., 2017) durağan olmayan zaman serileri üzerinde ARIMA modeli kullanılarak uçak motoru yağlama yağının metal içerik tahmini yapılmıştır. ARIMA ve üstel yumuşatma modelleri kullanılmış ve ARIMA modelinin daha başarılı tahminlemeler yaptığı gözlemlenmiştir.

Zaman serilerini kullanarak döviz kurlarını derin öğrenme yöntemi ile tahmin etmeye yönelik yapılan çalışmada RNN, LSTM, CNN (Evrişimsel Sinir Ağı-Convolutional Neural Network) ve ARIMA yöntemleri kullanılarak saat bazında ve günlük bazda veri içeren veri setlerindeki üç adet döviz çiftinin (USD/TRY, EUR/TRY ve EUR/USD) kapanış oranları tahmin edilmeye çalışılmıştır (Al-Asadi, 2019). Modelin performans değerleri ise Ortalama Mutlak Yüzde Hata (MAPE) ile ölçülerek değerlendirilmiştir. Çalışma sonuçlarına bakıldığında CNN tabanlı modellerin diğer modellere göre daha iyi sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir.

Endüstri 4.0 için derin öğrenme yaklaşımlarının incelendiği bir çalışmada (Güdelek, 2019) ise endüstriyel zaman serileri kullanılarak süreçlerin iyileştirilmesinin mümkün olup olmadığı araştırılmıştır. Derin öğrenme modellerinden LSTM kullanılmıştır. Modelin performansı ise Ortalama Mutlak Hata (MAE) hesaplanarak ölçülmüştür. Diğer çalışmalara kıyasla bu çalışmadaki modelin ortalama ve standart sapma değerlerinin daha yüksek çıktığı gözlemlenmiş ve modelin katmanlarında iyileştirme ihtiyacı olduğu belirtilmiştir (Güdelek, 2019).

Bir başka çalışmada LSTM modeli kullanılarak Çorum iline ait 1983 ile 2018 yılları arasındaki güneş ışınımı verileri üzerinde tahminleme yapılmıştır. Veriler zaman serileri formatındadır. Bu çalışmada gelecek ışınım oranı tahminleme yapılmaya çalışılmıştır (Kara, 2019). Önerilen model Gradyan Güçlendirme, Karar Ağaçları, K-En Yakın Komşu Algoritması ve Rastgele Orman Regresyonu gibi makine öğrenme algoritmaları ile kıyaslanmıştır. Sonuçlara bakıldığında LSTM modeli daha başarılıdır. Optimizasyon algoritması olarak Adam, epoch (eğitim tur) sayısı 150, veri işleme batch size (yığın boyutu) 32 olarak tercih edilmiştir. Performans karşılaştırması ise MAE, Kök Ortalama Kare Hata (RMSE) ve MAPE, Determinasyon Katsayısı (Coefficient of Determination, R^2) değerleri ile ölçülmüştür. LSTM tüm bu metrikler bazında daha iyi sonuçlar üretmiştir.

Derin öğrenme yöntemleri ile zaman serisi tahminlemesini içeren farklı bir doktora tezi çalışmasında ise finansal zaman verisi üzerinde tahminleme yapılmıştır (Gündüz, 2019). Çalışmada Borsa İstanbul verileri kullanılmıştır. Dolar, altın ve birleşiminden oluşan ilk yüz endeks içinde bulunan hisse fiyatlarından yararlanılmıştır. LSTM ve CNN modelleri klasik finansal tahminleme teknikleri ile kıyaslanmıştır. Bu çalışmada derin öğrenme modelleri borsa tahmininde iyi sonuçlar vermiş ve diğer öğrenme modellerine göre iyi bir alternatif olmuştur. LSTM ve CNN modelleri lineer regresyon ve Destek Vektör Makineleri'ne (SVM) göre üstünlük sağlamıştır.

Endüstri 4.0 çalışmaları kapsamında yapılan başka bir çalışmada ise derin öğrenme modellerinin zaman serileri üzerinde uygulanması gösterilmiştir. Çalışmada LSTM modeli için en uygun parametrelerin bulunması hedeflenmiştir (Baş, 2019).

Yine benzer olarak 2019 yılında yapılan farklı bir çalışmada ise zaman serileri analizi ve derin öğrenme modelleri kullanılarak döviz kuru tahminlemesi için hibrit bir model önerilmiştir (Yaşar, 2019). Çalışma kapsamında CNN, RNN ve LSTM gibi popüler derin öğrenme modelleri kullanılarak hem Twitter üzerinde duygu analizi hem de istatistiksel metotlar kullanılarak tarihsel veriler üzerinde tahminleme yapılmıştır. Tahminleme algoritmaları olarak Basit Üstel Yumuşatma, Holt-Winters ve ARIMA modelleri kullanılmıştır. Performans sonuçlarına göre duygu analizinde LSTM ve GloVe modeli ile hibrit olarak inşa edilen model en başarılı sonuçlara sahiptir. Kur tahminlemesinde ise Holt-Winters modeli en iyi sonucu vermiştir.

Zhejiang Üniversitesi tarafından yapılan bir çalışmada yine LSTM modeline stokastik bağlantı özelliği eklenerek LSTM'nin önemli hesaplama maliyetini azaltmayı hedefleyen hibrit bir model ortaya konmuştur. Değerlendirme sonuçlarına göre bu yeni model LSTM modeline göre daha başarılı sonuçlar vermiştir (Hua vd., 2019).

2020 yılında yaşanan Covid-19 pandemi dönemi öncesi ve pandemi sonrasında Bitcoin üzerindeki fiyat dalgalanmalarının makine öğrenmesine ek olarak derin öğrenme teknikleri ile değerlendirildiği bir diğer çalışmada ise yine zaman serileri verilerinden yararlanılmıştır (Kaya vd., 2020). Bu çalışmada Covid-19 öncesi ve pandeminin sonrasında Bitcoin kripto para birimi üzerindeki kapanış fiyatları ile düşme yükselme trendi dikkate alınarak iki adet veri seti oluşturulmuştur. Veriler üzerinde uygulanan tahminleme ile veri sınıflandırma yöntemleri karşılaştırılarak bunların başarıları değerlendirilmiştir. ARIMA, LSTM ve SVM modelleri ayrı ayrı çalışılmıştır. Tüm modellere ait F1 Skoru, doğruluk, Matthews Korelasyon Katsayısı (MCC), ARIMA modeli için RMSE ve MAPE ölçümleri de ele alınarak performans karşılaştırılması yapılmıştır. Sonuçlara göre SVM pandemi öncesi veriler üzerinde, ARIMA modeli ise pandemi sonrası veriler üzerinde daha başarılı sonuçlar vermiştir. SVM ortalama 1,72 saniyede, ARIMA 7,63 saniyede ve LSTM ise 14,86 saniyede tahminleme işlemlerini gerçekleştirmişlerdir.

Avrupa ülkelerindeki Covid-19 vakalarının tahmini ve karşılaştırmalı analizi çalışmasında (Kırbaş vd., 2020) ARIMA, NARNN (Lineer Olmayan Özbağlanımlı Sinir Ağı-Nonlinear Autoregressive Neural Network) ve LSTM yaklaşımları karşılaştırılmıştır. Performans sonuçlarına göre LSTM modeli diğer modellere göre daha başarılı sonuçlar vermiştir. Benzer şekilde Hindistan Jammu Üniversitesi Bilgisayar Mühendisliği Bölümü tarafından Hindistan ve Amerika Birleşik Devletleri Covid-19 vaka tahminlemesi üzerine bir çalışma yapılmış ve LSTM, Çift Yönlü LSTM de denilen BiLSTM ve RNN modelleri karşılaştırılmıştır. Çalışma sonuçlarına göre LSTM modelinin diğer modellere göre bir aylık periyot için daha başarılı sonuçlar verdiği görülmüştür (Shastri vd., 2020).

Altın fiyatlarının tahminlemede XGBoost, MARS ve lineer regresyon modellerinin kullanıldığı bir başka çalışmada ise elde edilen sonuçlara göre XGBoost %99,6 başarı oranı ile kestirim yaparken, MARS modeli için bu oran %97,8 olmuştur. Lineer regresyon için oran %94,3 olarak ölçülmüştür. Görüldüğü gibi XGBoost ve MARS modellerinin ikisi de lineer regresyon modeline göre daha iyi sonuçlar vermiştir. Diğer yandan XGBoost zaman yönünden diğer modellere göre daha kötü performans göstermiştir (Abar, 2020).

Bir başka çalışmada derin öğrenme ile zaman serileri tahminlemesi üzerine derinlemesine bir araştırma yapılmış, RNN, CNN ve LSTM ile olasılıksal yöntemler incelenmiştir (Lim & Zohren, 2021).

Elektrik talep tahmini yapılan bir çalışmada ise ARIMA ve XGBoost modeli karşılaştırılmıştır (Özdemir, 2021). ARIMA modelinin parametreleri ACF (Autocorrelation Function) ve PACF (Partial Autocorrelation Function) grafiklerinden faydalanılarak oluşturulmuştur. Modeller kıyaslandığında benzer sonuçlar verdikleri görülmektedir. Ancak XGBoost modelinin min, max, peak ve step parametreleri değiştirilerek istatistiksel modellere göre performansının kayda değer arttığı gözlemlenmiştir. MAPE değeri 0,10'dan 0,05'e gerilemiştir.

Farklı bir çalışmada ise LSTM modeli kullanılarak Bitcoin fiyat tahmini yapılmıştır (Tanışman vd., 2021). LSTM modeli istatistiksel model olan ARIMA modeli ile karşılaştırılmıştır. Sonuçlara göre ARIMA sadece yakın vadede başarılı tahminleme performansı sergilemiştir. Yakın ve uzun vadede gelecek tahminlemesi için kullanılan LSTM algoritması ise daha düşük hatalar ile tahminleme yapmıştır.

Fiber internet kullanan müşterilerin şikayetlerinin makine öğrenmesi teknikleri ile analiz edilerek müşteri memnuniyetinin araştırılması hedeflenen bir başka çalışmada ise Naive Bayes, Rastgele Orman, Karar Ağacı, XGBoost ve Lojistik Regresyon algoritmaları kullanılmıştır. Naive Bayes ve Lojistik Regresyon modellerinden oluşan hibrit modelin diğer modellere göre başarılı sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir (Kayaş, 2021).

Bir yüksek lisans tezinde Türkiye'de yaygın kullanılan operatörlerin birinden alınan mobil uygulama kullanıcı giriş sayısı verileri üzerinde modeller uygulanmış ve sonraki dönemler için kullanım tahmini yapılmaya çalışılmıştır (İnce, 2021). Çalışmada ARIMA, Naive metodu, üstel düzleştirme, basit düzleştirme yöntemleri, SVM ve YSA kullanılmıştır. Performans değerlendirmesi için MAE metriği ölçülmüştür. Deney sonuçlarına göre SVM modeli en başarılı model olarak gözlemlenmiştir. Sonrasında ise YSA yöntemi ikinci başarılı model olarak ölçülmüştür. Benzer şekilde Bitcoin, Ethereum, Ripple gibi kripto para tahminlemesi için LSTM ve Prophet modellerini kullanan bir çalışma da mevcuttur (İndulkar, 2021). Facebook tarafından geliştirilen otomatik makine öğrenmesi algoritması olan Prophet mevsim verileri üzerinde oldukça başarılı sonuçlar vermiştir. Modellerin performansları MAE metriği ile ölçülmüştür (İndulkar, 2021).

Bir başka çalışmada ise veri madenciliği ve makine öğrenmesi yöntemleri kullanılarak döviz kuru tahmini yapılmaya çalışılmıştır (Erbudak, 2022). Tahmine dayalı sınıflandırma ve regresyon modelleri çalışılmıştır. Çalışmada USD/TRY parite verileri TCMB'nin satış döviz kuru değerlerinden alınarak elde edilmiştir. Performans metrikleri olarak Kök Ortalama Kare (RMS), R-Kare, Ortalama Kare ve MAE ile ölçülmüştür. Karar Ağaçları ve SVM'nin en yüksek doğruluk ve tahmin oranlarını verdiği gözlemlenmiştir. Çalışmadan elde edilen sonuçlara bakıldığında döviz kuru ve sapmaları ile tahmini değerlerin öngörülmesinde krizlerin önemli bir gösterge olabileceği çıkarılmıştır.

Bir diğer çalışmada ise perakende sektöründe veri madenciliği yöntemleri ile satış tahminlemesi yapılmıştır (Dinçoğlu, 2022). Özel bir perakende firmasının 2018 ve 2019 yıllarına ait satış verileri kullanılarak çıkan tahmin sonuçları karşılaştırılmıştır. Çalışmada Regresyon ve ARIMA modelleri kullanılmış ve çıkan sonuçlara göre regresyon modelinin hata oranı ARIMA modeline göre daha az olmuştur. Ancak çalışmanın genelinde her iki modelin de yakın hata oranlarına sahip olduğu gözlemlenmiştir.

2022 yılında yapılan bir başka çalışmada ise makine öğrenmesi modellerinden ARIMA modeline ek olarak derin öğrenme algoritmaları çalışılmıştır. Bu çalışmada Covid-19'la bağlantılı Türkiye'deki vaka ile vefat sayıları tahmin edilmeye çalışılmıştır. LSTM, BiLSTM ve GRU (Geçitli Tekrarlayan Birim) modelleri ile makine öğrenmesi modellerinden ARIMA modeli tercih edilmiştir (Nusrat, 2022). Model performansları için RMSE ve MAPE değerleri hesaplanarak karşılaştırma yapılmıştır. Elde edilen sonuçların gerçeğe yakın olduğu görülmüştür. Derin öğrenme yöntemlerinde optimizasyon algoritması olarak Adam fonksiyonu tercih edilmiştir. Sigmoid fonksiyonu ise aktivasyon fonksiyonu olarak seçilmiştir. Performans sonuçlarına göre LSTM modeli, BiLSTM ve GRU modellerine göre daha başarılı sonuçlar vermiştir. Ayrıca en hızlı sonucu LSTM modelinin ürettiği görülmüştür. ARIMA modelinin ürettiği sonuçlar ise derin öğrenme yöntemleri ile kıyasla gerçeğe daha uygun çıkmıştır. Derin öğrenme hata oranları, ARIMA modeli hata oranlarından daha yüksek olmuştur.

(Ejder, 2022)'deki doktora tezinde ise zaman serileri için veri madenciliği tabanlı düzenlenmiş CNN geliştirilmiştir. Finansal veriler üzerinden tahminleme yapılmaya çalışılmıştır. YSA olarak CNN, zaman serilerinin gelecekteki hareketlerini tahmin etmek için Hareketli Ortalama (MA), DBMEA modelinin performansını arttırmak için CART (Classification And Regression Trees) ve GBM (Gradient Boosting Machines) algoritmaları sırası ile RFE (Recursive Feature Elimination) ve SFS (Sequential Feature Selection) ile nitelik seçimi modellenmiştir. Bu modelde finansal özelliklerin seçilmesi için tercih edilmiştir. Tüm özellikler birleştirilmiş ve 2 boyutlu görüntüler elde edilmiştir. Görüntülerin elde edilmesinin ardından veriler CNN ile sınıflandırılmıştır. Çalışmanın sonuçları oldukça başarılı olmuştur. Buna göre CNN-DBMEA algoritması literatürdeki diğer yöntemlere kıyasla daha iyi sonuçlar vermiştir.

2022 yılında güneş enerji santrallerindeki aylık elektrik üretiminin derin öğrenme ile tahminini yapan bir çalışmada ise LSTM modeli kullanılarak gelecekteki üretim miktarı tahmin edilmiştir. Çalışma sonucunda LSTM modeli ile büyük bir başarı elde edildiği görülmüştür. Epoch sayısı 100, batch size 70 alınarak verilerin eğitilmesi ile yapılan tahminlemelerin diğer epoch ve batch size değerlerine kıyasla çok daha başarılı olduğu görülmüştür (Çetin, 2022). Bir başka çalışmada da yine LSTM modeli kullanılarak ETH (Ethereum) fiyat tahminlemesi yapılmıştır. Kısa dönem tahminlemede ARIMA başarılı olurken uzun dönem tahminlemede LSTM daha başarılı sonuçlar vermiştir. ARIMA'nın kısa dönem başarı oranı %94,1 olurken uzun dönemde bu oran %78,84'e gerilemiştir (Wasee vd., 2022).

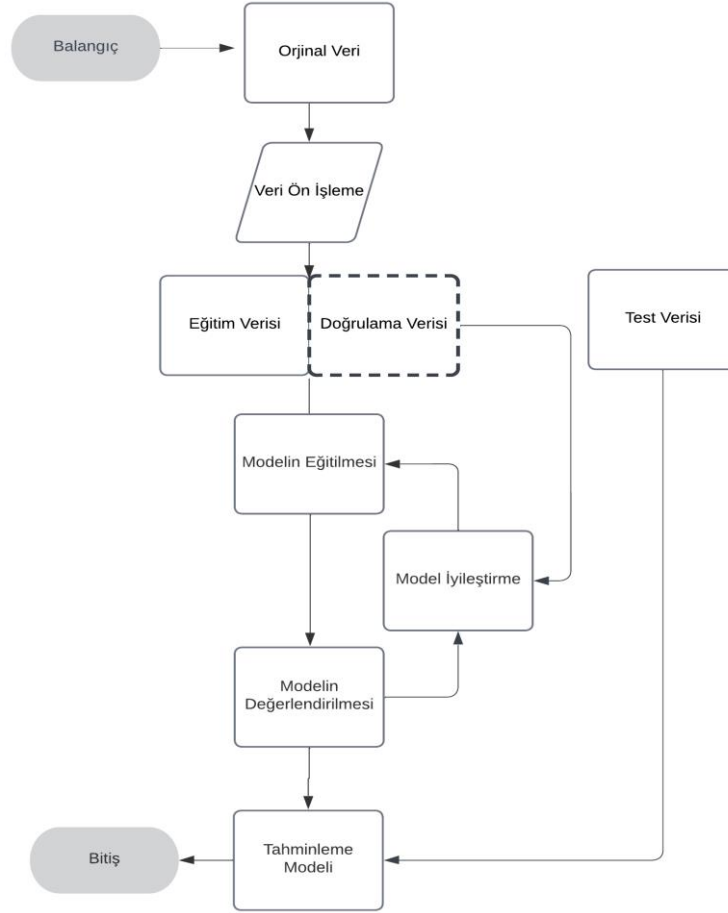
Bir diğer çalışmada LSTM ve ARIMA modelleri kullanılarak gümüş/ons paritesi üzerinde derin öğrenme ile finansal tahmin modellemesi geliştirilmiştir. MAE ve RMSE performans kriterleri kullanılarak ölçüm yapılmıştır. Sonuç olarak ARIMA algoritmasının LSTM algoritmasından daha iyi sonuçlar ürettiği görülmüştür (Üntez, 2022).

YÖNTEM

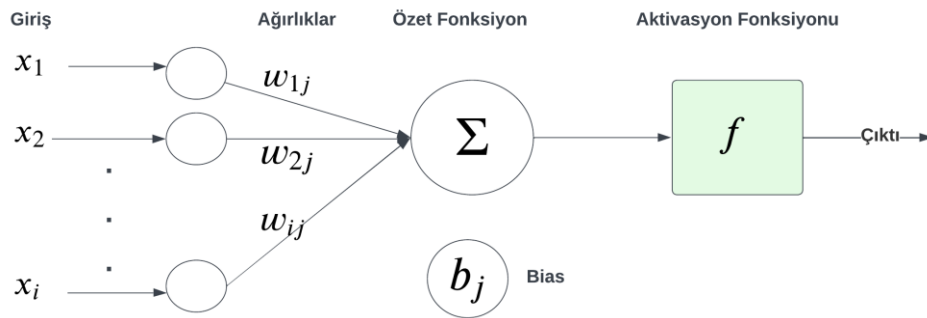
Makine öğrenmesi, bilgisayarların verileri analiz ederek insanlar gibi öğrenmelerini sağlayan bilim dalıdır. Makine öğrenmesi ve derin öğrenme için genel iş akış diyagramı (Güdelek, 2019) kaynağından yararlanarak Şekil 1'de gösterilmiştir. İş akışları, orijinal verinin okunması, veri ön işleme, eğitim ve test verisinin ayrılması, model oluşturma ve modelin eğitilmesi, modelin iyileştirilmesi ve son olarak modelin test verisi ile doğrulanması adımlarından oluşmaktadır.

YSA, insan beynini taklit eden ve öğrenme sürecine benzetilerek geliştirilmiş basit matematiksel modeller ile tanımlanan yapay zekâ yöntemlerindedir. Bu yapı, insan beynindeki sinir hücreleri gibi düşünülebilir. Sistem

girdileri ağırlıklandırılmış katsayılarla çarpılır ve ağırlıklandırılmış bir toplam oluşur. İşlem sonucunda sonuç bir eşik değer ile kıyaslanır. Sonuç eşik değerden büyükse sinir hücresi iletişime geçer, küçükse sinir hücresi bir iletim yapmaz. YSA'ların da çalışma modeli benzerdir. YSA'lardaki aktivasyon fonksiyonları sayesinde doğrusal olmayan ilişkilerin temsil edilmesi de sağlanabilmiştir (İnce, 2021). YSA mimarisi Şekil 2'de (Mohammedali, 2021) kaynağındaki gibi, yeniden çizilerek gösterilmiştir.



Şekil 1. Makine Öğrenmesi ve Derin Öğrenme Genel İş Akışı Diyagramı



Şekil 2. YSA Mimarisi

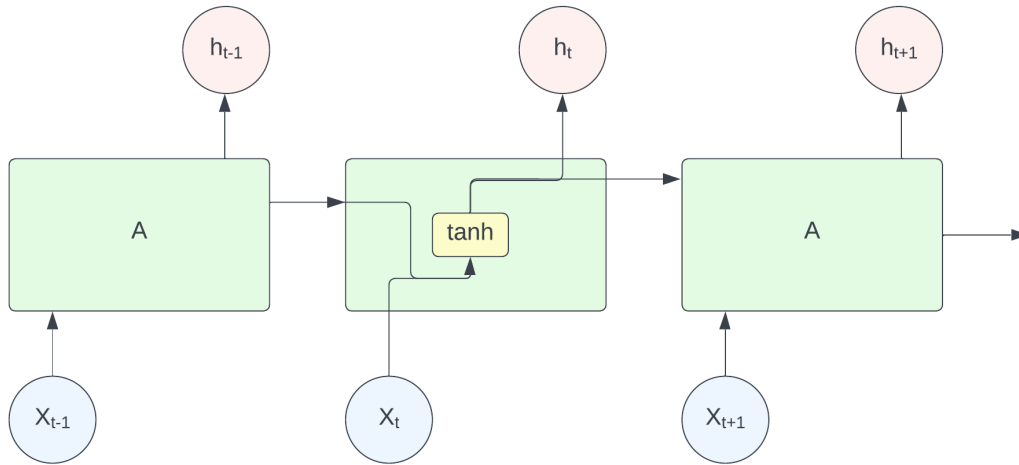
YSA, 5 farklı bileşenden oluşur. Bunlar sistem girdileri, düğüm ağırlıkları, toplama ve aktivasyon fonksiyonu ve çıktı düğümüdür. Birleştirme (özet) fonksiyonu, her X girdisini kendisine ait w ağırlığı ile çarpıp toplayarak çıkan değeri aktivasyon fonksiyonuna iletir. Aktivasyon fonksiyonu bu girdinin hücreye karşılık olarak vereceği çıktıyı hesaplar. Bu fonksiyon doğrusal değildir ve türevi kolay alınır. Özellikle türevi zor alınan aktivasyon fonksiyonlarının

kullanılmasının sistemi yavaşlattığı görülmüştür. Aktivasyon fonksiyonu olarak genellikle Sigmoid, tanjant hiperbolik fonksiyonu, eşik değer fonksiyonu ve sinüs fonksiyonu gibi fonksiyonlar tercih edilmektedir. Aktivasyon fonksiyonundan çıkan her değer o sinir hücresinin çıktısı olarak değerlendirilir (Günay, 2018). Sinir ağlarının katmanlarındaki nöronlar girdileri toplar, bir ağırlıklandırılmış bias değerini ekler ve çıktı üretir. Aktivasyon fonksiyonunun görevi, nöronun aktif veya pasif olup olmadığına karar vermektir. Aktivasyon fonksiyonu Step türünde ise sistem 1 çıktısı verdiğinde nöron aktif, 0 çıktısı verdiğinde pasif olmuş demektir (Güdelek, 2019).

Yinelemeli Sinir Ağları (Recurrent Neural Networks)

Bu ağlarda katmanlar sıralı şekilde çalışırlar. Bir sonraki katman bir önceki katmanın çıktılarını girdi olarak kullanır (Yaşar, 2019). RNN'nin geliştirilmesi 1980'li yıllarda David Rumelhart'ın çalışmalarına dayanmaktadır. Sıralı veriler üzerinde işlem yapma ve bunlardan içgörü elde etme yeteneği ile ön plana çıkan bir algoritmadır. Doğal dil işleme, video analizi, görüntü altyazıları gibi birçok alanda kullanılmaktadır (Üntez, 2022).

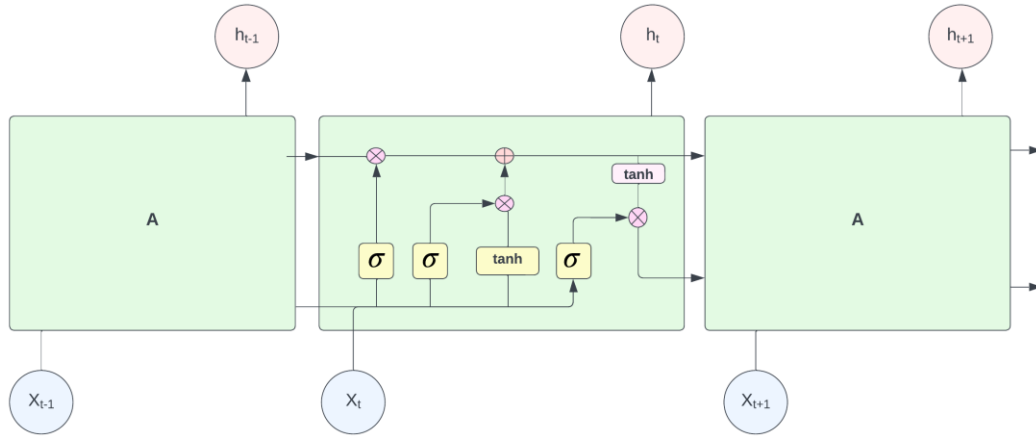
RNN algoritmasının çok popüler ve literatürde kaybolan gradyan problemi olarak geçen bir konusu vardır. Bu problem optimizasyon algoritmasının gradyan inişi ile kullanılması nedeniyle oluşur. Bağımlılıkların boşluklarının artmasına, gradyanların kaybolmasına ve ağırlıkların eğitilmesinin yavaşlamasına kadar giden bir süreci vardır. Hatta bu durumda ağırlıkların eğitilememesinden bile söz edilebilir (Mohammedali, 2021). RNN ağında tahminler katmanlardaki ağırlıklar ile ilişkilendirilerek oluşturulur. Tahminler ile gerçek değerler karşılaştırılır ve bir hata oranı hesaplaması yapılır. Hata payını düşürmek için bu işlem tekrarlanır. Bu nedenle yapıya tekrarlı sistem denmiştir. Hata payı 0'dan büyükse ağırlıklar değiştirilir ve model yeniden çalıştırılır. RNN temelde dört katmandan oluşur. Bunlar bir giriş, iki gizli katman ve bir çıkış katmanıdır (Şeker, 2017). RNN mimarisi (Güdelek, 2019) baz alınarak Şekil 3'te yeni bir gösterimle sunulmuştur.



Şekil 3. RNN Mimarisi

Uzun-Kısa Süreli Bellek (Long-Short Term Memory)

Sepp Hochreiter ve Jürgen Schmidhuber tarafından 1990'lı yıllarda geliştirilmiştir. Uzun vadeli bağımlılıkları öğrenebilme yeteneğine sahip özel bir RNN alt varyantlarından biridir. Bu nedenden dolayı zaman serisi verilerine dayanan tahminlerde oldukça performanslı çalışmaktadır (Çetin, 2022). Geleneksel RNN'lerden bu özelliği ile ayrılmaktadır. Uzun süreler boyunca ağırdaki bilginin hatırlanması işlemi LSTM modelinin en belirgin özelliğidir. LSTM bunu tek bir sinir ağı katmanı yerine birbirleri ile etkileşime giren dört katman kullanarak yerine getirir (Gündüz, 2019). Bir LSTM katmanı bir giriş kapısı, bir hücre durumu, bir unutmaya kapısı ve bir çıkış kapısından oluşmaktadır (Baş, 2019). LSTM mimarisi, (Hua vd., 2019)'daki modele benzer olarak Şekil 4'te gösterilmiştir.



Şekil 4. LSTM Genel Mimarisi

Unutma kapısının görevi verinin hücre katmanında ne kadar süre boyunca saklanacağını hesaplamaktır. Sigmoid fonksiyonu bu katmanda kullanılır ve 0-1 arasında normalize edilmiş bir sonuç üretir (Alpay, 2020). Giriş katmanının görevi ise verinin hücre durumundaki işlem süresini ayarlamaktır. Ayrıca bu katmanda yeni bilgiler de eklenebilir veya çıkarılabilir. Sigmoid fonksiyonu bu katmanda da kullanılmaktadır. Sonraki katmanda tanh fonksiyonu ile aday verilerin saklanması sağlanır ve bu katman ara katman olarak tanımlanır. Unutma kapısı, giriş katmanı ve tanh ara katmanı birleşerek hücre katmanını oluşturur. Hücre katmanı bir iletim hattı gibi çalışır ve anlamlı bilgileri hem hafızasında saklar hem de hat boyunca yer alan katmanlar arasında iletir. Bu özelliğinden dolayı LSTM algoritmasında kısa süreli bellek sorunu denilen sorun çözülmüş olur. Kapılardan gelen bilgiler hücre katmanının taşıyacağı formata dönüştürülür ve işlenir. Kapılar 0-1 arasında normalizasyon yapar ve bu işlem için sigmoid fonksiyonundan yararlanır. Aktivasyon işlemi sonunda değeri 0 olan bilgiler hafızadan silinirken, 1 olan bilgiler tutulmaya devam eder ve hat boyunca ilerler. Çıkış katmanı ise yine sigmoid fonksiyonu ile çalışır ve bilgileri filtreleyip nihai çıktıyı üretir (Kaya vd., 2020; Tanışman vd., 2021).

Otoregresif Entegre Hareketli Ortalama (ARIMA)

ARIMA algoritması 1970'li yıllarda Box ve Jenkins tarafından geliştirilmiştir. Başarı oranı özellikle kısa vadeler için ve durağan olmayan zaman serileri üzerinde yüksektir ve yaygın olarak kullanılır. ARIMA, AR (otoregresif), I (entegre) ve MA (hareketli ortalama) modüllerinden oluşur ve ARIMA(p,d,q) şeklinde formüle edilmiştir (Al-Asadi, 2019; Nusrat, 2022). AR modelinde önceki zaman adımları kullanılarak sonraki adımlar bu gözlemlerin bir türevi olarak modellenir. Tek değişkenli (univariate), trendi olmayan ve mevsimsellik özelliği göstermeyen zaman serileri için modellemeler yapmak için tercih edilir. Zaman serileri durağan değilse herhangi bir modelin gerçekleştirilmesi beklenmez ve tercih edilmez. Kısa bir tanımla artan veya azalan bir eğilimde olmayan ve mevsimsel değişkenlik göstermeyen zaman serileri durağan olarak nitelendirilir. Trend ve mevsimsellik, zaman serilerinin değerini etkilediği için veri kümesinde trend varsa, modeli oluşturmadan önce fark alarak ya da çıkararak trendi ortadan kaldırmak gerekir. AR modeli, önceki zaman dilimlerindeki gözlemleri kullanarak bir sonraki zaman dilimindeki değeri tahmin eder. Farklı periyotlardaki değerler arasında bir ilişki olabilir. Bu ilişkiye değişkenler arası korelasyon adı verilir ve pozitif ve negatif olmak üzere iki çeşittir. İlişki ters yönde değişiyorsa negatif korelasyona, aynı yönde değişiyorsa pozitif korelasyona işaretler. Korelasyonu hesaplamak için istatistik tabanlı metrikler kullanılır. AR (p) notasyonu aşağıdaki Denklem (1) ile ifade edilir.

$$X_t = c + \sum_{i=1}^p \varphi_i X_{t-i} + \varepsilon_t \quad (1)$$

Denklem (1)'deki c sabit katsayıdır. Zaman serisi X_t ile ve zaman serisinin tamsayı indeksi de t ifadesi ile gösterilir. AR modelinin parametre değerleri φ_i ile gösterilir. P, modelin gecikme sayısının, ε_t ise ortalaması sıfır olan sabit varyanslı hata teriminin ifadesidir. MA modeline yuvarlanan veya hareketli ortalama denir. Veri analizinde kullanmak için varsa farklı alt kümeler diğer kümelerin ortalama hesabını yapar (Kaya vd., 2020).

$$X_t = \mu + \varepsilon_t \sum_{i=1}^q \theta_i \varepsilon_{t-i} \quad (2)$$

Denklem (2)'deki μ , modeldeki serinin ortalamasını gösterir. Hareketli ortalamasının değeri θ_i , ortalamasının sırası ise q ile ifade edilir. X_t zaman serisini belirtir. Hata terimleri de ε_t ve ε_{t-i} ile gösterilir (Kaya vd., 2020). ARMA, hem

önceki adımlardan bir sonraki adımı doğrusal olarak modeller hem de AR ile MA modellerini birleştirir. Bunun yanı sıra ön işleme adımını birleştirerek diziyi durağan hale getirir. Bu işleme entegrasyon (I) adı verilir ve aşağıdaki Denklem (3) gibi formüle edilir (Kaya vd., 2020).

$$X_t = \frac{\left(1 + \sum_{i=1}^p \theta_i L^i\right) \varepsilon_t}{\left(1 - \sum_{i=1}^p \theta_i L^i\right) (1-L)^d} \quad (3)$$

Denklem (3)'teki gecikme operatörü L ile ifade edilmiştir. Otoregresif modelin parametre değeri θ ifadesi, hareketli ortalama modelinin parametre değerleri ise θ_i ile gösterilmiştir. Benzer şekilde X_t zaman serisini belirtir. Hata terimleri de ε_t ile gösterilir (Kaya vd., 2020). ARIMA (p,d,q) modeli giriş parametreleri olarak üç bağımsız değişken alır. Buna göre p gecikme sayısını, d farklılaşma derecesini, q ise hareketli ortalama "window size (pencere boyutu)" değerini ifade etmektedir. p ve q parametrelerini belirlemek için birden fazla yöntem vardır. Ancak öncesinde zaman serisinin durağan hale getirilmesi gerekir. Bu durumda d=1 değerini alır. Bu yöntemlerden birisi otokorelasyon fonksiyonu ve kısmi korelasyon fonksiyonu grafiklerini yorumlamaktır. Grafikler incelenerek AR ve MA sayıları belirlenir. Ek olarak bu grafikler trend ve mevsimsellik hakkında da fikir verebilir. ACF bir serideki otomatik korelasyon değerlerini gösterir. Geçmişteki değerler ile günümüzdeki değerler arasında nasıl bir ilişki olduğunu belirlemesi yönünden önemlidir. ACF trend, mevsimsellik, gürültü gibi bileşenleri analiz eder ve bu nedenle tam otomatik korelasyon grafiği olarak adlandırılır. Durağan olmayan zaman serilerinde bu grafiğin zaman içerisinde düşüş eğiliminde olduğu görülür. PACF ise kısmi otomatik korelasyon grafiği olarak adlandırılır. İki nokta arasındaki zaman içerisinde değişen korelasyonu dikkate alır. AR modelinin optimal terim sayısını belirlemek için kullanılır. Terim sayısı aynı zamanda modelin sırasını belirleyen parametredir. PACF, AR modelini en iyi tanımlayan fonksiyonlardandır. SARIMA modeli ARIMA modeline mevsimsellik parametrelerinin eklenmiş türevidir. ARIMA ile benzer şekilde çalışır. Geçmişteki verileri inceler ve gelecekteki verileri doğrusal bir fonksiyon kullanarak modeller. ARIMA modelinin gerçekleştirdiği tüm işlemleri serinin mevsimsellik özelliğini de ekleyerek gerçekleştirir.

Prophet

Prophet mevsimselliği kullanarak günlük, haftalık, aylık ve yıllık bazda verileri tahmin etmeyi sağlayan otomatik bir makine öğrenimi paketidir. Meta (Facebook) şirketi tarafından geliştirilmiştir (Indulkar, 2021). Doğrusal olmayan eğilimlerin yıllık, haftalık ve günlük mevsimsellik dışında tatil etkileri ile uyumlu olduğu bir toplama modeline dayalı zaman serisi verilerini tahmin etme modelidir. Prophet, eksik verilere ve trenddeki değişimlere karşı dirençlidir ve tipik olarak aykırı değerleri kendi içinde iyi yönetir (Facebook, 2023). Prophet, güvenilir tahminler ürettiği, diğer tüm yaklaşımlardan daha iyi performans gösterdiği ve saniyeler içinde tahminleme yapabildiği için Meta'daki birçok uygulamada kullanılmaktadır. Denklem (4) ile ifade edilir. Denklem (4)'te $y(t)$ eklemeli regresif model, $g(t)$ trend faktörü, $h(t)$ tatil bileşeni, $s(t)$ sezonsallık bileşeni ve e_t ise hata terimi olarak tanımlanmıştır (Indulkar, 2021).

$$y(t) = g(t) + h(t) + s(t) + e_t \quad (4)$$

Bu model tatillerin etkisini değerlendirmemizi sağlar. Tatiller, bir zaman serisi üzerinde net bir etkiye sahip olabilecek düzensiz olaylardır. Örneğin, Amerika Birleşik Devletleri'ndeki Kara Cuma, Sevgililer Günü gibi etkinlikler, mağazalara katılımı veya bir e-ticaret web sitesindeki satışları önemli ölçüde artırabilir. Bu nedenle, bir zaman serisinde tatillerin etkisini modellemek için Prophet belirli bir ülke için bir tatil listesi tanımlamamıza izin verir. Daha sonra tatil etkileri, hepsinin bağımsız olduğu varsayılarak modele dâhil edilir. Bir veri noktası bir tatil tarihine denk gelirse, o zaman noktasındaki serideki değişikliği temsil etmek için bir parametre hesaplanır. Değişim ne kadar büyük olursa, tatil etkisi o kadar büyük olur (Peixeiro, 2022).

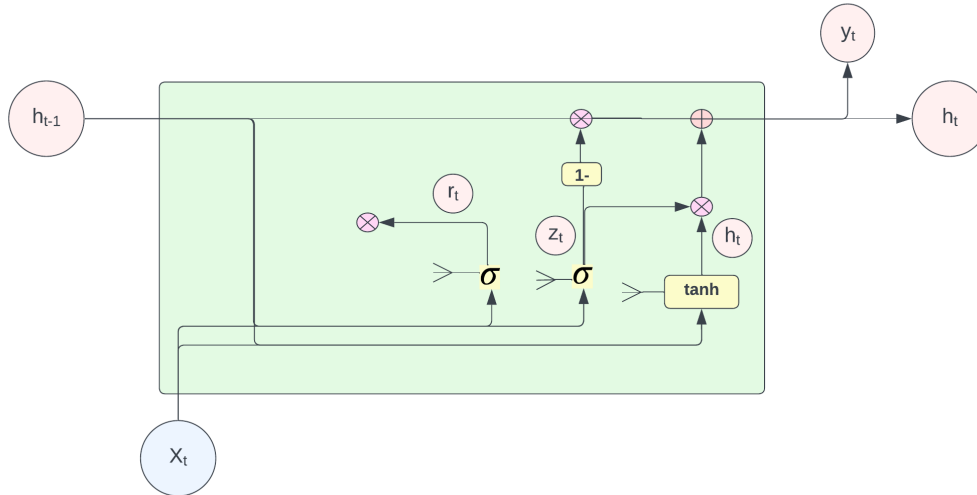
Ekstrem Gradyan Yükseltme (Extreme Gradient Boosting)

Friedman tarafından 2001 yılında geliştirilmiş sınıflandırma ve regresyon ağacına dayanan gradyan yükseltme temelli bir yöntemdir. Ancak XGBoost aşırı öğrenmeden kaçınmak için daha düzenli bir model biçimlendirmesi kullanır ve bu nedenle daha iyi performans gösterir. Performansı ve hızlı uygulanabilmesi nedeniyle son yılların en başarılı yöntemlerinden birisi olarak kabul edilir (Abar, 2020; Özdemir, 2021). Rastgele Orman algoritmasından farklı olarak burada torbalama (bagging) değil, yükseltme (boosting) kullanılmaktadır. Boosting yönteminde eğiticiler sıralı şekilde kullanılarak hatalardan ders alarak bir öğrenme ve ilerleme söz konusudur. XGBoosting algoritması, Gradient Boosting algoritmasından türemiştir ve daha hızlı, doğru ve paralel çalışabilen bir mimariye sahiptir (Kayış, 2021).

Geçitli Tekrarlayan Birim (Gated Recurrent Unit)

GRU, belirli durumlarda LSTM modeline göre avantajları olan bir RNN türüdür. GRU, daha az kapı ve bellek kullanır ve LSTM algoritmasına göre daha hızlıdır. Ancak LSTM daha uzun dizilere sahip veri kümeleri kullanıldığında daha doğru sonuçlar üretir. LSTM algoritmasının aksine üç kapı kullanır. Bunlar Güncelleme Geçidi, Sıfırlama Kapısı ve Mevcut Bellek Getirileridir. GRU, unutmaya kapısı olan bir LSTM gibidir. Ancak bir çıkış kapısı olmadığı için LSTM modeline göre daha az parametreye sahiptir. 2014 yılında Kyunghyun Cho tarafından tanıtılmıştır (Mohammedali, 2021).

GRU, tekrarlayan sinir ağlarının yaşadığı kaybolan gradyan problemini (ağ ağırlıklarının güncellemek için kullanılan değerler) ele alır. Derecelendirme, geri yayıldığında zamanla küçülürse öğrenmeyi etkilemek için çok küçük kalabilir ve böylece sinir ağını eğitilemez hale getirebilir. Bir sinir ağındaki katman öğrenemezse RNN'ler esasen daha uzun dizileri unutulabilir. GRU modeli bu sorunu, güncelleme kapısı ve sıfırlama kapısı olmak üzere iki kapı kullanarak çözer. Bu kapılar, çıktıda hangi bilgilere izin verildiğine karar verir ve daha geriden gelen bilgileri tutmak için eğitilebilir. Bu, daha iyi tahminler yapmak için ilgili bilgileri bir olaylar zincirinden geçirmeye olanak tanır. Güncelleme Kapısı, geçmiş bilginin ne kadarının geleceğe aktarılması gerektiğini belirler. Bir LSTM tekrarlayan modelindeki Çıkış Kapısına benzer. Sıfırlama Kapısı, geçmiş bilgilerin ne kadarının unutulacağını belirler. Bir LSTM tekrarlayan birimindeki Giriş Kapısı ve Unut Kapısının kombinasyonuna benzer. Geçerli Bellek Kapısı ise Giriş Kapısının bir alt parçası olması ve girişe bir miktar doğrusal olmayan bilgi katmak, ayrıca girişi sıfır-ortalama yapmak için kullanılması nedeniyle Sıfırlama Kapısına dâhil edilmiştir. Bunu Sıfırlama geçidinin bir alt parçası yapmanın bir başka nedeni de önceki bilgilerin geleceğe aktarılmakta olan mevcut bilgiler üzerindeki etkisini azaltmaktır (Mohammedali, 2021). GRU mimarisi (Nusrat, 2022)'deki gibi çizilerek Şekil 5'te gösterilmiştir.



Şekil 5. GRU Genel Mimarisi

Zaman Serileri (Time Series)

Zaman serileri verileri, finanstan teknolojiye, sağlıktan hava durumuna kadar birbirinden farklı alanlara ait farklı ve düzenli zaman periyotlarına göre dağılım gösteren veri türleridir. Kaydedilen verilerin frekansı saat, gün, ay ya da yıl gibi değişen periyotlarda olabilir. Veriler zamana göre sıralı olduğu için aralarında zaman bağı ilişkiler oluşur. Özellikle birbirine komşu olan değerler arasında korelasyon oluşabilir. Tek değişken içeren ve çok değişken içeren seriler olmak üzere ikiye ayrılır. Tek değişkenli serilerde zamana göre değişen tek bir değişken ve bir bağımsız değişken varken çok değişkenin olduğu serilerde ise zamana bağlı yine bir değişken vardır, ancak bağımsız değişkenlerin sayısı 1'den fazladır (Güdelek, 2019). Zaman serilerinde durağanlığı tespit etmek için çeşitli yöntemler vardır. En yaygın kullanılanları ADF (Genişletilmiş Dickey Fuller Testi), Phillips-Perron, KPSS (Kwiatkowski-Phillips-Schmidt-Shin) Birim Kök Testi ve Korelogram grafiğidir (Özdemir, 2021).

ADF, sıfır ve alternatif hipotez içeren birim kök testidir. Sıfır hipotezi, birim kök içerir ve serinin durağan dışı olduğunu kabul eder. Alternatif hipotez ise serinin durağan olduğunu kabul eder ve birim kök içermez. Birim kök test örneklerinden biri Phillips-Perron yöntemidir. Bu yöntemin ADF'den farkı, t-test istatistiğine parametrik olmayan bir düzeltme yapmasıdır. Böylece otokorelasyonlar ve değişen varyans durumlarında elde ettiği sonuçlar daha düzgün olmaktadır. Serilerin durağanlık tespitinde sıklıkla kullanılan bir başka yöntem de KPSS testidir. Buradaki sıfır ve alternatif hipotez, ADF testinin tersidir. ADF testinde birim kök bulunmazsa ve KPSS testinde

bulunursa, seri fark-durağandır demektir ve yine de fark alınması gerekir. Bu testlerden biri bile birim kök bulursa seri durağandır denilemez. ACF ve PACF grafiğine bakarak da durağanlık tespiti yapılabilir. Durağan olmayan bir zaman serisinde ACF grafiğinin yavaşça düştüğü gözlemlenir. Bağımlılık aynı değişkenin önceki zaman dilimleri ile olan ilişkisini ifade eder. Gürültü (düzensiz bileşen) ise model tarafından tanımlanamayan veya açıklanamayan değişkenlere denir (Güdelek, 2019).

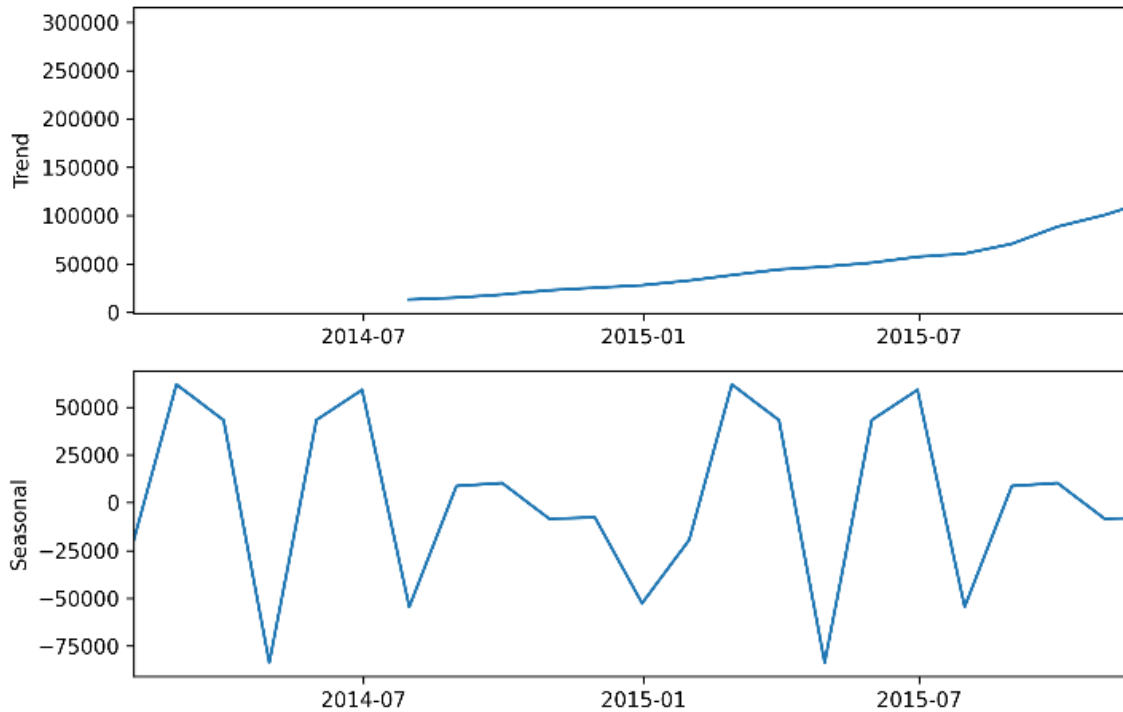
Zaman serileri tahmini ise geçmiş verilere dayanarak bir serinin gelecekteki olası değerlerini tahmin etmek için istatistiksel bir model oluşturma ve tahmin etme sürecidir. Eskiden zaman serileriyle ilgili problemlerin çözümünde lineer istatistiksel yöntemler kullanılırdı. Günümüzde ise verinin boyutu ve niteliği arttıkça lineer istatistiksel yöntemler yetersiz gelmeye başladı. Bu nedenle hem verideki özneliklerin belirlenmesinde hem de verilerin karmaşıklıklarının analiz edilmesinde aradaki lineer olmayan ilişkileri öğrenme kabiliyetine sahip derin YSA'lar sıklıkla kullanılmaya başlanmıştır (Kara, 2019).

Zaman serileri tahminlemesi istatistik, ekonometri, matematiksel finans, deprem tahmini, hava tahmini, desen tanıma, sinyal işleme gibi birçok alanda kullanılabilir. Zaman serilerindeki unsurların toplamından oluşan "toplam modeli" ve çarpımlarından oluşan "çarpım modeli" olmak üzere iki temel model vardır. Bu modeller zaman serilerinde aşağıda gösterilen Denklem (5) ve Denklem (6) ile ifade edilirler. T_t trend, S_t sezonsallık, C_t periyodik, R_t artık parçalar demektir (Can, 2009).

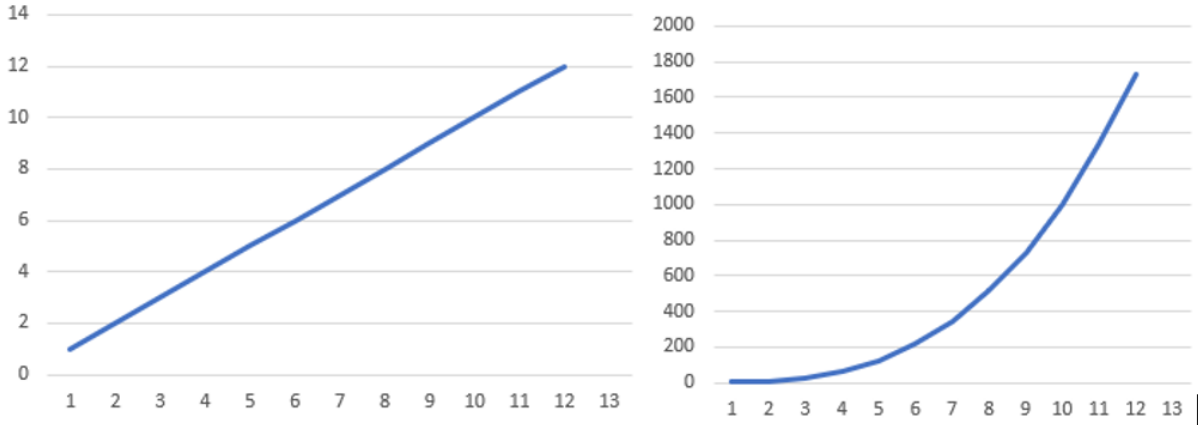
$$U_t = T_t + S_t + C_t + R_t \quad (5)$$

$$U_t = T_t \times S_t \times C_t \times R_t \quad (6)$$

Zaman serilerinde trend analizi oldukça önemlidir. Trend analizi uzun dönemlere ait verilerin analizinde kullanılır. Verinin artma, azalma ve durağanlık eğiliminde olup olmadığının tespitinin yapılması için kullanılan istatistiksel yöntemdir. Şekil 6'da trend analizi gösterilmiştir. Zaman serileri doğrusal veya doğrusal olmayan bir trend eğiliminde olabilirler (Oracle, 2023). Doğrusal trende sahip olan zaman serilerinde, eğilimi belirleyen hareket düz bir doğru şeklindedir. Doğrusal olmayan trende sahip zaman serilerinde ise eğilimi belirleyen hareket, matematiksel eğriler şeklindedir. Trend eğilimleri Şekil 7'deki gibidir (Can, 2009).



Şekil 6. Zaman Serileri Özellikleri



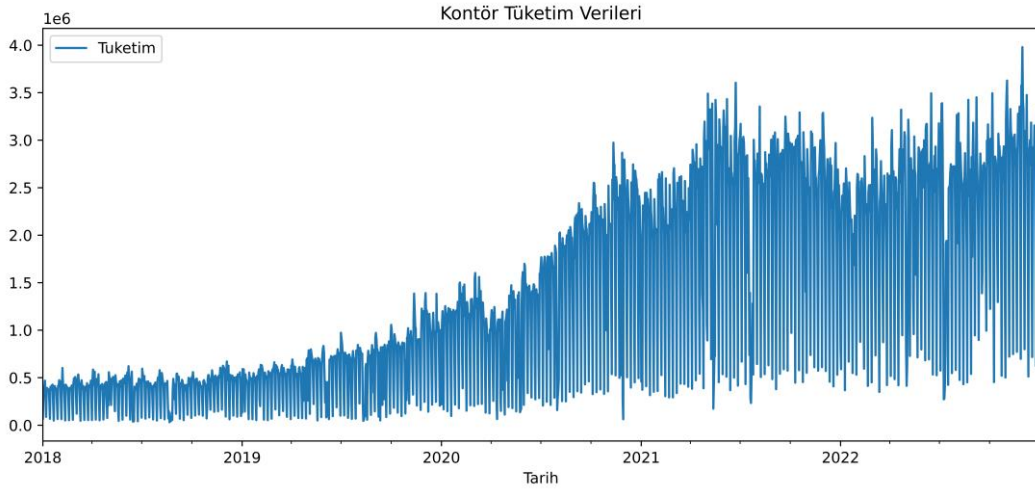
Şekil 7. Doğrusal ve Doğrusal Olmayan Trend

Bu çalışmada geliştirme ortamı (IDE) olarak Jupyter Notebook 6.5.2 ve Spyder 5.4.2 sürümü kullanılmıştır. Tüm modellerin geliştirmeleri, Python programlama dili ve Python 3.10.9 çekirdek (Kernel) sürümü kullanılarak yapılmıştır. ARIMA ve SARIMA modellerini kodlamak için Python paketlerinden “statsmodel.tsa”, Prophet için “prophet”, XGBoost için “xgboost”, RNN ve LSTM modelleri için ise “tensorflow” ve “keras” kütüphaneleri kullanılmıştır. Matematiksel işlemler, matris ve dizi işlemleri için “pandas” ve “numpy”, grafik ve görselleştirme için ise “matplotlib” ve “statsmodels.graphics” kütüphanelerinden yararlanılmıştır. Tüm model eğitme, test ve tahminleme işlemleri “11th Gen Intel Core i7-1165G7 @ 2.80GHz 2.80 GHz 32 GB Ram 64 Bit” bir bilgisayarda ve “Windows 10 Enterprise” işletim sistemi üzerinde gerçekleştirilmiştir.

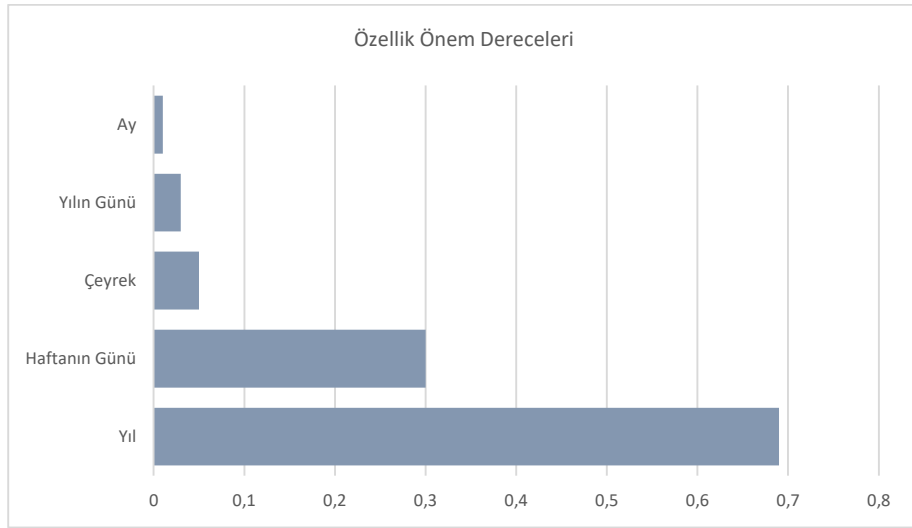
Veri Seti (Dataset)

Bu çalışmada bir teknoloji şirketinin müşterilerinin kullandıkları hizmetler için harcadıkları 9 yıllık günlük kontör tüketim verisi kullanılarak tahminleme yapılmıştır. Veri seti daha önce başka bir akademik çalışmada kullanılmamıştır. Veri seti 2014-2017 yıllarına ait tüketimler, 2018-2022 yıllarına ait tüketimler ve tüm yıllara ait (2014-2022) tüketimler olmak üzere 3 ayrı gruba ayrılmıştır. Buradaki ayırım şirketin dijital hizmetlerinin yıllara göre yaygınlaşması ve müşteri sayılarının artması kriterlerine göre belirlenmiştir. 2014 yılı hizmetlerin başlangıç yılı ve 2017 yılı ise müşteri sayısındaki artışın keskin arttığı yıl olması nedeniyle 2014-2017 yılları ayrı bir grup, 2018-2022 yılları ise ayrı bir grup olarak ele alınmıştır. Makine öğrenmesi ve derin öğrenme modelleri veri setleri üzerinde ayrı ayrı uygulanmıştır. Veriler tek değişkenli zaman serileri formatındadır ve zamana göre değişen kontör tüketim değerleri yer almaktadır. 2014-2017 yıllarına ait veri setinde 1461 adet, 2018-2022 yıllarına ait veri setinde 1825 ve 2014-2022 (tüm veri) yıllarına ait veri setinde 3286 adet satır bulunmaktadır.

Şekil 8’de görüleceği gibi, kontör tüketiminde 2020 yılına kadar artan bir trend, 2020 yılından itibaren ise keskin bir artış görülmektedir. Bu artış, bu yıllarda çıkan düzenlemelere bağlanabilir. Çıkan yasa ve yönetmelikler ile e-fatura kullanan şirket sayısının kapsamı genişlemiş ve buna bağlı olarak kontör tüketimleri de Şekil 8’deki gibi artmıştır. Şekil 9’da verideki özelliklerin önem dereceleri gösterilmiştir. Buna göre yıl ve haftanın günü özellikleri sonuca en fazla etki eden özellikler olarak öne çıkmıştır. Bunun nedeni ise şirketin hizmetlerinin sayısının, yaygınlığının ve müşteri sayısının yıllara göre artması olarak gösterilebilir.

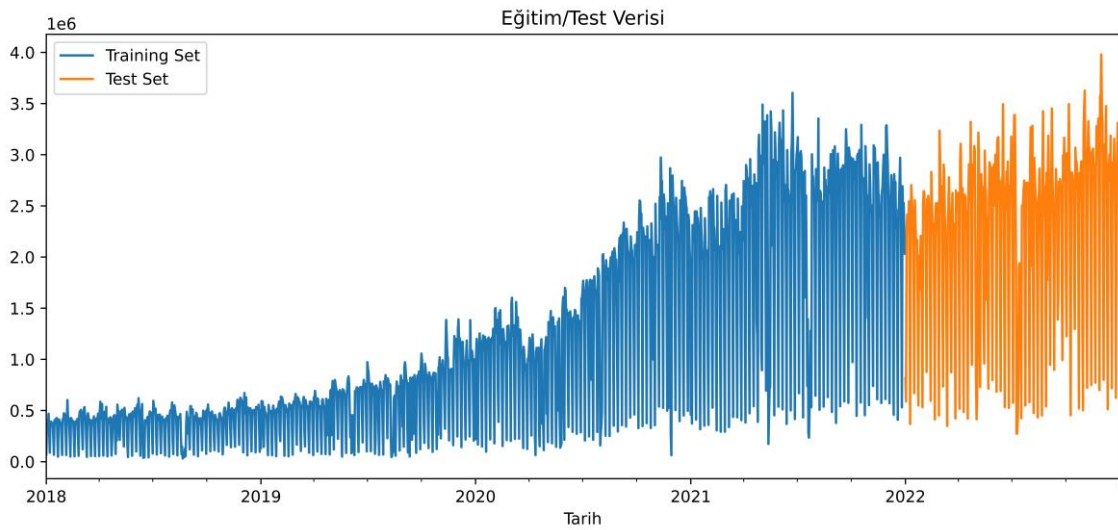


Şekil 8. 2014-2022 Yıllarındaki Müşteri Kontör Tüketim Dağılımı



Şekil 9. Sezonallık Özelliklerinin Önem Derecesi

2014-2017 yıllarına ait verinin 3 yılı eğitim verisi 1 yılı test, 2018-2022 yıllarına ait 5 yıllık verinin 4 yılı eğitim veri seti, 1 yıllık veri de test veri seti olarak kullanılmıştır. 2014-2022 yıllarına ait verinin ise 8 yıllık verisi eğitim, 1 yıllık veri ise test veri seti olarak kullanılmıştır. Şekil 10'da eğitim ve test verisi dağılımları gösterilmiştir.

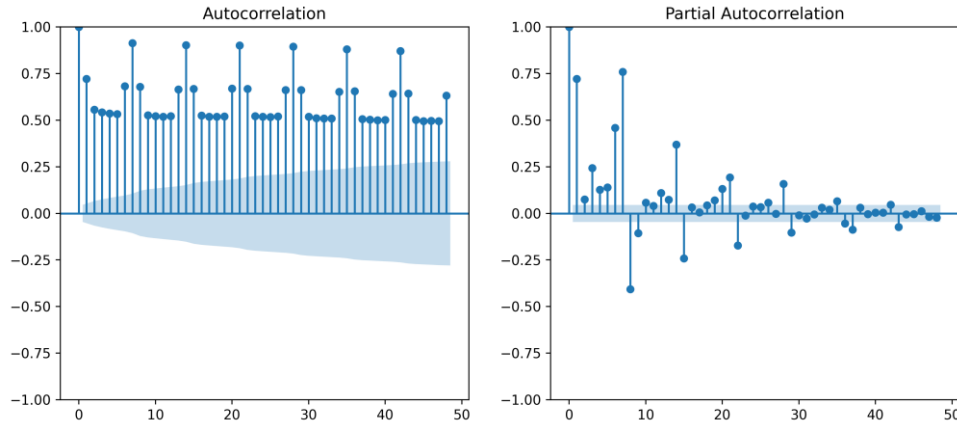


Şekil 10. Eğitim ve Test Verisi (2018-2022 yılları)

BULGULAR

Modeller sırasıyla 2014-2017, 2018-2022 ve 2014-2022 yıllarına ait üç veri seti üzerinde ayrı ayrı çalıştırılmıştır. Bu veri setlerinin nasıl ayrıldığı bir önceki bölümde detaylı anlatılmıştır. 2018-2022 yıllarına ait veri seti referans veri seti olarak alınmıştır ve sonuçlar 2014-2017 yılları ile tüm yılları içeren 2014-2022 veri setinin sonuçları ile ayrı ayrı karşılaştırılarak modellerin başarı oranları karşılaştırmalı olarak test edilmiştir. Bu karşılaştırma sonuçları bölüm sonunda gösterilmektedir. Veri setleri üzerinde önce makine öğrenmesi modelleri, sonra derin öğrenme modelleri ve son olarak da derin öğrenme modellerinden oluşturulan hibrit modeller sırasıyla çalıştırılmıştır.

Çalışmada MAE, MAPE, RMSE ve R^2 metrikleri kullanılarak performans ölçümü yapılmıştır. İlk olarak makine öğrenmesi modellerinden ARIMA ve SARIMA modelleri uygulanmıştır. Verinin durağanlığını tespit etmek için ACF ve PACF grafiklerinden yararlanılmıştır. Ayrıca ADF ve KPSS testleri uygulanmıştır. ACF grafiği zaman içerisinde bir düşüş eğilimi göstermektedir. Aynı şekilde PACF grafiği t-1 ve t-2 farkları için keskin bir düşüş göstermiştir. Bu iki veriye göre seri durağan olmadığı görülmüştür. Şekil 11’de ACF ve PACF grafikleri görülmektedir.

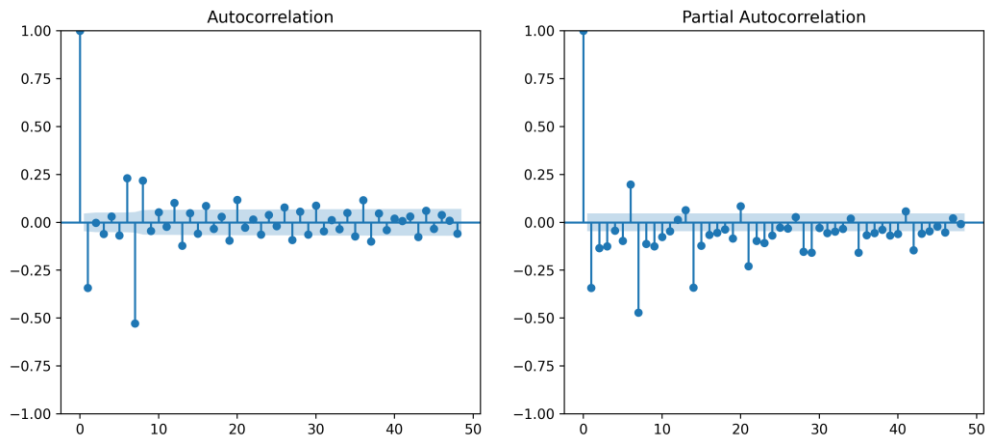


Şekil 11. ACF ve PACF Grafikleri

ADF ve KPSS testlerinin sonucuna göre de (Tablo 1) seri durağan değildir. Durağan hale getirmek için fark alma işlemi yapılmıştır. Serinin durağan olması için p-value değerinin 0,05’ten büyük olması gerekmektedir. Birinci dereceden fark alınmıştır. Fark alma işlemi sonrası ACF ve PACF grafikleri Şekil 12’de gösterilmiştir. ADF birim kök bulamaz ancak KPSS testi bulursa seri fark durağandır ve yine de fark alma işlemi uygulanarak serinin durağan hale getirilmesi gerekir.

Tablo 1. ADF ve KPSS Test Sonuçları

ADF Statistics	-0,9274541494854743
p-value	0,7787969935683057
KPSS Statistic	6,803335
p-value	0,010000



Şekil 12. Fark Alma Sonrası ACF ve PACF Grafikleri

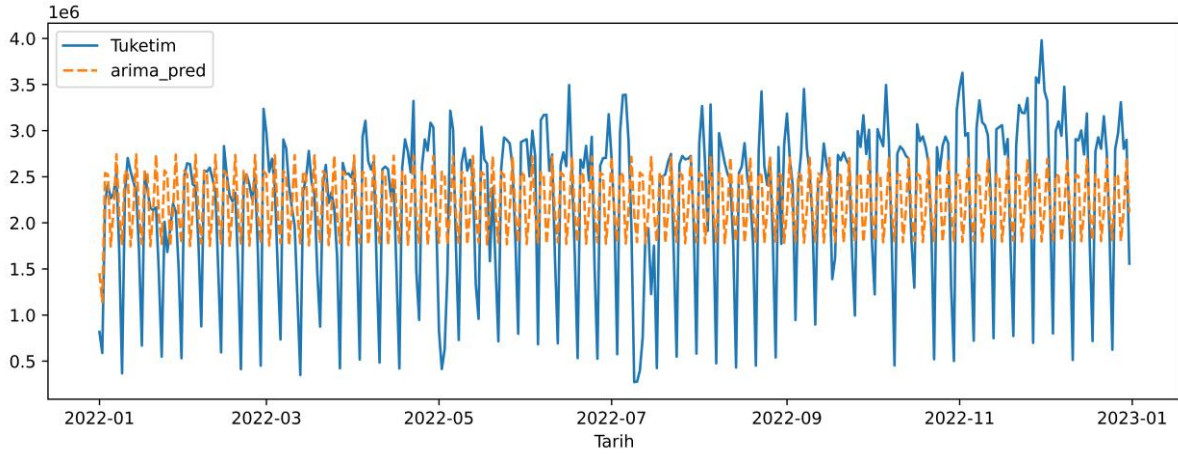
ACF ve PACF grafikleri aracılığıyla serinin durağan hale gelmesinden emin olmak için ADF ve KPSS testleri tekrar yapılmıştır. Ek ADF ve KPSS testi sonuçları ise Tablo 2’deki gibi oluşmuştur. P-value değerinden de anlaşılacağı üzere seri durağan hale getirilmiştir.

Tablo 2. Fark Alma İşlemi Sonrası ADF ve KPSS Testi Sonuçları

ADF Statistics	-
p-value	14,517242505878471
KPSS Statistic	5,598963729919661
p-value	0,036513
	0,100000

ARIMA(p,d,q) modelini uygulamak için önce p,d,q değerlerini hesaplamak gerekmektedir. Bu değerleri bulmak için iki yöntem bulunmaktadır. İlk yöntem ACF ve PACF grafiklerini yorumlamaktır. Grafik yorumlaması nedeniyle maliyetli ve hataya açık bir yöntemdir. İkinci yöntem ise Auto ARIMA dediğimiz “Grid Search” yöntemidir. Bu çalışmada Auto ARIMA yöntemi kullanılarak p,d,q değerleri hesaplanmıştır. Bu yöntemle göre en iyi model olarak ARIMA (3,1,5) önerilmiştir.

Veri sezonsallık içerdiği için ARIMA modeli iyi bir performans göstermemiştir. Performans metrikleri de bunu doğrulamaktadır. Şekil 13’te ARIMA modelinin tahminlemesi, Tablo 3’te ise model performans değerleri yer almaktadır.

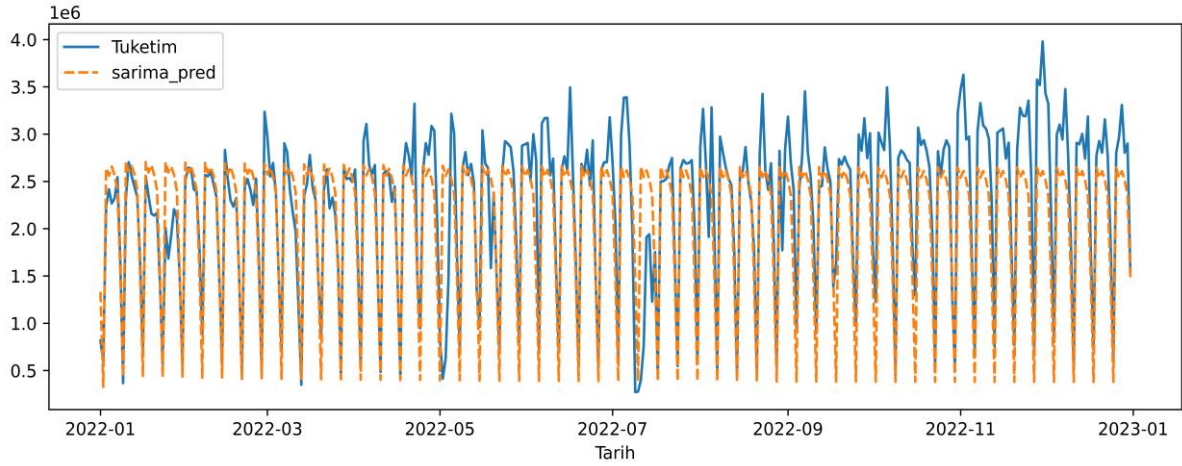


Şekil 13. ARIMA Modeli Tahminlemesi

Tablo 3. ARIMA Modeli Performansı

	ARIMA
MAE	597292,383534
MAPE	0,513970
RMSE	749371,846102
R ²	0,218284

ARIMA modelini iyileştirmek için modele mevsimsellik parametreleri eklenerek SARIMA modeli oluşturulmuştur. Auto ARIMA kullanılarak SARIMA (5,0,3) (0,1,1,7) modeli önerilmiştir. Veri sezonsallık içerdiği için, yani kontör tüketimi verisi sezonsal olarak değişkenlik gösterdiği için SARIMA modeli bu veri üzerinde ARIMA modeline göre çok daha iyi performans göstermiştir. SARIMA sezonsallık değişimlerini de dikkate alan bir modeldir. MAPE değeri ARIMA modelinde 0,51 iken SARIMA modelinde 0,21 olarak ölçülmüştür. Şekil 14’te SARIMA modelinin ARIMA modeline oranla oldukça iyi bir tahminleme yaptığı görülmektedir.



Şekil 14. SARIMA Modeli Tahminlemesi

SARIMA modeli gerçek tüketim değerlerine oldukça yakın tahminleme yapmıştır. Tablo 4’te de model performans ölçümleri yer almaktadır.

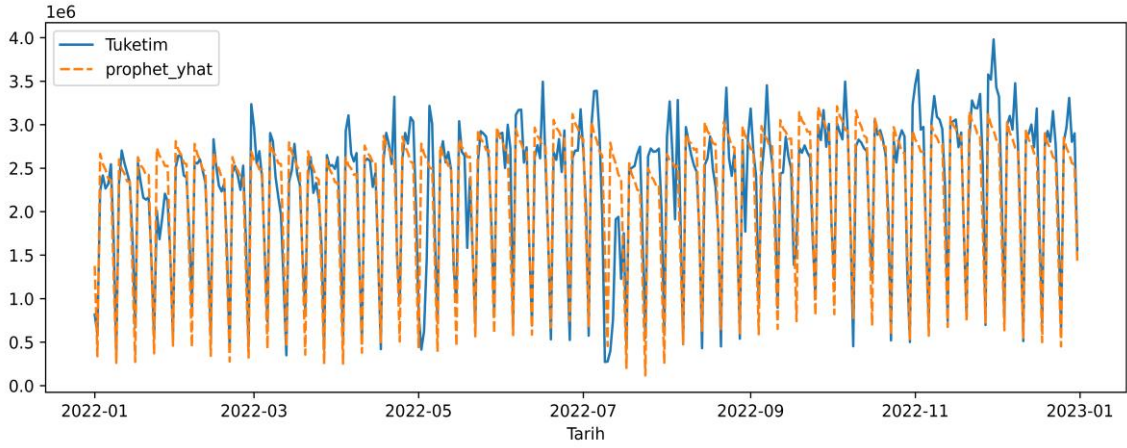
Tablo 4. SARIMA Modeli Performansı

	SARIMA
MAE	338533,575589
MAPE	0,217062
RMSE	470696,183788
R^2	0,691585

Prophet, Meta tarafından geliştirilen ve trend, mevsimsellik gibi parametreleri otomatik olarak içinde yöneten bir algoritmadır. İnsan davranışlarından kaynaklanan mevsimsel etkiler, haftalık, aylık ve yıllık döngüler, resmî tatillerdeki düşüşler ve zirveler, yeni ürünler ve Kara Cuma gibi pazar olaylarından dolayı trenddeki değişimler, aykırı değerler gibi birçok parametreyi başarılı yöneten bir algoritmadır. Model çalışma parametreleri Tablo 5’teki gibi belirlenmiştir. Şekil 15’te görüleceği üzere Prophet modeli, ARIMA ve SARIMA modellerine göre daha başarılı tahminleme yapmıştır. Prophet’in özellikle en tepe noktalarını SARIMA’ya göre daha başarılı tahmin ettiği görülmüştür. Tablo 6’da ise Prophet’in performans ölçüm değerleri yer almaktadır.

Tablo 5. Prophet Model Parametreleri

Parametre	Değeri
growth	Linear
yearly_seasonality	True
weekly_seasonality	True
daily_seasonality	True
seasonality_mode	multiplicative
seasonality_prior_scale	20
holidays_prior_scale	20
changeoint_prior_scale	0,01



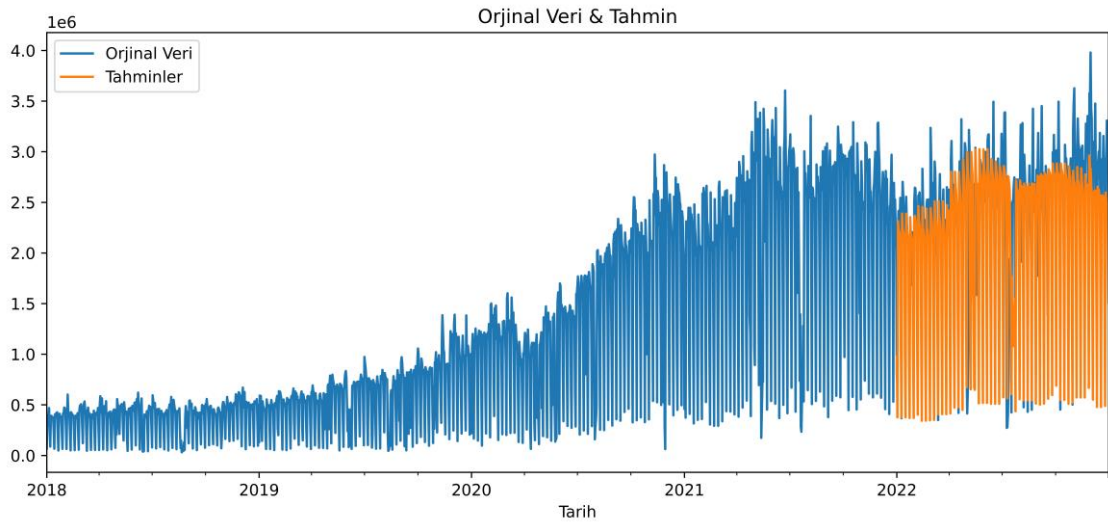
Şekil 15. Prophet Modeli Tahminlemesi

Tablo 6. Prophet Modeli Performansı

	PROPHET
MAE	283502,455315
MAPE	0,202677
RMSE	412533,996697
R^2	0,763095

Prophet, doğrusal olmayan trendlerin yıllık, haftalık ve günlük mevsimsellik ek olarak tatil etkileriyle uyumlu olduğu bir eklemeli modele dayanan zaman serisi verilerini tahmin etmeye yönelik bir yöntemdir. Güçlü mevsimsel etkilere ve birkaç mevsime ait geçmiş verilere sahip zaman serileriyle en iyi şekilde çalışır. Prophet, eksik verilere ve trenddeki değişimlere karşı dayanıklı olduğu ve genellikle aykırı değerleri iyi yönettiği için SARIMA modeline göre tahminleme başarı oranı daha yüksektir.

XGBoost, karar ağacı temelli ve Gradient Boosting bir makine öğrenmesi sistemidir. XGBoost modelinin çalışma parametreleri tahminleyici sayısı 1000, erken durdurma parametresi 50, öğrenme oranı ise 0,01 olarak belirlenmiştir. Bu parametreler karşılaştırmalı denemeler sonucu seçilmiştir. Tahminleme sonucu Şekil 16'daki gibi oluşmuştur. Tablo 7'de ise performans sonuçları yer almaktadır.



Şekil 16. XGBoost Modeli Tahminlemesi

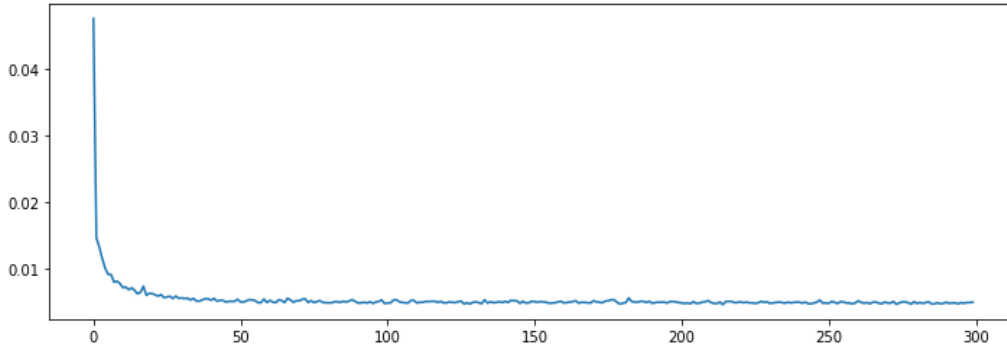
Tablo 7. XGBoost Modeli Performansı

	XGBoost
MAE	313162,62
MAPE	0,21

RMSE	465993,12
R^2	0,70

XGBoost modelinin sonuçları değerlendirildiğinde, Prophet ile tahminleme oranları benzer çıkmıştır ve SARIMA modeline göre tepe noktaları bulmada daha iyi sonuçlar vermiştir.

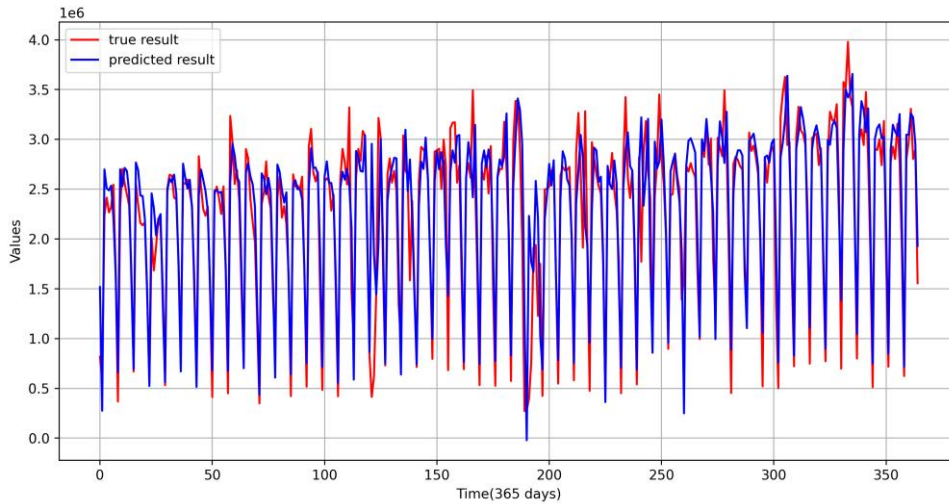
Bu bölümde ise derin öğrenme temelli algoritmaların sonuçlarına yer verilmiştir. Veri seti üzerinde ilk olarak RNN yöntemi uygulanmıştır. RNN modelinde 64 düğümden oluşan SimpleRNN, Dropout, Flatten ve Dense katmanı olmak üzere 4 katmanlı bir YSA kullanılmıştır. Aktivasyon fonksiyonu olarak “ReLU”, optimizasyon fonksiyonu olarak “adam” ve hata kaybı fonksiyonu için ise “ortalama kare hata (mse)” kullanılmıştır. Epoch sayısı 50, batch size 32 ve window size 90 olarak seçilmiştir. Epoch sayısı Şekil 17’deki kayıp fonksiyonuna göre belirlenmiştir. Tablo 8’de model performans sonuçları gösterilmiştir. Şekil 18’de ise tahminleme sonucu gösterilmiştir.



Şekil 17. RNN Kayıp Fonksiyonu

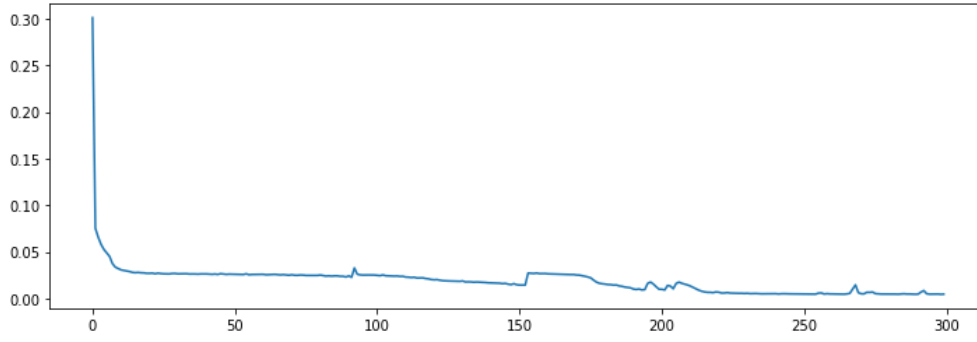
Tablo 8. RNN Modeli Performansı

	RNN
MAE	258768,70
MAPE	0,18
RMSE	368595,47
R^2	0,81

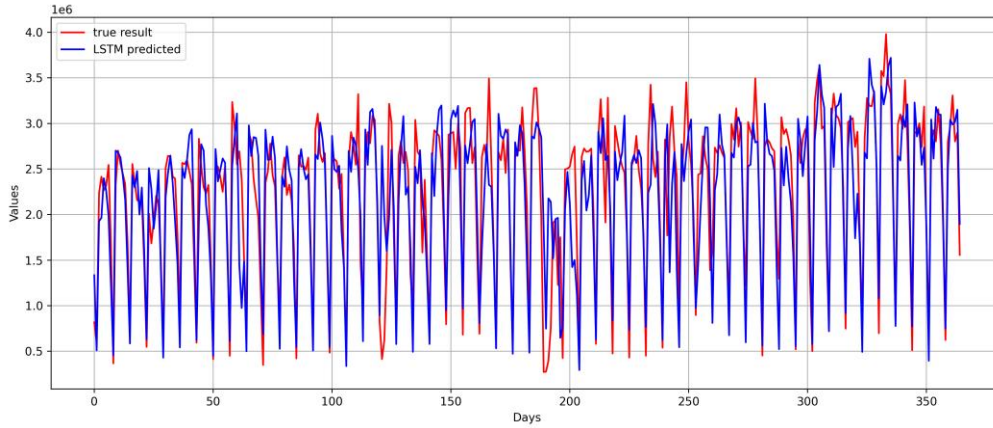


Şekil 18. RNN Modeli Tahminlemesi

LSTM modelinde ise 128 düğümden oluşan giriş ve çıkış katmanı olmak üzere iki katmanlı bir YSA modeli kullanılmıştır. Epoch sayısı 300, batch size 32 ve window size 90 olarak belirlenmiştir. RNN ile eşdeğer olarak aktivasyon fonksiyonu olarak “ReLU”, optimizasyon fonksiyonu olarak “adam” ve hata kaybı fonksiyonu için ise “ortalama kare hata (mse)” kullanılmıştır. Şekil 19’deki LSTM Kayıp Fonksiyonu grafiğine göre 300 epoch sayısında kayıp oranının stabil hale geldiği görülmektedir. Bu nedenle LSTM modelinde epoch sayısı 300 olarak alınmıştır. Şekil 20’de LSTM modelinin tahminleme sonucu gösterilmiştir.



Şekil 19. LSTM Kayıp Fonksiyonu



Şekil 20. LSTM Modeli Tahminlemesi

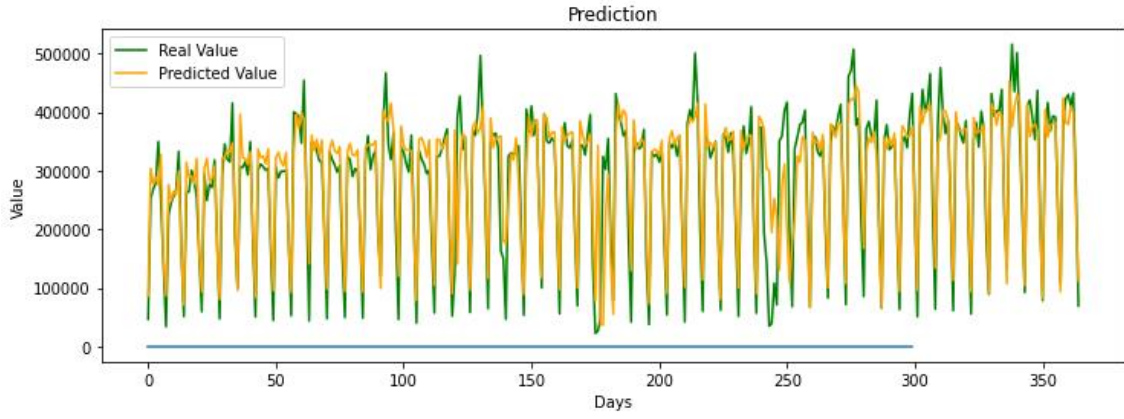
LSTM modelinde ayrıca farklı epoch, batch ve window size'lara göre model çalıştırılmış ve Tablo 9'daki sonuçlar elde edilmiştir. Bu tablo epoch 300, batch size 32 ve window size 90 parametreleri ile elde edilmiş en başarılı sonuçları vermiştir.

Tablo 9. LSTM Modeli Performansı

	LSTM
MAE	253316,13
MAPE	0,17
RMSE	383641,75
R^2	0,79

RNN ve LSTM sonuçları kıyaslandığında LSTM modelinin daha başarılı olduğu görülmektedir. Aralarındaki temel fark, LSTM'nin bilgiyi RNN'ye göre daha uzun süre hafızada tutabilmesinden kaynaklanmaktadır. Bu nedenle LSTM RNN'ye göre daha avantajlıdır, çünkü LSTM, RNN'ye kıyasla hafızadaki bilgileri uzun süre işleyebilir. Ayrıca LSTM uzun vadeli zamansal bağımlılıkları koruyabilir ve bilgiyi uzun süre hatırlayabilir. RNN, uzun bağımlılıklara sahip karmaşık görevler için uygun değil iken LSTM uzun vadeli bağımlılıkların modellenmesini gerektiren görevler için çok daha uygundur.

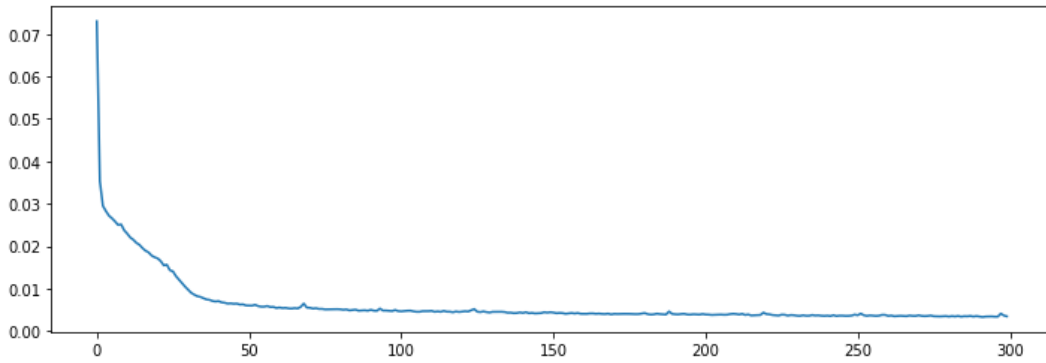
Şekil 21'de GRU modelinin tahminleme sonuçları gösterilmiştir. Tablo 10'da ise modelin performans sonuçları yer almaktadır. Şekil 22, GRU Kayıp Fonksiyonunu göstermektedir.



Şekil 21. GRU Modeli Tahminlemesi

Tablo 10. GRU Modeli Performansı

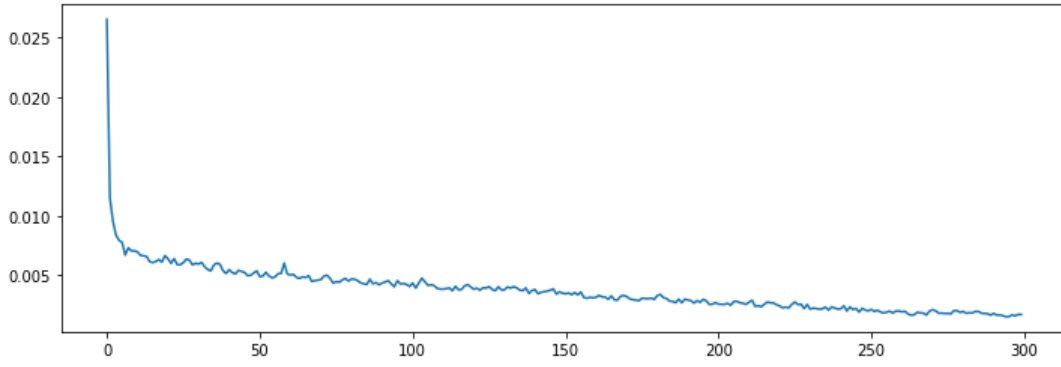
	GRU
MAE	252771,98
MAPE	0,18
RMSE	377491,71
R^2	0,80



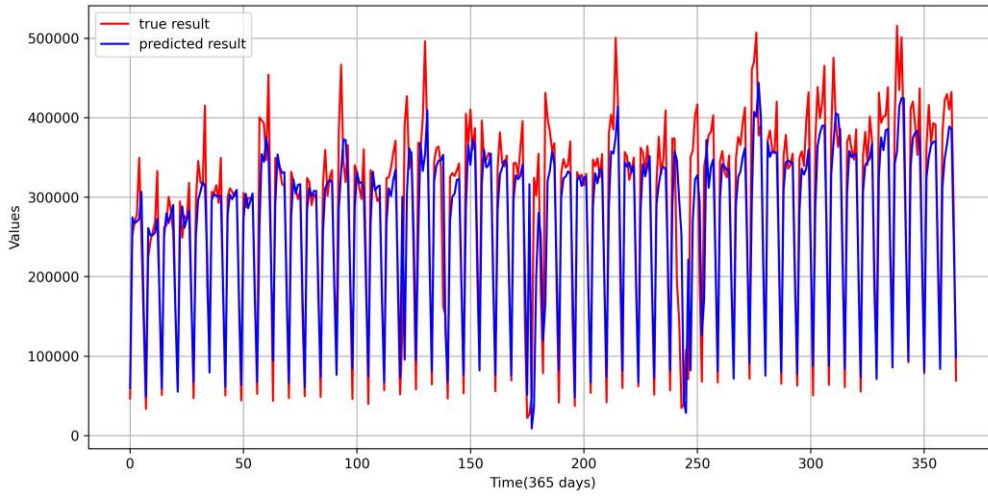
Şekil 22. GRU Kayıp Fonksiyonu

GRU modeli RNN ve LSTM'ye göre daha az kapıya sahiptir ve daha az parametresi vardır. Bu nedenle GRU performans açısından LSTM ve RNN'ye göre daha hızlı olmasına karşın uzun vade veri kümelerine uyarlanması noktasında daha kısıtlı bir algoritmadır. Tablo 10'daki ölçüm sonuçlarına göre RNN ve LSTM ile çok yakın sonuçlar verdiği gözlemlenmiştir.

Çalışmanın bu bölümünde ise derin öğrenme algoritmalarından oluşan hibrit modeller ile ilgili sonuçlara yer verilmiştir. RNN ve GRU algoritmaları ikisi bir arada hibrit model olarak kullanılmıştır. Hibrit model kavramı başarı oranlarını arttırmak için modellerin birlikte kullanılması prensibine dayanmaktadır. Modeller ayrı ayrı özelliklerde olabilirler ve ayrı öğrenme yeteneklerine sahiptirler. Bu nedenle birlikte kullanılarak YSA'da başarı oranları artırılabilir. Birden çok basit algoritma, birbirini tamamlamak ve artırmak için birlikte çalışır. Birlikte çalışarak tek başına çözemedikleri sorunları çözebilirler. Hibrit modelleri oluştururken bir modelin çıktısı diğer modele girdi olarak verilmektedir. Bu nedenle veri yapısı ve formatının buna uygun olarak belirlenmesi gerekmektedir. RNN ve GRU hibrit modeli tüm veri setlerine uygulanmıştır ve sonuçların daha başarılı olduğu görülmüştür. Aşağıdaki grafik ve tabloda RNN + GRU hibrit modelinin sonuçları yer almaktadır. Şekil 23'te görüldüğü gibi Kayıp Fonksiyonu oranı 300 epoch sayısında stabil hale gelmiştir. Bu nedenle RNN + GRU hibrit modelinin epoch sayısı 300 olarak alınmıştır. Şekil 24'te RNN+GRU hibrit modelinin tahminleme sonucu yer almaktadır. Tablo 11'de RNN + GRU modelinin performans çıktıları yer almaktadır.



Şekil 23. RNN + GRU Kayıp Fonksiyonu



Şekil 24. RNN + GRU Modeli Tahminlemesi

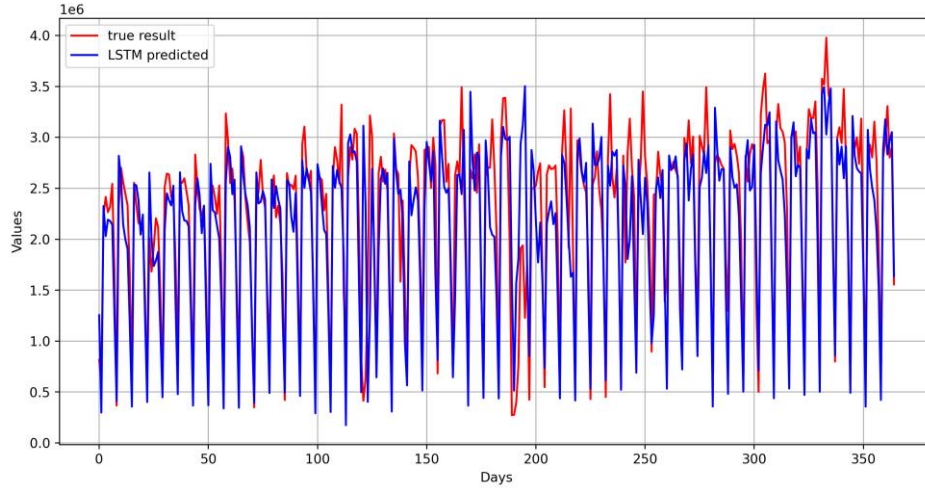
Tablo 11. RNN + GRU Modeli Performansı

	RNN + GRU
MAE	247293,97
MAPE	0,17
RMSE	379218,40
R^2	0,79

Benzer şekilde RNN + LSTM birlikte hibrit bir model oluşturulduğunda sonuçların hem makine öğrenmesi hem de derin öğrenme modellerine göre daha başarılı olduğu görülmüştür. Model, epoch sayısı 100, batch size 32 ve window size 60 parametreleri ile çalıştırılmıştır. Tablo 12 ve Şekil 25'te RNN + LSTM hibrit modelinin performans sonuçları yer almaktadır.

Tablo 12. RNN + LSTM Modeli Performansı

	RNN + LSTM
MAE	253481,53
MAPE	0,17
RMSE	374332,38
R^2	0,80



Şekil 25. RNN + LSTM Modeli Tahminlemesi

Tüm modellerin üç ayrı veri seti üzerindeki performans sonuçları Tablo 13’te karşılaştırmalı olarak belirtilmiştir.

Tablo 13. Modellerin Karşılaştırmalı Performans Tablosu

Modeller/Metrikler	MAE	MAPE	RMSE	R ²
2014-2017 Yıllarına Ait Veri Seti				
ARIMA	117562,46	0,73	131719,73	- 0,19
SARIMA	69752,57	0,29	86647,11	0,48
Prophet	98350,69	0,61	119062,67	0,02
XGBoost	95757,33	0,38	111930,82	0,14
RNN	36147,61	0,24	54819,15	0,79
LSTM	36952,69	0,24	57029,38	0,77
GRU	35892,84	0,26	55038,08	0,79
RNN + GRU	34070,98	0,20	56032,33	0,78
RNN + LSTM	33054,29	0,24	51318,22	0,81
2018-2022 Yıllarına Ait Veri Seti				
ARIMA	597292,38	0,51	749371,84	0,21
SARIMA	338533,57	0,21	470696,18	0,69
Prophet	283502,45	0,20	412533,99	0,76
XGBoost	313162,62	0,21	465993,12	0,70
RNN	258768,70	0,17	368595,47	0,81
LSTM	255900,54	0,18	368703,42	0,81
GRU	252771,98	0,18	377491,71	0,80
RNN + GRU	247293,97	0,17	379218,40	0,79
RNN + LSTM	253481,53	0,17	374332,38	0,80
2014-2022 Yıllarına Ait Veri Seti				
ARIMA	607739,82	0,50	754616,62	0,20
SARIMA	333428,83	0,21	466397,63	0,69
Prophet	770824,50	0,42	917314,04	- 0,17
XGBoost	313520,15	0,21	478258,73	0,68
RNN	287852,62	0,20	412975,82	0,76
LSTM	262566,93	0,18	378016,56	0,80
GRU	273876,99	0,21	390291,35	0,78
RNN + GRU	253907,16	0,17	380195,49	0,79
RNN + LSTM	265043,56	0,18	390127,01	0,78

SONUÇ

Bu çalışmada zaman serileri tahminlemesi konusunda 7 farklı model hazırlanmıştır. Ayrıca RNN/GRU/LSTM modelleri birleştirilerek hibrit modeller oluşturulmuştur. Literatürdeki benzer çalışmalar ile kıyaslandığında bu çalışmada konu oldukça geniş bir perspektiften incelenmiştir. Hibrit modeller dâhil 9 farklı modelin birbirleriyle olan performans karşılaştırmaları ve ayrıca literatürdeki diğer çalışmalar ile karşılaştırmalı analizi yapılmıştır. Bu yönüyle literatürdeki diğer çalışmalardan ayrılmaktadır. 2014-2017 yıllarına ait veri setinde makine öğrenmesi yöntemlerinden en başarılı sonucu SARIMA ve XGBoost modelleri göstermiştir. ARIMA modelinin performansı beklenildiği gibi olmuştur ve 0,73 MAPE değeri ile en başarısız model olmuştur. Derin öğrenme yöntemlerinden ise RNN + GRU ve RNN + LSTM hibrit modelleri en başarılı modeller olmuştur. Tekil modellerden ise LSTM ve RNN, GRU modeline göre daha başarılı olmuştur. Ancak LSTM modelinin uzun vadeli tahminlemeler için daha başarılı sonuçlar verdiği görülmüştür.

2018-2022 yılları arasındaki veri seti için ARIMA'da RMSE değeri 749371,84 ve MAPE 0,51 olarak ölçülürken SARIMA modelinde RMSE 470696,18 ve MAPE 0,21 olarak elde edilmiştir. Elimizdeki verinin mevsimsellik içermesinden dolayı SARIMA performansı ARIMA modeline göre iki katına yakın olmuştur. Bu veri setinde makine öğrenmesi yöntemlerinden en iyi performansı 0,20 MAPE değeri ile Prophet göstermiştir. XGBoost ile SARIMA modelleri benzer performans değerlerine sahip olmuştur. Derin öğrenme modellerinden ise RNN + GRU ve RNN + LSTM hibrit modelleri 0,17 MAPE değeri ile en başarılı modeller olurken bunları sırasıyla RNN, LSTM ve GRU modelleri takip etmiştir. 2014-2022 yılları arasındaki veri seti için benzer şekilde RNN + GRU ve RNN + LSTM hibrit modelleri en başarılı modeller olmuştur. Veri setlerine göre modellerin performansında kayda değer bir farklılık gözlemlenmemiş, tüm veri setleri için model performansları benzer şekilde ölçülmüştür. Literatürdeki çalışmalar ile kıyaslandığında mevcut çalışmadaki sonuçların daha başarılı olduğu görülmektedir.

Tüm veri setlerinde en iyi performansı RNN + GRU ve RNN + LSTM hibrit modelleri göstermiştir. Tüm veri setlerinde en başarısız model beklenildiği gibi ARIMA modeli olmuştur. Makine öğrenmesi modellerinden Prophet ile XGBoost benzer performans göstermiştir. Sezonsal veriler üzerinde ise SARIMA modeli, ARIMA ve diğer makine öğrenmesi modellerine göre daha başarılı performans göstermiştir. Ayrıca Prophet hariç tüm modeller üç veri setinde de başarı oranları olarak aynı oranda değişim göstermiştir.

Bu çalışmanın sonuçları değerlendirildiğinde geçmiş tüketimler baz alınarak gelecekteki kontör tüketimleri tahmin edilebilir. Bu çalışmanın çıktıları kullanarak şirketlerin geleceği tahmin edebilmesi ve planlaması açısından bir projeksiyon ortaya konulabilir. Şirketler gelecek stratejik ve finansal planlarını ve kontör satışından gelecek olan tahmini gelir miktarlarını bu tahminlemeye göre yapabilirler. Yine böyle bir tahminleme, şirketlerin satış kampanyalarına ve pazarlama çalışmalarına yön verebilir. Tüm bunlara ek olarak eldeki verilerin yapay zekâ destekli sistemler tarafından işlenmesi ve değerli bir veriye dönüştürülmesi prestij açısından da şirketler için önemli bir uygulama olabilir.

Çalışmanın daha ileriye taşınması için farklı hibrit modeller oluşturularak modellerin performans iyileştirmesi yapılabilir. Ayrıca derin öğrenme modellerinden olan LSTM için tek katmanlı bir model tercih edilmiştir. Derin öğrenme yöntemleri için gizli katman sayısı artırılarak farklı modeller çalışılabilir ve performans karşılaştırması yapılabilir.

ÖNEMLİ NOT

Bu çalışma, İstanbul Üniversitesi-Cerrahpaşa Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Bilgisayar Mühendisliği Yüksek Lisans programında Hakan AKÇAY tarafından Doç. Dr. Derya YILTAŞ KAPLAN danışmanlığında hazırlanan "Zaman Serileri Tahminleme Algoritmalarının Karşılaştırmalı Uygulaması" isimli yüksek lisans tezinin içeriğinden oluşturulmuştur.

KAYNAKLAR

Abar, H. (2020). XGBoost ve Mars Yöntemleri İle Altın Fiyatlarının Kestirimi. *Ekev Akademi Dergisi*, 24(83), 427-445.

Al-Asadi, M. J. (2019). *Deep Learning For Time Series Forecasting of Currency Exchange Rates*. Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.

- Alpay, Ö. (2020). LSTM Mimarisi Kullanarak USDTRY Fiyat Tahmini. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi* (Special Issue), 452-456.
- Amazon. (2023, 22 Ocak). *What is deep-learning?* Erişim adresi <https://aws.amazon.com/what-is/deep-learning/> adresinden alındı
- Baş, C. N. (2019). *Time Series Analysis With Deep Learning Approaches For Industry 4.0*. Thesis (MSc), Galatasaray University, Graduate School Of Science and Engineering.
- Can, M. (2009). *İşletmelerde Zaman Serileri Analizi İle Tahmin*. Doktora Tezi, İstanbul Üniversitesi, Sosyal Bilimler Enstitüsü.
- Çetin, Ö. (2022). *Güneş Enerji Santrallerinde Derin Öğrenme İle Aylık Elektrik Üretim Tahmini*. Yüksek Lisans Tezi, Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Dinçoğlu, P. (2022). *Perakende Sektöründe Veri Madenciliği Teknikleri İle Satış Tahmini*. Yüksek Lisans Tezi, Maltepe Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü.
- Ejder, U. (2022). *DataMining Based On Regularized Convolutional Neural Network For Time Series Financial Prediction Algorithm*. Doktora Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Erbudak, A. E. (2022). *Veri Madenciliği ve Makine Öğrenimi İle Döviz Kuru Tahmini Uygulaması*. Yüksek Lisans Tezi, Altınbaş Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü.
- Facebook. (2023, 23 Şubat). *Prophet*. Erişim adresi https://facebook.github.io/prophet/docs/quick_start.html adresinden alındı
- Güdelek, M. U. (2019). *Zaman Serisi Analiz ve Tahmini : Derin Öğrenme Yaklaşımı*. Bilgisayar Mühendisliği. Yüksek Lisans Tezi, TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Günay, M. (2018). *Makine Öğrenmesiyle Müşteri Kayıplarının Tahmini*. Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Gündüz, H. (2019). *Derin Öğrenme Yöntemleri İle Zaman Serisi Tahmini*. Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Hua, Y., Zhao, Z., Li, R., Chen, X., Liu, Z., & Zhang, H. (2019). Deep Learning with Long Short-Term Memory for Time Series Prediction. *IEEE Communications Magazine*, 114-119.
- Indulkar, Y. (2021). Time Series Analysis of Cryptocurrencies Using Deep Learning & Fbprophet. *Pune: 2021 International Conference on Emerging Smart Computing and Informatics (ESCI)*.
- İnce, U. (2021). *Mobil Uygulamaların Gelecek Dönemde Kullanımının Zaman Serileri Kullanılarak Tahmin Edilmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Kara, A. (2019). Global Solar Irradiance Time Series Prediction Using Long Short-Term Memory Network. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 882-892.
- Kaya, U., Akba, F., Medeni, İ. T., & Medeni, T. D. (2020, Temmuz). Bitcoin Fiyat Değişimlerinin Makine Öğrenmesi, Zaman Serileri Analizi ve Derin Öğrenme Yöntemleriyle Değerlendirilmesi. *Bilişim Teknolojileri Dergisi*, 3(13), 341-355.
- Kayış, Ö. (2021). *Fiber İnternet Müşteri Şikayet Tahminlemesi*. Yüksek Lisans Tezi, Beykent Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü.
- Kırbaş, İ., Sözen, A., Tuncel, D. A., & Kazancıoğlu, F. Ş. (2020). Comparative analysis and forecasting of COVID-19 cases in various European countries with ARIMA, NARNN and LSTM approaches. *Chaos, Solitons and Fractals*, 138.
- Lim, B., & Zohren, S. (2021). Time-series forecasting with deep-learning: a survey. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 379(2194), 202-209.
- Microsoft. (2023, 10 Mart). *What-is-deep-learning?* Erişim adresi Microsoft Azure: <https://azure.microsoft.com/tr-tr/resources/cloud-computing-dictionary/what-is-deep-learning/> adresinden alındı
- Mohammedali, S. S. (2021). *Time Series Classification Using Deep Learning Networks*. Thesis (MSc), Karabük University, Institute of Graduate Programs.

- Nusrat, F. (2022). *Arima ve Derin Öğrenme Modelleri Kullanılarak Türkiyedeki Covid19 Vaka ve Vefat Sayılarının Tahmini*. Yüksek Lisans Tezi, Konya Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü.
- Oracle. (2023, 15 Nisan). *What-is-deep-learning*. Erişim adresi <https://www.oracle.com/tr/artificial-intelligence/machine-learning/what-is-deep-learning/> adresinden alındı
- Özdemir, M. C. (2021). *Arima ve XGBoost Modelleri İle Elektrik Talep Tahmini*. Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Peixeiro, M. (2022). *Time Series Forecasting in Python by Marco Peixeiro*. New York: Manning Publications Co.
- Shastri, S., Singh, K., Kumar, S., Kour, P., & Mansotra, V. (2020). Time series forecasting of Covid-19 using deep learning models India-USA comparative case study. *Chaos, Solitons and Fractals*, 140(110227).
- Şeker, A. (2017). *Derin Öğrenme Yöntemleri ve Uygulamaları Hakkında Bir İnceleme*. Fen Bilimleri Enstitüsü. İstanbul: Rapor, Yıldız Teknik Üniversitesi.
- Tanışman, S., Karcıoğlu, A. A., Uğur, A., & Bulut, H. (2021, Aralık). LSTM Sinir Ağı ve ARIMA Zaman Serisi Modelleri Kullanılarak Bitcoin Fiyatının Tahminlenmesi ve Yöntemlerin Karşılaştırılması. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 32, 514-520.
- Üntez, A. (2022). *Gümüş Ons Paritesi Üzerine Derin Öğrenme İle Finansal Tahmin Modellemesi Geliştirilmesi*. Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Wasee, M. S., Kundu, P. S., Mahzabeen, I., Tamim, T., & Alam, R. G. (2022). Time-Series Forecasting of Ethereum Price Using Long Short-Term Memory (LSTM) Networks. *Kuala Lumpur: Proc. of the 8th International Conference on Engineering and Emerging Technologies (ICEET)*.
- Yang, Y., Gao, W., & Guo, C. (2017). Aero-engine Lubricating Oil Metal Content Prediction Using Non-stationary Time Series ARIMA Model. *2017 10th International Symposium on Computational Intelligence and Design*.
- Yaşar, H. (2019). *Zaman Serileri Analizi ve Derin Öğrenme Modelleri Kullanarak Amerikan Doları/Türk Lirası Döviz Kuru İçin Hibrid Tahmin Modeli*. Yüksek Lisans Tezi, Doğu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.



Kahramanmaraş Sütçü İmam University

Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 02.10.2023
Kabul Tarihi : 28.12.2023

Received Date : 02.10.2023
Accepted Date : 28.12.2023

A NOVEL STUDY ON THE SYNTHESIS, CHARACTERIZATION, AND PHOTOCATALYTIC ACTIVITY OF CeO₂ NANOPARTICLES

CeO₂ NANOTANECİKLERİNİN SENTEZİ, KARAKTERİZASYONU VE FOTOKATALİTİK AKTİVİTESİ

Nazlı TURKTEN^{1*} (ORCID: 0000-0001-9343-3697)

Yunus KARATAS¹ (ORCID: 0000-0002-3826-463X)

¹ Department of Chemistry, Faculty of Arts and Sciences, Kirsehir Ahi Evran University, Kirsehir, 40100, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Nazlı TURKTEN, nazli.turkten@yahoo.com

ABSTRACT

The discharge of untreated wastewater from unplanned industrial activities using dyes can cause serious environmental pollution and affect the aquatic environment. Semiconductor photocatalysis is a favorable technology widely used for degrading organic dyes in wastewater. This study dealt with the preparation of CeO₂ nanoparticles via a simple precipitation technique. Information on the structural and morphological features of the developed CeO₂ nanoparticles were determined using Fourier transform infrared with attenuated total reflectance (FTIR-ATR), Raman spectroscopy, X-ray diffraction (XRD), and scanning electron microscopy (SEM) spectroscopic methods. The presence of the characteristic bands of CeO₂ in the FTIR spectrum provided evidence of successful CeO₂ formation. The calculated crystallite particle size utilizing the Scherrer equation was 10 nm. SEM images revealed that the morphology of CeO₂ consisted of almost spherical particles with slight agglomeration. Brunauer-Emmett-Teller (BET) technique was also used to find out the specific surface area of CeO₂ nanoparticles (11 m²/g). The efficiency of CeO₂ nanoparticles was also confirmed in terms of their photocatalytic activity against Rhodamine B (Rh B) under UV-A light. The results indicated that CeO₂ nanoparticles could be a promising catalyst candidate for industrial wastewater treatment.

Keywords: CeO₂ nanoparticles, photocatalyst, photocatalysis, Rhodamine B, wastewater treatment.

ÖZET

Boya içeren endüstriyel atık suyunun yeterli bir arıtma işlemi yapılmadan boşaltılması sonucunda önemli çevre ve su kirliliği oluşabilir. Yarı iletken fotokataliz, atık sulardaki organik boyaların parçalanması amacıyla yaygın olarak kullanılan uygun bir teknolojidir. Bu çalışmada, CeO₂ nanotanecikleri basit bir çöktürme yöntemi kullanılarak hazırlanmıştır. Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi-zayıflatılmış toplam yansıma (FTIR-ATR), Raman spektroskopisi, X-ışını difraktometresi (XRD) ve taramalı elektron mikroskopu (SEM) yöntemleri kullanılarak CeO₂ nanotaneciklerinin yapısal ve morfolojik özellikleri belirlenmiştir. FTIR spektrumunda yer alan karakteristik bandların varlığı CeO₂ oluşumunun başarılı bir şekilde gerçekleştiğini göstermiştir. Scherrer eşitliği kullanılarak kristal tanecik boyutu 10 nm olarak hesaplanmıştır. SEM görüntüleri, CeO₂'nin morfolojisinin yüzeyde çok az bir topaklanma olsa da neredeyse küresel taneciklerden oluştuğunu ortaya çıkarmıştır. Brunauer-Emmett-Teller (BET) yöntemi kullanılarak CeO₂ nanotaneciklerinin spesifik yüzey alanı (11 m²/g) belirlenmiştir. CeO₂ nanotaneciklerinin etkinliği, UV ışığı altında Rhodamin B (Rh B) boyasına karşı fotokatalitik aktiviteleri incelenerek saptanmıştır. Elde edilen sonuçlar, CeO₂ nanotaneciklerinin endüstriyel atıksu arıtımında kullanılabilecek, ileriye dönük ümit vaat eden bir katalizör olduğunu göstermiştir.

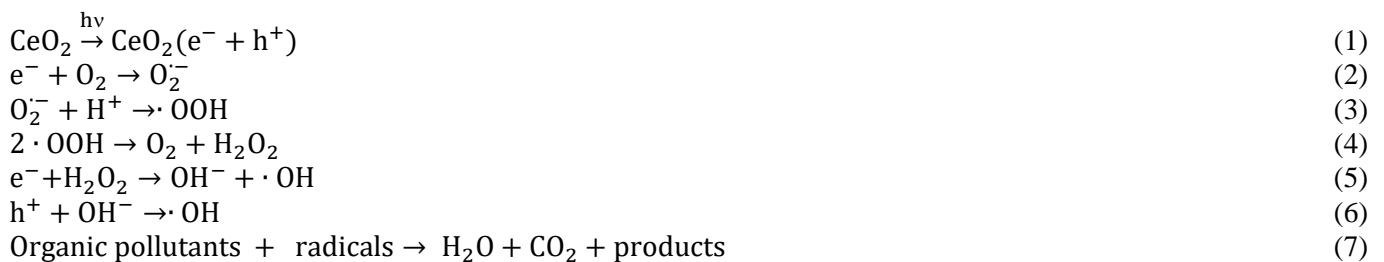
Anahtar Kelimeler: CeO₂ nanotanecikleri, fotokatalizör, fotokataliz, Rhodamin B, atıksu arıtımı.

INTRODUCTION

Unauthorized industrial wastewater discharge containing dyes from textiles, printing, paper, and food processing is a currently growing pollution problem that can cause adverse environmental and health problems (Soleyman et al., 2023). The textile industry is known to be one of the largest consumers of dyes, resulting in excessive amounts of wastewater containing dye effluents (Amalina et al., 2022; Sharma & Soni, 2021). Rh B is widely used as a water-soluble textile dye colorant with carcinogenic and neurotoxic effects that can cause an extremely toxic value in textile wastewater (Al-Buriah et al., 2022; Al-Gheethi et al., 2022).

The significance of developing efficient and modern water treatment methods has become an urgent task to prevent the negative impact of the widespread distribution of Rh B contaminated, incompletely treated wastewater into water bodies and thus to ensure the safe disposal of dye effluents in aquatic environments (Al-Buriah et al., 2022; Linghu et al., 2023; Ma et al., 2021; Soleyman et al., 2023). Despite global efforts to address this challenging issue, traditional approaches are still inadequate and have many disadvantages. Physical methods are insufficient for the complete removal of organics from wastewater. Biological treatment techniques are expensive and require long preparation cycles. On the other hand, advanced oxidation processes (AOPs) are applied as a highly effective chemical method that can degrade organics entirely with a rapid oxidation rate. The most commonly used AOPs are photocatalytic oxidation, Fenton reactions, and electrochemical oxidation reactions that do not cause secondary pollution (Ma et al., 2021; Soleyman et al., 2023). Among the AOPs, photocatalysis has proven to be fast, low operating cost, chemical free, environmentally friendly, highly stable, and has high removal efficiency for recalcitrant contaminants from water. In photocatalysis, reactive oxygen species (ROS) are produced during oxidation processes when a semiconductor is captured by light (Durodola et al., 2023; Soleyman et al., 2023).

Ceria, also known as CeO₂, plays a key role in a diversity of applications, particularly in optical devices, solar cells, fuel oxidation catalysis, photocatalysis, and the biological field, as this n-type semiconductor has a unique crystal structure and electronic features (Ma et al., 2023; Pansambal et al., 2022). Today, CeO₂ nanoparticles are considered as one of the most promising catalyst candidates, showing encouraging results in wastewater treatment technologies as well as photocatalysis (Kurian, 2020; Kusmierk, 2020). The exceptional characteristics and superior properties of CeO₂ are being non-toxic, inexpensive, having high chemical stability, and an efficient oxygen storage capability that makes this semiconductor as a pivotal importance photocatalyst (Tran et al., 2022). The reaction Equations (1-7) corresponding to the photocatalytic degradation mechanism of organic pollutants using CeO₂ are given as follows (Ma et al., 2019):



The photocatalytic degradation mechanism of CeO₂ begins with the irradiation of light on the semiconductor surface ($>E_g$), resulting in electron excitation followed by a photogeneration process to produce electron/hole (e^-/h^+) pairs. These charge carriers produced in the photocatalyst are forwarded to redox reactions to form ROS containing superoxide and hydroxyl radicals as represented in the equations. Highly oxidizing hydroxyl radicals attack organic pollutants forming products as well as converting them into harmless compounds such as CO₂ and H₂O via a complete mineralization (Ma et al., 2019).

The present study reported the preparation of CeO₂ nanoparticles using a simple precipitation route that could provide broad possible aspects in wastewater treatment. FTIR-ATR, Raman spectroscopy, XRD analysis were utilized to confirm the structural properties of CeO₂ nanoparticles and the morphology of CeO₂ was investigated by SEM analysis. BET method and BJH pore size distribution technique were applied to identify the surface properties of CeO₂. Furthermore, the photocatalytic application of CeO₂ nanoparticles in the photodegradation of Rh B dye under UV light irradiation was investigated.

MATERIALS AND METHODS

Materials

Ammonium cerium (IV) nitrate ($\text{Ce}(\text{NH}_4)_2(\text{NO}_3)_6$), Sigma-Aldrich, ACS reagent, $\geq 98.5\%$) and sodium hydroxide (NaOH, Sigma-Aldrich, ACS reagent, $\geq 97.0\%$, pellets) were used without further purification. Distilled water was used for the preparation of all solutions used in experiments.

Preparation of CeO_2 Nanoparticles

CeO_2 nanoparticles were synthesized via a modified precipitation method (Seeharaj et al., 2019). In the usual synthesis procedure, 100 mL of 0.1 M $\text{Ce}(\text{NH}_4)_2(\text{NO}_3)_6$ solution was placed in a flat bottomed flask. 0.5 M NaOH solution was used to adjust the pH=12 and then added dropwise to $\text{Ce}(\text{NH}_4)_2(\text{NO}_3)_6$ solution under vigorous stirring. The entire solution continued stirring well for 2 h. The solution was then filtered, washed with distilled water, and dried in an oven at 80°C for 24 h. The pale-yellow CeO_2 nanoparticles were calcinated for 2 h using a porcelain crucible at 500°C .

Characterization Techniques

FTIR-ATR measurements (Perkin Elmer Spectrum Two) were acquired at a resolution of 4 cm^{-1} in the range of $2000\text{--}400\text{ cm}^{-1}$. Dispersive Raman spectroscopy (Thermo Scientific DXR Raman Microscope) was performed using an Ar^+ laser excitation at $\lambda=532\text{ nm}$ with an applied power of 10 mW. SEM analysis (FEI-Philips XL30 Scanning Electron Microscope) was carried out with an operational accelerating voltage of 10 kV. XRD diffractograms (Rigaku-D/MAX-Ultima diffractometer) were obtained using $\text{Cu K}\alpha$ radiation ($\lambda=1.54\text{ \AA}$) with operational parameters of 40 kV and 40 mA. BET technique and BJH pore size distribution model were used on a Quantachrome Quadrosorb SI instrument. The analytical procedure applied for nitrogen isotherm tests was at 77 K.

Photocatalytic Activity Assessment

Photocatalytic activity experiments were performed in a Pyrex vessel illuminated using a black light fluorescent lamp (125 W) placed at the top of the reactor. The volume of the solution in photocatalytic activity test was 50 mL containing a concentration of Rh B solution (10 mg/L) with a dose of CeO_2 nanoparticles (0.25 g/L). The absorption changes of Rh B dye at maximum absorbance wavelength ($\lambda_{\text{max}}=553\text{ nm}$) were monitored using a UV-vis spectrophotometer. Additional detailed information on the photocatalytic system was reported in our previous work (Turkten, 2022).

RESULTS AND DISCUSSION

Characterization of CeO_2 nanoparticles

The surface functional groups and chemical bonding of CeO_2 nanoparticles were proved by FTIR-ATR spectroscopy and the results were presented in Figure 1. The intense band observed at 1341 cm^{-1} was attributed to the stretching mode of vibration $\nu(\text{Ce-O-Ce})$ while the band at 467 cm^{-1} corresponded to the stretching $\nu(-\text{Ce-O})$ vibration bond in CeO_2 . Moreover, a small band at 587 cm^{-1} could be assigned to the stretching $\nu(\text{O-Ce-O})$ vibrational signal. The small bands located at 1042 cm^{-1} and 834 cm^{-1} belong to the stretching vibration of $\nu(\text{NO}_3^-)$ indicating the existence of residual nitrate moiety (Ramadan & El-Masry, 2021; Turkten, 2022; Vivek & Babu, 2016; Xie et al., 2021).

The Raman spectrum of CeO_2 nanoparticles revealed a major band at 458 cm^{-1} and a small band at 585 cm^{-1} corresponding to F_{2g} mode and LO mode, respectively (Figure 2). The F_{2g} mode was related to the fluorite structure, addressing the symmetrical stretching of oxygen around each cerium, while the non-degenerate LO mode belonged to the O^{2-} vacancies resulting from nonstoichiometric oxygen vacancies in CeO_2 (Babitha et al., 2014; Malleshappa et al., 2016).

The XRD diffractogram of CeO_2 nanoparticles was revealed in Figure 3. The specific diffraction peaks are indexed on the standard card JCPDS NO. 43-1002. The diffraction angles, $2\theta = 28.54^\circ, 33.26^\circ, 47.58^\circ, 56.52^\circ, 59.32^\circ, 69.72^\circ, 76.64^\circ, \text{ and } 79.08^\circ$ corresponded to (111), (200), (220), (311), (222), (400), (331), and (420) planes of pure CeO_2 . The XRD diffractogram of CeO_2 nanoparticles agreed with the ideal fluorite lattice position related to the (111) plane located at $2\theta = 28.54^\circ$ (Cerrato et al., 2022; Chang et al., 2022). The XRD analysis was also well-matched with the fluorite-type structure of CeO_2 , as confirmed by Raman data.

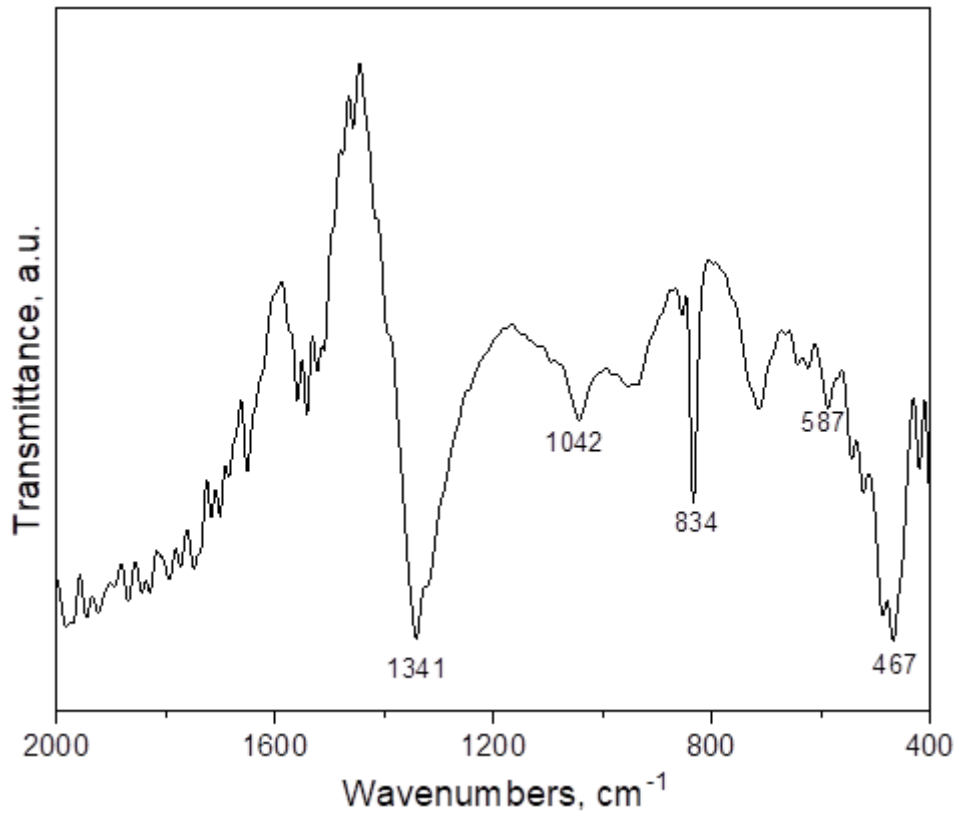


Figure 1. FTIR-ATR Spectrum of CeO₂ Nanoparticles.

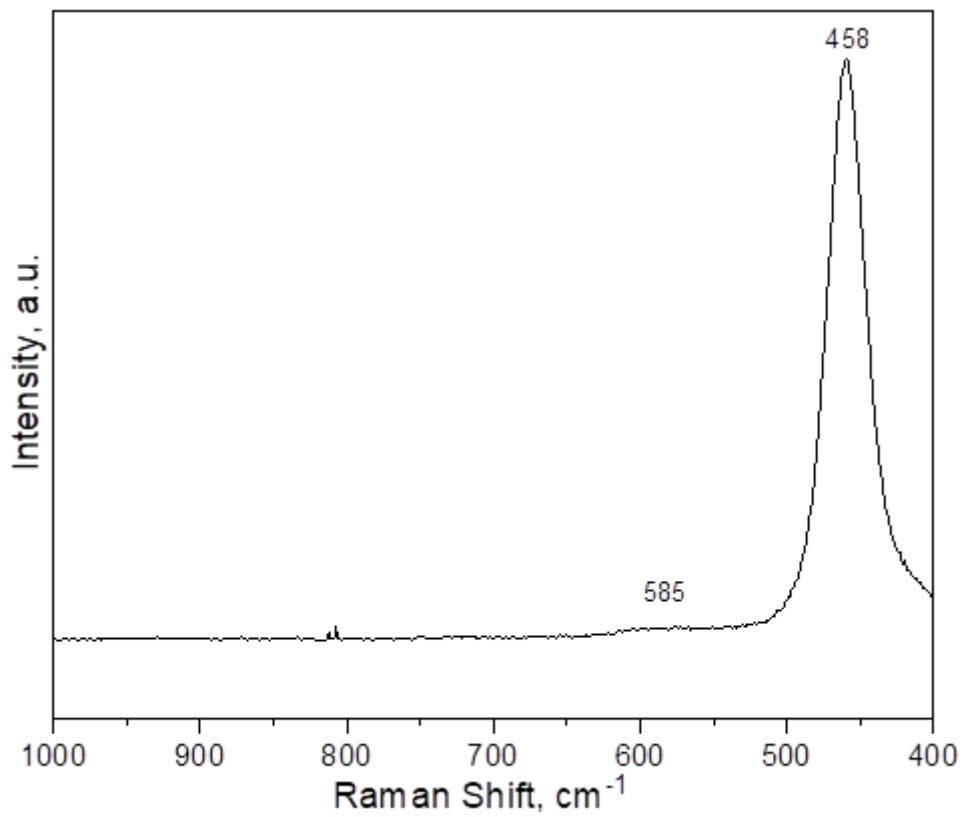


Figure 2. Raman Spectrum of CeO₂ Nanoparticles.

The crystallite size (D , nm) of CeO_2 nanoparticles was estimated from the (111) plane of CeO_2 by according to the Scherrer formula (Equation (8)) (Scherrer, 1918).

$$D = K \lambda / (\beta \cos\theta) \quad (8)$$

In Equation (8), $K = 0.9$, $\lambda = 1.5418 \text{ \AA}$, θ is the Bragg angle, and β is the full width at half maximum intensity. The calculated crystallite size of CeO_2 particles was 10 nm, therefore CeO_2 particles were designated as CeO_2 nanoparticles throughout the manuscript.

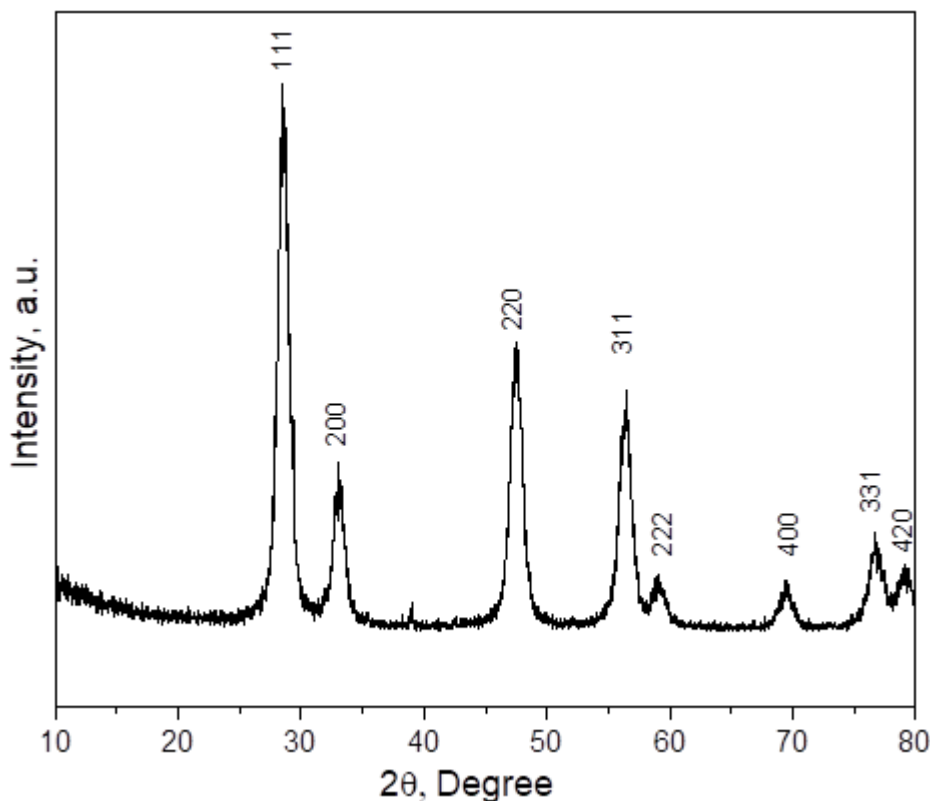


Figure 3. XRD Spectrum of CeO_2 Nanoparticles.

The surface morphological properties of CeO_2 nanoparticles were examined by SEM analysis (Figure 4). SEM images of CeO_2 nanoparticles revealed almost spherical particles with a slight agglomeration (Figure 4 (a)). The particle size was about 15 nm in diameter. The influence of pores on the CeO_2 surface with a few aggregates was clearly seen in Figure 4 (b).

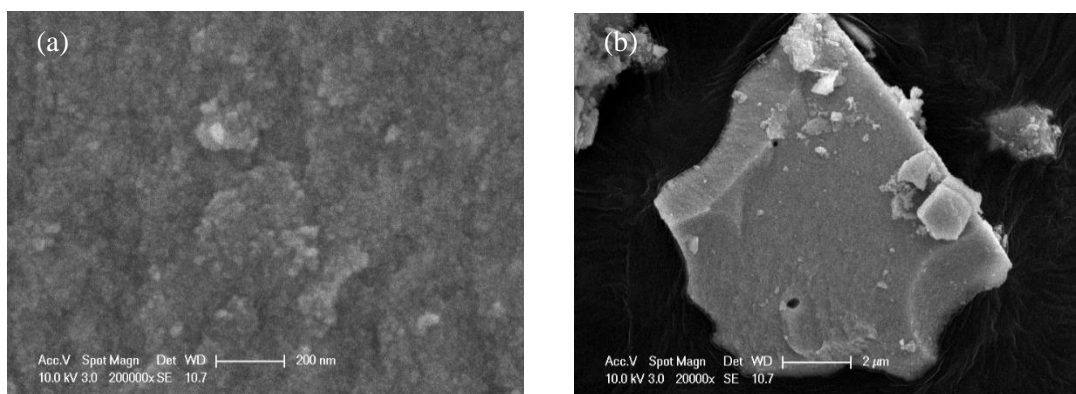


Figure 4. SEM Images of CeO_2 Nanoparticles (a) 200000x, (b)20000x.

The calculated BET specific surface area of CeO_2 nanoparticles was $11 \text{ m}^2/\text{g}$. This value was in agreement with the experimental BET surface areas reported in the literature (De Faria & Trasatti, 1994). The pore size diameter obtained

from BJH method was 2.51 nm, which was in agreement with the pore size distribution between 2 nm and 50 nm, indicating a mesoporous character (Sing, 1985).

Photocatalytic activity

The photocatalytic degradation ability of Rh B using CeO₂ nanoparticles over an irradiation time of 60 min to 300 min was presented in Figure 5. Moreover, the degree of Rh B decolorization by using CeO₂ nanoparticles was also estimated by the following (Equation (9)):

$$\text{Decolorization, \%} = ((A_{553,0} - A_{553}) / A_{553,0}) \times 100 \tag{9}$$

where,

A_{553,0}: initial absorbance of Rh B dye,

A₅₅₃: absorbance of Rh B dye irradiated time at t.

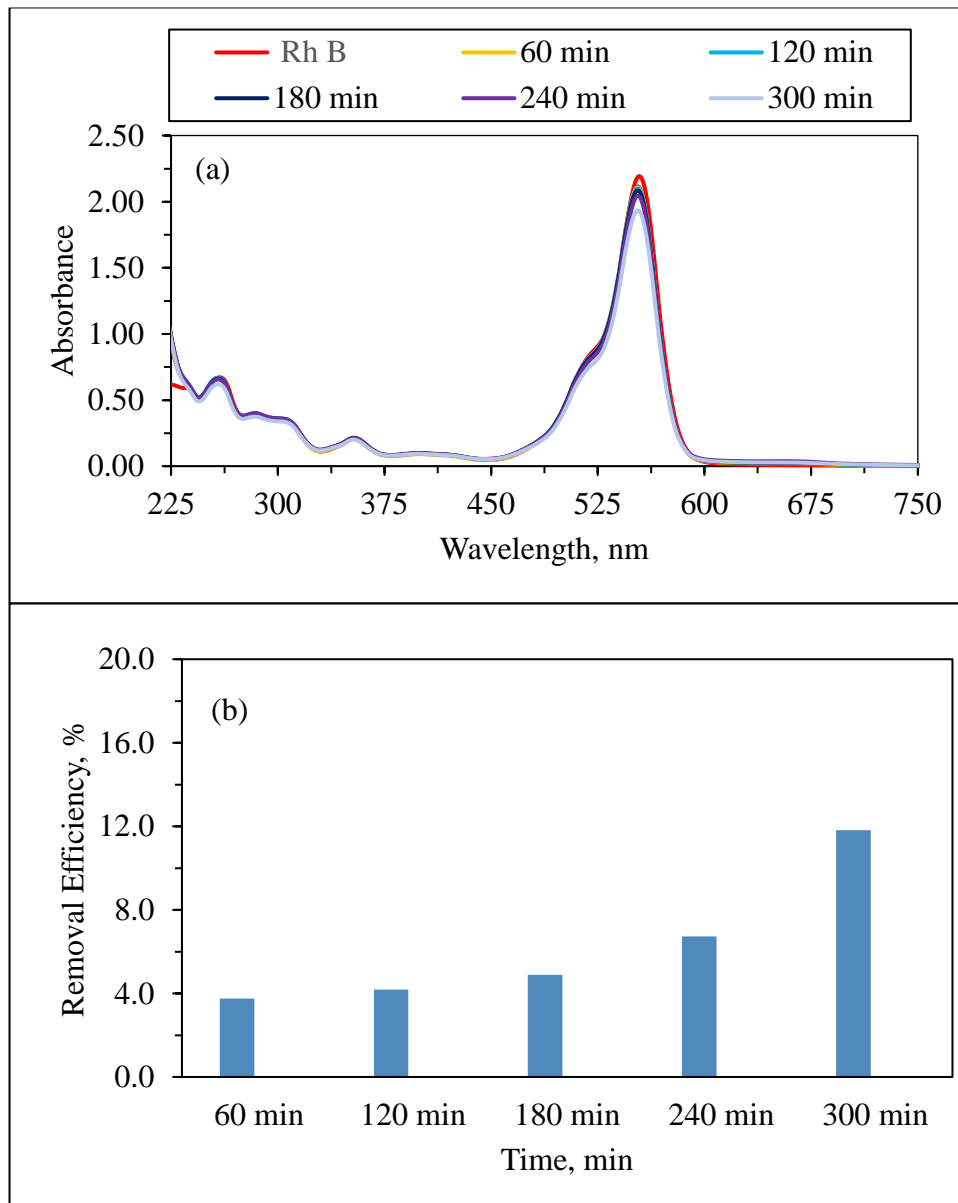


Figure 5. (a) UV-vis Photocatalytic Degradation Profiles of CeO₂ nanoparticles, (b) Photocatalytic Decolorization Degree of Rh B upon the Presence of CeO₂ Nanoparticles.

The observed reduction in the maximum wavelength absorption peak ($\lambda_{\max}=553$ nm) with time could indicate the destruction of the conjugated xanthene structure of Rh B and the photocatalytic degradation of dye (Hu et al., 2015). The Rh B removal decolorization degree of the CeO₂ nanoparticles was maintained at 12% after 300 minutes of irradiation. This slow degradation could be explained by the surface charges of both CeO₂ nanoparticles and Rh B. It was reported that the isoelectric potential of CeO₂ was pH=6-8-7.3 (Issarapanacheewin et al., 2016; Nadjia, et al., 2018; Wu et al., 2021). The pH of the solution used in this photocatalytic study was at around pH=6.0. Since the surface of CeO₂ was positively charged at this pH value, Rh B cationic dye molecules were preferably repelled from the CeO₂ surface. This repulsion could result in a low decolorization degree of Rh B.

CONCLUSION

In this study, CeO₂ nanoparticles were synthesized in a cost-effective and facile way by precipitation method. Structural and morphological properties of CeO₂ nanoparticles were confirmed by FTIR-ATR, Raman, XRD, and SEM analysis. XRD and Raman results indicated a fluorite structure of CeO₂. The functional groups of CeO₂ were verified from FTIR-ATR results. SEM images revealed that CeO₂ nanoparticles exhibited almost spherical particles with slight agglomeration. Rh B was chosen as the cationic model dye, and the photocatalytic degradation of Rh B upon the use of CeO₂ nanoparticles was also investigated. Henceforth, future photocatalytic studies on anionic dye removal are proposed for prospects in research, with an overall benefit for a further application of CeO₂ nanoparticles used in the field of catalysis. The prepared CeO₂ nanoparticles could be a promising candidate material that could be utilized for various applications, especially in photocatalysis, solar cell, and optoelectronics.

REFERENCES

- Al-Buriah, A. K., Al-Gheethi, A. A., Senthil Kumar, P., Radin Mohamed, R. M. S., Yusof, H., Alshalif, A. F., & Khalifa, N. A. (2022). Elimination of rhodamine B from textile wastewater using nanoparticle photocatalysts: A review for sustainable approaches. *Chemosphere*, 287, 132162. doi:https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.132162
- Al-Gheethi, A. A., Azhar, Q. M., Senthil Kumar, P., Yusuf, A. A., Al-Buriah, A. K., Radin Mohamed, R. M. S., & Al-shaibani, M. M. (2022). Sustainable approaches for removing Rhodamine B dye using agricultural waste adsorbents: A review. *Chemosphere*, 287, 132080. doi:https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.132080
- Amalina, F., Abd Razak, A. S., Krishnan, S., Zularisam, A. W., & Nasrullah, M. (2022). A review of eco-sustainable techniques for the removal of Rhodamine B dye utilizing biomass residue adsorbents. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 128, 103267. doi:https://doi.org/10.1016/j.pce.2022.103267
- Babitha, K. K., Priyanka, K. P., Sreedevi, A., Ganesh, S., & Varghese, T. (2014). Effect of 8MeV electron beam irradiation on the structural and optical properties of CeO₂ nanoparticles. *Materials Characterization*, 98, 222-227. doi:https://doi.org/10.1016/j.matchar.2014.11.004
- Cerrato, E., Calza, P., & Cristina Paganini, M. (2022). Photocatalytic reductive and oxidative ability study of pristine ZnO and CeO₂-ZnO heterojunction impregnated with Cu₂O. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 427, 113775. doi:https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2022.113775
- Chang, S., Jia, Y., Zeng, Y., Qian, F., Guo, L., Wu, S., Lu, J., & Han, Y. (2022). Effect of interaction between different CeO₂ plane and platinum nanoparticles on catalytic activity of Pt/CeO₂ in toluene oxidation. *Journal of Rare Earths*, 40(11), 1743-1750. doi:https://doi.org/10.1016/j.jre.2021.10.009
- De Faria, L. A., & Trasatti, S. (1994). The point of zero charge of CeO₂. *Journal of Colloid and Interface Science*, 167(2), 352-357. doi:https://doi.org/10.1006/jcis.1994.1370
- Durodola, S. S., Akeremale, O. K., Ore, O. T., Bayode, A. A., Badamasi, H., & Olusola, J. A. (2023). A Review on nanomaterial as photocatalysts for degradation of organic pollutants. *Journal of Fluorescence*. doi:10.1007/s10895-023-03332-x
- Hu, L., Yuan, H., Zou, L., Chen, F., & Hu, X. (2015). Adsorption and visible light-driven photocatalytic degradation of Rhodamine B in aqueous solutions by Ag@AgBr/SBA-15. *Applied Surface Science*, 355, 706-715. doi:https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2015.04.166
- Issarapanacheewin, S., Wetchakun, K., Phanichphant, S., Kangwansupamonkon, W., & Wetchakun, N. (2016). Photodegradation of organic dyes by CeO₂/Bi₂WO₆ nanocomposite and its physicochemical properties investigation. *Ceramics International*, 42(14), 16007-16016. doi:https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2016.07.108

- Kurian, M. (2020). Cerium oxide based materials for water treatment – A review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 8(5), 104439. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104439>
- Kusmierek, E. (2020). A CeO₂ Semiconductor as a photocatalytic and photoelectrocatalytic material for the remediation of pollutants in industrial wastewater: A Review. *Catalysts*, 10(12), 1435. Retrieved from <https://www.mdpi.com/2073-4344/10/12/1435>
- Linghu, X., Shu, Y., Liu, L., Zhao, Y., Zhang, J., Chen, Z., Shan, D., & Wang, B. (2023). Hydro/solvothermally synthesized bismuth tungstate nanocatalysts for enhanced photocatalytic degradation of dyes, antibiotics, and bacteria in wastewater: A review. *Journal of Water Process Engineering*, 54, 103994. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2023.103994>
- Ma, D., Yi, H., Lai, C., Liu, X., Huo, X., An, Z., Li, L., Fu, Y., Li, B., Zhang, B., Qin, L., Liu, S., & Yang, L. (2021). Critical review of advanced oxidation processes in organic wastewater treatment. *Chemosphere*, 275, 130104. doi:<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.130104>
- Ma, J., Xu, N., Luo, Y., Liu, Q., & Pu, Y. (2023). Defect generation and morphology transformation mechanism of CeO₂ particles prepared by molten salt method. *Ceramics International*, 49(3), 4929-4943. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2022.10.007>
- Ma, R., Zhang, S., Wen, T., Gu, P., Li, L., Zhao, G., Niu, F., Huang, Q., Tang, Z., & Wang, X. (2019). A critical review on visible-light-response CeO₂-based photocatalysts with enhanced photooxidation of organic pollutants. *Catalysis Today*, 335, 20-30. doi:<https://doi.org/10.1016/j.cattod.2018.11.016>
- Mallesappa, J., Nagabhushana, H., Prasad, B. D., Sharma, S. C., Vidya, Y. S., & Anantharaju, K. S. (2016). Structural, photoluminescence and thermoluminescence properties of CeO₂ nanoparticles. *Optik*, 127(2), 855-861. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2015.10.114>
- Nadjia, L., Abdelkader, E., Naceur, B., & Ahmed, B. (2018). CeO₂ nanoscale particles: Synthesis, characterization and photocatalytic activity under UVA light irradiation. *Journal of Rare Earths*, 36(6), 575-587. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jre.2018.01.004>
- Pansambal, S., Oza, R., Borgave, S., Chauhan, A., Bardapurkar, P., Vyas, S., & Ghotekar, S. (2022). Bioengineered cerium oxide (CeO₂) nanoparticles and their diverse applications: a review. *Applied Nanoscience*. doi:10.1007/s13204-022-02574-8
- Ramadan, R., & El-Masry, M. M. (2021). Comparative study between CeO₂/ZnO and CeO₂/SiO₂ nanocomposites for (Cr6+) heavy metal removal. *Applied Physics A*, 127(11), 876. doi:10.1007/s00339-021-05037-z
- Scherrer, P. (1918). Estimation of the size and internal structure of colloidal particles by means of röntgen. *Nachrichten von der Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen*, 2, 96–100.
- Seeharaj, P., Kongmun, P., Paipod, P., Prakobmit, S., Sriwong, C., Kim-Lohsoontorn, P., & Vittayakorn, N. (2019). Ultrasonically-assisted surface modified TiO₂/rGO/CeO₂ heterojunction photocatalysts for conversion of CO₂ to methanol and ethanol. *Ultrasonics Sonochemistry*, 58, 104657. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2019.104657>
- 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. doi:<https://doi.org/10.1016/j.rsma.2021.101802>
- Sing, K. S. W. (1985). Reporting physisorption data for gas/solid systems with special reference to the determination of surface area and porosity (Recommendations 1984). In *Pure and Applied Chemistry* (Vol. 57, pp. 603).
- Solayman, H. M., Hossen, M. A., Abd Aziz, A., Yahya, N. Y., Leong, K. H., Sim, L. C., Monir, M.U., & Zoh, K.-D. (2023). Performance evaluation of dye wastewater treatment technologies: A review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 11(3), 109610. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.109610>
- Tran, D. P. H., Pham, M.-T., Bui, X.-T., Wang, Y.-F., & You, S.-J. (2022). CeO₂ as a photocatalytic material for CO₂ conversion: A review. *Solar Energy*, 240, 443-466. doi:<https://doi.org/10.1016/j.solener.2022.04.051>
- Turkten, N. (2022). A novel low-cost photocatalyst: Preparation, characterization, and photocatalytic properties of CeO₂-diatomite composites. *Water*, 14(21), 3373. Retrieved from <https://www.mdpi.com/2073-4441/14/21/3373>
- Vivek, S., Arunkumar, P., & Babu, K. S. (2016). In situ generated nickel on cerium oxide nanoparticle for efficient catalytic reduction of 4-nitrophenol. *RSC Advances*, 6(51), 45947-45956. doi:10.1039/C6RA04120E

Wu, H., Sun, Q., Chen, J., Wang, G.-Y., Wang, D., Zeng, X.-F., & Wang, J.-X. (2021). Citric acid-assisted ultrasmall CeO₂ nanoparticles for efficient photocatalytic degradation of glyphosate. *Chemical Engineering Journal*, 425, 130640. doi:<https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.130640>

Xie, L., Ren, Z., Zhu, P., Xu, J., Luo, D., & Lin, J. (2021). A novel CeO₂-TiO₂/PANI/NiFe₂O₄ magnetic photocatalyst: Preparation, characterization and photodegradation of tetracycline hydrochloride under visible light. *Journal of Solid State Chemistry*, 300, 122208. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jssc.2021.122208>



Kahramanmaraş Sütçü İmam University

Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 04.10.2023
Kabul Tarihi : 20.02.2024

Received Date : 04.10.2023
Accepted Date : 20.02.2024

COĞRAFİ BİLGİ SİSTEMLERİ TABANLI ANALİTİK HİYERARŞİ YÖNTEMİ KULLANILARAK GÜNEŞ ENERJİSİ SANTRALİ YER SEÇİMİ: MARDİN İLİ ÖRNEĞİ

SOLAR POWER PLANT SITE SELECTION USING GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEMS BASED ANALYTICAL HIERARCHY METHOD: THE CASE OF MARDIN PROVINCE

Durmuş Ali TEKDAMAR^{1*} (ORCID: 0000-0002-8706-9849)
*Kübra TEKDAMAR*² (ORCID: 0000-0002-2952-6298)

¹ Mardin Artuklu Üniversitesi, Mimarlık ve Şehir Planlama Bölümü, Mardin, Türkiye
² Bartın Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Bartın, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Durmuş Ali TEKDAMAR, durmusalitekdamar@artuklu.edu.tr

ÖZET

Günümüzde teknolojinin hızla gelişmesi ve insan nüfusunun artmasıyla birlikte enerji tüketimi de artmaktadır. Bu durum mevcut fosil yakıt kaynaklarının hızla tükenmesi, çevre kirliliği ve iklim değişikliği gibi çevresel sorunlara neden olmaktadır. Tükenen fosil yakıt rezervleri ve artan çevresel kaygılar, toplumların çevre dostu enerji üretme yöntemlerini geliştirmeye ve uygulamaya yönelik çabalarını artırarak günümüzde yenilenebilir enerji kaynaklarına yatırım yapmayı teşvik etmektedir. Yenilenebilir enerji kaynakları, çevresel etkileri azaltma konusundaki önemli bir rol oynamaktadır. Güneş enerjisi gibi yenilenebilir enerji kaynakları, dünya enerji sorunlarının çözümünde en umut verici alternatiflerden biri olarak öne çıkmaktadır. Bu kaynakların optimum kullanımı için uygun yerlerin etkili bir şekilde belirlenmesi büyük önem taşımaktadır. Bu çalışma, Türkiye'nin güneydoğusunda yer alan Mardin ili bütününe yönelik uygun güneş enerjisi santrali yer seçimi için Coğrafi Bilgi Sistemi ve Analitik Hiyerarşi Prosesi temelinde Çok Kriterli Bir Karar Verme sistemi oluşturmayı amaçlamaktadır. Bu kapsamda elde edilen sonuçlara göre, çalışma alanı güneş enerjisi santrali kurulumu için %68.12'lik oran ile "uygun", %2.48'lik oran ile "en uygun" düzeyde olduğu tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Yenilenebilir enerji, güneş enerjisi santrali, analitik hiyerarşi prosesi, CBS, Mardin

ABSTRACT

Today, with the rapid development of technology and the increase in human population, energy consumption is also increasing. This situation causes environmental problems such as rapid depletion of existing fossil fuel resources, environmental pollution and climate change. The depleting fossil fuel reserves and increasing environmental concerns increase the efforts of societies to develop and implement environmentally friendly energy production methods and encourage investment in renewable energy sources today. Renewable energy sources play an important role in reducing environmental impacts. Renewable energy sources, such as solar energy, stand out as one of the most promising alternatives in solving the world's energy problems. For the optimum utilization of these resources, it is of great importance to effectively identify suitable locations. This study aims to develop a Multi-Criteria Decision-Making system based on Geographic Information System and Analytic Hierarchy Process for selecting a suitable solar power plant location for the whole Mardin province located in southeastern Turkey. According to the results obtained in this context, the study area was found to be "suitable" with a rate of 68.12% and "most suitable" with a rate of 2.48% for solar power plant installation.

Keywords: Renewable energy, solar power plant, analytical hierarchical process, GIS, Mardin

GİRİŞ

Enerji, neredeyse tüm insan faaliyetlerinde önemli bir rol oynamakla birlikte sürdürülebilir kalkınma ve toplum refahı için önemli bir faktördür (Uyan, 2017a). Sürdürülebilir enerji temini için küresel talep önemli ölçüde artmakta ve önümüzdeki yıllarda da büyük ölçüde artması beklenmektedir (Habib vd., 2020). Uluslararası Enerji Ajansı'na (IEA) göre, fosil yakıtlar şu anda tüm dünya için birincil enerji üretim kaynaklarıdır (Saraswat vd., 2021). Dünyada enerji ihtiyacının %80'i temel fosil yakıtlar olan petrol (%31), kömür (%28) ve doğal gazdan (%22) sağlanmaktadır (Uyan, 2017a; Saraswat vd., 2021). Teknolojideki hızlı gelişmeler ve nüfus artışına bağlı artan enerji talebi, mevcut fosil yakıt rezervlerinin azalması, küresel ısınma ve çevre kirliliği gibi çevresel sorunları daha da önemli bir duruma getirmiştir. Bu nedenle, yenilenebilir enerji kaynaklarına yönelik çalışmalar ve yatırımlar artmıştır. Yenilenebilir enerjinin en büyük avantajları, ekolojik dengeyi olumsuz etkilememesi veya etkisini minimize etmesidir (Uyan, 2017b). Yenilenebilir enerji, sürdürülebilirlik, çevresel koruma ve enerji güvenliği açısından önemlidir (Fang vd., 2018). Fosil yakıtların sınırlı kaynakları ve çevresel etkileri göz önüne alındığında, yenilenebilir enerji kaynakları, sera gazı emisyonlarını azaltarak iklim değişikliği ile mücadeleye katkıda bulunmakta ve enerji arzını daha güvenli ve istikrarlı hale getirmektedir. Ayrıca, yerel ekonomiyi desteklemekte ve enerji maliyetini düşürmektedir (Kumar, 2020).

Güneş enerjisi, yenilenebilir enerjinin en önemli kaynaklarından biri olarak kabul edilir ve fosil yakıtlara olan bağımlılığı azaltma, sera gazı emisyonlarını düşürme ve enerji güvenliğini artırma potansiyeline sahiptir (Habib vd., 2020). Aynı zamanda temiz ve sürdürülebilir bir enerji kaynağı olarak değerlendirilen güneş enerjisi, diğer enerji kaynaklarına kıyasla çok daha düşük çevresel etkilere sahiptir (Uyan, 2017a). Güneş enerjisi sistemleri, uzun vadeli maliyet tasarrufu sağlayabilir ve enerji maliyetlerini düşürebilir. Güneş enerjisi teknolojilerinin hızla gelişmesi ve dünya genelinde yaygınlaşması, yeşil ekonomiye geçişin hızlanmasına katkıda bulunarak ekonomik kalkınmayı destekleyebilir (Azhar vd., 2023). Bu nedenle güneş enerjisi, sürdürülebilir enerji dönüşümünün önemli bir bileşenidir.

Türkiye, yenilenebilir enerji kaynaklarını kullanımını artırmak ve sürdürülebilir enerji üretimini teşvik etmek için çeşitli yasal ve yönetsel düzenlemeleri uygulamaktadır. Sürdürülebilir kalkınma amaçları, birçok ülkede olduğu gibi ülkemizin kalkınma planlarına da dahil edilmiştir. Birleşmiş Milletler'in 2030 Sürdürülebilir Kalkınma Hedeflerinin bir parçası olan Hedef 7'de "Herkes için erişilebilir, güvenilir, sürdürülebilir ve modern enerjiye erişimi sağlamak"; enerjiye yönelik sürdürülebilir bir dönüşümü teşvik etmeyi amaçlamaktadır. Özellikle Hedef 7.2'de "2030 yılına kadar yenilenebilir enerjinin küresel enerji bileşimi içindeki payını önemli ölçüde artırmak" maddesi ile enerji kaynaklarının kullanımını daha sürdürülebilir hale getirmeyi ve yenilenebilir enerji kaynaklarının küresel enerji tüketimindeki payını artırmayı hedeflemektedir. Aynı zamanda 11. Kalkınma Planı'na göre; "Yenilenebilir enerji kaynaklarından elektrik üretimi artırılacak, yenilenebilir enerji üretiminin şebekeye güvenli bir şekilde entegrasyonunun sağlanması amacıyla gerekli planlama ve yatırımlar gerçekleştirilecektir." maddesi ile Türkiye'deki enerji politikalarında ve planlarında yenilenebilir enerji üretimine verilen önem açıkça görülmektedir. Bu gibi politika ve planlar, Türkiye'nin enerji sektöründe daha temiz ve sürdürülebilir bir geleceğe doğru ilerlemesine katkıda bulunurken, aynı zamanda iklim değişikliği ile mücadele ve enerji güvenliği gibi ulusal ve uluslararası önceliklere de yanıt vermektedir.

Türkiye, doğal kaynakları ve coğrafi konumu sayesinde zengin bir yenilenebilir enerji potansiyeline sahip bir ülke olarak öne çıkmaktadır. Özellikle güneş enerjisinden faydalanma potansiyeli yüksek olan ülkemizde, ortalama yıllık toplam güneşlenme süresi günlük 7.5 saate kadar çıkarken, ortalama toplam ışınım şiddeti de 1.524 kWh/m²-yıl (günlük 4.17 kWh/m²) seviyelerine ulaşmaktadır ve bu değerler Türkiye'nin güneş enerjisi potansiyelinin 400 milyar kWh/yıl üzerinde olduğunu göstermektedir. (Uyan, 2017b; URL-1). Ülkemizde özellikle Güneydoğu Anadolu Bölgesi, yüksek güneşlenme süreleriyle güneş enerjisi sistemleri için uygun bir potansiyele sahiptir. Bu bölgedeki yüksek güneşlenme süreleri, güneş enerjisine dayalı üretimi verimli bir şekilde desteklemektedir.

Güneş enerjisine yönelik en önemli önceliklerden biri, kurulacak güneş enerjisi santrali (GES) için en uygun yer seçimidir (Konurhan vd., 2023). GES kurulumu yer seçimi, dünya genelinde önemli bir konu haline gelmiştir ve ülkemizde de GES santrali kurulacak yerlerin belirlenmesine yönelik birçok çalışma yapılmıştır (Yalçın ve Yüce, 2020). Yapılan çalışmaların çoğu, yer seçimi problemlerinin çözülmesinde Çok Kriterli Karar Verme (ÇKKV) tekniklerini ele alarak yaklaşmış, karar vericilerin tercihlerini ve gereksinimlerini çözüm sürecine dahil etmiştir (Ozdemir ve Sahin, 2018).

ÇKKV tekniği, bir kararın alınmasında birden çok kriter veya faktörün dikkate alındığı bir analiz ve değerlendirme sürecidir (Azhar vd., 2023). Bu yöntem, karmaşık kararlar verilirken çeşitli faktörlerin, hedeflerin ve kısıtlamaların bir araya getirilmesini amaçlamaktadır. ÇKKV çevresel kararlar dahil birçok alandaki karar süreçlerini desteklemek için kullanılan etkili bir tekniktir (Kereush ve Perovych, 2017). Ayrıca, farklı alternatifler arasından en uygun olanı seçmek için çeşitli çelişen kriterleri açıkça değerlendirmek amacıyla bir yaklaşım sunmaktadır. Bu değerlendirme kriterlerinin ağırlıklandırılmasında en yaygın kullanılan ÇKKV tekniği ise Analitik Hiyerarşi Prosesi (AHP) yöntemidir (Shao vd., 2023).

AHP karar vericilere, farklı kriterlerin ve alternatiflerin önem sıralamalarını belirlemelerine yardımcı olan bir yapı sunmaktadır. Karmaşık kararlar alırken birden çok kriterin ve alt kriterin değerlendirilmesini kolaylaştırmak amacıyla geliştirilmiştir (Shao vd., 2023). Hiyerarşik yapısı ve kullanıcıların her bir kriter için farklı ağırlık vermesine izin veren ikili karşılaştırması sayesinde kullanımı kolaydır (Ozdemir ve Sahin, 2018). Bu yöntem seçim, maliyet-fayda analizi, tahmin, değerlendirme, karar verme, öncelik-sıralama, planlama ve geliştirme gibi çeşitli amaçlar için kullanılmaktadır. AHP yenilenebilir enerji dahil olmak üzere birçok önemli alanda yaygın olarak kullanılmaktadır (Azhar vd., 2023).

Coğrafi Bilgi Sistemi (CBS) tabanlı mekânsal analiz, uygun alanların belirlenmesi ve yenilenebilir enerji kaynaklarının planlama sürecine dahil edilmesi için etkili bir araçtır. CBS, yer seçimi sürecinde karar vericilere daha fazla veri ve analitik güç sağlayarak daha bilinçli kararlar almalarına yardımcı olmaktadır. Yer seçim süreçlerinde AHP yöntemi, coğrafi bilgileri oluşturan, düzenleyen, görselleştiren, analiz eden ve yayınlayan CBS ile entegre edilebilmektedir (Azhar vd., 2023). Bu kapsamda CBS tabanlı AHP yöntemi, mekânsal karar verme süreçlerinde çok kriterli değerlendirmeleri entegre eden etkili bir süreçtir. Coğrafi veri analizi ve AHP'nin hiyerarşik yapılarını birleştirerek, karar vericilere mekânsal bağlamda daha kapsamlı ve bilinçli kararlar almalarına olanak tanımaktadır. CBS, coğrafi veri tabanlı faktörleri içerirken, AHP ise bu faktörleri önceliklendirme ve ağırlıklandırma süreçlerini yönetmektedir (Azmi vd., 2022; Azhar vd., 2023). Bu entegrasyon yer seçimi, planlama ve kaynak tahsisi gibi coğrafi odaklı karar verme alanlarında, optimize edilmiş ve bilimsel temelli çözümler sunmaktadır.

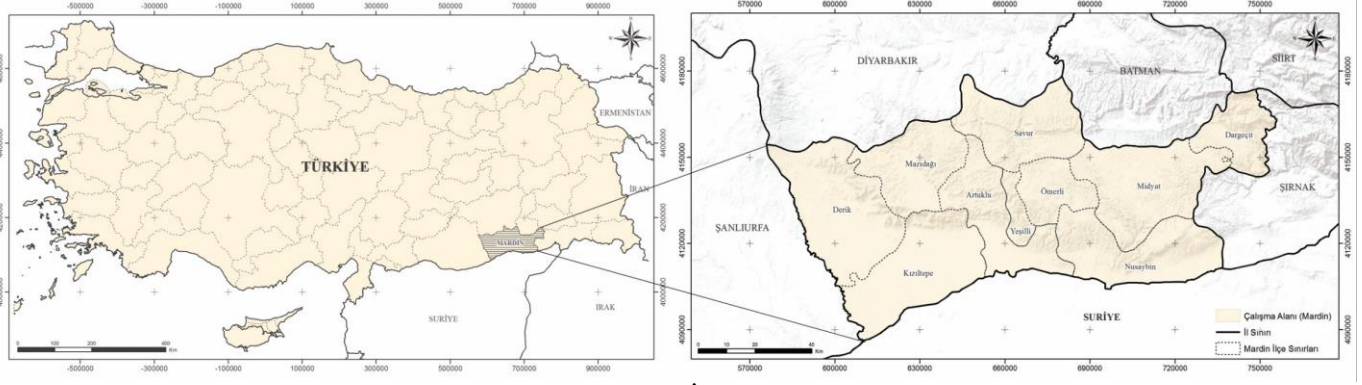
GES için uygun yer seçimi, potansiyel enerji üretimi, çevresel faktörler, güvenlik, trafo merkezlerine olan uzaklık ve topografik özellikler gibi birçok faktörün birlikte değerlendirilmesi gerektiği için CBS tabanlı AHP yöntemi kullanımına oldukça uygundur. AHP yöntemi ve CBS'nin uygulanması, yenilenebilir enerji projelerinin ön fizibilite ve fizibilite analizlerinde, bütçelerin ve doğal kaynakların doğru bir şekilde yönetilmesini amaçladığından dolayı önemli bir rol oynamaktadır. Bu yöntem, mekânsal bilgi ve kriter ağırlıklarını bir araya getirerek, ilgili veri katmanlarını üst üste bindirilmiş ağırlıklı bir analize dayalı olarak GES için en uygun konumların belirlenmesini sağlar (Ruiz ve ark., 2020; Villacreses vd., 2022).

Bu kapsamda çalışmanın amacı, CBS tabanlı ÇKKV tekniklerinden biri olan AHP yöntemi kullanılarak Mardin ili bütününe yönelik GES kurulumu için uygun alanların belirlenmesidir. Potansiyel GES için yer seçimine ilişkin karar verme sürecinde, çoklu bakış açılarını barındırma ve büyük hacimli karmaşık bilgileri işleme konusundaki zorlukları azaltmak için CBS tabanlı AHP yöntemi kullanılmıştır. Çalışmada önerilen bu yaklaşımlar büyük ölçekli GES için en uygun alanların belirlenmesinde faydalı bilgiler sağlamaktadır. Türkiye'nin güneydoğu kesiminde güneş enerji santralleriyle ilgili sınırlı sayıda çalışma bulunması, Mardin ili genelinde güneş enerjisi santrali kurulumu konusunda gerçekleştirilecek potansiyel araştırmaların gerekliliğini vurgulamakta ve bu çalışmanın bilimsel açıdan özgün bir katkı sunma potansiyelini ortaya koymaktadır.

MATERYAL VE YÖNTEM

Çalışma Alanına İlişkin Genel Bilgiler

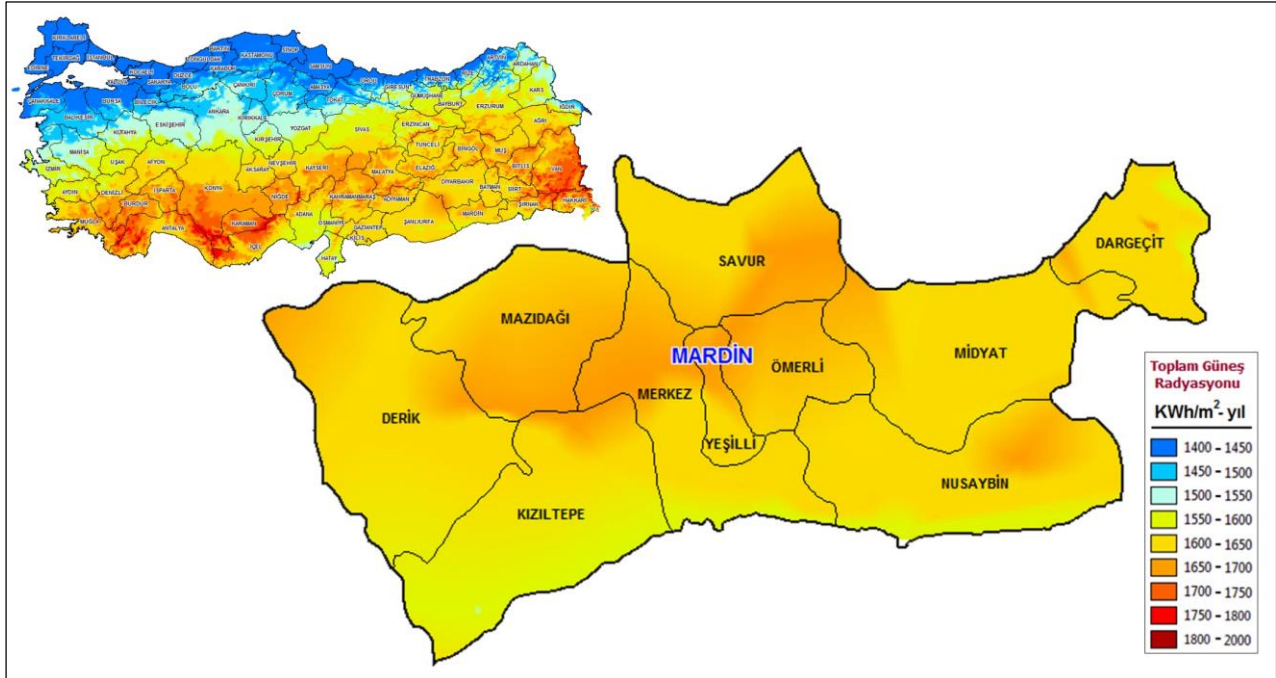
Çalışma alanı; Güneydoğu Anadolu Bölgesinde yer alan Mardin ili sınırları olarak belirlenmiştir (Şekil 1). Mardin ili coğrafi konum olarak 36°55'-37°45' kuzey enlemleri ve 39°53'-41°54' doğu boylamları arasında yer almaktadır. Yüzölçümü yaklaşık olarak 8784.65 km²'dir. Fırat-Dicle Havzası içerisinde yer alan Mardin; güneyinde Suriye, batısında Şanlıurfa ili, kuzeyinde Diyarbakır ve Batman, doğusunda Şırnak ve kuzeydoğusunda ise Siirt illeri yer almaktadır. Mardin ili Artuklu, Kızıltepe, Midyat, Nusaybin, Dargeçit, Derik, Mazıdağı, Ömerli, Yeşilli ve Savur olarak toplam on ilçesi bulunmaktadır. Tarihi İpek Yolu'nun kavşağında bulunması sebebiyle tarih boyunca önemli bir yerleşim merkezi olmuştur. 2022 yılı TÜİK Adrese Dayalı Nüfus Kayıt Sistemi verilerine göre Mardin ilinin toplam nüfusu 870.374 kişidir.



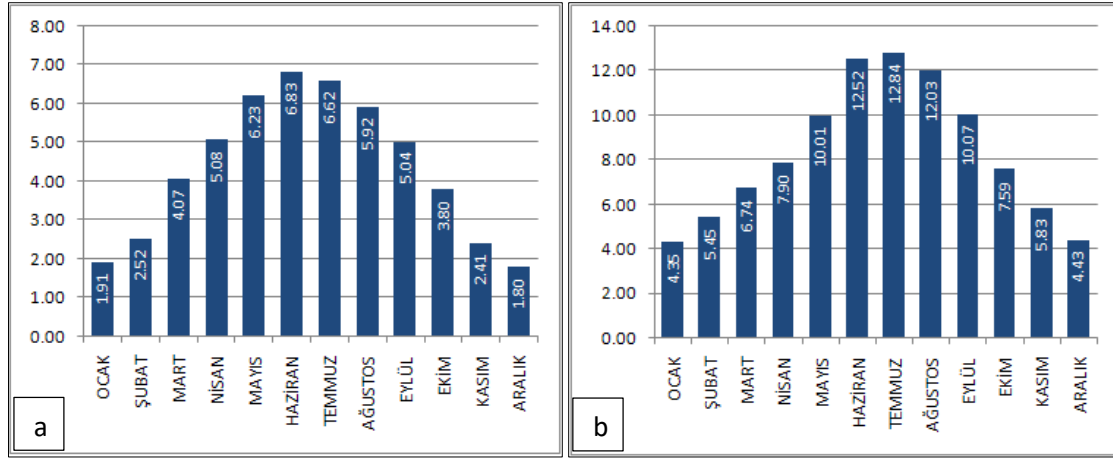
Şekil 1. Çalışma Alanına İlişkin Konum Haritası

Çalışma alanına ilişkin doğal peyzaj özellikleri incelendiğinde, alanın %56.66'lık oranla %0-6 eğimli geniş düzlük arazilerin oluşturduğu ve yükseltinin 350 m ile 1454 m arasında değişmekte olduğu tespit edilmiştir. Çalışma alanının alansal olarak %41.40'lık oran ile büyük bir kısmını güney yönlü bakımlar oluşturmaktadır. İklimsel veriler incelendiğinde bölgede; Akdeniz iklimi ve karasal iklimin ortak özelliklerine görülmekte olup yazları çok sıcak ve kurak, kışları ise ılımandır. Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nün verilerine göre yıllık ortalama sıcaklık 16.1°C, ortalama güneşlenme süresi 8.1 saat ve yıllık toplam yağış miktarı ortalama 675.6 mm'dir (URL-2, 2023).

Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığının Güneş Enerjisi Potansiyeli Atlası (GEPA)'na göre, Mardin ilinin Toplam Güneş Radyasyon Haritasına (Şekil 2) göre Mardin'in ortalama yıllık toplam ışınım değeri (Şekil 3a) 1588.66 kWh/m² olarak, ortalama yıllık toplam güneşlenme süresi (Şekil 3b) ise 8,31 saat olarak hesaplanmıştır (URL-1, 2023). Mardin ili, Türkiye'nin güneydoğu kesiminde bulunan bir bölge olması nedeniyle güneş enerjisi potansiyeli açısından büyük bir değere sahiptir. Uygun coğrafi konumu ve iklim koşulları sebebiyle çalışma alanı olarak, Mardin ili bütünü seçilmiştir. Ayrıca, Doğan ve Uludağ (2018) tarafından ifade edildiği gibi, diğer illerle karşılaştırıldığında Mardin ilinin GES kurulumu için yüksek potansiyele sahip olması, bu tercihin bir diğer nedenidir.



Şekil 2. Mardin Toplam Güneş Radyasyonu Değerleri (URL-1, 2023)



Şekil 3. a. Mardin Global Radyasyon Değeri-kWh/m² b. Mardin Güneşlenme Süreleri-saat (URL-1, 2023)

Yer Seçimi İçin Kullanılan Kriterler

GES yer seçim kriterleri, üretim maliyetlerini, santralin kurulum ve işletme süreçlerini doğrudan etkileyen önemli bir konudur. Yer seçimi kararları, genellikle verimlilik, yasal düzenlemelere uygunluk ve çevresel etkiler gibi değerlendirme kriterlerine dayalı olarak yapılmaktadır. GES yer seçimi için bir dizi faktörün dikkate alınması gereken kapsamlı bir süreçtir. Bu kapsamda gerçekleştirilen literatür taraması sonucunda en çok tercih edilen ve çalışma alanına uygun olan kriterler seçilmiştir. Bu doğrultuda; 3 ana faktör (teknik, sosyo-çevresel ve ekonomik) ve 8 kriter (güneş radyasyonu, eğim, bakı, arazi kullanımı, yerleşim alanlarına uzaklık, yol ağına uzaklık, enerji nakil hatlarına uzaklık ve trafo merkezine uzaklık) belirlenmiştir. Bu kriterlere ilişkin teknik veriler literatür taraması ışığında; güneş radyasyonu (Kaimbekova, 2020; Turan, 2022), eğim (Obut, 2016; Kaimbekova, 2020), bakı (Yolcan ve Köse, 2020; Saraswat, 2021; Turan, 2022), arazi kullanımı (Arca ve Çıtıröglü, 2022; Turan, 2022), yerleşim alanlarına uzaklık (Obut, 2016; Kaimbekova, 2020; Turan, 2022), yol ağına uzaklık (Kaimbekova, 2020; Sarsıcı, 2020), enerji nakil hatlarına uzaklık (Obut, 2016; Kaimbekova, 2020; Soydan, 2021; Saraswat, 2021) ve trafoya uzaklık (Sarsıcı, 2020; Saraswat, 2021) uygunluk dereceleri elde edilmiştir.

GES yer seçimi için kullanılan; güneş radyasyonu verisi Global Solar Atlas web sitesinden (URL-3), eğim ve bakı haritaları USGS EarthExplorer web sitesinden indirilen DEM verisinden (URL-4), arazi kullanımı ve yerleşim alanları haritası Copernicus web sitesinden alınan Corine 2018 arazi örtüsü verisinden (URL-5) oluşturulmuştur. Ayrıca, yol, enerji nakil hatları ve trafo verileri OpenStreetMap web sitesinden (URL-6) elde edilmiştir.

Güneş Radyasyonu (K1)

Güneş radyasyonu, güneş ışınlarının yeryüzüne düşen enerji miktarını ifade etmektedir. GES yer seçiminde güneş radyasyonu oldukça önemlidir. GES için en uygun yerler, yüksek güneş radyasyonuna sahip bölgelerdir (Saraswat vd., 2021). Bölgenin güneş ışınım düzeyi üretilen enerji miktarı ile doğru orantılıdır. Güneş radyasyonunun yoğunluğu, santralin kurulacağı bölgenin coğrafi konumuna, iklim koşullarına ve yüzey özelliklerine bağlıdır. Güneş radyasyonu, güneş enerjisi panellerinde elektrik enerjisine dönüştürülebilen fotovoltaiik hücreler tarafından yakalanır. Dolayısıyla, GES için yer seçiminde, yüksek güneş radyasyonuna sahip bölgelerin tercih edilmesi, güneş enerjisi üretimi ve verimliliği açısından büyük önem taşımaktadır. Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı'nın güneş enerjisine dayalı santral sahası alanı kurmak için yıllık toplam güneş radyasyonu değerinin 1650 KWh/m²-yıl'a eşit veya yüksek olması zorunludur (Uyan, 2017a).

Eğim (K2)

GES yerlerinin belirlenmesinde eğim, önemli bir faktördür. Eğim, güneş panellerinin doğru açıda yerleştirilmesi için gereklidir. Güneş enerjisi panelleri, güneş ışınlarının doğrudan geldiği açıya dik bir şekilde yerleştirildiğinde, maksimum verimlilik sağlanır. Bu nedenle, güneş GES kurulacağı alanın eğimi, doğru açıda yerleştirme için kritik bir faktördür. Yer seçimi sürecinde, en ekonomik eğim değeri genellikle %1 ile %3 arasında bulunmalıdır; çünkü %3'ten daha fazla eğime sahip araziler verimlilik açısından uygun kabul edilmez (Şenlik, 2017; Arca ve Çıtıröglü, 2022). Literatürden elde edilen verilere dayanarak, mevcut araştırma çalışması güneş enerjisi için maksimum 5 derecelik bir eğim dikkate almaktadır.

Bakı (K3)

GES verimliliğini etkileyen önemli bir diğer faktör de arazi topografyasıdır. Genellikle GES için düz ve güney yönlü alanlar tercih edilmektedir. Eğimli bölgeler, gölgelendirme sorunlarını artırabilmekte, kurulum süreçlerini zorlaştırabilmekte ve maliyetleri yükseltebilmektedir (Şenlik, 2017).

Arazi Kullanımı (K4)

GES yer seçiminde, kurulum yapılacak alanın arazi kullanım durumu, verimliliği etkileyen temel faktörlerden biridir. Bir enerji projesinin kurulumu, mevcut arazilerin dikkatli bir şekilde değerlendirilmesini gerektirmektedir (Saraswat vd., 2021). Yer seçimi sırasında, kurulum yapılacak alandaki doğal bitki örtüsü, gölgeleme etkisini artırarak verimliliği azaltmaktadır. Bu nedenle, ağaç örtüsüne sahip alanlar ve doğal bitki örtüsünün verimliliği olumsuz etkileyebileceği bölgeler, tercih edilmeyen yerler arasında yer almaktadır. (Şenlik,2017).

Yerleşim Alanlarına Olan Uzaklık (K5)

GES yer seçimi sürecinde dikkate alınması gereken faktörlerden biri de yerleşim alanlarına olan uzaklıktır. GES genellikle kırsal bölgelere kurulur, bu nedenle yerleşim yerlerinden uzak olmak hem çevresel hem de toplumsal uyum açısından kritik bir öneme sahiptir. Yerleşim alanlarına olan uzaklık, çevresel etkilerin en aza indirilmesine yardımcı olmakla birlikte sosyal uyum açısından da önemlidir. Ancak, uzaklık kriteri diğer kriterlerle birlikte değerlendirilmelidir ve her bölgenin kendine özgü koşulları dikkate alınarak karar verilmelidir. Literatür taramasına göre, kentsel alanlar ile güneş santralleri arasında en az 500 m mesafe olması gerekmektedir (Villacreses vd., 2022).

Yol Ağına Uzaklık (K6)

GES yer seçiminde ekonomik açıdan önemli bir diğer faktör yol ağına uzaklıktır. Uygun yerler, gereksiz çevresel zararları ve yol yapım maliyetlerini önleyecek şekilde ulaşım ağına yakın olmalıdır (Saraswat vd., 2021). Yola olan uzaklık, santralin bakım ve onarım işlemleri için de önemlidir. Santralin, bakım ve onarım işlemleri sırasında, yolların ulaşım kolaylığı sağlaması gerekmektedir. Ayrıca, güneş enerjisi panellerinin taşınması ve montajı için de uygun bir yolun olması önemlidir. Yol trafiğinden kaynaklanan atıkların güneş panellerine olumsuz etkileri ve güvenlik açısından potansiyel sorunları önlemek amacıyla, literatürde santralin yol ağına en az 100 metre uzaklıkta olması önerilmektedir (Arca ve Çıtıroğlu, 2022).

Enerji Nakil Hatlarına Uzaklık (K7)

GES'nin enerji nakil hatlarına yakınlığı, verimliliğin korunması açısından kritik bir faktördür. Enerji nakil hatlarına uzak bölgelerde inşa edilen santraller, enerji kaybını artırabilir ve verimliliği azaltabilir (Kaimbekova, 2020). Ayrıca GES kurulması planlanan alanlar ile enerji nakil hatları uzak olduğu takdirde, yeni şebeke kurulması gerekeceğinden ek maliyet oluşturmaktadır. Bu doğrultuda GES için yer seçimi yapılırken enerji nakil hatlarına yakın olması oldukça önemlidir (Turan, 2022).

Trafo Merkezine Uzaklık (K8)

GES yerlerinin belirlenmesinde Trafo merkezlerine olan uzaklık önemlidir. Çünkü üretilen elektrik enerjisi, trafo merkezleri aracılığıyla iletim hatlarına verilerek şebekelere aktarılır. Tesis yakınında, üretilen enerji miktarına uygun kapasitede trafonun bulunması önemlidir. Bu nedenle, yer seçimi yapılırken trafo merkezlerine yakın bölgeler tercih edilmelidir. Aksi durumda yeni trafo merkezleri kurmak gerekirken, bu da ek maliyet getirmektedir (Turan, 2022). Trafo merkezleri, elektrik enerjisinin iletimindeki önemli noktalarındır ve santralin trafo merkezine olan uzaklığı, enerjinin şebekeye aktarılması için gerekli olan maliyetleri etkileyebilir. GES için uygun yerlerinin belirlenmesinde trafo merkezlerine olan uzaklık, maliyet analizi ve enerji verimliliği açısından önemli bir kriterdir. GES yer seçiminde trafo merkezlerine olan uzaklığın 10 km'den fazla olması istenilen bir durum değildir (Arca ve Çıtıroğlu, 2022).

Yöntem

Bu çalışma, CBS tabanlı AHP yöntemi kullanılarak Mardin ili bütününde kurulması planlanan GES'ler için en uygun yerlerin belirlenmesi amacıyla gerçekleştirilmiştir. Literatür çalışmalarının incelenmesi ve uzman görüşlerinin alınmasıyla GES kurulumunu etkileyen en önemli kriterler tespit edilmiştir. Bu kriterler, 3 ana faktör (teknik, sosyo-çevresel ve ekonomik) ve 8 kriter (güneş radyasyonu, eğim, bakı, arazi kullanımı, yerleşim alanlarına uzaklık, yol ağına uzaklık, enerji nakil hatlarına uzaklık ve trafo merkezine uzaklık) olarak belirlenmiştir. Bu kriterlerin önem derecelerini belirlemek amacıyla ÇKKV yöntemlerinden biri olan AHP kullanılmıştır. AHP yönteminde her kriterin diğer kriter ile olan ilişkisel önemini belirlemek için 10 farklı uzman görüşüne başvurulmuştur. Uzman görüşleri

doğrultusunda elde edilen verilerin geometrik ortalamaları alınmış ve bu ortalama değerleri AHP matrisinde kullanılarak kriterin ağırlıkları tespit edilmiştir. CBS ile kriterlere ait mekânsal analizler, ArcMap 10.2 programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Belirlenen kriterlerin literatür araştırması ışığında elde edilen uygunluk derecelerine göre 5 kategoride (en uygun, uygun, orta uygun, az uygun, uygun değil) yeniden sınıflandırılmıştır (Tablo 1). Tüm bu adımlar doğrultusunda, oluşturulan nihai haritada Mardin ili bütününe yönelik GES için uygun alanlar tespit edilmiştir. Uygulanan metodoloji Şekil 4'te görülebilir.



Şekil 4. Çalışmaya İlişkin Yöntem Akış Şeması

Tablo 1. Çalışma İçin Belirlenen Kriter ve Uygunluk Dereceleri

Kriterler	Uygunluk Derecesi					
	En Uygun 5	Uygun 4	Orta Derecede Uygun 3	Az Uygun 2	Uygun Değil 1	
Teknik	Güneş Radyasyonu (kWh/m ² /gün)	>1800	1800-1650	1650-1550	-	-
	Eğim (derece)	<1	1-2	2-3	3-5	>5
	Baki	Güney, Düz	Güneydoğu ve Güneybatı	Doğu ve Batı	Kuzeydoğu ve Kuzeybatı	Kuzey
Sosyo-Çevresel	Arazi Kullanımı	Çıplak Alanlar, Otlak	Maden Ocağı, Çalılık	Mera Alanları	Yerleşim	Orman, Su, Tarım
	Yerleşim Alanlarına Uzaklık (m)	>5000	3000-5000	3000-2000	2000-1000	<1000
	Yol Ağına Uzaklık (m)	100-1000	1000-2000	2000-3000	3000-4000	>4000
Ekonomik	Enerji Nakil Hatlarına Uzaklık (m)	<2500	2500-5000	5000-7500	7500-10000	10000<
	Trafo Merkezine Uzaklık (m)	<7500	7500-15000	15000-22500	22500-30000	>30000

Analitik Hiyerarşi Prosesi (AHP)

Saaty (1980) tarafından geliştirilen AHP, çoklu hedeflerle başa çıkmak için bir karar yapısı sunarak alternatifleri sıralamak için en kapsamlı ÇKKV araçlarından biridir. CBS-AHP uygulamaları, AHP'yi diğer karar destek teknikleriyle entegre etmek için en sık kullanılan yaklaşımlar arasındadır (Al Garni vd., 2017). Yapılan literatür taramaları, çok kriterli problemlerin genellikle AHP yöntemi kullanılarak çözüldüğünü ortaya koymaktadır (Uyan, 2017a; Garni ve Awasthi, 2017; Yalçın ve Yüce, 2020; Arca ve Çıtıröğlü, 2022; İnceyavuz vd., 2022). Bu çalışmada da problemimizin çok kriterli yapısı ve AHP yönteminin bu yapının çözümü için uygun olması nedeniyle AHP yöntemi tercih edilmiştir.

AHP yöntemi kapsamında ikili karşılaştırmalar sonucunda bir karar matrisi oluşturulur. Daha sonra bu hesaplamalar sonucunda kriter ağırlıklarına ulaşılır. Ayrıca, ikili karşılaştırma sürecinde kararların tutarsız yargılarını elemek için bir tutarlılık oranı (CR) kullanılır. Karşılaştırmada "n" sayıda kriter belirlenmiş ise bu kriter ağırlıklarını belirlemek için AHP ile aşağıdaki adımlar izlenir (Saaty, 1980; Al Garni vd., 2017; Uyan, 2017a);

Adım 1. $n \times n$ sayıda kriterin ikili karşılaştırma matrisi (A) oluşturulur. k_{ij} , Tablo 2'de gösterildiği gibi Saaty (1980) tarafından önerilen değer ölçeğini kullanarak i kriterinin j kriterine göre ne kadar fazla önemli olduğunu ifade eder.

Karşılaştırma matrisinin köşegeni üzerindeki bileşenler, yani $i=j$ olduğunda, 1 değerini alır. Köşegenin altında kalan değerler için karşıt özelliklere sahip matris $k_{ij} = 1/k_{ji}$ ile hesaplanır (Tablo 3).

$$A = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & \cdots & k_{1n} \\ k_{21} & k_{22} & \cdots & k_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ k_{n1} & k_{n2} & \cdots & k_{nn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

Adım 2. İkili karşılaştırma matrisleri normalize edilerek A_w matrisi oluşturulur. Bu A_w matrisini bulmak için, j sütundaki her bir değer j sütunundaki değerlerin toplamına bölünür. Yeni hesaplanan A_w matrisinde her bir sütunun toplamı 1'e eşit olmalıdır.

$$A_w = \begin{bmatrix} \frac{k_{11}}{\sum k_{i1}} & \frac{k_{12}}{\sum k_{i2}} & \cdots & \frac{k_{1n}}{\sum k_{in}} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{k_{n1}}{\sum k_{i1}} & \frac{k_{n2}}{\sum k_{i2}} & \cdots & \frac{k_{nn}}{\sum k_{in}} \end{bmatrix} \quad (2)$$

Adım 3. Normalize edilmiş A_w matrisi üzerinden öncelik vektörü (C) hesaplanır. Öncelik vektörü elde etmek için A_w matrisinin her bir satır toplamı, matrisin boyutuna (n) bölünerek ortalaması alınır. Elde edilen değerler yüzde cinsinden ifade edilir. Her bir kriter için hesaplanan önem ağırlıkları, öncelik vektörünü oluşturur. Daha yüksek bir ağırlık, kriterin GES için daha büyük bir etkiye sahip olduğunu gösterir.

$$C = \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \\ \vdots \\ C_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{k_{11}}{\sum k_{i1}} & \frac{k_{12}}{\sum k_{i2}} & \cdots & \frac{k_{1n}}{\sum k_{in}} \\ n & n & \cdots & n \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{k_{n1}}{\sum k_{i1}} & \frac{k_{n2}}{\sum k_{i2}} & \cdots & \frac{k_{nn}}{\sum k_{in}} \\ n & n & \cdots & n \end{bmatrix} \quad (3)$$

Adım 4. Tutarlılık oranı (Consistency Ratio-CR) hesaplanır. CR hesaplanabilmesi için ilk aşama olarak tutarlılık vektörü olarak anılan $A \times C$ matrisi hesaplanır.

$$A \times C = \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & \cdots & k_{1n} \\ k_{21} & k_{22} & \cdots & k_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ k_{n1} & k_{n2} & \cdots & k_{nn} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \\ \vdots \\ C_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ \vdots \\ X_n \end{bmatrix} \quad (4)$$

İkinci aşamada "Tutarlılık İndeksi (Consistency Index-CI)" eşitsizliğindeki karşılaştırma çiftleri matrisinin öz değeri olan λ_{max} değeri Denklem-5'de verilen formül ile hesaplanır.

$$\lambda_{max} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{x_i}{c_i} \quad (5)$$

Üçüncü aşamada CI katsayısının hesaplanması gerekir. CI, Denklem-6'da belirtilen formül ile ölçülür.

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (6)$$

Son aşamada matrisin boyutunun (n) tutarlılığı yeterli olup olmadığı belirlenmesi gerekir. Bu kapsamda, CI ile Rastgele İndeks (Random Index-RI) oranlanarak CR değeri Denklem-7'de belirtilen formül ile hesaplanır. RI, Saaty (1980) tarafından belirlenen standart bir değere sahiptir ve n sayısına göre değişmektedir (Tablo 4).

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (7)$$

Denklem-7’de tanımlı CR değerinin %10’un altında ($CR \leq 0,1$) çıkması durumunda karşılaştırma matrisinin tutarlı olduğu kabul edilir. Aksi takdirde, ikili karşılaştırmada ciddi tutarsızlıklar vardır. Bu nedenle, AHP anlamlı sonuçlar vermeyebilir. Mevcut çalışmada karar kriterleriyle ilişkili sekiz kriter ($n=8$) vardır. Buna göre, $RI=1.41$ ve $CR=0,04$ olup kabul edilebilir aralıktadır.

Tablo 2. Saaty Tarafından Geliştirilen AHP Önem Skalası (Saaty, 1980; Al Garni vd., 2017)

i Kriterinin j Kriterine Göre Önem Derecesi (K_{ij})	Açıklaması
1	i ve j kriterleri eşit öneme sahiptir
3	i kriteri j kriterinden biraz daha önemlidir
5	i kriteri j kriterinden orta derecede daha önemlidir
7	i kriteri j kriterinden çok daha önemlidir
9	i kriteri j kriterinden çok daha güçlü önemlidir
2, 4, 6, 8	Ara değerler

Tablo 3. Belirlenen Kriterlerin İkili Karşılaştırma Matrisi

Kriter	K1	K2	K3	K4	K5	K6	K7	K8	Ağırlık (%)
(K1) Güneş Radyasyonları	1	3	4	7	5	6	4	5	0.35
(K2) Eğim	1/3	1	2	3	5	4	3	2	0.18
(K3) Bakı	1/4	0.5	1	3	4	4	2	3	0.14
(K4) Arazi Kullanımı	1/7	1/3	1/3	1	3	2	1/3	1	0.06
(K5) Yerleşim Alanlarına Uzaklık	1/5	1/5	1/4	1/3	1	1/2	1/4	1/3	0.04
(K6) Yol Ağına Uzaklık	1/6	1/4	1/4	1/2	2	1	1/5	1/2	0.04
(K7) Enerji Nakil Hatlarına Uzaklık	1/4	1/3	1/2	3	4	5	1	2	0.12
(K8) Trafo Merkezine Uzaklık	1/5	1/2	1/3	1	3	2	1/2	1	0.07
CR=0,04									1

Tablo 4. Rastgele Tutarsızlık İndeksi (RI) Değeri (Saaty, 1980; Uyan, 2017a; Al Garni vd., 2017)

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RI	0,00	0,00	0,58	0,90	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49

BULGULAR

CBS tabanlı ÇKKV-AHP yöntemlerinin GES yer seçimi için kullanılması, çeşitli seçeneklerin dikkate alınmasına ve bu sayede çeşitli stratejilerin oluşturulmasına olanak sağlamaktadır. Bu çalışmada, Mardin ili için 8 kriter (güneş radyasyonu, eğim, bakı, arazi kullanımı, yerleşim alanlarına uzaklık, yol ağına uzaklık, enerji nakil hatlarına uzaklık, trafo merkezine uzaklık) kullanılarak, CBS temelli AHP yöntemi ile kriterler ağırlıklarının belirlenmesi, normalleştirilmesi ve tüm kriterlerin ağırlıklı çakıştırılması suretiyle GES için uygunluk haritaları oluşturulmuştur.

AHP yöntemi ile hesaplanan kriterler ağırlıkları incelendiğinde güneş radyasyonu değeri %35 etkiye sahiptir. Bu değer, GES için uygun yer seçimini etkileyen en önemli kriterin güneş radyasyonu olduğu göstermektedir. Bu kriter ağırlığını sırasıyla %18 ağırlık ile eğim, %14 ağırlık ile bakı, %12 ağırlık ile enerji nakil hatlarına uzaklık, %7 ağırlık ile trafo merkezine uzaklık, %6 ağırlık ile arazi kullanımı, %4 ağırlık ile yerleşim alanlarına uzaklık ve %4 ağırlık ile yol ağına uzaklık takip etmektedir (Şekil 5). Ayrıca oluşturulan karşılaştırma matrisindeki değerlerin ve kriter ağırlıklarının tutarlı olup olmadıklarının belirlenmesi amacıyla hesaplanan “Consistency Ratio-Tutarlılık oranı” (CR) değeri ise 0,04 olarak hesaplanmıştır. CR değerinin 0,10’dan küçük olması ikili karşılaştırma matrisi sonucu elde edilen değerlerin birbirleriyle tutarlı oldukları göstermektedir.

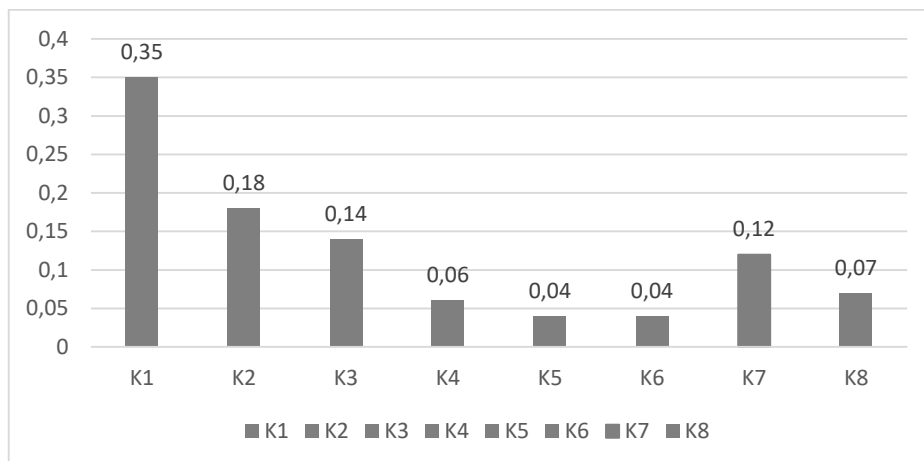
Çalışma kapsamında, Mardin ili için gerçekleştirilen GES yer seçimine yönelik belirlenen 8 kriterin, CBS ortamında mekânsal analizi ile elde edilen veriler ışığında (Şekil 6); güneş radyasyonu kriteri analizine göre (Şekil 6a), %99.50'lik oran ile çalışma alanının büyük bir kısmı “en uygun (5)” olarak tespit edilmiştir. Eğim kriteri incelendiğinde (Şekil 6b), alanın %18.64'lük oran ile “en uygun (5)” olarak belirlendiği, ancak %40.48'lik oran ile büyük bir kısmının “uygun değil (1)” olarak tespit edildiği gözlemlenirken, aynı şekilde bakı kriteri analiz edildiğinde (Şekil 6c), %17.10'lük oran ile “en uygun (5)”, %30.13'lük oran ile “uygun (4)” ve %24.50'lik oran ise “orta derece uygun (3)” olarak belirlendiği gözlemlenmiştir. Arazi kullanımı kriterine göre (Şekil 6d), çalışma alanının %10.89'lük oran ile “en uygun (5)” ve %15.86'lük oran ile “uygun (4)” olarak belirlendiği, ancak %69.32'lik oran ile büyük bir kısmının “uygun değil (1)” olarak tespit edildiği gözlemlenirken, aynı şekilde yerleşim alanlarına uzaklık kriterinin analizi sonucunda (Şekil 6e), %29.31'lik oran ile en “uygun (5)” ve %25.16'lık oran ile “uygun (4)” olarak belirlendiği tespit edilmiştir. Yol ağına uzaklık kriterinin analizi sonucunda (Şekil 6f), çalışma alanının %52.35'lik oran ile “en uygun (5)” ve %22.68'lik oran ile “uygun (4)” olduğu belirlenirken; enerji nakil hatlarına uzaklık kriterinde (Şekil 6g) ise %29.32'lik oran ile “en uygun (5)” ve %20.63'lik oran ile “uygun (4)” olduğu, %20.31'lik oran ile ise “uygun değil (1)” olarak tespit edildiği gözlemlenmiştir. Trafo merkezine uzaklık kriterine göre (Şekil 6h) ise %16.68'lik alanın “en uygun (5)”, %38.76'lık oran ile büyük bir alanın “uygun (4)” ve %33.29'lük alanın “orta derece uygun (3)” olarak tespit edilmiştir.

Mardin ili bütününde GES için uygun alanların belirlenmesinde etkili olan kriter ve bu kriterlerin uygunluk derecelerinin ArcGIS 10.2 programda yeniden sınıflandırılmasıyla oluşturulan tematik uygunluk haritaları “uygun değil, az uygun, orta uygun, uygun ve en uygun” olmak üzere beş farklı sınıfa yeniden sınıflandırılmıştır (Şekil 6). AHP yöntemi ile elde edilen kriter ağırlıklarını kullanarak tematik uygunluk haritalarının Weighted Overlay (Ağırlıklı Çakıştırma) modülü yardımıyla birleştirilmesi sonucunda 5 dereceli GES Uygunluk Haritası elde edilmiştir (Şekil 7).

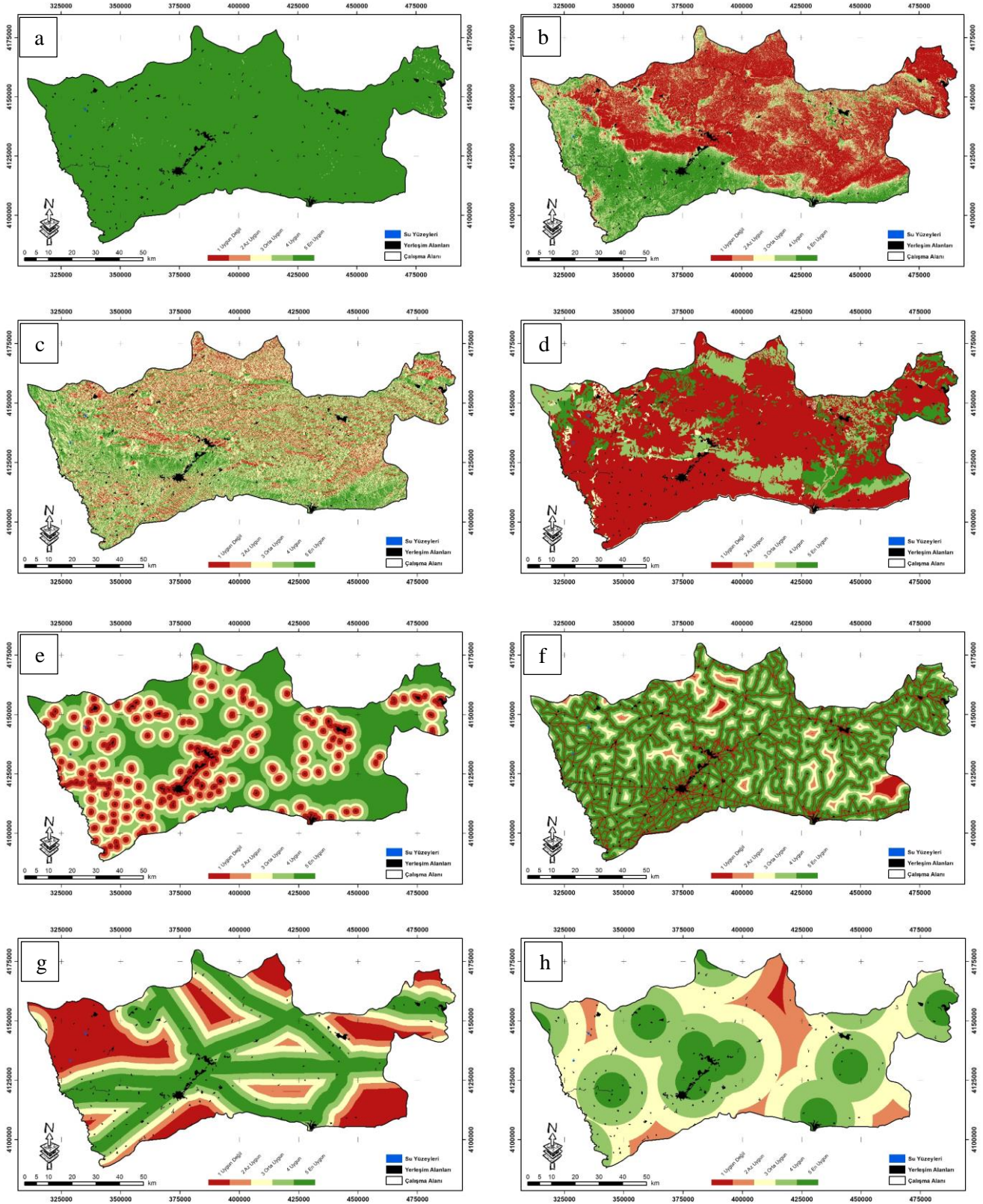
Mardin GES uygunluk haritasına sonucuna göre; ilin %68.12'lik gibi büyük bir alanı GES için “uygun alanlar (4)” olduğu, %29.40'lık bölümün “orta derecede uygun alanlar (3)” olduğu, %2.48'lik bölümün “en uygun alan (5)” olduğu ve %0.01'lik bölümün “az uygun alanlar (2)” olduğu tespit edilmiştir. Mardin ili bütününde GES için “uygun olmayan alanlar (1)” bulunmamaktadır. Alansal olarak GES kurulumu için “uygun alanların (4)” 5983.86 km², “orta derecede uygun alanların (3)” ise 2582.42 km² alan kapsadığı görülmüştür. GES için uygun alanların alansal ve oransal dağılımı Tablo 6'da sunulmuştur.

Mardin ili içinde, GES kurulumu için en uygun alanlar genellikle çalışma alanının güney ve batısında yer almaktadır. Çalışma, özellikle Mardin ilinin Kızıltepe ilçesinin kent merkezinin kuzey ve batısında, ayrıca Derik ilçesinin kent merkezinin güneyinde bulunan alanların GES kurulumu için en uygun bölgeler olduğunu tespit etmiştir.

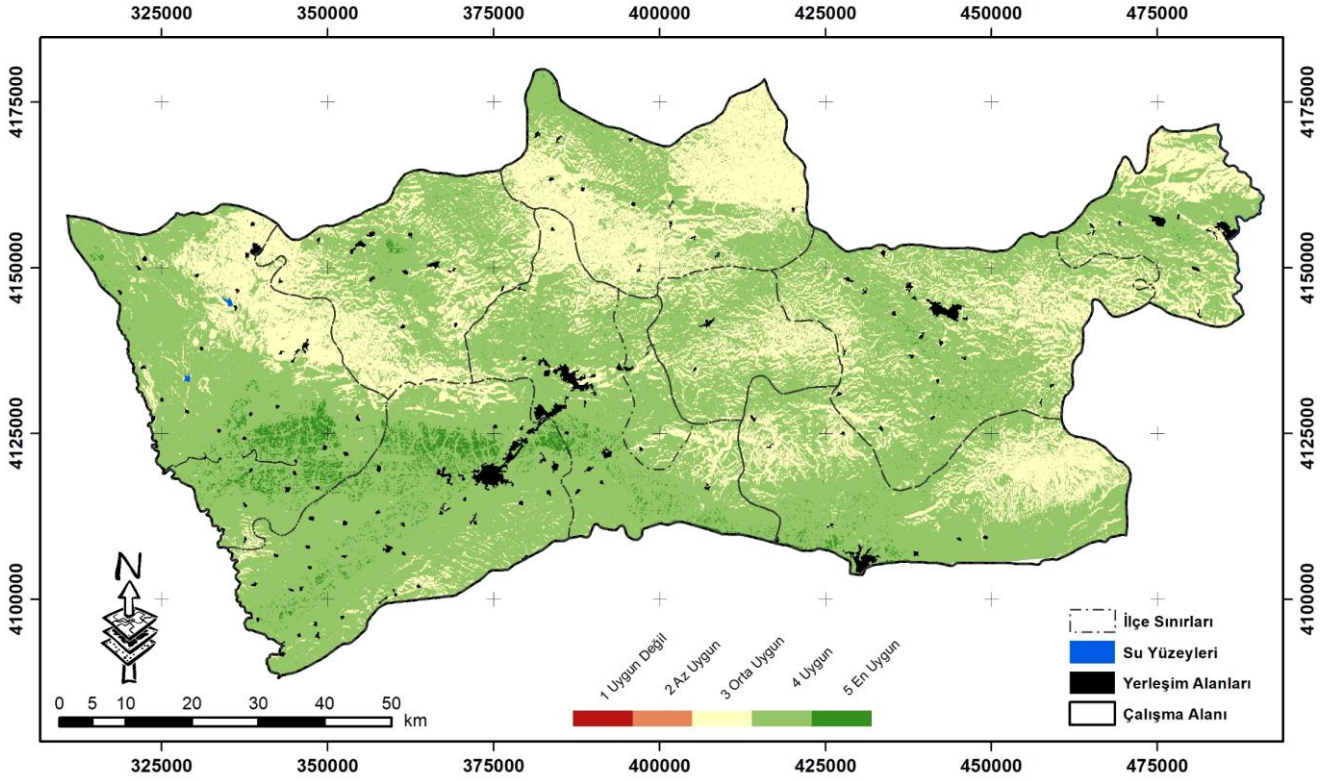
Mardin İli genelinde güneş radyasyon ışınım değeri yıllık 1800-2000 kWh/m² aralığındadır ve çalışma alanının %99'unu kapsamaktadır. Bu yüksek güneş radyasyon değeri, il genelinde GES potansiyelinin yüksek olduğunu göstermektedir. Mardin ili genelinde bulunan mevcut GES konumları, uygunluk haritasında belirlenen “en uygun” ve “uygun” alanlarla örtüşmektedir. Bu durum, mevcut tesislerin yer seçiminin çalışma sonuçlarıyla uyumlu olduğunu göstermektedir. Bu uyum, çalışmada kullanılan yöntemin uygulanabilirliğini daha da artırmaktadır.



Şekil 5. Kriterlerin Öncelik Ağırlıkları



Şekil 6. Kullanılan Parametreler a. Güneş Radyasyonu b. Eğim c. Bakı d. Arazi Kullanımı e. Yerleşim Alanlarına Uzaklık f. Yol Ağına Uzaklık g. Enerji Nakil Hatlarına Uzaklık h. Trafo Merkezine Uzaklık



Şekil 7. GES İçin Uygun Alanlar

Tablo 6. GES İçin Uygun Alanların Alansal ve Oransal Dağılımı

	km ²	%
(5) En Uygun	217.52	%2.48
(4) Uygun	5983.86	%68.12
(3) Orta Uygun	2582.42	%29.40
(2) Az Uygun	0.85	%0.01
(1) Uygun Değil	-	-

SONUÇ VE ÖNERİLER

CBS temelli AHP yöntemi daha objektif ve bilimsel bir yaklaşım sağlayarak GES için en uygun yerin belirlenmesine yardımcı olmaktadır. Bu çalışma, GES için uygun yer seçimi sürecinin incelendiği, 8 farklı kriter için uygunluk haritalarının oluşturulduğu, AHP yöntemi kullanılarak bu kriterlerin ağırlıklandırıldığı ve sonucunda Mardin ili genelinde GES uygunluğunu gösteren nihai haritanın elde edildiği bir dizi süreci içermektedir. Günümüzde güneş enerjisi kaynakları üzerinde aktif bir şekilde çalışmalar devam etmektedir. Ancak mevcut çalışma, Mardin ili için CBS tabanlı AHP yöntemi kullanarak GES yer uygunluğunu ilk kez ayrıntılı bir şekilde ortaya koymaktadır. Mardin ili bütününe yönelik gerçekleştirilen bu çalışmada, bölgenin %68.12'sinin GES için “uygun alanlar (4)” olarak belirlendiği, %29.40'lık bölümünün “orta derecede uygun alanlar (3)” olarak, %2.48'lik kısmın “en uygun alan (5)” olduğu ve %0.01'lik kesimin “az uygun alanlar (2)” olduğu tespit edilmiştir. GES için “en uygun alanların (5)” ağırlıklı olarak Kızıltepe ve Derik ilçelerini kapsadığı yani çalışma alanının güney ve batısında yer aldığı görülmektedir.

Çalışma alanı içerisinde mevcut durumda kullanımda olan güneş enerjisi santrallerinin konumları göz önünde bulundurulduğunda, Mardin GES uygunluk haritasında tespit edilen “en uygun (5)” ve “uygun (4)” alanlara denk geldiği görülmektedir. Bu durum, çalışmada ele alınan kriterlerin yer seçimi için oldukça etkili olduğunu ve CBS tabanlı AHP yönteminin, karar verme sürecini kolaylaştırdığını ortaya koymaktadır. Ayrıca, AHP yöntemi ile entegrasyonu, geniş alanların ve zengin coğrafi bilgi verilerinin sistematik bir şekilde ele alınmasını sağlayarak, GES'in en uygun yerlerini belirlemede kritik öneme sahip kriterleri etkili bir şekilde yönetmek için faydalı bir teknik sunmaktadır. Mardin, Güneydoğu Anadolu bölgesinde bulunan ve yüksek güneş ışınımı potansiyeline sahip olmasından dolayı GES yer seçimi için uygun bir bölgedir. Bununla birlikte bulgulara göre, çalışma alanının iklimsel

potansiyeli ve coğrafi konumu, GES kurulumu için geniş bir uygun alan sunmaktadır. GES'nin bölgede belirlenen en uygun alanlara kurulumu, enerji üretiminde çevre dostu ve sürdürülebilir bir yaklaşım benimsenmesine ek olarak bölgenin kalkınmasına önemli ölçüde katkı sağlayacaktır. Aynı zamanda, yeşil bir ekonomide GES yatırımları için karar verme desteği oluşturacaktır.

GES uygun yer seçiminde en önemli kriterler arasında trafo merkezleri ve bağlantı kapasiteleri yer almaktadır. Ancak bu kriterlere ait verilerin yıllık olarak güncellenmesi ve değişmesi nedeniyle, mevcut çalışmada bu kriterlere yer verilmemiştir. Bu araştırmaya, gelecekte yapılacak veya yapılması planlanan potansiyel güneş enerjisi santralleri yer seçimi için stratejik bir planlama rehberi sunmaktadır. Araştırmanın devamında, belirli bir güneş enerjisi santrali projesi için planlanan tesisin proje ve uygulama aşamalarında, trafo merkezleri ve bağlantı kapasiteleri kriterlerinin de dikkate alınması önem arz etmektedir.

KAYNAKLAR

- Al Garni, H. Z., & Awasthi, A. (2017). Solar PV power plant site selection using a GIS-AHP based approach with application in Saudi Arabia. *Applied energy*, 206, 1225-1240. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.10.024>
- Arca, D. & Çıtıröğlü, H. K. (2022). Güneş enerjisi santral (GES) yapım yerlerinin CBS dayalı çok kriterli karar analizi ile belirlenmesi: Karabük örneği. *Geomatik*, 7(1), 17-25. <https://doi.org/10.29128/geomatik.803200>
- Azhar, N. A., Radzi, N. A. M., Mustafa, I. S., Azmi, K. H. M., Samidi, F. S., Zulkifli, I. T., & Zainal, A. M. (2023). Selecting communication technologies for an electrical substation based on the AHP. *IEEE Access*. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3321922>
- Azmi, R., Amar, H., Chenal, J., Diop, E. B., & Tekouabou Koumetio, C. S. (2022). Decision analysis related to solar farm investments based on analysis hierarchical process and fuzzy AHP for sustainable energy production. *International Journal of Energy Research*, 46(9), 11730-11755. <https://doi.org/10.1002/er.7943>
- Doğan, H., & Uludağ, A. S. (2018). Yenilenebilir enerji alternatiflerinin değerlendirilmesi ve uygun tesis yeri seçimi: Türkiye'de bir uygulama. *Ekonomik ve Sosyal Araştırmalar Dergisi*, 14(2), 157-180.
- Fang, D., Shi, S., & Yu, Q. (2018). Evaluation of sustainable energy security and an empirical analysis of China. *Sustainability*, 10(5), 1685. <https://doi.org/10.3390/su10051685>
- Habib, S. M., Suliman, A.E.R.E., Al Nahry, A. H., & Abd El Rahman, E. N. (2020). Spatial modeling for the optimum site selection of solar photovoltaics power plant in the northwest coast of Egypt. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 18, 100313. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2020.100313>
- İnceyavuz, H., Alkan, T., & Durduran, S. S. (2022). Adana şehir merkezinde CBS ve AHP kullanılarak alışveriş merkezleri için uygun yer seçimi. *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 22(4), 824-835. <https://doi.org/10.35414/akufemubid.1099852>
- Kaimbekova, A. (2020). Güneş enerjisi santrali kurulumuna uygun alanların uzaktan algılama ve CBS yöntemleri ile belirlenmesi (Türkistan ve Karaganda, Kazakistan). Yüksek Lisans Tezi, Eskişehir Teknik Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Çevre Mühendisliği Ana Bilim Dalı, Eskişehir 156s.
- Kereush, D., & Perovych, I. (2017). Determining criteria for optimal site selection for solar power plants. *Geomatics, Landmanagement and Landscape*, (4), 39-54. <http://dx.doi.org/10.15576/GLL/2017.4.39>
- Konurhan, Z., Yucesan, M., & Gul, M. (2023). A GIS-Based BWM Approach for the Location Selection of Solar Power Plant in Tunceli Province (Turkey). In *Advances in Best-Worst Method: Proceedings of the Third International Workshop on Best-Worst Method (BWM2022)* (pp. 87-102). Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-031-24816-0_8
- Kumar, M. (2020). Social, economic, and environmental impacts of renewable energy resources. *Wind solar hybrid renewable energy system*, (pp. 227-237). <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.89494>
- Obut, Z. (2016). Göksun ilçesinde güneş enerjisi santrali kurulacak alanların CBS yöntemi ile belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi. Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Coğrafya Ana Bilim Dalı, Kahramanmaraş, 56s.
- Ozdemir, S., & Sahin, G. (2018). Multi-criteria decision-making in the location selection for a solar PV power plant using AHP. *Measurement*, 129, 218-226. <http://dx.doi.org/10.1016/j.measurement.2018.07.020>

- Ruiz, H.S., Sunarso, A., Ibrahim-Bathis, K., Murti, S.A., Budiarto, I., (2020). GIS-AHP multi criteria decision analysis for the optimal location of solar energy plants at Indonesia. *Energy Reports*, 6, 3249–3263. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2020.11.198>
- Saaty, T.L., (1980). The analytic hierarchy process: planning, priority setting, resources allocation. New York: McGraw-Hill; 1980.
- Saraswat, S. K., Digalwar, A. K., Yadav, S. S., & Kumar, G. (2021). MCDM and GIS based modelling technique for assessment of solar and wind farm locations in India. *Renewable Energy*, 169, 865-884. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.01.056>
- Sarsıcı, N. (2020). Karabük ilinde güneş enerjisi santrali (ges) kurulabilecek alanların çok ölçütlü karar analizi ile tespiti. Yüksek Lisans Tezi. Karabük Üniversitesi Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Coğrafya Ana Bilim Dalı, Karabük, 191s.
- Shao, M., Zhao, Y., Sun, J., Han, Z., & Shao, Z. (2023). A decision framework for tidal current power plant site selection based on GIS-MCDM: A case study in China. *Energy*, 262, 125476. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.125476>
- Soydan, O. (2021). Solar power plants site selection for sustainable ecological development in Nigde, Turkey. *SN Applied Sciences*, 3(1), 41. <https://doi.org/10.1007/s42452-020-04112-z>
- Şenlik, İ. (2017). Güneş enerjisi santrallerinin yer seçimi. *Elektrik Mühendisliği*, 462, 94-98.
- Turan, E. S. (2022). Adana ili için coğrafi bilgi sistemleri ve analitik hiyerarşi prosesi kullanılarak güneş enerjisi santrali yer seçiminin optimizasyonu. Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Çevre Mühendisliği Anabilim Dalı, 171s.
- URL-1, (2023). Güneş Enerjisi Potansiyel Atlası (GEPA). <https://gepa.enerji.gov.tr/MyCalculator/>, Enerji İşleri Genel Müdürlüğü. Erişim Tarihi: 03.10.2023.
- URL-2, (2023). İklim Verileri <https://www.mgm.gov.tr/veridegerlendirme/il-ve-ilceler-istatistik.aspx?m=MARDIN>, Meteoroloji Genel Müdürlüğü. Erişim Tarihi: 03.10.2023.
- URL-3, (2023). Global Radyasyon Haritası. <https://globalsolaratlas.info/download/turkey>, Erişim Tarihi: 10.09.2023.
- URL-4 (2025). DEM Verisi (Sayısal Yükseklik Modeli). <https://earthexplorer.usgs.gov/>, Erişim Tarihi: 10.09.2023.
- URL-5 (2023). Corine 2018 Arazi Örtüsü Verisi. <https://land.copernicus.eu/en/map-viewer?product=130299ac96e54c30a12edd575eff80f7>, Erişim Tarihi: 10.09.2023.
- URL-6 (2024). Mekansal Veriler. <https://overpass-turbo.eu/>, Erişim Tarihi: 10.09.2023
- Uyan, M. (2017a). Güneş enerjisi santrali kurulabilecek alanların AHP yöntemi kullanılarak CBS destekli haritalanması. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 23(4), 343-351. <https://doi.org/10.5505/pajes.2016.59489>
- Uyan, M. (2017b). Optimal site selection for solar power plants using multi-criteria evaluation: a case study from the Ayrancı region in Karaman, Turkey. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 19, 2231-2244. <https://doi.org/10.1007/s10098-017-1405-2>
- Villacreses, G., Martinez-Gomez, J., Jijon, D., & Cordovez, M. (2022). Geolocation of photovoltaic farms using Geographic Information Systems (GIS) with Multiple-criteria decision-making (MCDM) methods: Case of the Ecuadorian energy regulation. *Energy Reports*, 8, 3526-3548. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.02.152>
- Yalçın, C., & Yüce, M. (2020). Burdur’da Güneş Enerjisi Santrali (GES) yatırımına uygun alanların CBS tabanlı AHP yöntemiyle tespiti. *Geomatik*, 5(1), 36-46. <https://doi.org/10.29128/geomatik.561962>
- Yolcan, O. O., & Köse, R. (2020). Türkiye’nin güneş enerjisi durumu ve güneş enerjisi santrali kurulumunda önemli parametreler. *Kırklareli Üniversitesi Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi*, 6(2), 196-215. <https://doi.org/10.34186/klujes.793471>



Kahramanmaraş Sütçü İmam University Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 10.10.2023
Kabul Tarihi : 21.11.2023

Received Date : 10.10.2023
Accepted Date : 21.11.2023

LİGNİN İLAVESİNİN CAM ELYAF TAKVİYELİ POLİAMİD 6/POLİAMİD 610 KOMPOZİTLERİNİN ÖZELLİKLERİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ

INVESTIGATION OF THE EFFECT OF LIGNIN ADITION ON THE PROPERTIES OF GLASS FIBER REINFORCED POLYAMIDE 6/POLYAMIDE 610 COMPOSITES

Bedriye ÜÇPINAR DURMAZ¹ (ORCID: 0000-0002-4446-6086)

Elnura ARTYKBAEVA¹ (ORCID: 0000-0003-0579-7605)

Ayşe AYTAÇ^{*1,2} (ORCID: 0000-0002-9566-7881)

¹ Kocaeli Üniversitesi, Kimya Mühendisliği Bölümü, Kocaeli, Türkiye

² Kocaeli Üniversitesi, Polimer Bilimi ve Teknolojisi Anabilim Dalı, Kocaeli, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Ayşe AYTAÇ, aaytac@gmail.com

ÖZET

Bu çalışmada PA6 ve PA610 harmanlanmış ve bu karışıma özelliklerini iyileştirmek amacı ile cam elyaf (GF) ve lignin (LL) eklenmiştir. Kompozitler ekstrüzyon ve enjeksiyon kalıplama yöntemleriyle hazırlanmış ve morfolojik, ısıl (diferansiyel taramalı kalorimetre-DSC, termogravimetrik analiz-TGA) ve yanmazlık (sınırlayıcı oksijen indeksi-LOI, dikey yanma testi-UL-94, konik kalorimetre), özellikleri incelenmiştir. GF takviyeli kompozitte iyi bir arayüzey etkileşimi ve homojen dağılım gözlenirken, LL'nin matris ile etkileşiminin zayıf olduğu görülmüştür. GF matrisin ısıl karalılığını iyileştirmiş ve kalıntı miktarını yükseltmiştir. GF/LL kompozitlerinde ise LL ısıl dayanımı düşürse de kütle kayıp hızını yavaşlatmış ve kalıntı miktarını artırmıştır. GF ve LL ilavesi ile matrisin erime noktasında belirgin bir değişim olmazken LL kristalizasyon sıcaklığını düşürmüş ve dolayısıyla matrisin kristalinitesini büyük oranda azaltmıştır. Matrisin LOI değeri ve UL-94 sınıflandırmasında GF ilavesi ile bir gelişim olmazken, LL'nin yanma süresini belirgin bir şekilde kısalttığı gözlenmiştir. PA6/PA610'a eklenen GF ve LL matrisin maksimum ısı salınım hızı, toplam ısı salınım değerlerinde önemli ölçüde düşüş sağlayarak kompozitin yanmazlık özelliğini geliştirmiştir. Sonuç olarak bu çalışma GF takviyeli PA kompozitleri için ligninin etkin bir alev geciktirici olduğunu göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Cam elyaf, lignin, poliamid, yanmazlık

ABSTRACT

In this study, PA6 and PA610 were blended and glass fiber (GF) and lignin (LL) were added to improve the properties. Composites were prepared by extrusion and injection molding and morphological, thermal (differential scanning calorimetry-DSC, thermogravimetric analysis-TGA) and flame retardancy (limiting oxygen index-LOI, vertical burning test-UL-94, cone calorimetry) properties were examined. While a good interfacial interaction and homogeneous dispersion were observed in the GF reinforced composite, the interaction of LL with the matrix was found to be weak. GF, improved the thermal stability of the matrix and increased the char residue. In GF/LL composites, although LL decreased the thermal resistance, it slowed down the mass loss and increased the char residue. While there was no significant change in the melting point of the matrix with the addition of GF and LL, LL reduced the crystallization temperature and therefore greatly reduced the crystallinity of the matrix. LOI and UL94 classification of the matrix did not change by adding GF. But LL significantly shortened the burning time. GF and LL improved the flame retardancy of the matrix by significantly reducing the total heat release and peak heat release rate values. In conclusion, this study showed that lignin is a promising flame retardant for GF reinforced PA composites.

Keywords: Glass fiber, flame retardancy, lignin, polyamide

ToCite: ÜÇPINAR DURMAZ, B., ARTYKBAEVE, E., AYTAÇ, A., (2024). LİGNİN İLAVESİNİN CAM ELYAF TAKVİYELİ POLİAMİD 6/POLİAMİD 610 KOMPOZİTLERİNİN ÖZELLİKLERİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 27(1), 213-221.

GİRİŞ

Kısa elyaf takviyeli termoplastik kompozitler kolay işlenebilirlik, düşük üretim maliyeti, hafiflik ve yüksek dayanım gibi avantajları sayesinde metal malzemelere alternatif olarak karşımıza çıkmaktadır (Zhong vd., 2020). Çeşitli elyaf türleri arasında cam elyaf (GF) diğer elyaf türlerine göre düşük maliyeti, uyarlanabilir oluşu ile dikkat çekmektedir. Kolaylıkla erişilen ham maddeler ile kolayca üretilebilmektedir. Kullanılan hammaddeler ve bunların kullanım oranlarına bağlı olarak farklı türlerde GF (A-Glass, E-Glass) elde edilebilmekte ve böylece ihtiyaca göre farklı GF takviyeli kompozitler (GFTP) üretilebilmektedir. GFTP kompozitleri denizcilik, havacılık uygulamalarından otomotiv, elektrik, ses ve ısı yalıtımı, spor ekipmanları ve kalıplanmış parçalara kadar giderek artan bir kullanım alanı bulmaktadır (Rajak vd., 2021).

Kompozitlerde matris malzemesi olarak termoplastik kullanımı da seri üretime uygunluk, kolay, hızlı, temiz ve düşük maliyetli üretim gibi avantajlar sağlamaktadır. Çeşitli termoplastikler arasında poliamidler (PA6, PA66, PA610, PA12) iyi ısıl dayanımları, mekanik özellikleri ve kolay işlenebilirlikleri ile dikkat çeken yarı kristalin mühendislik polimerleridir. Genel olarak tekstil, otomotiv, inşaat, ambalaj ve mühendislik uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadırlar (Otaegi vd, 2018). Endüstriyel olarak kullanılan PA'ların çoğu petrol türevli olmasına rağmen günümüzde yenilenebilir kaynaklardan üretilen biyo bazlı PA (PA410, PA610, PA11) türleri de pazarda yerini almıştır (Safari vd., 2021). Bununla birlikte, poliamidlerin mekanik özelliklerindeki sınırlamalar, yüksek su emilimi ve kolay yanabilmesi gibi bazı özelliklerinin yetersiz olması dezavantaj oluşturmaktadır (Turkmen vd., 2017). Bu nedenle PA'ların özellikleri farklı polimerler ve katkı maddeleri kullanılarak geliştirilmektedir. Polimer harmanlama; düşük maliyetle istenen uygulama için ayarlanabilir özelliklere sahip çok çeşitli mevcut malzemelerden yeni malzemeler oluşturmaya izin verir (Moran vd., 2016; Shi, 2016). Buradan yola çıkılarak daha önceki çalışmamızda (Artykbaeva vd., 2022) farklı oranlarda PA6/PA610 karışımları geleneksel eriyik harmanlama ile hazırlanmış ve özellikleri incelenmiştir. Sonuçlar harmanlama ile PA6'nın nem çekme oranının düştüğünü, termo-mekanik ve ısıl özelliklerin gelişme sergilediğini göstermiştir. Elde edilen bu özellikleri geliştirilmiş PA6/PA610 karışımının yüksek performans gerektiren uygulamalarda kullanımının önünü açmak adına en iyi özellikleri sergileyen karışım oranı (60/40) farklı oranlarda (%10-40) GF ile takviye edilmiştir. Beklenildiği gibi artan GF miktarı ile nem çekicilik daha da düşerken mekanik ve termo-mekanik özellikler artış sergilemiştir. %30 GF ilavesi en yüksek çekme dayanımını sağlarken, depo/kayıp modülü ve nem çekicilik gibi özellikler açısından da %40 GF'ye yakın değerler elde edilmiştir.

Diğer yandan bu kompozitlerde özellikle PA6'nın düşük sınırlayıcı oksijen indeksi (LOI) ile kolayca yanması yangın riskini beraberinde getirmektedir. PA'ların yanması sırasında yaydığı ısının fazlalığı, yanma hızının yüksekliği, yoğun duman salınımı ve eriyik damlamalarının fazla olması sebebiyle alevin çok kolay yayılmasına neden olduğu bilinmektedir (Chen vd., 2006; Yan vd., 2022). Dahası sürekli GF/PA6 kompozitlerinin GF'nin "mum fitili etkisi" nedeniyle saf PA6'dan bile daha yanıcı olduğu bildirilmiştir (Yan vd., 2022). Bu nedenle GF takviyeli PA6/PA610 kompozitlerin alev geciktirici özelliklerinin iyileştirilmesi yeni uygulamalarda daha geniş kullanımın önünü açabilir. Polimerik kompozitlerin alev geciktirici performansının iyileştirilmesi için çeşitli silikon, fosfor, nitrojen bazlı alev geciktiriciler, metal bileşikleri ve karbon nano dolgular gibi halojeniz çevre dostu katkıları yapıya eklenebilmektedir (Yan vd., 2022). Bunların yanı sıra yenilenebilir kaynaklardan elde edilen halloysit, yumurta kabuğu, muz kabuğu ve lignin gibi bazı katkıları da alev geciktirici olarak kullanılabilir (Koruyucu & Balaban, 2021; Mandlekar vd., 2017; Marsset vd., 2020; Özdemir & Özgan, 2023).

Biyokütleden selülozdan sonra en çok bulunan ikinci polimer olan lignin yenilenebilirlik, kolay ulaşılabilirlik ve düşük maliyet avantajları ile ilgi çekmektedir. Endüstriyel lignin kağıt ve kağıt hamuru endüstrilerinin bir yan ürünü olarak karşımıza çıkmakta ve dünya genelinde miktarının 100 milyon ton/yıl olduğu tahmin edilmektedir (Fabbri vd., 2023; Mandlekar vd., 2017). Son yıllarda lignin yapısal özellikleri, reaktif fonksiyonel gruplarının varlığı, yüksek karbon içeriği ve buna bağlı yüksek kömür oluşturma kapasitesi gibi özellikleri sayesinde polimerlerde özellikle ısıl dayanımı ve alev geciktiriciliği artırmak için kullanılmaya başlanmıştır (Cayla vd., 2019; Mandlekar vd., 2017).

Bu çalışma kapsamında, yukarıda da özetlendiği gibi daha önceki çalışmamızda iyi özellikler sergilediği belirlenen ağırlıkça %30 GF içeren PA6/PA610/GF kompozitlerinin alev geciktiricilik ve ısıl dayanımlarının geliştirilmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla yapıya ağırlıkça %5-7,5-10 sodyum lignosülfonat (LL) eklenerek kompozitler hazırlanmıştır. Elde edilen kompozitlerin morfolojik, ısıl ve yanmazlık özellikleri incelenmiştir.

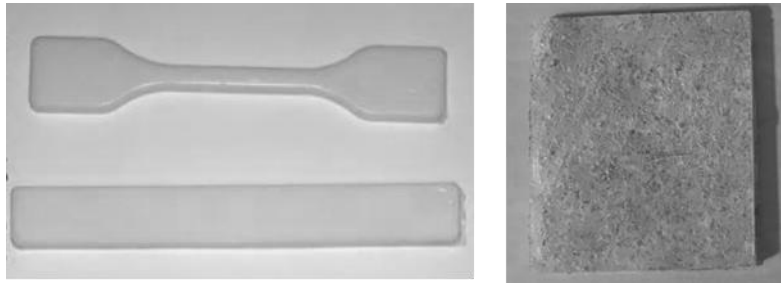
MALZEME VE YÖNTEM

Malzemeler

Bu çalışmada, ekstrüzyon ve enjeksiyona uygun NYLEM® 6 (EMAŞ A.Ş., Bursa/Türkiye) PA6 ve PA610 (EPSAN, Bursa/Türkiye) kullanılmıştır. PA6 1,12 g/cm³ bağıl yoğunluk ve 220 °C erime sıcaklığına sahip iken PA610'un bağıl yoğunluğu 1,07 g/cm³ ve erime sıcaklığı 220 °C'dir. Cam elyaf (PA2, GF) 11 µm ortalama lif çapı, 4,5 mm lif uzunluğunda Şişecam İstanbul/Türkiye'den temin edilmiştir. Kömürleşme ajanı olarak kullanılan 1,28 g/cm³ yoğunluk ve %3,38 toplam sülfür oranına sahip LL Aker Kimya İstanbul/Türkiye'den tedarik edilmiştir.

Deneysel Yöntem ve Karakterizasyon

Ekstrüzyon prosesi öncesinde nemi almak için tüm malzemeler 80 °C 'de 12 saat boyunca vakumlu etüvde kurutulmuştur. Tüm kompozitler 240 °C'de 3 dk karıştırma süresi ve 100 rpm karıştırma hızında laboratuvar ölçekli ekstrüderde (Xplore 15 cc Micro-compounder) eriyikten harmanlama yöntemiyle hazırlanmıştır. Ekstrüdere beslemeden önce bileşenler kuru halde Tablo 1'de verilen oranlarda karıştırılarak 10 gr kuru karışım hazırlanmış ve ardından bu kuru bileşenler besleme hunisi yardımı ile ekstrüder kovanına beslenmiştir. Karıştırma süresi sonunda oluşan eriyik haldeki karışımlar 10 bar enjeksiyon basıncına sahip laboratuvar ölçekli bir enjeksiyon kalıplama makinesi (Xplore 12 cc Injection Molder) kullanılarak kalıplanmıştır. Kalıp sıcaklığı ve hazırlanan eriyik karışım sıcaklığı sırasıyla 30 °C ve 240 °C olarak ayarlanmıştır. Kalıplama sonucunda ISO 180 standartlarına uygun darbe test numuneleri elde edilmiştir (Şekil 1). Hazırlanan numunelerin bileşimleri ve isimlendirme Tablo 1'de görülmektedir.



Şekil 1. Üretilen PA6/PA610 Örneklerinin Görüntüsü

Tablo 1. Hazırlanan Numunelerin Bileşim Oranları ve İsimlendirme

Numune	PA6/PA610 (%/%)	GF (%)	LL (%)
60-40	60/40	-	-
30GF	70(60/40)	30	-
30GF/5LL	65 (60/40)	30	5
30GF/7.5LL	62,5 (60/40)	30	7,5
30GF/10LL	60 (60/40)	30	10

Kompozitlerin morfolojik özellikleri FESEM (QUANTA 400F Field Emission) cihazı ile incelenmiştir. Görüntüleme numunenin çekme testi sonucu oluşan kopma yüzeyinden yapılmıştır. Görüntüleme öncesi numunelerin yüzeyleri altın ve paladyum ile kaplanmıştır.

Üretilen kompozitlerin ısı davranışı Mettler Toledo DSC 1 Star diferansiyel taramalı kalorimetre (DSC) cihazında azot gazı atmosferinde incelenmiştir. İlk olarak, 25-260 °C aralığında, 10 °C/dk ısıtma hızı ile ısıtılan örnekler, bu sıcaklıkta 5 dakika bekletilmiştir. Daha sonra, 260 °C'den 25°C'ye 10 °C/dk soğutma hızı ile soğutulmuştur. Daha sonra 260 °C'ye kadar ikinci bir ısıtma işlemi uygulanmıştır. Elde edilen DSC termogramlarından örneklerin erime sıcaklığı (T_m), kristalizasyon sıcaklığı (T_c), erime entalpisi (ΔH_f, J/g) değerleri okunmuş ve % kristalinite (X_c) değerleri aşağıdaki denklem 1 kullanılarak hesaplanmıştır.

$$X_c (\%) = \frac{\Delta H_f - \Delta H_c}{(\omega)(\Delta H_f^*)} * 100 \quad (1)$$

Denklemden; ΔH_f her örnek için erime entalpisini, ω polimerin ağırlık fraksiyonunu, ΔH_f* ise % 100 kristalin haldeki polimerin erime entalpisini ifade etmektedir. ΔH_f* PA6 için 230 J/g, PA610 için 254 J/g'dir (Arboleda-Clemente, Ares-Pernas, García-Fonte, & Abad, 2016; Pagacz, Raftopoulos, Leszczyńska, & Pielichowski, 2016).

Mettler Toledo TGA-1 Star termogravimetrik analiz (TGA) cihazı yardımı ile kompozitlerin ısı kararlılıkları değerlendirilmiştir. TGA 5-10 mg aralığında numunenin 25°C'den 700 °C'ye 10 C/dk ısıtma hızında azot atmosferinde ısıtılması ile gerçekleştirilmiştir. Kompozitlerin kütlelerinin %5 (T_{d5}) ve %50'sini (T_{d50}) kaybettikleri bozunma sıcaklıkları, maksimum bozunma sıcaklıkları (T_{max}) ve 700 °C'deki kalıntı oranları belirlenmiştir.

GF ve LL katkılarının polimerik matrisin yanma davranışı üzerindeki etkilerini belirlemek amacı ile UL-94 ve LOI testleri kullanılmıştır. UL-94 dikey yanma testi ASTM D3801 standardına göre gerçekleştirilmiştir. Test düzeneğine dikey olarak yerleştirilen numunenin alt ucundan bir alev beki yardımı ile alev uygulanmış ve numunenin damlama/yanma durumu ve yanma süreleri kaydedilmiştir. Her bileşim için 5 numune test edilerek ateşlemeden sonraki ortalama ilk söndürme süresi (t_1) ve ikinci söndürme süresi (t_2) raporlanmış ve UL-94 testi V sınıflandırmasına göre örnekler sınıflandırılmıştır.

Kompozitleri tutuşturmak için gereken minimum oksijen konsantrasyonunu belirlemek için LOI değerleri TS EN ISO 4589-2 standardına göre Mares Analyzer (M-LOI-01) cihazı ile ölçülmüştür. Standarda uygun numuneler cihazın O₂/N₂ gaz karışımı beslenen silindirik bacasına dikey şekilde yerleştirilerek numunenin üst ucundan alev uygulanmıştır. Numune tutuşana kadar gaz karışımının miktarı ayarlanmış ve tutuştuğu %O₂ oranı kaydedilerek, yanma süreleri ölçülmüştür. Her bileşimden 5 numune test edilmiştir.

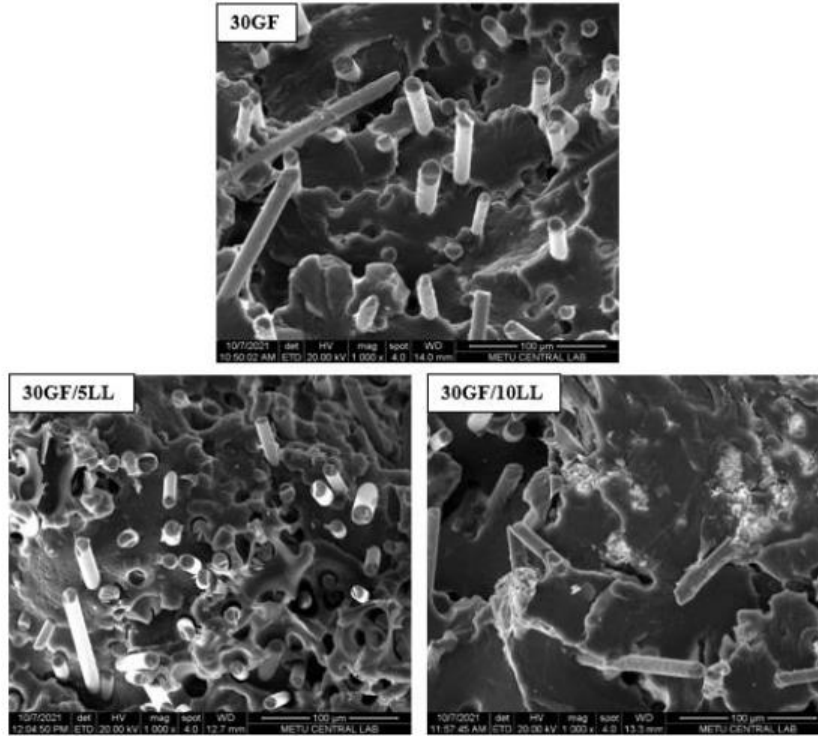
Isı salınım testleri konik kalorimetri cihazı ile ISO 5660-1 standardına göre gerçekleştirilmiştir. Test için 100×100×6 mm boyutlarında ve yaklaşık olarak 65 gr ağırlığında plakalar kullanılmıştır. Test numunelerinin hazırlanması için önce polimer ve katkıları ekstrüderde 240 °C'de harmanlanarak filament olarak üretilmiştir. Daha sonra granülatör vasıtasıyla pelet haline getirilmiştir. Ardın bu peletler, 240 °C, 80 bar'da 3 dakika boyunca hidrolik pres yardımıyla uygun boyutlarda kalıplanmıştır.

BULGULAR VE TARTIŞMA

Morfolojik Özellikler

GF ve LL ilavesinin kompozit mikroyapısı üzerindeki etkisini araştırmak için FESEM analizleri gerçekleştirilmiştir. Saf PA6, PA610 ve 60/40 oranında hazırlanan PA6/PA610 karışımının SEM görüntüleri daha önceki çalışmamızda sunulmuştur (Figure 4) (Artykbaeva vd., 2022). Saf polimerlerin, birbirlerinden önemli farklılıklar olmaksızın nispeten düzensiz ve pürüzlü bir morfoloji sergiledikleri görülmektedir. Bu mikrograflar, sünek polimerlerin tipik kırılmasını göstermektedir. 60-40 karışımı da saf polimerlere benzer bir morfolojik yapı sergilemiştir. Karışımda polimerler arasında belirgin bir faz ayrımının olmadığı ve dolayısıyla PA6 ve PA610 karışabilir özellikte olduğu söylenebilir.

GF ve GF/LL içeren kompozitlerin SEM mikrografları da Şekil 2'de görülmektedir. 30GF'ye ait mikrograf incelendiğinde genel olarak lifler ile matris arasında iyi bir arayüzey etkileşiminin olduğu ve liflerin matriste homojen şekilde dağıldığı görülebilmektedir. 30GF/5LL ve 30GF/10LL kompozitlerinin mikrograflarına bakıldığında genel olarak matris ile katkı etkileşiminin zayıfladığı söylenebilir. 30GF kompozitine 5LL ilavesi ile liflerin matristen daha fazla çekildiği ve boşluklar bıraktığı göze çarpmaktadır. LL miktarı %10'a yükseldiğinde ise topaklaşmalar meydana geldiği açıktır. LL partiküllerinin matris içinde homojen şekilde dağıtılmadığı görülmektedir.



Şekil 2. GF ve LL İçeren Kompozitlerin SEM Mikrografları (100 µm)

Diferansiyel Taramalı Kalorimetre (DSC)

DSC termogramlarından belirlenen eriyik kristalizasyon sıcaklığı (T_c), erime sıcaklığı (T_m), erime entalpisi (ΔH_m) ve % kristalinite değerleri (X_c) Tablo 2'de verilmiştir. Daha önceki çalışmalarımızdan PA6'nın 221 °C, PA610'un ise 224 °C T_m değeri sergilediği bilinmektedir (Artykbaeva vd., 2022). 60-40 karışımı da saf polimerlerin erime noktaları arasında tek bir erime noktası sergilemiştir. Buna göre PA6 ve PA610'un karışabilir olduğu söylenebilir (Moran vd., 2016; Ruehle vd., 2013; Shi, 2016). Saf polimerler soğutma basamağında keskin bir kristalizasyon piki sergilemişlerdir. PA610'un PA6'ya göre daha yüksek olan T_c değeri daha erken kristallenmeye başladığının bir göstergesidir. Harmanlama ile 60-40 karışımında PA6'nın T_c 'si değişirse de kristalizasyon oranının yükseldiği görülmüştür. Bu durum PA610'un çekirdeklendirici olarak davrandığını düşündürmektedir (Artykbaeva vd., 2022).

Tablo 2. DSC Sonuçları

Numune	T_m (°C)	ΔH_m (J/g)	T_c (°C)	$X_{c(PA6)}$ (%)	$X_{c(PA610)}$ (%)
60-40	221,7	41,4	180,5	29,9	40,7
30GF	224,9	34,2	179,8	35,3	33,7
30GF/5LL	221,1	39,3	177,1	28,5	38,7
30GF/7,5LL	220,0	31,0	176,7	22,4	30,5
30GF/10LL	222,8	22,9	176,9	16,6	22,5

GF ilavesi matrisin T_m ve T_c değerlerini önemli ölçüde etkilememiştir. PA6'nın GF eklenmesi ile artan % X_c değeri GF'nin PA6'nın çekirdeklenmesini teşvik eden ve kristallik artışı sağlayan bir çekirdeklendirici ajan olarak davrandığını göstermektedir (Wang vd., 2019). 30GF kompozitine LL ilavesi ile T_m değerlerinde belirgin bir değişim olmazken T_c değeri artan LL miktarı düşüş sergilemiştir. Benzer bir sonuç PA11/LL kompozitleri için Sallem-Idrissi ve ark. tarafından raporlanmıştır (Sallem-Idrissi vd., 2018). Bu durum hidrojen bağları yoluyla farklı türler arasındaki moleküller arası etkileşimlerin varlığına atfedilmiştir. T_c değerleri ile uyumlu olarak % X_c değerleri LL artışı giderek düşmüştür. Bu düşüş LL varlığında ve artan miktarda oluşan topaklanmalar nedeniyle polimer zincir hareketlerinin ve dolayısıyla paketlenmenin engellenmesinden kaynaklanmaktadır.

Termogravimetrik Analiz (TGA)

Kompozitlerin ısı kararlılıkları TGA ile değerlendirilmiş ve elde edilen sonuçlar Tablo 3'te sunulmuştur.

Tablo 3. TGA Sonuçları

Numune	T _{d5} (°C)	T _{d50} (°C)	T _{max} (°C)	Kalıntı (700 °C)
60-40	386,9	448,4	452,8	1,2
30GF	403,1	460,2	458,8	30,1
30GF/5LL	368,2	450,4	442,0	33,3
30GF/7,5LL	355,4	449,9	440,0	36,1
30GF/10LL	352,0	450,9	437,1	38,7

60-40 PA6/PA610 karışımı yaklaşık 380 °C civarında başlayan tek basamaklı bir bozunma sergilemiştir. Karışımın T_{d5}, T_{d50} ve T_{max} değerlerinin %30 GF ilavesi ile belirgin artış sergilediği görülmektedir. Bu sonuçlara göre GF ilavesinin karışımın ısı kararlılığını arttırdığı söylenebilir. Bu, GF'nin yüksek ısı kararlılığına ve matris içinde bariyer etkisi yaratmalarına atfedilebilir. Lifler, matristen gelen ısıyı emerek ve bozunma ürünlerinin difüzyonunu engelleyip bozunma sürecini uzatarak ısı dayanımı iyileştirmiştir (Nurazzi vd., 2020). Ayrıca GF'nin 700°C'de stabil kalması sonucunda GF miktarı arttıkça kalıntı miktarı da yükselmiştir.

LL etkisine bakıldığında; LL eklenmesi ve miktarının artışı ile T_{d5} değerleri hem 60-40 matrise hem de 30GF'ye göre belirgin şekilde düşmüştür. Genel olarak, poliamidlere göre LL'nin daha düşük ısı kararlılığı nedeniyle (Mandlekar vd., 2017) LL artışı ile ısı dayanımı olumsuz etkilenmiştir. Artan LL miktarı düşen ısı dayanım, yüksek miktardaki LL'nin PA matris ile lignin arasındaki karışamazlığı indüklemesine ve artan topaklanmaya ve dolayısıyla düşen bariyer etkisine atfedilebilir. Diğer yandan, karbon kaynağı LL'nin kömürleştirici etkisi sonucu kalıntı miktarı artış sergilemiştir.

Sınırlayıcı Oksijen İndeksi (LOI)

Tablo 4'te verilen LOI sonuçlarına göre matrisin %28,7 olan LOI değeri GF ilavesi ile bir miktar düşüş sergilemiştir. Bu düşüş GF'nin "mum fitili etkisi"nden kaynaklanmaktadır (Yan vd., 2022). GF/LL takviyeli kompozitlerin sonuçları incelendiğinde; LL ilavesinin LOI değerini düşürdüğü görülmektedir. Diğer yandan LL, kompozitlerin yanma süresini oldukça kısaltmış ve çok hızlı sönmelerini sağlayarak yanma sınırını geçmesini engellemiştir. LL'nin kömürleşme ajanı olarak davranışa yol açtığı söylenebilir. Yanma süreleri ve test esnasındaki yanma davranışları değerlendirildiğinde; test esnasında yanma sırasında LL'nin etkili bir kömür tabakası oluşturduğu sonucuna varılmıştır. Bu oluşan etkin kömür tabakasının malzemenin O₂ ile temasını engellediği ve aynı zamanda ısı transferini düşürerek malzemenin yanmasını engellediği düşünülmektedir.

Tablo 4. PA6/PA610/GF/LL Kompozitlerinin LOI Sonuçları

Örnek	LOI (%O ₂)	Yanma Süresi (sn)	Yanma Miktarı (5 cm)
60-40	28,7	117,6	GEÇTİ
30GF	27,7	298,5	GEÇTİ
30GF/5LL	25,4	17,4	GEÇMEDİ
30GF/7,5LL	26,2	10,1	GEÇMEDİ
30GF/10LL	26,9	9,0	GEÇMEDİ

Dikey Yanma Testi (UL-94)

UL-94 dikey yanma testi sonuçları Tablo 5'te sunulmuştur. PA6/PA610 karışımı ve 30GF kompoziti test sırasında damlama yaparak pamuk yanmasına sebep olduğundan V2 olarak sınıflandırılmıştır. V2 yanmazlık sınıfını göstermiştir. Damlamanın gözlemlenmesi her ne kadar malzemenin yangını yayma riskini gösterse de bazı termoplastiklerde bu damlamanın olması malzemenin kendi kendini söndürmesi için önemli bir etkidir. Yapıya LL

girmesi ve miktarının artması yanma süreleri kısalmış ve damlama davranışı da görülmemiştir. Özellikle, %10 LL içeren kompozitler, toplam yanma süresinde belirgin bir düşüş göstermiş ve V1 sınıfına ulaşmıştır. Test esnasında LL'nin etkisi ile ısı ve kütle transferi için bariyer görevi gören koruyucu bir kömür tabakasının oluştuğu gözlemlenmiştir. Ayrıca, LL'de bulunan sülfonat yapısının ısı olarak kararlı bir bileşiğin oluşumuna yol açması beklenir. Bu da etkili bir kömür tabakasının oluşumuna katkıda bulunarak kompozitlerin kendi kendine sönmeye davranışına yol açmaktadır. Böylece UL-94 sınıfının gelişimi gözlenebilmektedir (Mandlekar vd., 2017).

Tablo 5. PA6/PA610/GF/LL Kompozitlerinin UL-94 Sonuçları

Örnek	t ₁ (sn)	t ₂ (sn)	Damlama	Pamuğun alev alması	UL-94 sınıfı
60-40	11,6	26,6	EVET	EVET	V2
30 GF	43,4	68,5	EVET	EVET	V2
30GF/5LL	34,0	52,4	EVET	EVET	V2
30GF/7,5LL	169,05	40,6	HAYIR	HAYIR	V1
30GF/10LL	29,486	24,71	HAYIR	HAYIR	V1

Konik Kalorimetre Sonuçları

Isı salınım hızı (heat release rate) (HRR), maksimum ısı salınım hızı (peak heat release rate) (pHRR), toplam ısı salınımı (total heat release) (THR), yanma süresi (time to ignition) (TTI) ve kütle kayıp hızı kompozitlerin yanma davranışının belirlenmesi için önem arz etmektedir. PA6/PA610 karışımı ve seçili kompozitlere uygulanan konik kalorimetre testi sonucu elde edilen parametreler Tablo 6'da özetlenmiştir.

Tablo 6. Konik Kalorimetre Sonuçları

Örnek	pHRR (kW/m ²)	Time to pHRR (s)	Time to Ignition (s)	THR (MJ/m ²)	Mass Loss Rate (g/s.m ²)	Time of MLR (s)
60-40	698,4	465,0	148,0	196,3	22,8	470,0
30GF	258,1	340,0	140,0	152,2	9,5	345,0
30GF/10LL	167,6	375,5	119,0	114,6	6,7	250,0

Karışımın pHRR değeri sırası ile 698,4 kW/m² iken %30 GF ve %10 LL ilavesi ile pHRR değeri belirgin şekilde düşmüştür. Zuhudi ve arkadaşlarının yaptığı çalışmada cam ve bambu lifinin polipropilen matrisin özellikleri üzerine etkileri incelenmiş ve GF ilavesinin matrisin pHRR değerini düşürdüğü bildirilmiştir (Zuhudi vd., 2016). Karışım ve kompozitlerin THR değerleri pHRR ile benzer şekilde düşüş eğilimindedir. En yüksek ısı salınım hızı değeri (THR) 196,3 MJ/m² olarak matrise aittir. Bu karışımlara ağırlıkça %30 GF ve %10 LL ilave edildiğinde 114 MJ/m²'ye kadar düşüş gözlenmiştir. Bu düşüşler GF'nin matrisin bozunmasını azaltmasına ve LL'nin aromatik yapılarının daha yüksek kömür kalıntısı oluşturarak ısı salınımını sınırlandırılmasına atfedilebilir. Ayrıca, LL içeren kompozitte yoğunlaştırılmış fazda ısı olarak kararlı Na₂SO₄ oluşumu, matristen ısı ve kütle transferine karşı koruyucu bir bariyer tabakası oluşturabilir. Böylece pHRR, THR ve diğer yanma parametrelerinin düşüşünü sağlayabilir. Dahası kütle kayıp oranı ve hızı da 30GF/10LL kompozitinde kayda değer bir düşüş sergilemiştir. Buna göre GF ve LL matrisin bozunmasını azalttığı söylenebilir.

SONUÇ

Bu çalışma kapsamında 60/40 oranında PA6/PA610 karışımına performansını iyileştirmek amacı ile GF ve LL ilave edilmiştir. Kompozitler ekstrüzyon ve enjeksiyonlu kalıplama yöntemleriyle hazırlanmış ve morfolojik, ısıl (DSC-TGA) ve yanmazlık özellikleri incelenmiştir. SEM mikrografları GF ile PA matris arasında iyi bir arayüzey etkileşimi olduğunu ancak yapıya LL girmesi ile etkileşimin zayıflayarak liflerin matristen çekildiğini göstermiştir. Ayrıca yüksel LL miktarında yapıda topaklanmalar gözlenmiştir. TGA sonuçlarına göre ısıl kararlılığı yüksek olan GF'nin matrisin ısıl kararlılığını iyileştirdiği kalıntı miktarını artırdığı sonucuna varılmıştır. Diğer yandan LL'nin düşük ısıl kararlılığı nedeniyle, LL miktarı arttıkça kompozitlerin ısıl kararlılıklarının düştüğü belirlenmiştir. Ancak LL ilavesi kütle kayıp hızını yavaşlatmış ve kalıntı miktarını artırmıştır. GF takviyesi matrisin T_m ve T_c değerlerini önemli ölçüde etkilemezken PA6 fazının kristalinitesini artırmıştır. LL ilavesi ise polimer zincir hareketlerini kısıtlayıp paketlenmeyi engellediğinden matrisin kristalinitesini büyük oranda düşürmüştür. Yanmazlık özelliklerine bakıldığında matrisin LOI değerinin GF ve LL ilavesi düştüğü gözlenmiştir. Ancak LL yanma süresini belirgin bir şekilde kısaltmış ve numuneler yanma sınırını geçmemiştir. Matris ve 30GF V2 yanmazlık sınıfında iken LL

kömürleşme davranışı ile yanmazlık sınıfını VI'ye yükseltmiştir. Konik kalorimetre PA6/PA610'a eklenen GF ve LL'nin matrisin THR ve pHRR değerlerinde düşüş sağlayarak kompozitin yanmazlık özelliğini geliştirdiğini göstermiştir. Tüm sonuçlar değerlendirildiğinde, ligninin PA6/PA610 karışımı için etkin bir alev geciktirici olduğu söylenebilir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmayı FYL-2021-2659 numaralı proje kapsamında destekleyen Kocaeli Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi'ne (KOUBAP) teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

- Arboleda-Clemente, L., Ares-Pernas, A., García-Fonte, X. X., & Abad, M. J. (2016). Water sorption of PA12/PA6/MWCNT composites with a segregated conductive network: structure–property relationships. *Journal of Materials Science*, 51(18), 8674–8686. <https://doi.org/10.1007/s10853-016-0127-x>
- Artykbaeva, E., Ucpınar Durmaz, B., Aksoy, P., & Aytac, A. (2022). Investigation of the properties of PA6/PA610 blends and glass fiber reinforced PA6/PA610 composites. *Polymer Composites*, 43(10), 7514–7525. <https://doi.org/10.1002/pc.26840>
- Cayla, A., Rault, F., Giraud, S., Salaün, F., Sonnier, R., & Dumazert, L. (2019). Influence of ammonium polyphosphate/lignin ratio on thermal and fire behavior of biobased thermoplastic: The case of Polyamide 11. *Materials*, 12(7). <https://doi.org/10.3390/ma12071146>
- Chen, Y., Wang, Q., Yan, W., & Tang, H. (2006). Preparation of flame retardant polyamide 6 composite with melamine cyanurate nanoparticles in situ formed in extrusion process. *Polymer Degradation and Stability*, 91(11), 2632–2643. <https://doi.org/10.1016/j.polydegradstab.2006.05.002>
- Fabbri, F., Bischof, S., Mayr, S., Gritsch, S., Jimenez Bartolome, M., Schwaiger, N., Guebitz, G.M., & Weiss, R. (2023). The Biomodified Lignin Platform: A Review. *Polymers*, 15(7). <https://doi.org/10.3390/polym15071694>
- Koruyucu, A., & Balaban, F. Ç. (2021). Muz kabuğu ekstraktının pamuk ve pamuk-poliester karışimli kumaşlarda güç tutuşurluğa etkisinin incelenmesi. *Kahramanmaraş Sutcu Imam University Journal of Engineering Sciences*, 24(2), 66–82.
- Mandlekar, N., Cayla, A., Rault, F., Giraud, S., Salaün, F., Malucelli, G., & Guan, J. (2017). Thermal Stability and Fire Retardant Properties of Polyamide 11 Microcomposites Containing Different Lignins. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 56(46), 13704–13714. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.7b03085>
- Marset, D., Dolza, C., Fages, E., Gong, E., Gutiérrez, O., Gomez-Caturla, J., Ivorra-Martinez, J., Sanchez-Nacher, L., & Quiles-Carrillo, L. (2020). The effect of halloysite nanotubes on the fire retardancy properties of partially biobased polyamide 610. *Polymers*, 12(12), 1–21. <https://doi.org/10.3390/polym12123050>
- Moran, C. S., Barthelon, A., Pearsall, A., Mittal, V., & Dorgan, J. R. (2016). Biorenewable blends of polyamide-4,10 and polyamide-6,10. *Journal of Applied Polymer Science*, 133(45). <https://doi.org/10.1002/app.43626>
- Nurazzi, N. M., Khalina, A., Sapuan, S. M., Ilyas, R. A., Rafiqah, S. A., & Hanafee, Z. M. (2020). Thermal properties of treated sugar palm yarn/glass fiber reinforced unsaturated polyester hybrid composites. *Journal of Materials Research and Technology*, 9(2), 1606–1618. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.11.086>
- Otaegi, I., Aramburu, N., Müller, A. J., & Guerrica-Echevarría, G. (2018). Novel biobased polyamide 410/polyamide 6/CNT nanocomposites. *Polymers*, 10(9), 1–18. <https://doi.org/10.3390/polym10090986>
- Özdemir, F., & Özgan, A. O. (2023). Yumurta kabuğu içeriğinin odun plastik kompozit malzemenin yanma dayanımı üzerine etkisi. *Kahramanmaraş Sutcu Imam University Journal of Engineering Sciences*, 26(1), 98–107.
- Pagacz, J., Raftopoulos, K. N., Leszczyńska, A., & Pielichowski, K. (2016). Bio-polyamides based on renewable raw materials: Glass transition and crystallinity studies. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 123(2), 1225–1237. <https://doi.org/10.1007/s10973-015-4929-x>
- Rajak, D. K., Wagh, P. H., & Linul, E. (2021). Manufacturing technologies of carbon/glass fiber-reinforced polymer composites and their properties: A review. *Polymers*, 13(21). <https://doi.org/10.3390/polym13213721>
- Ruehle, D. A., Perbix, C., Castañeda, M., Dorgan, J. R., Mittal, V., Halley, P., & Martin, D. (2013). Blends of biorenewable polyamide-11 and polyamide-6,10. *Polymer*, 54(26), 6961–6970.

<https://doi.org/10.1016/j.polymer.2013.10.013>

Safari, M., Otaegi, I., Aramburu, N., Wang, Y., Liu, G., Dong, X., Wang, D., Guerrica-Echevarria, G., & Müller, A. J. (2021). Composition dependent miscibility in the crystalline state of polyamide 6 /polyamide 4,10 blends: From single to double crystalline blends. *Polymer*, 219(February), 123570. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2021.123570>

Sallem-Idrissi, N., Van Velthem, P., & Sclavons, M. (2018). Fully Bio-Sourced Nylon 11/Raw Lignin Composites: Thermal and Mechanical Performances. *Journal of Polymers and the Environment*, 26(12), 4405–4414. <https://doi.org/10.1007/s10924-018-1311-7>

Shi, Y. (2016). Phase behavior of polyamide 6/612 blends. *Plastics Engineering*, 72(4), 46–49. <https://doi.org/10.1002/j.1941-9635.2016.tb01515.x>

Turkmen, E., Yetgin, S.H., & Gülesen, M. (2017). Investigation of Properties of Glass Fiber and Rubber Filled PA6 Polymer, 7575, 15–23.

Wang, Y., Cheng, L., Cui, X., & Guo, W. (2019). Crystallization behavior and properties of glass fiber reinforced polypropylene composites. *Polymers*, 11(7), 14–16. <https://doi.org/10.3390/polym11071198>

Yan, C., Yan, P., Xu, H., Liu, D., Chen, G., Cai, G., & Zhu, Y. (2022). Preparation of continuous glass fiber/polyamide 6 composites containing hexaphenoxycyclotriphosphazene: Mechanical properties, thermal stability, and flame retardancy. *Polymer Composites*, 43(2), 1022–1037. <https://doi.org/10.1002/pc.26431>

Zhong, Y., Liu, P., Pei, Q., Sorkin, V., Louis Commillus, A., Su, Z., Guo, T., Thitsartarn W., Lin, T., He, C., & Zhang, Y. W. (2020). Elastic properties of injection molded short glass fiber reinforced thermoplastic composites. *Composite Structures*, 254(April), 112850. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.112850>

Zuhudi, N. Z. M., Lin, R. J., & Jayaraman, K. (2016). Flammability, thermal and dynamic mechanical properties of bamboo–glass hybrid composites. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 29(9), 1210–1228. <https://doi.org/10.1177/0892705714563118>



Kahramanmaraş Sütçü İmam University

Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi: 11.10.2023
Kabul Tarihi: 12.11.2023

Received Date : 11.10.2023
Accepted Date : 12.11.2023

LİMBA ODUNUNUN (*TERMINALIN SUPERBA*) BAZI MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ

DETERMINATION OF SOME MECHANICAL PROPERTIES OF LIMBA WOOD (*TERMINALIN SUPERBA*)

Musa KAYA¹ (ORCID:0000-0002-5955-7378)
Ramazan BÜLBÜL² (ORCID: 0000-0003-4760-9166)

¹Atatürk Mesleki ve Teknik Anadolu Lisesi, Erzurum, Türkiye
²Gazi Üniversitesi, Ağaççileri Endüstri Mühendisliği Bölümü, Ankara, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Musa KAYA, kayamusa2512@gmail.com

ÖZET

Yapılan çalışmada, tropikal bir odun türü olana limba (*Terminalin superba*) odunun teğet ve radyal yönlerine bağlı olarak eğilme direnci, eğilmede elastikiyet modülü, dinamik eğilme direnci ve vida tutma kapasiteleri araştırılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre limba odununun teğet yöndeki eğilme direnci, 91.27 N/mm², radyal yöndeki eğilme direnci ise 105.93 N/mm²; eğilmede elastikiyet modülü, teğet yönde 10772.68 N/mm², radyal yönde ise 12985.29 N/mm²; dinamik (Şok) eğilme direnci, teğet yönde 37.05 kJ/m², radyal yönde 38.80 kJ/m²; vida tutma kapasitesi, teğet yüzeyde 29.03 N/mm² radyal yüzeyde 30.45 N/mm² olduğu tespit edilmiştir. Elde edilen bu değerlere göre limba odununun özellikle vidalama işlemlerinde ve dinamik etki biçimindeki yüklere karşı teğet ve radyal yüzeyleri arasında anlamlı bir farkın olmadığı tespit edilmiştir. Statik yüklere maruziyet söz konusu olduğunda limba odununun teğet ve radyal yönleri arasında anlamlı bir farklılığın olduğu, dolayısıyla limba odununun kullanılması durumunda bu farklılığın dikkate alınması gerekmektedir.

Anahtar Kelimeler: Limba odunu, mekanik özellikler, teğet ve radyal yönler

ABSTRACT

In the study, bending strength, modulus of elasticity in bending, dynamic bending resistance and screw holding capacities of limba (*Terminalin superba*), a tropical wood species, were investigated depending on the tangential and radial directions. According to the results obtained, the bending resistance of limba wood in the tangential direction is 91.27 N/mm², and the bending resistance in the radial direction is 105.93 N/mm²; modulus of elasticity in bending is 10772.68 N/mm² in the tangential direction and 12985.29 N/mm² in the radial direction; dynamic (Shock) bending strength, 37.05 kJ/m² in tangential direction, 38.80 kJ/m² in radial direction; The screw holding capacity was determined to be 29.03 N/mm² on the tangential surface and 30.45 N/mm² on the radial surface. According to these values obtained, it was determined that there was no significant difference between the tangential and radial surfaces of the limba wood, especially in screwing operations and against dynamic loads. When it comes to exposure to static loads, there is a significant difference between the tangential and radial directions of limba wood, so this difference should be taken into account when limba wood is used.

Keywords: Limba wood, mechanical properties, tangential and radial directions

GİRİŞ

Son yıllarda hızlı bir şekilde gelişen Türkiye mobilya ve dekorasyon sanayisi hem tasarım ve hem de malzeme çeşitliliği açısından birçok alternatif seçim imkânını içerisinde barındırmaktadır. Yurt içi ve yurt dışı müşteri istekleri doğrultusunda oluşturulan alternatif seçim imkânlarından bazen yerel orman ürünlerinde mevcut olmayan, tropikal ormanlara has; limba (*Terminalin superba*), padouk (*Pterocarpus soyauxii* T.), sapelli (*Entandrophragma cylindricum*) gibi bazı ağaç malzeme türlerinin de kullanılmasını zorunlu kılmaktadır. Dolayısıyla mobilya ve dekorasyon imalatında kullanılacak olan söz konusu bu ağaç malzemelerin fiziksel ve mekanik özelliklerinin iyi bilinmesi; böylece amacı doğrultusunda kullanılan ağaç malzemelerin daha verimli bir şekilde kullanılması oldukça önemlidir.

Mobilya veya yapısal amaçlı uygulamalarda kullanılan ağaç malzemenin mekanik özellikleri; onun var olan yapısal formunu değiştirmeye yönelik tesir edici harici kuvvetlere karşı kendine has mukavemet seviyesidir (Tsoumis, 1991). Ağaç malzemenin bu kuvvetlere karşı gösterdiği direnç, tesir eden kuvvetlerin büyüklüğüne ve yükleme şekline bağlı olarak değişmektedir. Metal ve benzeri homojen yapıya sahip malzemelerin aksine anizotrop bir yapıya sahip olan ağaç malzemenin anatomik ve fiziksel yapısı liflere paralel yönde (Boyuna) ve liflere dik yönde (Teğet ve radyal) farklı olduğundan dolayı mekanik özellikleri de buna bağlı olarak farklılık göstermektedir (Usta, 2016). Bununla birlikte ahşap esaslı kompozit panellerde de (Geometrik oluklu paneller, CLT paneller vb. gibi) mekanik dirençler farklı yönlerde farklı değerlere sahip olabilmektedir (Kaya, 2023; Altunok, Bülbül & Güneş, 2023). Yapılan bu deneysel çalışmada tropik bir ağaç türü olan limba (*Terminalin superba*) odununun radyal ve teğet yönlerine bağlı olarak bazı mekanik özellikleri (Dinamik eğilme direnci, eğilme direnci, eğilmede elastikiyet modülü ve vida tutma kapasitesi) ilgili standartlar esas alınarak incelenmiştir.

Ağaç malzemenin anizotropik yapısı, mekanik özellikleri dâhil olmak üzere bütün özelliklerini etkilemektedir. Örneğin elastiklik modülü liflere paralel yönde en yüksek iken teğet yönde en düşük değere sahiptir (Şirin & Aydemir, 2016). Bununla birlikte ahşap esaslı mobilya yapımındaki birleştirme konstrüksiyonlarının emniyetli olmasındaki esas faktör ağaç malzemenin mekanik özellikleridir (Efe & Kasal, 2007). Mobilya imalatında kullanılan ağaç malzemenin kullanım süresince taşıyacağı yük ve malzemenin mekanik özellikleri göz önünde bulundurularak yapılan mobilyaların kullanım süreleri artmaktadır (Yılmaz, 2011). Dolayısıyla mobilya imalatında tasarım ve fonksiyonelliğin yanında aranan diğer bir özellik ise sağlamlığıdır. Sağlamlık ise ancak kullanılan ağaç malzemenin fiziksel ve mekanik özelliklerinin yanı sıra uygun konstrüksiyon biçimine bağlı olarak sağlandığı için kullanılan ağaç malzemenin söz konusu bu özelliklerinin iyi bilinmesi ve buna bağlı olarak mobilya tasarım ve imalatının gerçekleştirilmesi gerekmektedir.

Dünyada ağaç malzemenin anatomik, fiziksel, mekanik ve kimyasal özelliklerini tayin etmek için birçok araştırma yapılmaktadır. Bu araştırmaların amacı ağaç malzemeler hakkında daha çok veri elde etmek ve elde edilen verilerin ise sistematik olarak kolay bir biçimde ulaşılabilmesine imkan sağlamaktır (As, Koç, Doğu, Atik, Aksu, & Erdinler, 2001).

Combretaceae familyasına ait olan Limba odunu (*Terminalia superba*); Kongo, Kamerun ve Nijerya gibi ülkelerde yetişen geniş yapraklı ağaç türlerinden olup; Boyu 50 metre'ye kadar çıkabilen, çapı ise 0.90 metre ile 1,50 metreye ulaşabilen (Göker & Kurtoğlu, 1987) hafif sarı renkli (CİRAD, 2009) bir ağaç türüdür. Dağmık bir trahe yapısına sahip olan limba odunu (Bozkurt & Erdin, 1990), mobilya imalatı, kontrplak üretiminde, müzik aletleri yapımında ve iç mekân tasarım uygulamalarında tercih edilen bir ahşap malzemedir. Ancak böcek ve mantar istilalarına karşı hassas bir yapıya sahip ağaç malzemedir (Stabnikov 1957). Yoğunluk değeri 0.50 ile 0.69 g/cm³ aralığında bulunduğu için orta ağırlıktaki ağaçlar sınıfına dâhil edilmektedir (Bozkurt & Erdin, 1990).

Yapılan bu çalışmada, limba (*Terminalia superba*) odununun; diğer ağaç malzemeler gibi gerek mobilya imalatında ve gerekse ahşap yapısal uygulamalarda vidalama işlemlerine tabi tutulma, ani kuvvet etkilerine maruz kalma, kısa ya da sürekli yatay yükler altında kalacak şekilde kullanılmaktadırlar. Bu tür etkilere karşı limba ağaç malzemesinin performans değerlerini tespit etmek için deneyler yapılmıştır. Deneyler sonucunda elde edilen veriler farklı istatistiksel analiz programları yardımıyla değerlendirilmiştir.

MATERYAL VE METOT

Materyal

Gerçekleştirilen bu deneysel çalışmada; limba (*Terminalia superba*) odununu kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan limba odunu kerestesi Türkiye Cumhuriyeti Erzurum ili Yakutiye ilçesindeki mobilyacılar sanayi sitesinden tedarik edilmiştir. Kereste seçimi; lif yönlerinin düzgün, anormal bir gövde (Çekme odunu) yapısı olmayan, budaksız, böcek ve mantar tarafından tahrip edilmemiş olması gibi kriterler göz önüne alınarak gerçekleştirilmiştir. Deneylerde kullanılan limba odununun, 20 °C sıcaklık ve %65 bağıl nem şartlarındaki yoğunluk ve rutubet değerleri Çizelge 1’de verilmiştir.

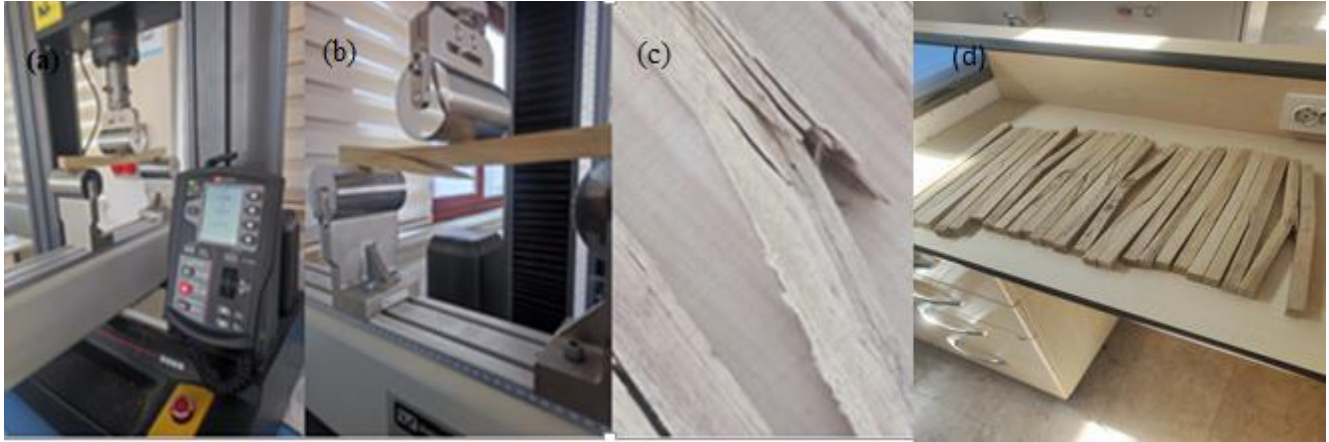
Çizelge 1. Limba Odununa Ait Hava Kuru Yoğunluk ve Rutubet Değerleri

No	Malzeme ismi	Numune sayısı	Ölçü (mm)	Yoğunluk (g/cm ³)	Rutubet değeri (%)
1	Limba	15	20 x 20 x 20	0,56	%11,86

Metot

Eğilme Direnci ve Eğilmeye Elastikiyet Modülünün Tespiti

Yapılan çalışmada gerçekleştirilen testler Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Ağaççileri Endüstri Mühendisliği Bölümü test laboratuvarında bulunan Instron 5969 Universal Test Cihazı’nda gerçekleştirilmiştir. Eğilme direnci deneylerinde, masif ağaç malzemeler için TS ISO 13061 - 3’te belirtilen esaslara uyulmuştur. Deney numuneleri, ağaç malzemeler için 360x20x20 mm ölçülerinde olup kuvvet uygulaması teğet ve radyal yönlere dik pozisyonda olacak şekilde 10’ar adet deney numunesi hazırlanmıştır. Ayrıca eğilme deneylerinde TS ISO 13061 - 4’teki esaslara göre eğilmeye elastikiyet modülü değerleri de tespit edilmiştir. Eğilme direnci testinde mesnetler arası mesafe 30 cm, kuvvet uygulaması ise dakikada 10 mm ayarlanıp; belirlenen yönlere (Radyal ve teğet) dik uygulanarak deney işlemi gerçekleştirilmiştir. Eğilme direncinin tespitinde kullanılan deney cihazı ve deney yapılmış numuneler Şekil 1’de görülmektedir.



Şekil 1. Eğilme Direnci ve Eğilmeye Elastikiyet Modülünün Tespiti; (a), (b) Statik Eğilme Deney Düzenegi, (c), (d) Statik Eğilme Deney Sonrası Numuneler

Dinamik (Şok) Eğilme Direncinin Tayin Edilmesi

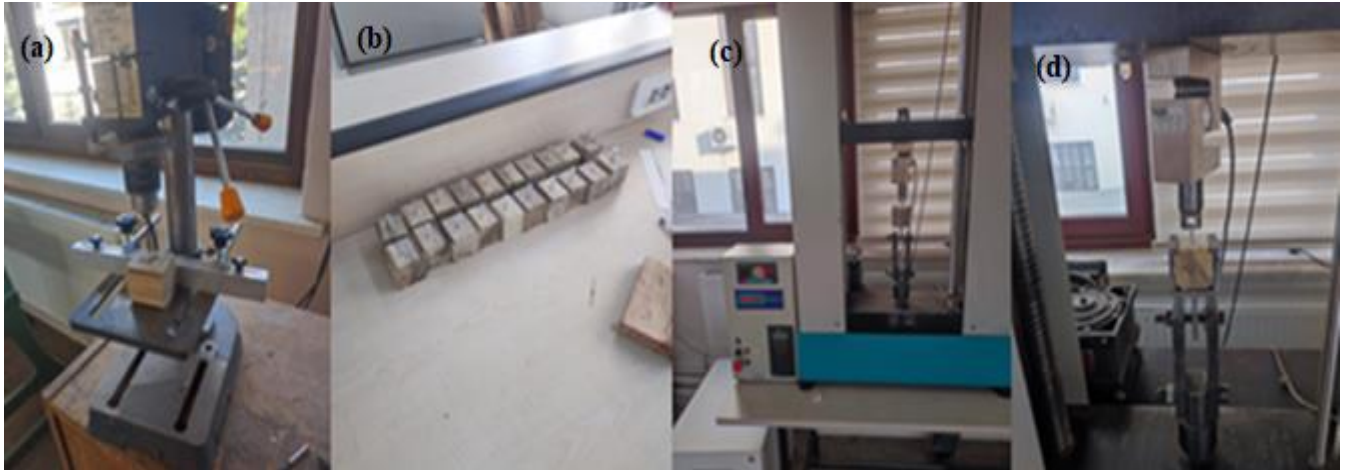
Dinamik eğilme direnci testi TS ISO 13061 - 10’daki esaslara uyularak, Gazi Üniversitesi Teknoloji Fakültesi Ağaççileri Endüstri Mühendisliği Bölümü test laboratuvarında bulunan Charpy markalı test cihazı’nda gerçekleştirilmiştir. Buna göre mesnetler arası mesafe 26 cm olarak ayarlanmış olup; deney numuneleri ise 20x20x300 mm ebatlarında hazırlanmıştır. Kuvvet uygulaması deney numunelerininin teğet ve radyal yönlerine dik gelecek şekilde uygulanmıştır. Deneyin yapılışı ile ilgili görseller Şekil 2’de verilmiştir.



Şekil 2. Dinamik Eğilme Direncinin Tespitine İlişkin Görüntüler; (a), (b) Deneş Düzeneği, (c) Dinamik Eğilme Sonrası Meydana Gelen Kırılmalar

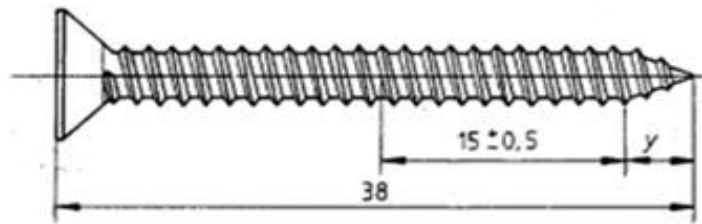
Vida Tutma Kapasitesinin Tespiti

Yapılan çalışmada vida tutma kapasitesinin tespiti yapılırken, deneş numunelerinin radyal ve teğet kesitlerine 15 mm derinliğinde ön kılavuz deliği açılarak vidalama işleminin gerçekleştirilmiştir. Vida tutma kapasitesinin tespiti için TS EN 13446 No'lu standart esas alınıp 5x5x5 cm boyutlarındaki deneş numuneleri ile her bir kesit yüzeyi için 10'ar adet olmak üzere toplam 20 adet deneş gerçekleştirilmiştir. Vida tutma kapasitesinin tespiti için yapılan deneşlere ilişkin görüntüler Şekil 3'te verilmiştir.



Şekil 3. Vida Tutma Kapasitesinin Tespitine İlişkin Görüntüler, (a) Kılavuz Deliği Açma, (b) Vidaların Bağlanması, (c), (d) Deneş Düzeneği

Deneş uygulamalarında kullanılan vida, Şekil 4'teki gibi çelik gövdeli ve yıldız uçlu olup; ölçüsü ise 4.2 mm x 38 mm ve vida adım ölçüsü ise 1.4 mm'dir.



Şekil 4. Deneşlerde Kullanılan Vidaya Ait Ölçüler

Verilerin Analiz Edilmesi

Deneysel metotlarla elde edilen verilerin analizinde SPSS 26 ve MSTAT-C programları tercih edilmiştir. Bu programlar ile tek yönlü varyans analizi (ANOVA) ve çoklu karşılaştırmalar 95% güven endeksi esas alınarak gerçekleştirilmiştir.

BULGULAR VE TARTIŞMA

Eğilme Direncinin Tespiti

TS ISO 13061 - 3'e göre limba odununun kesit (Teğet ve radyal) yüzeylerine bağlı olarak tespit edilen eğilme dirençlerine ilişkin istatistiksel veriler Çizelge 2'de verilmiştir.

Çizelge 2. Limba Odununun Teğet ve Radyal Yönlerdeki Eğilme Direncine İlişkin İstatistiksel Veriler

Kuvvetin Uygulandığı Yüzey	N	X_{min}	X_{max}	$X_{ort.}$	Std. sp.
Teğet Yüzey	10	73,9	105,44	91,27	10,40
Radyal Yüzey	10	90,95	126,29	105,93	11,04

Çizelge 2'de verilen limba odununun teğet ve radyal yüzeylerine dik yönde etkide bulunan kuvvete karşı deney numunesinde meydana gelen eğilme dirençlerinin birbirlerinden farklı olduğu tespit edilmiştir. Tespit edilen bu farklılığın istatistiksel olarak %5 hata payı içerisinde anlamlı olup ya da olmadığını belirlemek için tek yönlü varyans analiz testi yapılarak, sonuçları Çizelge 3'te verilmiştir.

Çizelge 3. Limba Odununun Teğet ve Radyal Yönlerine Göre Meydana Gelen Eğilme Direncinin Varyans Analizi

Varyans Kaynağı	Kareler Toplamı	SD	Kareler Ort.	F	Anlamlılık Düzeyi (p<0.05)	Kısmi Eta ²
Kuvvetin Uygulandığı Yüzey	1074,285	1	1074,285	9,339	0,007	0,34
Hata	2070,654	18	115,036			
Toplam	197588,083	20				
Düzeltilmiş Toplam	3144,939	19				

Çizelge 3'e göre; limba odununun teğet ve radyal yüzeylerinin eğilme dirençlerine olan etkilerinin %5 hata payı dâhilinde (p<0.05) anlamlı olduğu; anlamlılık düzeyinin ise %34 olduğu tespit edilmiştir. Tek yönlü varyans analiz çizelgesine göre etkisi anlamlı çıkan limba ağaç malzemenin teğet ve radyal yüzeylerindeki eğilme direncinin homojenlik gruplarını belirlemek için Duncan testi yapılarak sonuçları Çizelge 4'te verilmiştir.

Çizelge 4. Eğilme Direncine Etkisi Anlamlı Olan Kesit Yüzeylerine Ait Homojenlik Grupları

Kesit Yüzeyi	\bar{X} (N/mm ²)	HG
Teğet Yüzey	91,27	B
Radyal Yüzey	105,93	A

LSD: 10.50 N/mm²; A,B: Homojenlik grupları

Çizelge 4'e göre, limba odununun teğet ve radyal yüzeylerinde meydana gelen eğilme dirençlerinin birbirlerinden anlamlı düzeyde farklı oldukları belirlenmiştir. Çizelgeye göre radyal yüzeydeki eğilme direncinin teğet yüzeydeki eğilme direncinden daha yüksek olduğu tespit edilmiştir.

Ağaç malzemenin direnç özellikleri yönlerine bağlı olarak değişmektedir. Buda ortotropik yapısal özeliğinin sonucudur (Ozyhar, 2013). Bundan dolayı, ağaç malzeme üzerinde yapılan fiziksel ve mekanik testlerin sonuçları da yüzeylere bağlı olarak farklı değerlerde elde edilmektedir (Efe & Bal, 2016; Usta, 2016). Teğet yüzeyde yıllık halkalar küçük tabakalar şeklinde bir yapıya sahiptir. Teğet yüzeye etki eden kuvvet; teğet yüzeydeki pozisyonu yıllık halka tabakalarına dik iken, radyal yüzeydeki pozisyonu ise yıllık halka tabakalarına paralel bir pozisyonda olduğu için teğet ve radyal yüzeylerde meydana gelen eğilme dirençleri de buna bağlı olarak farklı olduğu söylenilebilir.

Yapılan araştırmalarda yoğunluğu 0.58 g/cm³ olan limba odununun eğilme direncinin 106 N/mm² (Bozkurt & Erdin, 1995), literatürde tropikal ağaç malzeme örneklerinden olan sapelli odununun teğet yöndeki eğilme direnci 77.06

N/mm² iken radyal yönde ise 85.11 N/mm²; iroko'da ise teğet yönde 50.18 N/mm², radyal yönde ise 86.59 N/mm² olduğu belirlenmiştir (Özkan, 2019). Dolayısıyla yapılan bu çalışmadaki limba odununun liflere paralel ve dik yöndeki eğilme dirençleri arasındaki farkın daha önce yapılan çalışmalarda elde edilen sonuçlarla uyumlu olduğu tespit edilmiştir.

Eğilmede Elastikiyet Modülünün Tespiti

TS ISO 13061 - 4'e göre limba odununun kesit (Teğet ve radyal) yüzeylerine bağlı olarak tespit edilen eğilmede elastikiyet modülü değerlerine ilişkin istatistiksel veriler Çizelge 5'te verilmiştir.

Çizelge 5. Limba Odununun Teğet ve Radyal Yönlerdeki Eğilmede Elastikiyet Modülüne Ait İstatistiksel Veriler

Kuvvetin Uygulandığı Yüzey	N	X_{min}	X_{max}	X_{ort}	Std. sp.
Teğet Yüzey	10	8301,6	12689,72	10772,68	1355,36
Radyal Yüzey	10	11296,29	14571,90	12985,29	1054,42

Çizelge 5'e göre, limba odununun teğet ve radyal yüzeylerine dik yönde etkide bulunan kuvvete karşı deney numunelerinde oluşan eğilmede elastikiyet modülü değerlerinin birbirlerinden farklı olduğu tespit edilmiştir. Tespit edilen farklılıkların istatistiksel olarak %5 hata payı içerisindeki anlamlılık durumunu belirlemek için tek yönlü varyans analiz testi yapılarak, sonuçları Çizelge 6'da verilmiştir.

Çizelge 6. Limba Odununun Teğet ve Radyal Yönlerine Göre Gerçekleşen Eğilmede Elastikiyet Modülünün Varyans Analizi

Varyans Kaynağı	Kareler Toplamı	SD	Kareler Ort.	F	Anlamlılık Düzeyi (p<0.05)	Kısmi Eta ²
Kuvvetin Uygulandığı Yüzey	24478192,934	1	24478192,934	16,602	0,001	0,48
Hata	26539198,645	18	1474399,925			
Toplam	2873221421,126	20				
Düzeltilmiş Toplam	51017391,579	19				

Çizelge 6'ya göre; limba odununun teğet ve radyal yüzeylerinin eğilmede elastikiyet modülüne olan etkilerinin %5 hata payı dâhilinde (p<0.05) anlamlı olduğu; kesit (Teğet ve radyal) yüzeylerinin etki seviyesi ise %48 olduğu tespit edilmiştir. Tek yönlü varyans analiz çizelgesine göre etkisi anlamlı çıkan limba odununun teğet ve radyal yüzeylerindeki eğilmede elastikiyet modülünün homojenlik gruplarını belirlemek için Duncan testi yapılarak sonuçları Çizelge 7'de verilmiştir.

Çizelge 7. Eğilmede Elastikiyet Modülüne Etkisi Anlamlı Olan Kesit Yüzeylerine Ait Homojenlik Grupları

Kesit Yüzeyi	\bar{X} (N/mm ²)	HG
Teğet Yüzey	10772,68	B
Radyal Yüzey	12985,29	A

LSD: 10.50 N/mm²; A,B: Homojenlik grupları

Çizelge 7'ye göre, limba odununun teğet ve radyal yönlerinde meydana gelen eğilmede elastikiyet modülü değerlerinin birbirlerinden anlamlı düzeyde farklı oldukları belirlenmiştir. Çizelgeye göre radyal yönde meydana gelen eğilmede elastikiyet modülünün teğet yönde gerçekleşen eğilmede elastikiyet modülünden daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Tespit edilen bu farklılığın; söz konusu deney numunesinin yıllık halkalarının uygulanan kuvvete karşılık paralel bir biçimde konumlandırılması ile gerçekleştiği söylenebilir.

Ağaç malzeme anizotrop bir yapıya sahip olduğundan eğilmede elastikiyet modülü değerleri de teğet ve radyal yönlerde farklılık gösterir. Liflere paralel yöndeki eğilmede elastikiyet modülü liflere dik yöndeki eğilmede elastikiyet modülünden daha yüksektir (Usta, 2016). Liflere paralel (Radyal) yöndeki eğilmede elastikiyet modülleri; tropikal ağaç malzemelerden olan iroko için 9700-13500 N/mm², sapelli için ise 10000 N/mm² olduğunu belirtmişlerdir (Bozkurt & Erdin, 1989).

Ağaç malzemedeki eğilmede elastikiyet modülü; ağaç malzemenin yoğunluğuna, yaz odunu iştirak oranına, yıllık halka genişliğine, lif yönü ve açısına bağlı olarak değişmektedir (Göker & As, 1990). Dolayısıyla limba odununun teğet ve

radyal yönlerine bağlı olarak gerçekleşen eğilmede elastikiyet modülü değerleri arasındaki farklılığın beklenen bir durum olduğu ve bu farklılığın daha önce yapılan benzer çalışmalarla uyumlu olduğu tespit edilmiştir.

Dinamik (Şok) Eğilme Direncinin Tayin Edilmesi

TS ISO 13061 – 10'a göre limba odununun kesit (Teğet ve radyal) yüzeylerine bağlı olarak tespit edilen dinamik eğilme direncine ilişkin istatistiksel veriler Çizelge 8'de verilmiştir.

Çizelge 8. Limba Odununun Teğet ve Radyal Yönlerdeki Dinamik Eğilme Dirençlerine (kJ/m²) İlişkin İstatistiksel Veriler

Kuvvetin Uygulandığı Yüzey	N	X _{min}	X _{max}	X _{Ort.}	Std. sp.
Teğet Yüzey	15	23,82	59,82	37,05	13,10
Radyal Yüzey	15	24,86	52,02	38,80	8,15

Çizelge 8'e göre, limba odununun teğet ve radyal yönlerine bağlı olarak gerçekleşen dinamik eğilme dirençlerinin farklı olduğu, radyal yüzeye etki eden kuvvete karşılık gelen ortalama dinamik eğilme direnci 38.80 kJ/m² ile teğet yönden daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Limba odununun dinamik eğilme direnci 3.0 – 4.5 J/cm² (Bozkurt & Erdin, 1990) olduğundan dinamik eğilme direnci küçük olan ağaçlar sınıfına dâhil edilebilir. Tespit edilen farklılıkların istatistiksel olarak %5 hata payı içerisindeki anlamlılık durumunu belirlemek için tek yönlü varyans analizi yapılarak, sonuçları Çizelge 9'da verilmiştir.

Çizelge 9. Limba Odununun Teğet ve Radyal Yönlerine Göre Dinamik Eğilme Dirençlerinin Varyans Analizi

Varyans Kaynağı	Kareler Toplamı	SD	Kareler Ort.	F	Anlamlılık Düzeyi (p<0.05)	Kısmi Eta ²
Kuvvetin Uygulandığı Yüzey	22,951	1	22,951	16,602	0,664	0,07
Hata	3334,147	28	119,077			
Toplam	46502,474	30				
Düzeltilmiş Toplam	3357,098	29				

Limba odununun teğet ve radyal yönlerine bağlı olarak gerçekleşen dinamik eğilme dirençlerindeki farklılığın anlamlı olup olmadığını belirlemek için tek yönlü varyans analizi yapılmıştır. Çizelge 9'a göre teğet ve radyal yönlerdeki dinamik eğilme dirençleri farklı değerlere sahip olmalarına rağmen, Çizelge 10'daki analizi sonuçlarına göre teğet ve radyal yönlerinin limba odununun dinamik eğilme direncinde anlamlı (p>0.05) etkilerinin olmadığı, bundan dolayı Duncan testi yapılmamıştır.

Dinamik eğilme direnci ağaç malzemenin ani etki eden kuvvetlere karşı gösterdiği dirençtir. Gerçekte bir alet sapında meydana gelen darbe tesiri, spor aletlerindeki çarpmalar, ambalaj sandıklarının karşılaştığı çapma kuvvetleri gibi faktörler sayılabilir (Özkan, 2019; Bozkurt, 1966). Dolayısıyla yapılan deneylere göre limba odununun teğet ve radyal yönlerine etki eden ani şekildeki kuvvetlere karşı göstermiş olduğu dirençler arasında, istatistiksel olarak anlamlı düzeyde (p<0.05) herhangi bir farkın olmadığı tespit edilmiştir. TS 2477 numaralı standarda göre dinamik eğilme direnci testlerinde meydana gelen kırılmalarda kıymık uzunluğu 3 mm'den uzun ise malzemenin sünek olduğu, 3 m'den kısa ise malzemenin gevrek olduğu belirtilmektedir. Yapılan bu çalışmada Şekil 1 (c)'de görüldüğü gibi limba odununun kırılma alanındaki kıymık uzunluklarına bakılarak, sünek bir malzeme olduğu söylenebilir.

Vida Tutma Kapasitesinin Tayin Edilmesi

TS EN 13446'ya göre limba odununun kesit (Teğet ve radyal) yüzeylerine bağlı olarak tespit edilen vida tutma kapasitesine ilişkin istatistiksel veriler Çizelge 10'da verilmiştir.

Çizelge 10. Limba Odununun Teğet ve Radyal Yüzeylerindeki Vida Tutma Kapasitelerine (N/mm²) İlişkin İstatistiksel Veriler

Kuvvetin Uygulandığı Yüzey	N	X _{min}	X _{max}	X _{Ort.}	Std. sp.
Teğet Yüzey	10	25,37	34,87	29,03	2,89
Radyal Yüzey	10	26,31	34,09	30,45	2,89

Çizelge 10'a göre limba odununun teğet ve radyal yüzeylerinin vida tutma kapasiteleri arasında farklılıkların olduğu görülmüştür. Meydana gelen bu farklılığın radyal yüzeyde 30.45 N/mm² ile teğet yüzeydeki vida tutma kapasitesinden daha yüksek olduğu görülmektedir. Ancak her iki yüzeydeki vida tutma kapasitelerinin birbirlerine

yakın değerlerde olduğu görülmektedir. Limba odununun teğet ve radyal yüzeylerdeki vida tutma kapasitelerindeki farklılıkların anlamlı olup olmadıklarını tespit etmek için tek yönlü varyans analizi yapılarak sonuçları Çizelge 11’de verilmiştir.

Çizelge 11. Limba Odununun Teğet ve Radyal Yüzeylerine Bağlı Gerçekleşen Vida Tutma Kapasitelerine İlişkin Varyans Analizi

Varyans Kaynağı	Kareler Toplamı	SD	Kareler Ort.	F	Anlamlılık Düzeyi ($p < 0.05$)	Kısmi Eta ²
Kuvvetin Uygulandığı Yüzey	10,033	1	10,033	1,202	0,287	0,063
Hata	150,299	18	8,350			
Toplam	17848,559	20				
Düzeltilmiş Toplam	160,331	19				

Çizelge 11’e göre limba odununun teğet ve radyal yüzeylerine bağlı olarak gerçekleşen vida tutma kapasitelerindeki farklılıkların anlamlı ($p > 0.05$) olmadığı tespit edilmiştir.

Daha önce yapılmış çalışmalara göre endüstriyel ya da endüstriyel amaçlı kullanılmayan bazı odunların teğet ve radyal yönlerine bağlı olarak vida tutma kapasiteleri; Ihlamur odununda teğet yüzeyde 24.60 N/mm², radyal yönde 20.32 N/mm² (Çavuş vd. 2022) olduğunu belirtmişlerdir. Japon akçaağacı için teğet yüzeyde 35.10 N/mm², radyal yüzeyde 33.10 N/mm² (Efe, 2020); kurtbağrı odunu için teğet yüzeyde 41.04 N/mm², radyal yüzeyde ise 43.93 N/mm² olduğunu belirtmiştir (Çavuş, 2021).

Ağaç malzemede vida tutma kapasitesi; odun türüne (Perçin & Ayan, 2012) odunun kesit yüzeyine (Örs vd. 1998) ve odunun özgül ağırlığına (Çelebi & Kılıç, 2007) bağlı olarak değişmektedir.

Yapılan bu çalışmada ise limba odunu için elde edilen vida tutma kapasitesi değerlerinin teğet ve radyal yüzeylerine bağlı olarak birbirlerine yakın değerlerde oldukları ve aynı zamanda daha önce yapılmış olan benzer çalışmalar ile uyumlu oldukları görülmüştür.

SONUÇ VE ÖNERİLER

Yapılan çalışmada limba odununun teğet ve radyal yönlerine bağlı olarak, ağaç malzemenin mekanik özelliklerinden bazıları olan; eğilme direnci, eğilmede elastikiyet modülü, dinamik eğilme direnci ve vida tutma kapasiteleri araştırılarak direnç değerleri tespit edilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre;

- Limba odunu sahip olduğu 0.56 g/cm³ yoğunluğu ile orta ağırlıktaki (0.50-0.69 g/cm³) ağaçlar sınıfına dâhil edilebilir.
- Limba odununun teğet ve radyal yüzeylerine dik yönde etkide bulunan kuvvete karşı deney numunesinde meydana gelen eğilme direnci ile eğilmede elastikiyet modülü değerlerinin birbirlerinden istatistiksel olarak anlamlı düzeyde farklı oldukları tespit edilmiştir. Böylece yıllık halkalara paralel (Radyal) yöndeki eğilme direnci ve eğilmede elastikiyet modülü, yıllık halkalara dik (Teğet) yöndeki eğilme direnci ve eğilmede elastikiyet modülü değerlerinden daha yüksek olduğu görülmüştür.
- Limba odununun teğet ve radyal yönlerine bağlı olarak dinamik eğilme dirençleri arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark tespit edilmemiştir. Ancak radyal yönde tespit edilen dinamik eğilme direncinin teğet yöndeki dinamik eğilme direncinden daha yüksek olduğu görülmüştür.
- Teğet yüzey ve radyal yüzeylerde tespit edilen vida tutma kapasiteleri; istatistiksel olarak anlamlı seviyede birbirlerinden farklı olmaz iken, radyal yüzeyde meydana gelen vida tutma kapasitesinin teğet yüzeye göre daha yüksek olduğu görülmüştür.

Elde edilen bulgulara göre limba odununun statik yüklere maruz kalınacak uygulamalarda kullanılması durumunda teğet ve radyal yüzeylerinin dikkate alınması gerektiği önerilmektedir. Böylece kullanılacak olan ürünün hizmet süresinin daha uzun olacağı söylenilebilir. Bununla birlikte limba odunu sahip olduğu estetik özelliklerinden dolayı

ağşap doğramalarda, mobilya imalatında, lamine ve ağşap parke imalatı ile minder ve mihrapların yapımında kullanılması önerilmektedir.

YAZAR KATKILARI

Musa KAYA: Verilerin analiz edilmesi ve yorumlanması, makalenin yazılması. **Ramazan BÜLBÜL:** Çalışma konusunun belirlenmesi, verilerin elde edilmesi, deney tasarımının yapılması.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmada bize sağladığı değerli ve yol gösterici bilgilerinden dolayı Sayın Doç. Dr. Vedat ÇAVUŞ'a sonsuz teşekkürlerimizi sunarız.

ÇIKAR ÇATIŞMASI BEYANI:

Makale yazarları; aralarında herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan ederler.

KAYNAKLAR

Altunok, M., Bülbül, R. & Güneş, M. (2023). Farklı Konseptte Sahip Isıl İşlem ve Klimatik Uygulamanın Yapısal Ağşabın Mekanik ve Fiziksel Performansına Etkilerinin Deneysel İncelenmesi. *Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology*, 11 (1), 263-272. <https://doi.org/10.29109/gujsc.1190933>

As, N., Koç, K. H., Doğu, A. D., Atik, C., Aksu, B., & Erdinler, E.S. (2001). Türkiye'de Yetişen Endüstriyel Öneme Sahip Ağaçların Anatomik, Fiziksel, Mekanik ve Kimyasal Özellikleri. *İstanbul Üniversitesi Orman Fakültesi Dergisi*. 51(1), 71-88. <https://dergipark.org.tr/en/pub/jffiu/issue/18789/198728/>

Bal, B. C., & Efe, F.T. (2016). Isıl işlemin kayın odununun şok direnci üzerine etkilerinin incelenmesi. I. Uluslararası Mühendislik Teknolojisi ve Uygulamalı Bilimler Konferansı (ICETAS 2016) (ss. 21-22).

Bozkurt, Y., & Erdin, N. (1995). Yoğunluk İle Mekanik Özellikler Arasındaki İlişkileri. *Journal of the Faculty of Forestry Istanbul University*, Seri A, 45(2), 10-31. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/jffiu/issue/18855/199059/Accessed> 25.09.2023.

Bozkurt, Y., & Erdin, N. (1990). Ticarete kullanılan ağaçlarda Önemli anatomik özellikler. *Journal of the Faculty of Forestry Istanbul University*, 40(2), 19-36. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/jffiu/issue/18729/197506/Accessed> 25.09.2023.

Bozkurt, Y., & Erdin, N. (1990). Ticarete kullanılan ağaçlarda fiziksel ve mekanik özellikler. *Journal of the Faculty of Forestry Istanbul University*, 40(1), 6-24. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/jffiu/issue/18791/198840/Accessed> 25.09.2023.

Bozkurt, Y. (1966). Ağaç Malzemenin Mekanik Özellikleri. *İstanbul Üniversitesi Orman Fakültesi Yayınları*, Seri B, 16(2), 41-60. <https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/175812/> Accessed 25.09.2023.

CIRAD, Tropix-African Wood. "Production and Processing of Tropical Wood" Research Unit Centre de cooperation internationale en recherche agronomique pour le développement, Forestry Department. <http://tropix.cirad.fr/africa/africa.html/> Accessed 05.09.2023.

Çavuş, V., Ersin, İ., & Bal, B. C. (2022). İhlamur (*Tilia tomentosa*) odununun bazı teknolojik özelliklerinin belirlenmesi. *Mobilya ve Ağşap Malzeme Araştırmaları Dergisi*, 5(2), 120-130. <https://doi.org/10.33725/mamad.1190347>

Çavuş, V. (2021). Kurtbağrı (*Ligustrum lucidum*) odununda bazı mekanik özelliklerinin araştırılması ve diğer bazı ağaç türleri ile karşılaştırılması. *Mobilya ve Ağşap Malzeme Araştırmaları Dergisi*, 4(1), 19-29. <https://doi.org/10.33725/mamad.927822>

Çelebi, G., & Kılıç, M., (2007). Nail And Screw Withdrawal Strength Of Laminated Veneer Lumber Made Up Hardwood And Softwood Layers, *Construction and Building Materials*, 21(4): 894-900. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.12.015>

Efe, F.T. (2020), Japon akçaağaç odununun bazı fiziksel ve mekanik özelliklerinin belirlenmesi üzerine bir çalışma, *Mobilya ve Ağşap Malzeme Araştırmaları Dergisi*, 3(2), 110-118, <https://doi.org/10.33725/mamad.837309>

Efe H., & Kasal, A. (2007). Çeşitli Masif ve Kompozit Ağaç Malzemelerin Bazı Fiziksel ve Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi. Gazi Üniversitesi, *Politeknik Dergisi*. Yayın No: 10 (3): 303-311 <https://dergipark.org.tr/en/pub/politeknik/issue/33026/367180/> Accessed 20.09.2023.

Göker, G., & As, N. (1990). Dallı Servi (*Cupressus sempervirens* var. *horizontalis* M.) Odununda Eğilmede Elastiklik Modülü. *Journal of the Faculty of Forestry Istanbul University*, 40(1), 27-39. <https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/176283/> Accessed 05.09.2023.

Göker, Y., & Kurtoğlu, A. (1987). Bazı Önemli Açık Renkli Afrika Ağaç Türleri. *İstanbul Üniversitesi Orman Fakültesi Yayınları*, 37(1), 1-20.

Kaya M. (2023). Farklı Katman Ve Malzemeler İle Üretilen Ahşap Esaslı Kompozitlerin Mekanik Ve Teknolojik Özellikleri. Doktora Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Ağaççışleri Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı, Ankara 246s.

Ozyhar, T. (2013). Moisture and Time Dependent Orthotropic Mechanical Characterization of Beech Wood, Ph. D Thesis, Technical University of Munich, Germany

Örs, Y., Özen, R., & Doğanay, S. (1998). Mobilya Üretiminde Kullanılan Ağaç Malzemenin Vida Tutma Dirençleri, *Türk Tarım Ve Ormanlık Dergisi*, (22), 29-34. <https://journals.tubitak.gov.tr/agriculture/vol22/iss1/5/> Accessed 17.09.2023.

Özkan, M. (2019). Yapraklı Ağaçlardan Üretilen Masif Panel Levhaların Bazı Teknolojik Özelliklerine Taslak Kesiş Yönünün Etkisi. Yüksek Lisans Tezi, Düzce Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Orman Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı, Düzce 96s.

Perçin, O., & Ayan, S. (2012). Isıl İşlem Uygulanmış Ağaç Malzemede Vida Çekme Direncinin Belirlenmesi. *İleri Teknoloji Bilimleri Dergisi*, 1(1), 57-68. <https://dergipark.org.tr/en/pub/duzceitbd/issue/4815/66432/> Accessed 20.09.2023.

Stabnikov, V.M., (1957). Puti Uviliczenia Sroka Sluschby Dreviesinyw Konstrukcjach, Leningrad.

Şirin G., & Aydemir, D. (2016). Sonlu Elemanlar Metodunun Ahşap Malzemelerde Kullanımına İlişkin Bir Araştırma. *Bartın Orman Fakültesi Dergisi*. Yayın No: 18 (2): 205-2012. <https://doi.org/10.24011/barofd.272971>

TS 2477, 1976. Odunun çarpmada eğilme dayanımının tayini. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

TS EN 13446, (2005). Ahşap Esaslı Levhalar - Bağlayıcıların Geri Çıkma Kapasitesinin Tayini, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.

TS ISO 13061 - 4, (2021). Odunun statik eğilmede elastiklik modülünün tayini, Türkiye Standartlar Enstitüsü (TSE), Ankara.

TS ISO 13061 - 3, (2021). Odunun statik eğilme dayanımının tayini, Türkiye Standartlar Enstitüsü (TSE), Ankara.

TS ISO 13061 - 10, (2021). Odunun çarpmada eğilme dayanımının tayini, Türkiye Standartlar Enstitüsü (TSE), Ankara.

Tsoumis, G.T., (1991). Science and technology of wood: Structure, Properties, utilisation. Van Nostrand Reinhold, New York.

Usta, İ. (2016). Ahşap: Mekanik Özellikler. *Yapı Dünyası*, Ocak/Şubat 2016 (238-239): 14-31.

Yılmaz, T. (2011). Sandalye Çerçevelerinin Sonlu Elemanlar Analizi. Yüksek Lisans Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Orman Endüstri Mühendisliği Anabilim Dalı, Isparta 86s.



Kahramanmaraş Sutcu Imam University Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 12.10.2023
Kabul Tarihi : 08.11.2023

Received Date : 12.10.2023
Accepted Date : 08.11.2023

MIXED MODE FRACTURE OF THE GEOPOLYMER COMPOSITES REINFORCED WITH RECYCLED STEEL FIBERS

ATIK ÇELİK LİFLERLE GÜÇLENDİRİLMİŞ GEOPOLİMER BETONLARDA KARIŞIK MOD KIRILMASI

Muhammed GÜMÜŞ^{1*} (ORCID: 0000-0002-7380-0098)

Hakan BAYRAK¹ (ORCID: 0000-0001-9441-2214)

¹ Kafkas Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Kars, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Muhammed GÜMÜŞ, muhammedgumus@kafkas.edu.tr

ABSTRACT

For the fiber-reinforced composites, strength-based criteria alone may fail to evaluate the bending response due to the long tail of the load-displacement curve. Hence, the fracture characterization of fibered composites has gained great attention worldwide. In this study, the mixed-mode fracture performance of the recycled steel fiber-reinforced geopolymer concrete was examined experimentally. The main test parameters were the amount of steel fibers (0 and 2% by mass) and the offset ratios of the edge notch ($\beta = 0, 0.2, \text{ and } 0.4$). Several notched prisms were produced and tested under a deformation-controlled three-point bending test. Deformation maps on the surface of the specimens were derived through the digital image correlation method. Experimental results were discussed concerning the first cracking load, ultimate load, critical crack mouth opening displacement, critical crack mouth sliding displacement, and fracture energy. Based on the experimental findings, it can be stated that the peak flexural loads were increased by 666%, 1327%, and 400%, respectively for the 0, 0.2, and 0.4 notch offset ratios due to the use of recycled steel fiber. The fracture energies of the plain specimens were proportional to the notch offset ratio, but they fluctuated for the fiber-reinforced specimens because of the uneven distribution of fibers.

Keywords: Fracture mechanics, recycled steel fiber, geopolymer, digital image correlation

ÖZET

Yük deplasman eğrisinin uzun kuyruk kısmından dolayı, çelik lifli kompozitlerin eğilme davranışının değerlendirilmesinde dayanım kriteri tek başına doğru bir değerlendirme için yeterli değildir. Bu nedenle, lifli kompozitlerin kırılma karakterleri dünya genelinde giderek önem kazanmaktadır. Mevcut çalışmada, atık çelik liflerle güçlendirilmiş geopolimer betonların Mod-II kırılma performansı deneysel olarak incelenmiştir. Çalışmadaki temel parametreler çelik lif miktarı (kütlece %0 ve %2) ve çentik öteleme oranlarıdır ($\beta = 0, 0.2 \text{ ve } 0.4$). Çok sayıda çentikli numuneler üretilmiş ve deformasyon kontrollü üç noktalı eğilme deneyi ile test edilmiştir. Eleman yüzeylerindeki deformasyon dağılımları dijital görüntü korelasyonu metodu ile hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar ilk çatlama yükü, maksimum yük, kritik çatlak ağzı açılma deplasmanı, kritik çatlak ağzı kayma deplasmanı ve kırılma enerjisi açısından irdelenmiştir. Elde edilen deneysel sonuçlardan, kullanılan çelik liften dolayı maksimum eğilme yükünün 0, 0.2, ve 0.4 çentik öteleme oranlarında sırasıyla 666%, 1327%, ve 400% arttığı görülmüştür. Lif içermeyen elemanların kırılma enerjisi çentik öteleme oranıyla doğrusal olarak değişmekteyken, çelik liflerin homojen olmayan dağılımından dolayı lifli elemanların kırılma enerjisinde dalgalanmalar görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Kırılma mekaniği, atık çelik lif, geopolimer, dijital görüntü korelasyonu

INTRODUCTION

The annual carbon dioxide emissions caused by the cement-related sectors worldwide were recorded as approximately 1.5 billion tons which corresponds to 6% of the total toxic gasses emissions (Amran et al., 2020). As an alternative to ordinary Portland cement-based concrete, geopolymers have been known as green concretes due to their cement-free mixture compositions. Their strength arises from the amorphous inorganic polymeric chains as a result of chemical reactions between the aluminosilicate precursors and the alkaline solutions. The by-product or waste materials such as slag, fly ash, metakaolin, silica fume, red mud, glass powder, and rice husk are the main sources of the aluminosilicate precursors (Almutairi et al., 2021). The hardened state of the geopolymers shows superior mechanical and durability properties compared to ordinary cement-based concrete (Ding et al., 2016). Unfortunately, due to the highly amorphous intrinsic structures, brittleness remains a matter for the geopolymer concretes. To overcome that issue, the fibers were dispersed into the mixtures in the fresh state. The pioneering study on the reinforcing of geopolymers was conducted by Davidovits (Davidovits, 1991). Since then, several types of fibers have been applied to improve the brittle characteristics of the geopolymer concretes (Laxmi & Patil, 2022; Ranjbar & Zhang, 2020). Among all the fibers, the most preferred type was the steel fibers with various geometric shapes (Rashad, 2020).

The contribution of the dispersed steel fibers to the crack bridging almost occurred at the post-peak region of the bending response. The main reason is that the fibers are activated following the initial formation of the cohesive crack. Hence, the stress-based criteria may alone lead to a misleading interpretation of the fracture evaluation of fiber-reinforced concrete (Shi et al., 2020). In literature, most of the ongoing research worldwide has been focused on the fracture behavior of industrial steel fiber-reinforced geopolymer composites. Aisheh et al. (Aisheh et al., 2022) reported that the steel fibers improve the fracture energy and stress intensity factor of ultra-high performance geopolymer composites. Zang et al. (Zhang et al., 2021) declared that the initial and the unstable fracture toughness of the plain geopolymer concrete is enhanced by 27.8% and 12.74-fold, respectively, thanks to steel fiber usage at 2.5 vol%. Implementing the work of fracture and the size effect method, Mousavinejad and Gashti (Mousavinejad & Gashti, 2021) revealed the correlation between steel fibers and the fracture characteristics of the heavyweight geopolymer concretes. Liu et al. (Liu et al., 2020) stated that although the increase in the steel fiber content up to 2 vol% significantly amends both fracture properties of the geopolymer concrete, further rise in the fiber content has a limited effect on the increment in the fracture energy. Gomes et al. (Gomes et al., 2020) pointed out the conversion from unstable to stable crack growth due to the utilization of steel fibers in geopolymer mixtures. They also specified the optimum fiber dosages of 0.5 vol% at which all the fracture parameters investigated reached the peak values. Similarly, the improvement in fracture characteristics is also stated in the experimental studies (Al-Rawi & Taysi, 2018; Ding & Bai, 2018). Briefly, as observed from the experimental findings given above, the industrial steel fibers positively affect the fracture parameters of the geopolymer concretes.

On the other hand, the philosophy of the invention of the geopolymer concretes seems to conflict with the use of industrial steel fibers. The global warming potential of industrial steel fibers is 1095.88 kgCO₂/ton which is even higher than that of the 903.23 kgCO₂/ton for ordinary Portland cement (Frazão et al., 2022). Compared to industrial steel fibers, the recycled steel fibers from the end-of-life tires have only 54.74 kgCO₂ per one-ton raw material production (Frazão et al., 2022), which means a 95% reduction in greenhouse gas emissions. Within this perspective, researchers aim to substitute industrial steel fiber with recycled one. The scope of the research attempts could be divided into three categories: (i) fresh (Celik & Ozkilic, 2023; Eskandarinia et al., 2022; Zhong et al., 2019), (ii) mechanical (Celikten, 2022; Mucsi et al., 2018; Yolcu et al., 2022) and (iii) durability and transport properties (Althoey et al., 2023) of the recycled steel fiber reinforced geopolymers. In some cases, recycled steel fibers were hybridized with industrial steel fibers (Alsaif & Albidah, 2022) or polyvinyl alcohol (Wang et al., 2020) to benefit from the synergetic effect of fibers. In most studies, the mechanical characteristics such as flexural and compressive strength as well as the fresh state features were well examined.

As observed from the literature review, the experimental research on the geopolymer concretes failed to address the fracture performance of the recycled steel fiber-reinforced composites. Thus, the aim of the present study was to shed new light on the effect of recycled steel fibers on the Mode-II fracture behavior of geopolymer composites. The main parameters of the study were the notch offset ratios ($\beta = 0, 0.2, \text{ and } 0.4$) and fiber content (0 and 2% by mass). By using the plain mixture and the companion recycled fiber-reinforced composite, a total of 6 prisms with a dimension of 100x100x400 mm were produced. All the specimens were tested under deformation-controlled quasi-static three-point bending loads. The formation and propagation of the cohesive crack were recorded through the two-dimensional

digital image correlation method. Test results were inspected in terms of (i) first cracking load, (ii) ultimate load, (iii) critical crack mouth opening, $CMOD_c$, (iv) critical crack mouth sliding displacement, $CMSD_c$, and (v) fracture energy. Despite the limited number of samples, we believe that the findings would be useful to extend the current knowledge about recycled fiber-reinforced geopolymers.

EXPERIMENTAL PROCEDURES

Raw Materials

As an aluminosilicate source material, ground granulated blast-furnace slag was utilized in the mixture. The specific gravity and the specific surface of the slag were reported by the manufacturer as 2.9 g/cm^3 and $5445 \text{ cm}^2/\text{g}$, respectively. Marble powder was intentionally chosen as a filler material due to environmental concerns. The particle size of the marble powder varied between 0-400 microns. Besides the marble powder, no additional coarse or fine aggregate was used in the mixture. To activate the aluminosilicate precursor, sodium silicate and sodium hydroxide solution were employed. The concentration ratios of the sodium silicate and sodium hydroxide solutions were 36% and 48%, respectively. The molarity of the sodium hydroxide was 12 M. The density of the sodium silicate and sodium hydroxide solutions was approximately 1.38 g/cm^3 . Aiming the environmental benefits, recycled steel fibers were incorporated into the concrete mixtures. Peak frequency of about 10% in fiber length corresponded to the range of 24-28 mm. Figure 1 shows a physical representation of the ingredients used to produce geopolymer composites.



Figure 1. Raw Materials Used for Manufacturing Geopolymer Composites

Manufacturing Test Specimen

Table 1 presents the ingredients used for the geopolymer composites. As given in the table, the precursor to the activator (sum of sodium silicate and sodium hydroxide) ratio was equal to 2. The sodium silicate to the sodium hydroxide ratio was 2.5. Those ratios were set as constant for each mixture. However, for the volume stability of the mixture, the amount of the marble powder was changed between 311 and 327 kg/m^3 . As for the fiber-reinforced composites, 46 kg of recycled steel fiber was included in the fresh mixture, which corresponded to about 2% by mass. The concrete mixtures were entitled according to their fiber content. "P" and "F" in Table 1 stand for the plain and the fiber-reinforced geopolymer composites.

Table 1. The Mixture Compositions for the Geopolymer Concretes (kg/m^3)

Mix ID	Slag	Marble powder	Sodium silicate	Sodium hydroxide	Steel fiber	Total mass (kg)
P	1260	327	450	180	0	2217
F	1260	311	450	180	46	2247

To increase the homogeneity of the mixture, slag, and the marble powder were first blended in a dry condition for one minute. Then, the liquid solution comprising sodium silicate and sodium hydroxide was added to the dry mixture and continued to blend for another four minutes. In the case of steel-fibered concretes the recycled steel fibers were incorporated into the fresh mixture. While adding steel fibers, particular attention was paid to preventing the fiber balling. Fibers were dispersed into the mixture slowly during the mixing for the next one minute. Fresh mixtures were cast into the wooden molds with a clear dimension of $100 \times 100 \times 400 \text{ mm}^3$. The open surface of the molds was covered with a thin plastic sheet to prevent evaporation. Approximately 24 hours following the casting, specimens were demolded and submerged into the water tank to apply a water cure during the testing day.

Before the experiments, the specimens were cut through the circular concrete saw to open an edge notch perpendicular to the longitudinal axis of the specimens. Notch depth was constant for each specimen and equal to 30 mm. However, the notch offset ratios, which were defined as the offset distance from the center to the half of the distance between supports, were 0, 0.2, and 0.4. Accordingly, the notch distances were 0, 30, and 60 mm, respectively from the specimen center. Figure 2.a. illustrates the distribution of the notch locations on the specimen surfaces. In this work, the deformation levels on the specimen surface were obtained by using the two-dimensional digital image correlation method. To this end, the surface of the specimens was first painted white and then the speckle patterns were created on the white background. The notched prisms were named according to their concrete and the offset ratio. For instance, the specimen designated by "P-0.2" has a plain geopolymer concrete and a notch offset ratio of 0.2, respectively.

Installing Test Set up

Figure 2.b demonstrates a representative view of the experimental arrangement used in the present work. As observed from the figure, the specimen's clear span length was adjusted to 300 mm, which yielded a span-to-depth ratio of 3. Notched beams were exposed to a deformation-controlled bending load. For the plain specimens, the loading rate was 0.2 mm/minute and constant during the experiment. In the case of fiber-reinforced specimens, loading rates were increased step by step up to the complete failure of the specimen. 0.2 mm/minute loading rate was applied between the stroke length of 0-0.6 mm. It suddenly increased to 1.0 mm/minute and 2.0 mm/minute when the stroke length of the testing machine exceeded 0.6 mm and 4.5 mm deflection, respectively. Data for the load exposed were determined by the load cell mounted on the loading machine and were recorded by using computer software. The vertical and the horizontal deformation maps on the specimen surface were calculated from the sequentially deformed images. To this end, the distorted shapes of the specimen, which are not possible to detect by the naked eye, were captured during the experiment at a time interval of 3 seconds. A Canon 6D Mark II digital camera and a Canon 50 mm f/1.4 USM lens were used for the image recording. To increase the contrast between the white background and the dots on it, LED light sources were operated. Those assemblies are also given in Figure 2. b. In this study, the image resolution was approximately equal to 14 pixels/mm. Images were analyzed by using an open-source algorithm developed by (Blaber et al., 2015). The analysis parameters such as subset size, subset spacing, and the strain radius were adjusted to 35, 15, and 5 pixels, respectively.

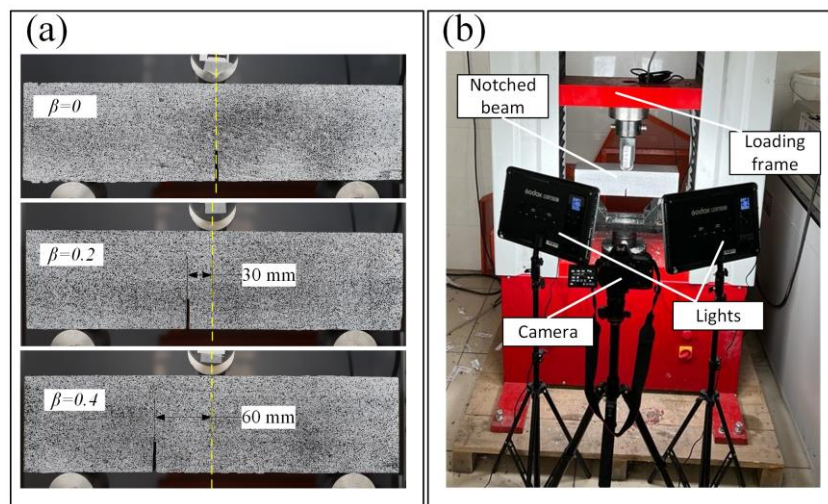


Figure 2. a. Notch Offset Distance b. Test Setup and Measurement Devices

RESULTS and DISCUSSIONS

Initial Cracking Load

Initial cracking loads were of significance to separate the complete elastic and elastic-plastic behavior of a material exposed to external loading. However, the determination of the first cracking point from the load versus deflection curves was a matter requiring a qualified perspective. Hence, strain gauges fixed on the notched tip were frequently employed for defining that bifurcation point. In this work, on the other hand, CMODs-Times graphs as in Figure 3 were handled to specify that transition point. From the figure, the first lateral region of the curves corresponded to the elastic behavior and thereby the end point of that plateau represented the cracking point of the specimen. Although the loading rates of the plain specimens were the same as those of the fiber-reinforced specimens, the fracture

initiation in the plain specimens was formed before the fiber-reinforced specimens. Initial cracking time is 114, 138, 150, 198, 183, and 177 s, respectively for the P-0, P-0.2, P-0.4, F-0, F-0.2, and F-0.4 specimens.

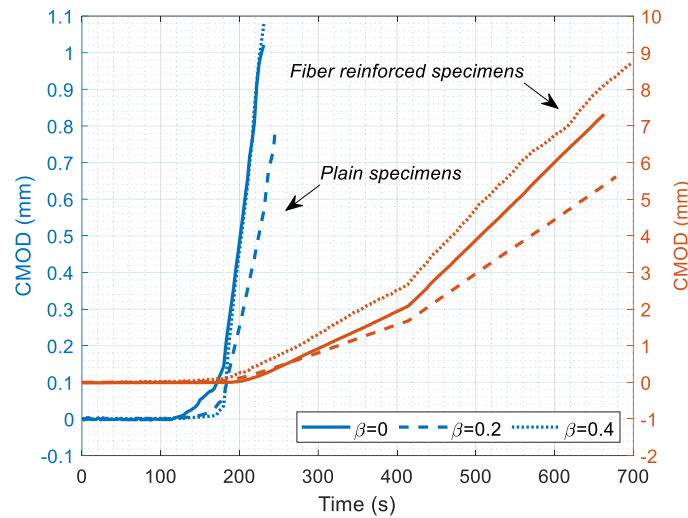


Figure 3. Comparison Between CMOD-time Curves of Plain and Fibered Geopolymers

A similar conclusion was also achieved in terms of the cracking loads. As seen in Table 2, compared to the fiber-reinforced specimens, plain specimens had lower cracking load capacities for each case of the notch offset ratios. The increment in the cracking load capacity due to recycled fiber usage was approximately 636.6%, 1251.1%, and 290.7% respectively for the offset ratio of 0, 0.2, and 0.4. Such an experimental finding conforms to the literature (Ahmad et al., 2021) in which the initial cracking load of ordinary concrete increased with the increasing steel fiber content. Accordingly, such an improvement may be referred to as the bridging mechanism of the steel fibers dispersed throughout the cohesive zone of the concrete. The other significant outcome from the experiments could be attained by examining the offset ratios. In the case of plain specimens, when it ascended from 0 to 0.2 and 0.4, the initial cracking loads first slightly changed and then significantly raised by about 148.2%. For the fiber-reinforced specimens, the improvement in the cracking load capacity was by about 51.4% and 31.1% due to the offset ratio of 0.2 and 0.4, respectively. Accordingly, it can be inferred that each test parameter influenced the initial cracking load though, the recycled fiber effect on the cracking load was much more dominant than that of the notch offset ratio.

Table 2. Some Mechanical and Fracture Quantities Measured

Specimen	Cracking load (N)	Ultimate load (N)	CMOD _c (mm)	CMSD _c * (mm)	G _F (N/mm)
P-0	338.0	461.7	0.002	0.0016	0.011
P-0.2	280.1	393.7	0.022	0.0100	0.027
P-0.4	838.9	1017.8	0.009	0.0003	0.034
F-0	2499.9	3536.4	0.201	0.0628	1.639
F-0.2	3784.5	5618.1	0.286	0.0312	4.097
F-0.4	3277.2	5088.8	0.259	0.0909	2.763

* Absolute magnitude

Ultimate Load

The load-bearing capacity may be referred to as the resisting capacity of a specimen against the load excited and is of significance for the designer. The recorded load-bearing capacities of the notched beams tested are given in Table 2 as well as Figure 4. Accordingly, it can be clearly seen that the recycled steel fibers enhanced the load-bearing capacity of the notched beams irrespective of the offset ratio. Due to the fiber additive at a 2% by mass, bearing capacity was increased by 666%, 1327%, and 400% for the notch offset ratio of 0, 0.2, and 0.4, respectively. This increment in the load-bearing capacity of geopolymer concretes resulting from the fiber additive is in good agreement with the findings in the literature (Celikten, 2022). The fiber bridging in the cohesive zone located in front of the initial notch is the main source of those increments in the load-bearing capacities of the fiber-reinforced specimens. Regarding the test parameters of the offset ratio, bearing capacity variation fluctuated as the offset ratio ascended. For the plain specimens, the peak load was decreased by 14.7% at the 0.2 offset ratio, then increased by 120.4% at the 0.4 offset ratio compared to the zero offset. When the fibered specimens were considered, the peak loads were

improved by 58.9% and 43.9% respectively for the offset ratio of 0.2 and 0.4 compared to the zero offset. Best fit functions for plain and fiber-reinforced specimens were also drawn in Figure 4. The functions indicate the clear increasing trend between the ultimate loads and the offset ratios. In the present work, due to some laboratory limitations, the number of specimens may be insufficient to represent the average value of the test results. Hence, to obtain more accurate results, more specific experimental attempts with a large number of identical specimens are needed in future works.

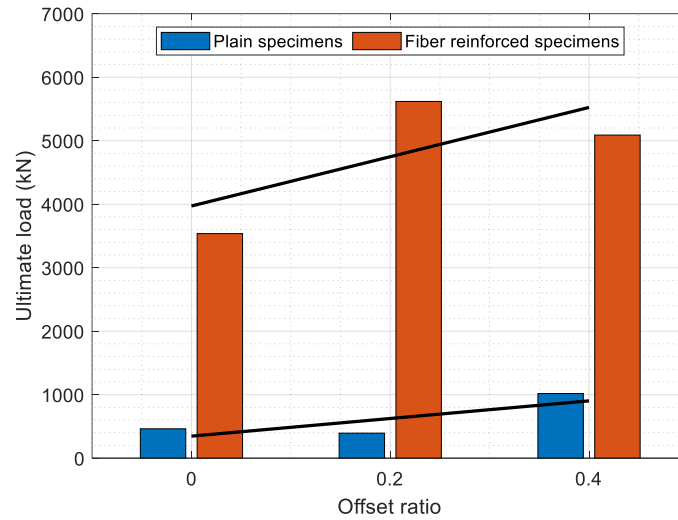


Figure 4. Variation of the Ultimate Load with the Increasing Offset Ratios

Crack Mouth Opening Displacement

For quasi-brittle materials like concretes, the smeared crack approach may result in a misleading evaluation when the cracks were formed. Hence, the crack mouth opening displacement (CMOD) was required to define the stress decay under increasing deflection loading. Figure 5 comparatively displays the load versus CMOD diagrams of the notched beams. From the comparison between Figure 5.a and b, it could be said that fiber addition decelerated the crack growth at the post-peak region, which yielded considerable residual strength levels. It is also significant to declare that the increasing offset ratio provided the notched beams an additional residual strength to some extent. In Figure 5.a, a limited improvement in the residual strength magnitudes could be seen for the plain specimens. However, as in Figure 5.b, the increment in the residual strength in fiber-reinforced geopolymers due to the notch offset ratio was remarkable. These observations were in line with the findings in the literature (Zhong et al., 2019). They pointed out that the increase in the recycled steel fiber content leads to an amendment in the post-peak residual strength levels of geopolymer concretes.

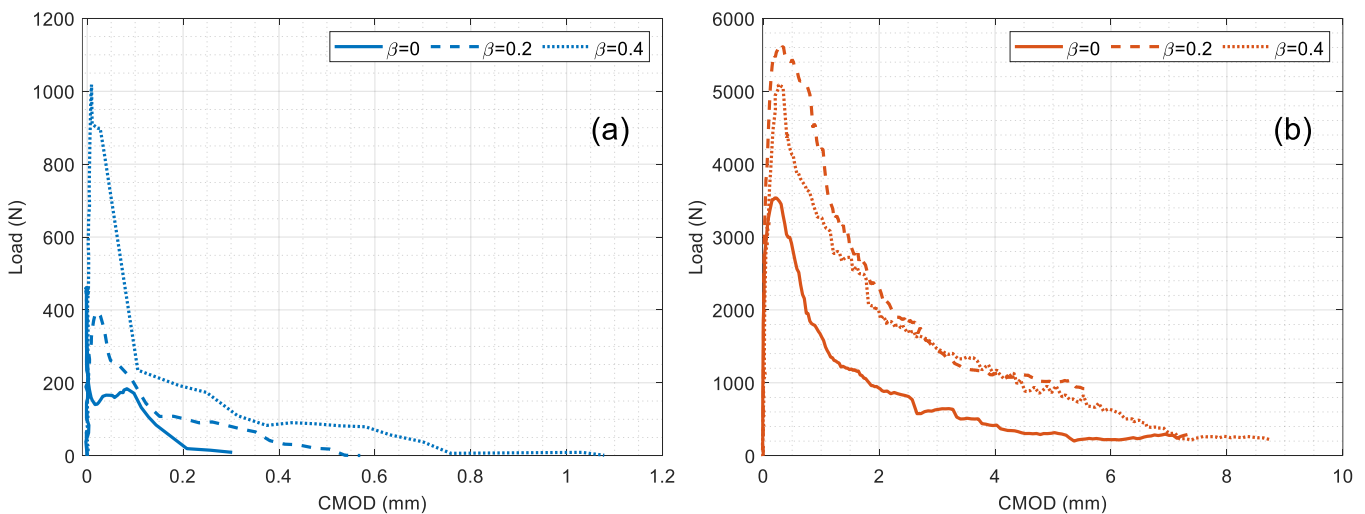


Figure 5. Load Versus CMOD Curves: **a.** Plain and **b.** Fiber Reinforced Specimens

CMODs at the time of peak load is reached are given in Table 2 and also plotted in Figure 6. As is seen from the figure, the offset ratio of 0.2 produced the highest critical CMOD ($CMOD_c$) for both plain and fiber-reinforced

geopolymers. Such a result is also predictable. As the notch offset moves to the support, the specimen's response converts from opening mode (mode-I) to the shear mode (mode-II). At a specific region in the shear span, CMOD is expected to reach its highest magnitudes and then is gradually substituted by CMSD as the notch further moves toward the supports. By comparing the $CMOD_c$ from the fibered and plain specimens, it is obtained that the fiber usage prolonged the critical CMOD at each offset ratio. Besides, the fiber usage also decreased the deviations in the set of $CMOD_c$ values. Differences between the maximum and minimum $CMOD_c$ in plain and fiber-reinforced specimens were 1000% and 42.3%, respectively.

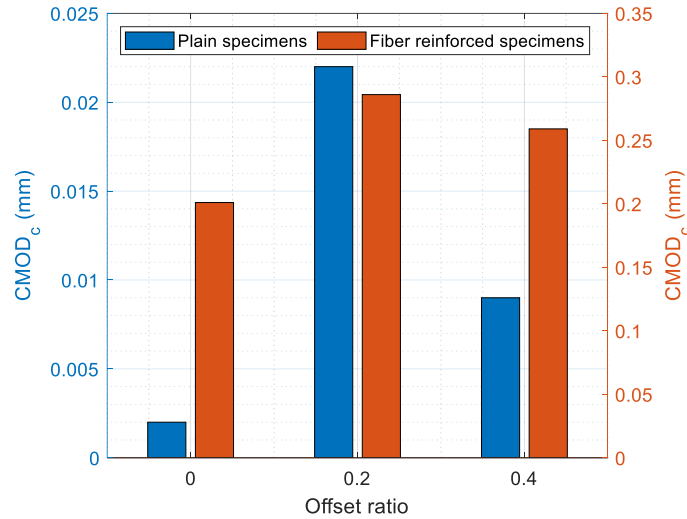


Figure 6. Dependence of the $CMOD_c$ at the Peak Loads on the Offset Ratios

Crack Mouth Sliding Displacement

In many cases, a structural member is subjected to a combined shear and tension stress state. For that reason, the cracking response including sliding and opening may be needed to fairly identify the characteristics of the material investigated. Load versus crack mouth sliding displacements (CMSD) were depicted in Figure 7. It is worth noting that the shear cracking in mixed mode was dominated not only by fiber bridging but also by friction between the crack faces. Hence, the overall shape of the Load-CMSD in Figure 7 could be varied from that of Load versus CMOD in Figure 5. This is because the sliding response in mode-II fracture may not be similar to the Load-CMOD, but it may be noticed by Load-crack tip opening displacement (Nunes & Reis, 2014). In Figure 7.a, strength decay at the post-peak regions seems to be not affected by the notch offset ratio, whereas, for the fiber-reinforced geopolymers in Figure 7.b, the rate of the strength decrements at the same region was depended on the offset ratio. Such a difference could be attributed to the brittleness of the plain specimens. When the first crack was formed at the plain specimens, the main crack sharply developed and did not allow the relative sliding between the crack faces. On the other hand, the recycled steel fibers bridged the crack and caused a slower crack development rate as well as the different sliding options in comparison with the plain specimens.

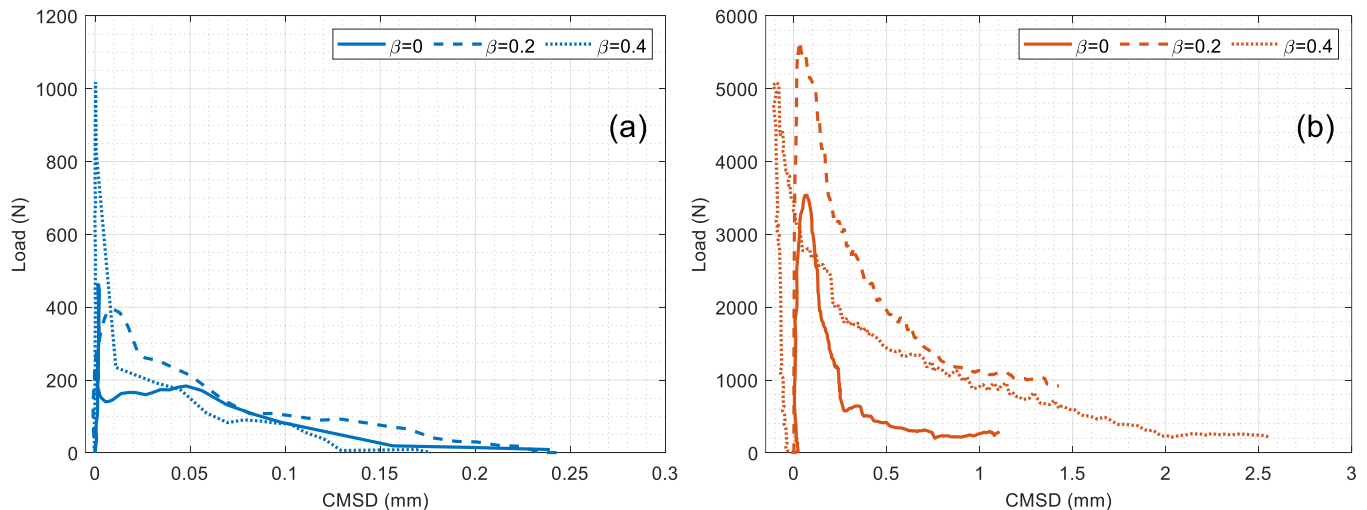


Figure 7. Load Versus CMSD Curves: a. Plain and b. Fiber Reinforced Specimens

The critical magnitude of the CMSD ($CMSD_c$) was obtained for the apex in the load-CMSD curves and given in Table 2 and Figure 8. It is evident from the figure that the fiber inclusion improved the sliding displacement magnitudes of the geopolymers compared to plain specimens. This result was also expected due to the bridging effect of the fibers. Because the fiber addition changes the brittle characteristic of the materials to the ductile one. As a result of such a bridging phenomenon, deviations in $CMSD_c$ of the steel fiber-reinforced geopolymers were much more stable than those of the plain geopolymers. The difference between the highest and lowest values of $CMSD_c$ was by about 3233.3% and 191.3% for the plain and the fiber-reinforced geopolymer specimens.

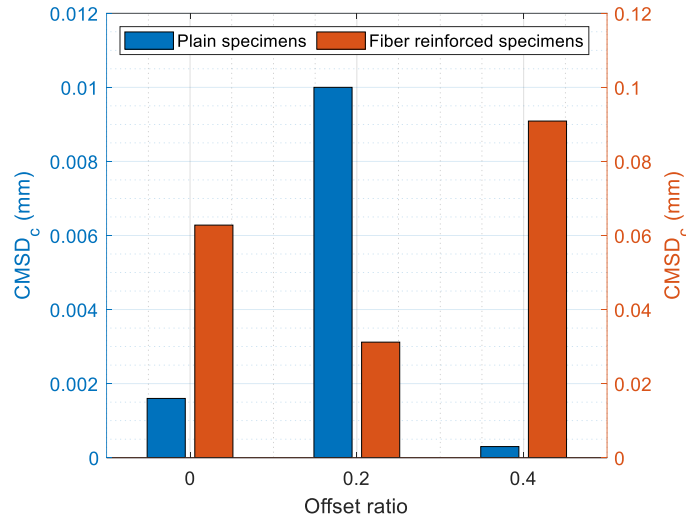


Figure 8. Dependence of the $CMSD_c$ at the Peak Loads on the Offset Ratios

Fracture Energy

Engineering structures have been designed based on the strength criteria of the materials used. However, the fiber-reinforced construction materials were referred to as highly ductile materials due to fiber bridging on the cohesive cracks. Accordingly, the energy-based criteria seem like it might be a more convenient approach in the design of the structures constructed of fiber-reinforced concrete. Figure 9 shows the bending loads applied versus corresponding mid-point deflections. It should be noted here that the net deflections were derived by subtracting the support deflections in this work. Due to the prolonged tail of the fiber-reinforced specimens, their experiments were terminated at about 13 mm deflection value. From the comparison of Figure 9.a and b, it is seen that the residual strength decay was slower in the fiber-reinforced geopolymers, which resulted in a higher fracture energy than the plain specimens.

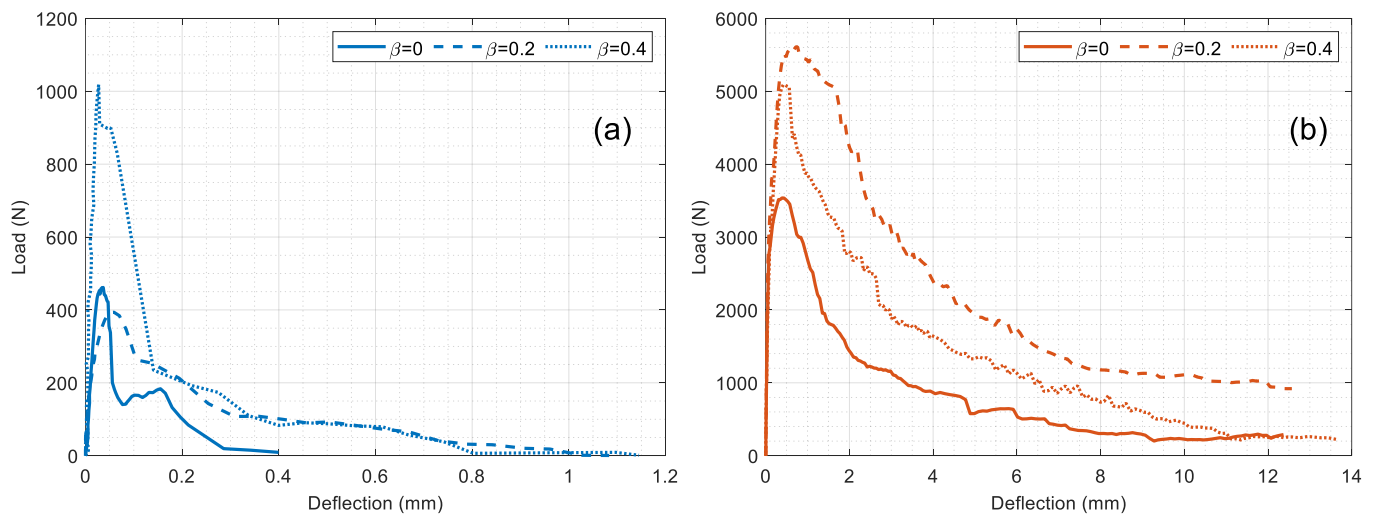


Figure 9. Load Versus Deflection Curves: a. Plain and b. Fiber Reinforced Specimens

The fracture energies were computed by using the following equation (RILEM-Draft-Recommendation, 1985) and then presented in Table 2 and Figure 10.

$$G_F = \frac{W_0 + mg\delta_0}{b(h-a_0)} \quad (1)$$

Where W_0 is the area under the load-deflection curve. m , g , and δ_0 represent the mass of the specimen between the supports, acceleration of gravity, and the ultimate deflection recorded, respectively. b , h , and a_0 stand for the specimen's width and depth, and the initial notch length.

As observed from Figure 10, fracture energies of the plain specimens proportionally increased with the increasing notch offset ratio. This finding conforms to the experimental results in the literature (Nunes & Reis, 2014). They highlighted that the energy release rate (i.e., defined here as the fracture energy) increases as the notch moves the specimen's support point. Comparing Figure 4 and Figure 10, it can be stated that the fluctuation in fracture energy was similar to the fluctuation in the load capacity of fiber-reinforced specimens. Such a result was not surprising because the fracture energy somewhat depended on the both load and the area under the load-deflection curve. In the case of fiber-reinforced geopolymers, the fracture energy initially raised by about 1.5-fold as the offset ratio increased from 0 to 0.2, but then declined to 0.7-fold at the offset ratio of 0.4. Such an unexpected decrement in the fracture energy could be attributed to the heterogeneous distribution of the steel fibers. Eskandarinia et al. (Eskandarinia et al., 2022) stated that the recycled steel fiber at high dosages (i.e., $V_f > 0.6$ vol%) may cause a balling effect due to its irregular shape. Despite the slight decrement in the fracture energy due to the uneven distribution of the fibers, recycled steel fibers significantly amended the fracture energy capacities of the plain geopolymers. When the recycled steel fibers were used, the fracture energies of the plain geopolymers reached 148-fold, 150.7-fold, and 80.3-fold respectively for the 0, 0.2, and 0.4 offset ratios. Therefore, it can be concluded that the recycled steel fiber additive is an effective way to improve the fracture performance of the geopolymer concrete especially for the low fiber dosages (i.e., $V_f < 0.6$ vol%) due to the fiber balling effect.

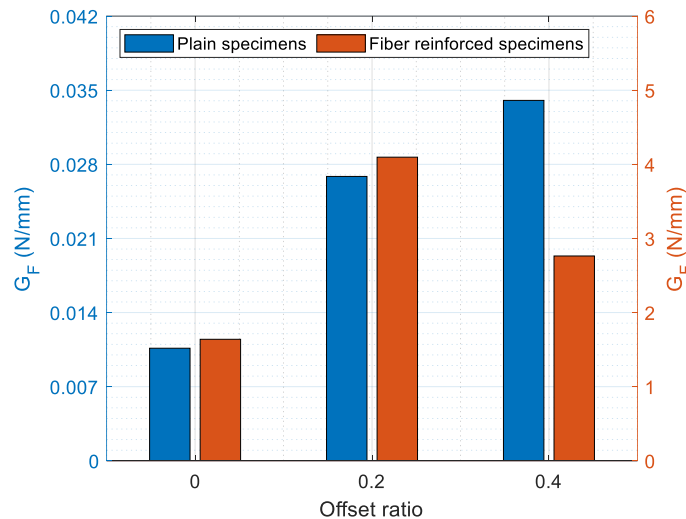


Figure 10. Fracture Energy Variations with the Offset Ratios

CONCLUSIONS

In this work, the effect of recycled steel fibers on the mixed-mode fracture of geopolymer concretes was investigated experimentally. The main test parameters were the recycled steel fiber ratio (0 and 2% by mass) and the notch offset ratio from the center of the specimen (0, 0.2, and 0.4). Notched specimens were subjected to the three-point bending test with a deformation-controlled monotonic loading sequence. The experimental data were recorded by both the software of the testing machine and the images taken by the remote digital camera. Following the experiments, images were analyzed and the surface displacement maps were derived. The main conclusion from the experimental attempt could be summarized as follows:

- The initial cracking load was clearly visible at the CMOD-Time curves. Both the notch offset ratio and fiber content affected the initial cracking load positively. It was also found that the fiber content was much more efficient on the cracking load capacity rather than the notched offset ratio.
- Thanks to the fiber usage at 2% by mass, the peak flexural loads ascended by 666%, 1327%, and 400%, respectively for the 0, 0.2, and 0.4 notch offset ratios.

- Using recycled steel fibers led to an increase in the $CMOD_c$ of notched beams independently of the notched offset ratio. Moreover, randomly disturbed steel fibers helped to decrease the deviations in the $CMOD_c$ values measured such that the variations in $CMOD_c$ of plain specimens were 1000% but only 42.3% for fiber-reinforced specimens.
- Due to the bridging mechanism of the steel fibers, deviations in $CMOD_c$ of the fiber-reinforced specimens were obtained as 191.3%, while it was as high as 3233.3% for the plain specimens.
- In the case of the unreinforced plain specimens, the fracture energies tended to raise proportionally with the notch offset ratio. For the fiber-reinforced specimens, however, the fracture energy increased 1.5-fold for the 0.2 offset ratio, but 0.7-fold for the 0.4 offset ratio compared to the specimens with zero offset.

REFERENCES

- Ahmad, I., Qing, L., Khan, S., Cao, G., Ijaz, N., & Mu, R. (2021). Experimental investigations on fracture parameters of random and aligned steel fiber reinforced cementitious composites. *Construction and Building Materials*, 284, 122680. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122680>
- Aisheh, Y. I. A., Atrushi, D. S., Akeed, M. H., Qaidi, S., & Tayeh, B. A. (2022). Influence of steel fibers and microsilica on the mechanical properties of ultra-high-performance geopolymer concrete (UHP-GPC). *Case Studies in Construction Materials*, 17, e01245. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01245>
- Al-Rawi, S., & Taysi, N. (2018). Performance of self-compacting geopolymer concrete with and without GGBFS and steel fiber. *Advances in Concrete Construction*, 6(4), 323-344. <https://doi.org/10.12989/acc.2018.6.4.323>
- Almutairi, A. L., Tayeh, B. A., Adesina, A., Isleem, H. F., & Zeyad, A. M. (2021). Potential applications of geopolymer concrete in construction: A review. *Case Studies in Construction Materials*, 15, e00733. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00733>
- Alsaif, A. S., & Albidah, A. S. (2022). Compressive and flexural characteristics of geopolymer rubberized concrete reinforced with recycled tires steel fibers. *Materials Today: Proceedings*, 65(2), 1230-1236. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.04.182>
- Althoey, F., Zaid, O., Alsharari, F., Yosri, A. M., & Isleem, H. F. (2023). Evaluating the impact of nano-silica on characteristics of self-compacting geopolymer concrete with waste tire steel fiber. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 23, 48. <https://doi.org/10.1007/s43452-022-00587-2>
- Amran, Y. H. M., Alyousef, R., Alabduljabbar, H., & El-Zeadani, M. (2020). Clean production and properties of geopolymer concrete; A review. *Journal of Cleaner Production*, 251, 119679. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119679>
- Blaber, J., Adair, B., & Antoniou, A. (2015). Ncorr: Open-Source 2D Digital Image Correlation Matlab Software. *Experimental Mechanics*, 55(6), 1105-1122. <https://doi.org/10.1007/s11340-015-0009-1>
- Celik, A. I., & Ozkilib, Y. O. (2023). Geopolymer concrete with high strength, workability and setting time using recycled steel wires and basalt powder. *Steel and Composite Structures*, 46(5), 689-707. <https://doi.org/10.12989/scs.2023.46.5.689>
- Celikten, S. (2022). Properties of recycled steel fibre reinforced expanded perlite based geopolymer mortars. *Advances in Concrete Construction*, 13(1), 25-34. <https://doi.org/10.12989/acc.2022.13.1.025>
- Davidovits, J. (1991). Geopolymers: Inorganic polymeric new materials. *Journal of thermal analysis*, 37(8), 1633-1656. <https://doi.org/10.1007/BF01912193>
- Ding, Y., & Bai, Y. L. (2018). Fracture Properties and Softening Curves of Steel Fiber-Reinforced Slag-Based Geopolymer Mortar and Concrete. *Materials*, 11(8), 1445. <https://doi.org/10.3390/ma11081445>
- Ding, Y., Dai, J.-G., & Shi, C.-J. (2016). Mechanical properties of alkali-activated concrete: A state-of-the-art review. *Construction and Building Materials*, 127, 68-79. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.09.121>
- Eskandarinia, M., Esmailzade, M., Hojatkashani, A., Rahmani, A., & Jahandari, S. (2022). Optimized Alkali-Activated Slag-Based Concrete Reinforced with Recycled Tire Steel Fiber. *Materials*, 15(19), 6623. <https://doi.org/10.3390/ma15196623>

- Frazão, C., Barros, J., Bogas, J. A., García-Cortés, V., & Valente, T. (2022). Technical and environmental potentialities of recycled steel fiber reinforced concrete for structural applications. *Journal of Building Engineering*, 45, 103579. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103579>
- Gomes, R. F., Dias, D. P., & Silva, F. D. (2020). Determination of the fracture parameters of steel fiber-reinforced geopolymer concrete. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 107, 102568. doi:10.1016/j.tafmec.2020.102568
- Laxmi, G., & Patil, S. G. (2022). Effect of fiber types, shape, aspect ratio and volume fraction on properties of geopolymer concrete - A review. *Materials Today: Proceedings*, 65(2), 1086-1094. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.04.157>
- Liu, Y. W., Shi, C. J., Zhang, Z. H., Li, N., & Shi, D. (2020). Mechanical and fracture properties of ultra-high performance geopolymer concrete: Effects of steel fiber and silica fume. *Cement & Concrete Composites*, 112, 103665. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103665>
- Mousavinejad, S. H. G., & Gashti, M. F. (2021). Effects of alkaline solution to binder ratio on fracture parameters of steel fiber reinforced heavyweight geopolymer concrete. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 113, 102967. <https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2021.102967>
- Mucsi, G., Szenczi, A., & Nagy, S. (2018). Fiber reinforced geopolymer from synergetic utilization of fly ash and waste tire. *Journal of Cleaner Production*, 178, 429-440. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.01.018>
- Nunes, L. C. S., & Reis J. M. L. (2014). Experimental investigation of mixed-mode-I/II fracture in polymer mortars using digital image correlation method. *Latin American Journal of Solids and Structures*, 11(2), 330-343. <https://doi.org/10.1590/s1679-78252014000200011>
- Ranjbar, N., & Zhang, M. Z. (2020). Fiber-reinforced geopolymer composites: A review. *Cement & Concrete Composites*, 107, 103498. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2019.103498>
- Rashad, A. M. (2020). Effect of steel fibers on geopolymer properties - The best synopsis for civil engineer. *Construction and Building Materials*, 246, 118534. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118534>
- RILEM-Draft-Recommendation. (1985). Determination of the fracture energy of mortar and concrete by means of three-point bend tests on notched beams. *Materials and Structures*, 18(106), 285-290. <https://doi.org/10.1007/BF02472918>
- Shi, X., Brescia-Norambuena, L., Tavares, C., & Grasley, Z. (2020). Semicircular bending fracture test to evaluate fracture properties and ductility of cement mortar reinforced by scrap tire recycled steel fiber. *Engineering Fracture Mechanics*, 236, 107228. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2020.107228>
- Wang, Y., Chan, C. L., Leong, S. H., & Zhang, M. Z. (2020). Engineering properties of strain hardening geopolymer composites with hybrid polyvinyl alcohol and recycled steel fibres. *Construction and Building Materials*, 261, 120585. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120585>
- Yolcu, A., Karakoc, M. B., Ekinci, E., Ozcan, A., & Sagir, M. A. (2022). Effect of binder dosage and the use of waste rubber fiber on the mechanical and durability performance of geopolymer concrete. *Journal of Building Engineering*, 61, 105162. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.105162>
- Zhang, P., Wang, J., Li, Q. F., Wan, J. Y., & Ling, Y. F. (2021). Mechanical and fracture properties of steel fiber-reinforced geopolymer concrete. *Science and Engineering of Composite Materials*, 28(1), 299-313. <https://doi.org/10.1515/secm-2021-0030>
- Zhong, H., Poon, E. W., Chen, K., & Zhang, M. Z. (2019). Engineering properties of crumb rubber alkali-activated mortar reinforced with recycled steel fibres. *Journal of Cleaner Production*, 238, 117950. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.117950>



Kahramanmaraş Sütçü İmam University

Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 16.10.2023
Kabul Tarihi : 07.11.2023

Received Date : 16.10.2023
Accepted Date : 07.11.2023

PHOTOPLETHYSMOGRAPHY BASED BLOOD PRESSURE ESTIMATION USING SYNCHROSQUEEZING TRANSFORM AND DEEP LEARNING

SENKRON SIKIŞTIRMA DÖNÜŞÜMÜ VE DERİN ÖĞRENME KULLANILARAK FOTOPLETİSMOGRAFİ TABANLI KAN BASINCI KESTİRİMİ

Yeşim HEKİM TANÇ¹ (ORCID: 0000-0001-8029-4253)
Mahmut ÖZTÜRK^{1*} (ORCID: 0000-0003-2600-7051)

¹ Istanbul University - Cerrahpaşa, Department of Electrical and Electronics Engineering, Istanbul, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Mahmut ÖZTÜRK, mahmutoz@iuc.edu.tr

ABSTRACT

Cardiovascular diseases are one of the deadliest health problems. Hypertension is the most common reason for cardiovascular diseases. Keeping the blood pressure (BP) level under control is the only way to protect against the deadly results of hypertension. Therefore, monitoring BP regularly makes it possible to detect dangerous conditions in patients with hypertension. With the rapid developments in computers and sensor technologies, it is becoming possible to monitor BP levels continuously by using photoplethysmogram (PPG) signals. This work presents a non-invasive BP prediction method using one channel PPG signal. We employed the Synchrosqueezing Transform to obtain Time-Frequency (TF) images of the PPG signals. The TF images were used to feed a pre-trained deep neural network. We estimated the BP levels inside the 5-second intervals. Our method estimates BP levels with a mean error (ME) of 0.2148 mmHg and -0.0370 mmHg in the systolic and diastolic blood pressure (SBP and DBP) respectively. The ME values of our method are in the applicable levels. The standard deviation (SD) of our method is 5.0642 mmHg for DBP and 10.9904 mmHg for SBP. The upper limit specified by the AAMI is 8 mmHg. Also, our method is coherent with grades A and B according to the BHS standard.

Keywords: Photoplethysmography, arterial blood pressure, convolutional neural network, time-frequency analysis, synchrosqueezing transform.

ÖZET

Kalp ve damar hastalıkları en ölümcül sağlık sorunlarından biridir. Hipertansiyon, kardiyovasküler hastalıkların en yaygın nedenidir. Tansiyon düzeyini kontrol altında tutmak, hipertansiyonun ölümcül sonuçlarından kurtulmanın tek yoludur. Bu nedenle, hipertansiyonu olan hastalar için kan basıncının (KB) düzenli olarak izlenmesi, tehlikeli durumların tespitini mümkün kılar. Bilgisayar ve sensör teknolojilerindeki hızlı gelişmeler ile fotopletismogram (PPG) sinyalleri kullanılarak kan basıncının sürekli olarak izlenmesi mümkün hale gelmektedir. Bu çalışmada, tek kanallı PPG sinyali kullanan invazif olmayan bir KB tahmin yöntemi sunuyoruz. PPG sinyallerinin Zaman-Frekans (ZF) görüntülerini elde etmek için Eş Zamanlı Sıkıştırma Dönüşümünü kullandık. ZF görüntüleri, önceden eğitilmiş bir derin sinir ağını beslemek için kullanıldı. KB seviyelerini 5 saniyelik aralıklarla tahmin ettik. Yöntemimiz, sistolik ve diyastolik kan basıncı (SKB ve DKB) seviyelerini sırasıyla 0,2148 mmHg ve -0,0370 mmHg ortalama hata (ME) ile tahmin eder. Yöntemimizin ME değerleri uygulanabilir seviyelerdedir. Yöntemimizin standart sapması (SS) DKB için 5.0642 mmHg, SKB için 10.9904 mmHg değerindedir. AAMI tarafından belirlenmiş olan üst limit 8 mmHg değerindedir. Ayrıca yöntemimiz BHS standardına göre A ve B sınıfları ile uyumludur.

Anahtar Kelimeler: Fotopletismografi, arteriyel kan basıncı, konvolüsyonel sinir ağı, zaman-frekans analizi, senkron sıkıştırma dönüşümü.

ToCite: HEKİM TANÇ, Y. & ÖZTÜRK, M., (2024). PHOTOPLETHYSMOGRAPHY BASED BLOOD PRESSURE ESTIMATION USING SYNCHROSQUEEZING TRANSFORM AND DEEP LEARNING. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 27(1), 243-255.

INTRODUCTION

Hypertension is a very common and fatal health problem for human beings in modern life. It has been guessed that approximately 1.25 billion people have tension problems all over the world (World Health Organization, 2022). The reason for hypertension has been determined as blood pressure (BP) abnormalities by researchers decades ago. When having this kind of BP problem, tracing the BP level continuously and keeping it under control is very crucial. Classically, medics use the cuffed sphygmomanometer to measure the blood pressure (BP) level. The accuracy of the cuffed measurements changes depending on the ability and experience of the medics. Moreover, BP level monitoring using cuffed measurements is not a practically applicable method in patients' daily life. To overcome such obstacles, photoplethysmography (PPG) signals can be used to monitor and trace a person's blood pressure continuously in daily life.

Blood pressure can be measured using invasive or non-invasive methods. It is clear that the invasive measurement provides more accurate measurement results than the noninvasive methods. Unfortunately, invasive measurement can be applied only in hospitals or clinics. In daily life, noninvasive measurement of BP is more applicable. The traditional cuff sphygmomanometer is the most used noninvasive BP measurement method. Although it is a noninvasive method, it is not practical to use often in daily life. Some experience is necessary to use these devices correctly. Also, it is not comfortable for patients who need to frequently monitor and trace their BP levels. PPG based BP estimation is a noninvasive and cuffless measurement method. The usage of PPG signals for BP monitoring is easier, more practical, and comfortable for the patients. With the developing recording devices and increasing accuracy rates, this method has become more popular in the last decades. Noninvasive, easier and practical measurement is possible using PPG sensors, and these properties make it useful in daily routine for frequent monitoring of BP levels. A smartwatch, a wristband, or the devices used in hospitals can be designed to record PPG signals and predict BP levels.

Recent developments in computer technologies and sensors make it possible to obtain some biological values of people noninvasively. For real-time monitoring and tracing, PPG sensors have been used widely. By using PPG sensors, comfortable, noninvasive, and cuffless monitoring of many biological values is possible. PPG signals are recorded using optical sensors. Some researchers used PPG signals to estimate heart rate and oxygen saturation levels; in this way, they made important contributions to diagnosing respiratory problems and sleep apnea (Oğuz et al., 2023; El-Hajj and Kyriacou, 2020; McDuff et al., 2014; Salehizadeh et al., 2014; Lázaro et al., 2014; Yousef et al., 2012; Shin et al., 2009; Suzuki et al., 2009; Arnold et al., 2007; Johnston, 2006; Kim and Yoo, 2006; Kraitl and Ewald, 2005). Also, a growing number of research have been focused on the estimation of BP using PPG signals (El-Hajj and Kyriacou, 2020).

Cuffless BP estimation is a challenging research area. Because of the importance of BP level tracing for health conditions, PPG based BP estimation research has been getting more popular since the last decade. Some promising methods have been proposed by researchers in the last years and high accuracies have been obtained using machine learning methods. Some researchers preferred to use shape-based time-domain features to estimate BP levels (Chao et al., 2021). The preferred signal features for PPG based BP estimation used in recent studies have caused low estimation errors and high accuracies. However, their recording processes are not easy and comfortable; also the necessary computations for extracting them are rather complex. Some of the features introduced and used in the recent BP estimation studies are pulse transit time (PTT), signal amplification time, pulse arrival time (PAT), pulse wave velocity (PWV), PPG pulse shape, systolic upstroke time (SysT), diastolic time (DiasT), pulse width (PW), and pulse height (Chao et al., 2021). All of these features depend on the shape of PPG pulses. Therefore, they are very sensitive to noise and patient movements. Even some small changes in the time domain cause significant differences in the estimation results. This sensitivity is not affordable in real-time tracing applications. Moreover, for extracting PTT two different but simultaneous PPG signals of different body parts are necessary. For calculating the PAT an additional but simultaneous ECG signal must be recorded.

Despite the high sensitivity to noise and small synchronization errors in the time domain, some researchers managed to get good estimation accuracies by using shape-based features. Liu et al. proposed a new method for real-time and continuous BP estimation using synchronous ECG and PPG signals (Liu et al., 2020). They preferred versions of PTT, PAT, PW, SysT, and DiasT values as features extracted from the PPG and ECG signals. With the help of machine learning (ML) methods, they estimated systolic blood pressure (SBP) and diastolic blood pressure (DBP) separately. Pour Ebrahim et al. presented an algorithm for measuring SBP continuously (Pour Ebrahim et al., 2019).

They used simultaneously recorded ECG and PPG signals to extract shape-based features. Teng et al. proposed a method for BP estimation using only one channel PPG recording (Teng et al., 2003). They also used different versions of shape-based features and regression algorithms. Ruiz-Rodriguez et al. monitored BP levels continuously using one channel PPG (Ruiz-Rodriguez et al., 2013). Xing and Sun suggested using frequency-domain features (Xing and Sun, 2016). They used classical Fast Fourier Transformation (FFT) to obtain the spectrums of PPG signals. They extracted spectrum-based features to use the ML stage.

The usage of deep learning (DL) methods for BP estimation has become more popular in the last few years. Sun et al. used pre-trained convolutional neural networks (CNN) to predict BP from PPG data (Sun et al., 2021). They used Hilbert-Huang Transforms (HHT) of PPG signals and their first and second derivatives. They obtained the best classification accuracies with AlexNet. Liang et al. proposed a method using Continuous Wavelet Transform (CWT) scalograms of PPG signals and a pre-trained CNN (Liang et al., 2018). They preferred GoogLeNet and their classification accuracies were between 80% to 90% in different scenarios. Tjahjadi et al. presented a new approach using Bidirectional Long-Short Term Memory (BLSTM) at DL stage (Tjahjadi et al., 2020). They used the Short-Time Fourier Transform (STFT) of PPG signals to estimate BP levels. Classification accuracy of their approach was higher than 93%. El-Hajj and Kyriacou used raw PPG signals and their derivatives for feeding CNN structure (El-Hajj and Kyriacou, 2021). In the studies presented by (Tazarv and Levorato, 2021) and (Esmalpoor et al., 2020), the authors preferred to use different versions of LSTM based CNN structures to predict BP levels of patients.

SST is a very robust method against noise and time-domain changes. Also, its time and frequency resolutions are very high compared to other TF analysis methods. The PPG signals were divided into 5-second segments, and SST was applied to each segment separately. At last, a single image of SST representation is obtained and stored for each 5-seconds segment. Then, the SST representation images are used for feeding the pre-trained CNN. As a result, we have estimated the SBP and DBP values for each of the 5-second segments and have shown that the continuous tracing of BP levels using PPG signals is possible.

The contributions of this study can be summarized as 1) Our approach uses only one channel PPG recording for BP estimations, 2) PPG records can be obtained very easily compared to traditional cuff-based BP measurement, 3) The proposed method is robust because the shape-based features are not used, 4) The Synchrosqueezing Transform (SST) which we preferred to use while obtaining TF representations of PPG signals provides very high time and frequency concentrations.

DATASET

In this study, the Multiparameter Intelligent Monitoring in Intensive Care (MIMIC-II) database is used to obtain the arterial blood pressure (ABP) and PPG signals. This database has been formed with the physiological signal records of intensive care unit patients (Saeed et al., 2011). It contains more than 23,000 records. Duration of the records changes between seconds to several hours; sampling frequencies are 125 Hz; and precision is at least 8-bit. The MIMIC-II dataset contains waveforms of ECG, PPG, and respiration, some numeric data such as heart and respiration rates, SpO₂, and systolic, mean, and diastolic blood pressures. PPG signals were obtained using a pulse oximeter at the finger. BP levels were measured invasively at the wrist. In our study, we used a preprocessed, filtered, and diminished version of the MIMIC-II dataset formed by Kachuee et al. (Kachuee et al., 2017). MIMIC-II dataset originally include many recordings with varying lengths and signals. Some records do not include PPG signals, some of them do not include blood pressure levels. In some records, signals are very short for meaningful analysis. Therefore, it is not possible to use all records in this research. For this reason, we decided to use a cleared, pre-processed, and reduced version of the MIMIC-II dataset. The dataset of Kachuee et al. is more useful for this kind of research (Kachuee et al., 2017). At last, we took 5599 records from the database and divided them into 12 segments. The signal records included in the database are in a cell array of matrices form. Each cell includes a single record and each row of the matrices shows one signal channel, i.e. PPG, ABP, and ECG from channel II respectively (Silva et al., 2014). A sample of signals in a 5 second-segment can be seen in Fig.1.

METHODOLOGY

Synchrosqueezing Transform

Traditionally, spectrums of the signals are analyzed using the Fourier Transform (FT) and some similar methods. They are useful tools for obtaining the frequency contents of the signals. The absolute square of FT forms the distribution of the signal's power depending on the frequency content. However, this analysis method does not give

information about which frequencies exist in which time periods. Therefore, FT and similar approaches are not satisfying to analyze the signals that have time-varying spectrums. Signals in real life problems are mostly random signals, especially biomedical ones. For obtaining and understanding the frequency contents and time-varying power spectrums of the random signals, Time-Frequency (TF) analysis methods can be used.

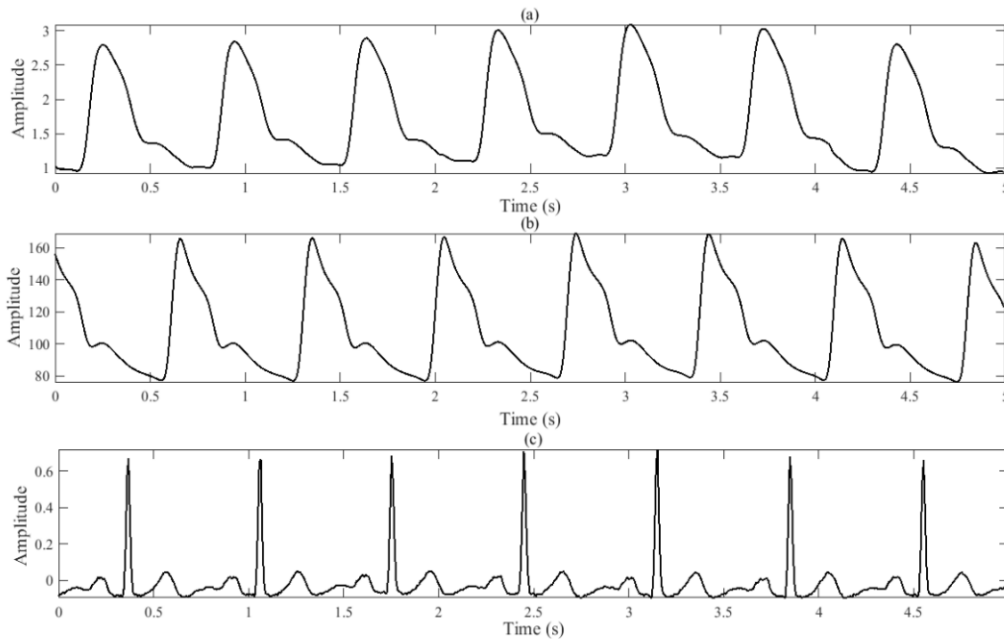


Figure 1. A 5 Second Segment of (a) PPG Signal, (b) ABP Signal, and (c) ECG Signal

Short-Time Fourier Transform (STFT), Wigner-ville Distribution (WVD), and Wavelet Transform (WT) are the most known and widely used TF analysis methods in the last decades. Also, different versions of these fundamental methods have been developed for obtaining TF representations with higher time and frequency resolutions. Synchrosqueezing Transform (SST) is a rather new and promising TF analysis method.

In this work, we use SST to obtain time-frequency representations of PPG signals. SST provides an excellent resolution in time-frequency representations. It takes one of the popularly known time-frequency methods and improves it. So, SST can be classified as a Reassignment Method (RM). In our approach, we preferred to use Wavelet based SST while analyzing the PPG signals. In short, SST estimates the Instantaneous Frequency (IF) of the signal with the help of Continuous Wavelet Transform (CWT). By using IF information, SST algorithm sums the spread energy of the signal and concentrates it through the IF. This part of the algorithm can be thought of as the squeezing of energy around the IF. As a result, a highly concentrated time-frequency representation is obtained. It can be seen in several researches (Auger et al., 2013; Daubechies et al., 2011) that representation accuracy of SST is much higher than traditional TF techniques.

The main advantage of SST is the high time and frequency resolutions in TF representations as mentioned before. Better representation of the signals provides better results in signal processing based research. Applications like noise filtering, artifact reduction, etc. become easier and more successful. Also, the performances of classification and regression algorithms increase with the usage of highly concentrated TF representations. These advantages of SST exist for all kinds of signals not only for PPG signals. Its success and advantage compared to the other TF methods can be seen especially in analyzing the random signals. PPG is also random like the other biomedical signals. Obtaining the TF representations of random signals with high resolutions is a challenging procedure using traditional signal analysis techniques. SST provides highly concentrated TF representations for random signals. Therefore, it is applicable to all kinds of biomedical signals like PPG signals.

SST has been developed by Daubechies et al. (Daubechies et al., 2011). It can be thought like a post-processing method used with CWT. First of all, the CWT of the signal $x(t)$ is calculated:

$$W_x(a, b) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) a^{-1/2} \bar{\psi}\left(\frac{t-b}{a}\right) dt \quad (1)$$

Here, $W_x(a, b)$ represents the wavelet coefficients for each pair of (a, b) . a shows the scale factor that is inversely proportional to the frequency. b is the time-dependent translation factor. $\bar{\psi}(x)$ represents the complex conjugate of the mother wavelet $\psi(x)$.

The IF of the signal can be estimated using the wavelet coefficients $W_x(a, b)$, as follows for any (a, b) where $W_x(a, b) \neq 0$ (Daubechies et al., 2011):

$$\omega_x(a, b) = \frac{-j}{2\pi W_x(a, b)} \frac{\partial W_x(a, b)}{\partial b} \quad (2)$$

With the help of IF, all wavelet coefficients $W_x(a, b)$, are reallocated into $T_x(\omega_l, b)$. Here, ω_l is the closest frequency to the real IF, $\omega_x(a, b)$. Finally, SST is obtained as follows (Daubechies et al., 2011):

$$T_x(\omega_l, b) = (\Delta\omega)^{-1} \sum_{a_k: |\omega_x(a_k, b) - \omega_l| \leq \frac{\Delta\omega}{2}} W_x(a_k, b) a_k^{-\frac{3}{2}} (\Delta a)_k \quad (3)$$

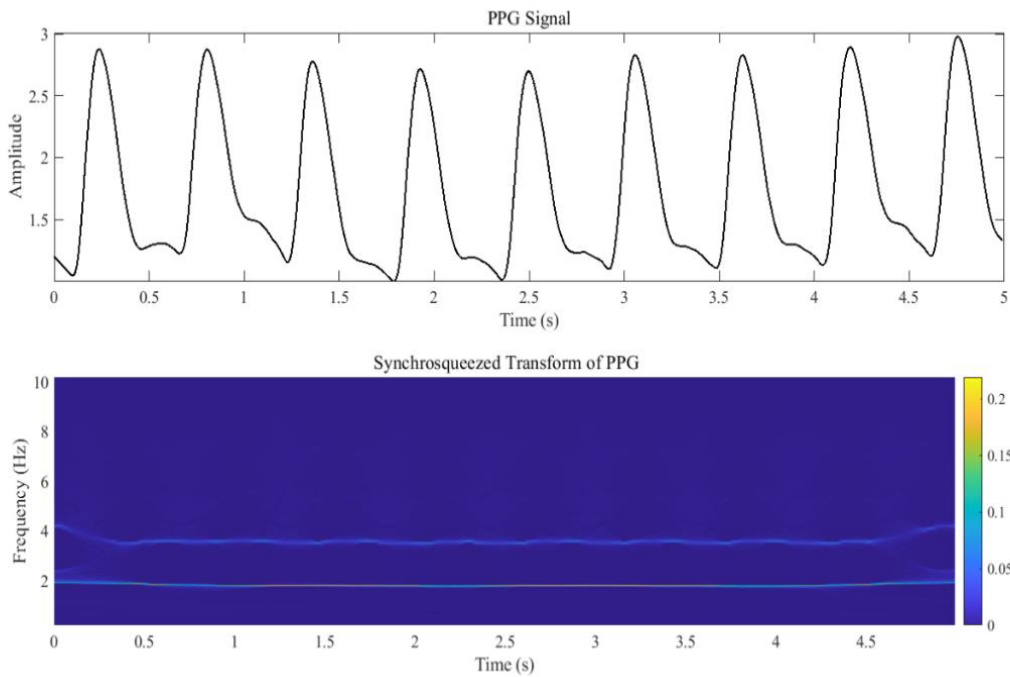


Figure 2. A 5-Second Segment of PPG Signal and its SST Spectrum

Here, $T_x(\omega_l, b)$ shows the SST coefficients at the centers ω_l of consecutive frequency bins; $\Delta\omega$ is the width of these frequency bins, $[\omega_l - \frac{1}{2}\Delta\omega, \omega_l + \frac{1}{2}\Delta\omega]$, $\Delta\omega = \omega_l - \omega_{l-1}$, and $(\Delta a)_k = a_k - a_{k-1}$. Briefly, for each time point b , the reassignment frequencies are obtained using (2) for all scales. After that, the SST coefficients $T_x(\omega_l, b)$, have been calculated as the sum of CWT coefficients, $W_x(a, b)$, where the difference between the reassigned frequency $\omega_x(a, b)$ and ω_l is less than a specified bin width $\frac{\Delta\omega}{2}$.

Time-Frequency Analysis of PPG Signals

At the experimental stage of this study, 100 data records of patients with 9 minutes and longer lengths ABP and PPG signals from the modified MIMIC-II database were selected randomly. Firstly, the signals were divided into 5s segments. Then, we filtered each PPG signal segment with a 0.5–10 Hz Chebyshev Type II filter. This bandwidth is chosen for bandpass filter because the change rate of the PPG signals is directly related to the heartbeat. Therefore, the frequencies of the PPG signals are expected lower than 4 Hz. SST was applied to each segment separately and TF representations of all segments were obtained as can be seen in Figure 2. It is seen that there is no signal component above approximately 8 Hz. Therefore, we filtered the frequencies higher than 8 Hz before forming TF images of the PPG segments. After that, all TF images were resized to feed the convolutional neural network. We

preferred to use ResNet-18 for the solution of the regression problem, so the sizes of TF images of the PPG segment had to be $224 \times 224 \times 3$. Then, the images of each segment were combined to form a four-dimensional (4-D) array.

The Arterial Blood Pressure (ABP) signals obtained from the dataset can be used as the ground truth for SBP and DBP values. The ABP signals show the results of periodical BP measurements. Classical techniques were employed for these measurements. For extracting the ground truth values of SBP and DBP from ABP, the method proposed by Elgendi et al. was used (Elgendi et al., 2013). In this method, SBP is the highest value in the segment of heart's systole, and DBP is the lowest value of the valleys in the segment of heart's diastole.

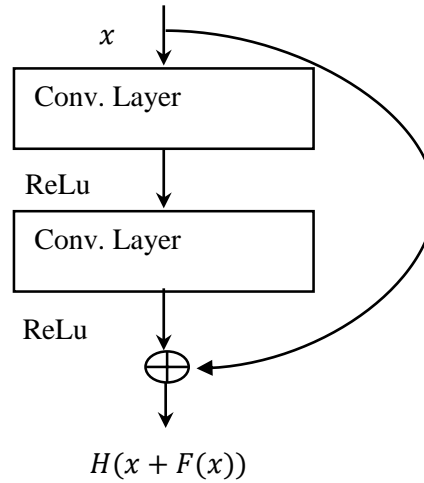


Figure 3. Architecture of a Residual Block

ResNet-18 Architecture for Regression Analysis

The Residual Network (ResNet) architecture proposed by He et al. is one of the most significant CNN models (He et al., 2016). It manages to classify many images quickly with high accuracy. With the insertion of residual blocks, ResNet architecture protects itself from the vanishing gradient problem and degradation which are known as common problems in CNN based structures and occur as an expected result of depth increase. Jumping some connections in residual blocks cancels the effects of the jumped layers in the neural network and transmits the output of a previous layer as the input to the next layers. The standard rectified linear activation (ReLU) function is $H(x) = ReLu(x) = \max(0, x)$. Architecture of a basic residual block is illustrated in Figure 3.

Many different ResNet architectures have been proposed and used by researchers (Sunneci et al., 2023). We preferred to use ResNet-18 in this work. Its depth and computational load seem to be enough and efficient for this kind of regression analysis. ResNet-18 includes 5 convolution blocks, 17 convolution layers, and 1 fully connected layer. The first convolution block can be thought of as a single convolution layer with 64 (7×7) filters. The following convolution blocks are formed with two residual blocks. Each residual block includes 2 convolution layers and these layers have same number of 3×3 filters. Also, each convolution block decreases the image size by half while increasing the feature dimension by two. Different from the standard CNN structure, each 3×3 filter pair has a shortcut connection.

ResNet-18, a variant of the Residual Network (ResNet) architecture, is a popular choice in deep learning and computer vision tasks, including image classification, due to several advantages that make it a strong candidate for a wide range of problems. We can elaborate on why ResNet-18 could be a suitable choice and its advantages over other potential architectures, taking into consideration the nature of our data:

Depth and Computational Load: ResNet-18 strikes a balance between model depth and computational load. It is not as deep as some other architectures like ResNet-50 or VGG-16, which can be computationally expensive and memory-intensive. For certain applications where computational resources are limited, ResNet-18 may be more practical without sacrificing too much performance.

Skip Connections and Residual Blocks: The key innovation in ResNet is the use of skip connections and residual blocks. These skip connections allow gradients to flow more easily during training, mitigating the vanishing

gradient problem. This is especially beneficial when dealing with deep networks, which is often the case in computer vision tasks. The presence of skip connections can help in capturing fine-grained details in our data.

Efficiency in Training: Architecture of ResNet helps in training deeper networks more effectively. This can be particularly advantageous if our dataset is large and complex. It enables the model to learn both low-level and high-level features efficiently, which is often crucial in image classification tasks.

Transfer Learning: ResNet-18 is a well-established deep learning architecture that has been pre-trained on large datasets like ImageNet. This pre-training allows us to boost transfer learning. We can start with a pre-trained ResNet-18 model and fine-tune it on our specific dataset. Transfer learning is valuable when we have limited labeled data because it helps the model to generalize better from the pre-trained knowledge.

Regularization: The skip connections of ResNet act as a form of regularization. They help to prevent overfitting, which is important when dealing with limited data. This can lead to a better generalization performance on our specific dataset.

Community and Resources: ResNet-18 has been widely adopted in the deep learning community, and there are plenty of resources, pre-trained models, and fine-tuning strategies available. This can save us time and effort in model development and training.

Tested Performance: ResNet-18 has demonstrated strong performance on a variety of computer vision tasks, including image classification, object detection, and segmentation. Its effectiveness in these tasks suggests that it is a reliable choice for a wide range of problems.

In summary, the advantages of ResNet-18, such as its efficient training, regularization properties, and strong performance on various computer vision tasks, make it a solid choice for image classification problems, especially when we have limited data or computational resources. While other architectures may have their strengths, ResNet-18's balance of depth and performance often makes it a sensible starting point for many real-world applications in computer vision, including those with unique data characteristics.

Because the ResNet-18 structure was designed originally for classification problems, we made some changes on the architecture to use it in a regression problem. We changed the final classification layer of the ResNet-18 with a regression output layer and a fully connected layer of size 1 that relates to the number of responses BP levels. The final structure after our modifications was composed of 71 layers. Moreover, we increased the learning rate factor for the weights and the biases of the fully connected layer to obtain faster learning in the new layers than in the transferred layers. The ResNet-18 architecture used in this study can be seen in Figure 4.

Adapting the ResNet-18 architecture for regression analysis typically involves specific modifications to the output layer and the loss function used for training. Here's how ResNet-18 can be adapted for regression, including the changes to the output layer and the loss function:

In a standard ResNet-18 architecture for image classification, the output layer typically consists of a fully connected layer followed by a softmax activation function, which is suitable for multi-class classification tasks. However, for regression analysis, where the goal is to predict a continuous numerical value, this output layer needs to be modified. For regression, we would replace the final fully connected layer with a single neuron or a small fully connected layer without any activation function. The output from this layer would be a continuous numerical value, which is the regression prediction. In the case of a single neuron output, this value represents the predicted target or continuous variable we are trying to estimate.

The choice of loss function is critical in regression tasks. Instead of using the categorical cross-entropy loss commonly used in classification tasks, we would typically use a regression-specific loss function. The most used loss function for regression is the Mean Squared Error (MSE) loss. The goal during training is to minimize this MSE loss. It quantifies how well the model's predictions match the actual target values. With the modified output layer and the MSE loss function, we can train our ResNet-18 architecture for regression. During training, the model adjusts its weights and biases to minimize the MSE loss, which means it is trying to make its predictions as close as possible to the real target values in our dataset. We would typically use gradient-based optimization algorithms, such as

stochastic gradient descent (SGD) or its variants (e.g., Adam), to update the model's parameters and minimize the loss function.

As a result, when adapting ResNet-18 for regression analysis, we modify the output layer to have a single unit with a linear activation function and choose an appropriate loss function like MSE or MAE. These modifications allow the network to predict continuous values and optimize its parameters based on the error between predictions and real target values. These changes are fundamental in transforming a classification-focused neural network architecture into one suitable for regression tasks.

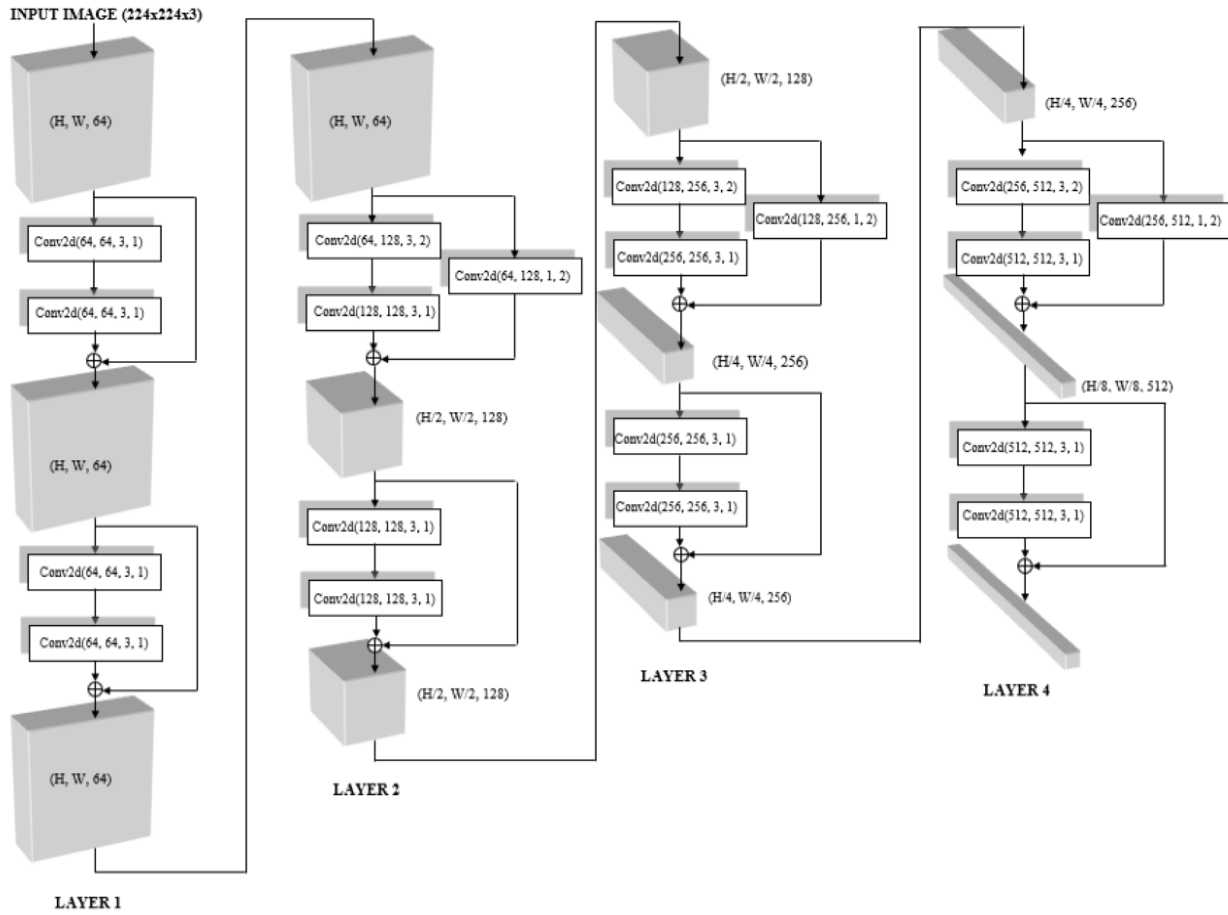


Figure 4. Architecture and Parameters of ResNet-18

RESULTS AND DISCUSSIONS

In this research, we used the pre-trained deep learning network ResNet-18. BP levels were estimated by regression analysis on ResNet-18 architecture. TF images obtained using SST of the PPG signals were used in the training and testing stages of the deep learning network. ADAM optimizer was used in the training of the network with a batch size of 128 and 10^{-4} learning rate. We limited the number of training epochs to 25. The learning rate factors for the weights and the fully connected layer's biases were set to 10. 70% of the TF images were used for training and 30% of them were used for validation. Training and validation sets were specified randomly. All stages of the algorithm were performed on MATLAB software (version R2021b).

For measuring the successes of predictions, we used the mean error (ME), mean absolute error (MAE) and the standard deviation (STD) of the error. The performance metrics are below (Lang et al., 2022; Kayadelen et al., 2022):

$$ME = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (BP_{predicted}^i - BP_{ground\ truth}^i) \quad (4)$$

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |BP_{predicted}^i - BP_{ground\ truth}^i| \quad (5)$$

$$STD = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (BP_{predicted}^i - BP_{ground\ truth}^i - ME)^2} \quad (6)$$

Here n is the number of estimated BP levels for validation data, $BP_{predicted}$ expresses the predicted BP value and $BP_{ground\ truth}$ expresses the reference BP value.

According to the Association for the Advancement of Medical Instrumentation (AAMI), as a standard for reliable BP measurement, the maximum ME has to be 5 mmHg, and the maximum STD has to be 8 mmHg (American National Standards Institute, 2017). Our results can be seen in Table 1 for systolic blood pressure (SBP) and diastolic blood pressure (DBP) separately. ME values in the proposed method are lower than the maximum allowed ME value. It is seen that our approach is mostly successful, but only the STD of SBP estimations is higher than the AAMI permissible limit. We believe that the reason for this high STD value of our estimations is due to the high STD of SBP recordings in the dataset. SBP values in the dataset spread to a wide range and this makes the regression analysis more challenging.

Table 1. Validation Results According to AAMI Standard

		ME (mmHg)	STD (mmHg)
AAMI	SBP	5	8
	DBP	5	8
Our Results	SBP	0.2148	10.9904
	DBP	-0.0370	5.0642

According to the British Hypertension Society (BHS) (O'Brien et al., 2001), a BP measurement device must have a minimum BP Monitor Grade of B for utilization in a clinical setting. The grade is the cumulative proportion of the prediction error that falls within 5, 10, and 15 mmHg of the mercury standard. The validation results according to the BHS standard can be seen in Table 2. Our model is at the grade A in DBP estimation and at the grade B in SBP estimation.

Table 2. Validation Results According to BHS Standard

		$\leq 5\text{ mmHg}$	$\leq 10\text{ mmHg}$	$\leq 15\text{ mmHg}$	Class
BHS		60%	85%	95%	Grade A
		50%	75%	90%	Grade B
		40%	65%	85%	Grade C
			Worse than C		Grade D
Our Results	SBP	74.97%	87.06%	92.04%	Grade B
	DBP	88.73%	97.28%	99.03%	Grade A

In Table 3, the comparison of our work with some other PPG based BP estimation methods has been presented. Only the methods that used regression were taken for comparisons. Although we have used only one channel of PPG signals, the performance of our method is better than most of the other methods that used two channels of PPG, PPG, and ECG together or modified versions of PPG. According to the performance metrics, the results of our approach are remarkable and promising for the design of real-time BP monitoring devices.

The studies that have used PTT, PAT, and similar waveform-based features are generally weak against time-domain manipulations and noise. Moreover, they need to use a second PPG recording or an additional ECG recording. These necessities make it difficult to use these methods in real life applications. Recording a second signal is not comfortable. Also, because of the movements of an individual in real life, noise, and time-shiftings can be realized. These reasons decrease the estimation performances. As seen in Table 3, our approach has lower error rates than the methods which use waveform-based features.

The estimation methods that use deep learning have lower error rates than our method in SPB estimation. In DBP estimation, the best results are obtained by Esmalpoor et al. (Esmalpoor et al., 2020). Our results are a little bit higher than the other methods. The difference is not much and significant. Our results are better than the results of Slapnicar et al. (Slapnicar et al., 2019) and Rodriguez et al. (Rodriguez et al., 2013). These differences can be raised as a result of the different signal processing techniques and deep learning structures.

Table 3. Performance Comparison with Related Works

Methods	Signals & Methods	Performance Metrics	DBP	SBP
(Kachuee et al., 2017)	PTT features	MAE \pm STD	6.34 \pm 8.45	12.38 \pm 16.17
(Kachuee et al., 2015)	PAT features	MAE \pm STD	5.35 \pm 6.14	11.17 \pm 10.09
(Tanveer and Hasan, 2019)	PTT raw signals	MAE	0.52	0.93
(Kurylyak et al., 2013)	PTT raw signals	ME \pm STD	2.21 \pm 2.09	3.80 \pm 3.46
(Slapnicar et al., 2019)	PPG derivatives and raw signals + CNN	MAE	12.38	15.41
(El-Hajj and Kyriacou, 2021)	PPG features + CNN	MAE \pm STD	2.6 \pm 4.41	4.51 \pm 7.81
(Rodriguez et al., 2013)	PPG waveform features + CNN	ME \pm STD	-3.65 \pm 8.69	-2.9 \pm 19.35
(Tazarv and Levorato, 2021)	CNN-LSTM	MAE \pm STD	2.02 \pm 1.76	3.70 \pm 3.07
(Esmaelpoor et al., 2020)	CNN-LSTM	MAE \pm STD	0.67 \pm 2.84	1.91 \pm 5.55
Proposed method	PPG raw signals +	ME \pm STD	-0.03 \pm 5.06	0.21 \pm 10.99
	ResNet-18	MAE \pm STD	3.51 \pm 5.06	7.52 \pm 10.99

CONCLUSIONS

In this research, we proposed a method to estimate SBP and DBP values using only one channel PPG recordings. In contrast with the other research on this problem, neither ECG records nor shape-based features were used to extract features in time or frequency domains. The high-resoluted TF images were generated as SST of PPG signals and they were applied to a deep learning algorithm for regression analysis. We preferred to use the ResNet-18 in regression analysis which is a pre-trained deep learning architecture. The reason for this choice is because of its efficiency and speed in image classification problems. Moreover, we modified the ResNet-18 for using it in regression analysis. The speed and computational efficiency of the pre-trained Resnet-18 architecture make it promising for being used in real-time BP monitoring systems.

Our algorithm is robust against noise and motion artifacts owing to the advantages of working in joint TF domain and excellent representation capability of SST. Reassignment based algorithm of SST makes the TF representations robust. Especially using a real-time BP monitoring device, our algorithm has some advantages against the challenges of real-time monitoring. The main problems are different kinds of noise and motion artifacts in real-time BP estimation. The reason for these problems is the movements of subjects. The usage of SST makes it easier to filter noise and artifacts because its algorithm concentrates the signals through the high energy regions or instantaneous frequencies of them. This squeezing algorithm deletes most of the noise and artifacts.

Besides low error rates and robustness, usage of only one channel PPG signal makes our method promising for the design of a real-time BP monitoring system. This algorithm can be used in wearable devices like smart watches and wristbands to monitor BP in daily life. Also, PPG signals can be recorded from the fingers and the earlobes of the patients easily in the hospital environment for monitoring the BP continuously.

The main limitation of our approach is the high computational loads of SST and deep learning, but luckily, the developments in the capabilities of processors will eliminate the computational loads of them in the near future. The importance of this limitation increases especially in real-time applications. Nowadays, it is possible to implement this algorithm using a fast processor and high capacity memory. However, it is not efficient because of the high prices of these hardwares. Another limitation of our method is the usage of only one channel PPG signal. A second PPG signal or an ECG signal makes it possible to obtain estimations with lower error rates. However, one channel PPG signal based BP estimation is more suitable and preferable for applications in daily life.

As a future research perspective, we aim to develop an optimized algorithm with efficient computations. The high computational load of our method can be reduced by using different signal processing techniques and deep learning structures. In signal processing side, low computations reduce also the resolutions of TF representations. This causes a possible performance decrease in regression analysis. A computationally efficient TF method with ignorable performance decrease can still be found and employed. On the other side, different deep learning architectures and modified versions of them can be tried to reduce the load of the learning stage. Another option is the usage of machine

learning algorithms instead of deep learning. Machine learning methods need less computation than deep learning methods.

In this study, we used only the modified version of MIMIC-II dataset. This dataset has been used in many different research and it is still useful. However, the importance of testing the method with different datasets can not be ignored. In this stage, we aim to improve the performance of our method by employing some other signal processing techniques and learning algorithms. After obtaining better prediction results, we are going to test our approach with different datasets and in a real life application.

ACKNOWLEDGEMENTS

This work was supported by Scientific Research Projects Coordination Unit of Istanbul University – Cerrahpasa with project number FBA-2022-36694.

REFERENCES

- American National Standards Institute. ANSI/AAMI/ISO 81060–2:2013. Non-invasive sphygmomanometers - Part 2: clinical investigation of automated measurement type. <http://webstore.ansi.org>, Accessed July 15, 2017.
- Arnold, M. A., Liu, L., & Olesberg, J. T., (2007), Selectivity assessment of noninvasive glucose measurements based on analysis of multivariate calibration vectors, *Journal of Diabetes Science and Technology*, 1(4), 454–462.
- Auger F., Flandrin P., Lin Y., et al, (2013). Time-Frequency reassignment and synchrosqueezing, *IEEE Signal Processing Magazine*, 30:32-41.
- Chao, P. C., Wu, P. C. -C. D., Nguyen, H. B. -S. Nguyen, P. -C. Huang and V. -H. Le, (2021). The Machine Learnings Leading the Cuffless PPG Blood Pressure Sensors Into the Next Stage, *IEEE Sensors Journal*, 21(11), 12498-12510, doi: 10.1109/JSEN.2021.3073850.
- Daubechies, I., Lu, J., Wu, H.T., (2011), Synchrosqueezed wavelet transform: an empirical mode decomposition like tool, *Appl. Comput. Harmon. Anal.*, 30(2), 243-261.
- Elgendi M, Norton I, Brearley M, Abbott D, Schuurmans D. (2013), Systolic peak detection in acceleration photoplethysmograms measured from emergency responders in tropical conditions. *PLoS One*, 8:e76585.
- El-Hajj, C., and Kyriacou, P.A, (2021), Cuffless blood pressure estimation from PPG signals and its derivatives using deep learning models, *Biomedical Signal Processing and Control*, 70, 102984.
- El-Hajj, C., and Kyriacou, P.A., (2020), A review of machine learning techniques in photoplethysmography for the non-invasive cuff-less measurement of blood pressure, *Biomedical Signal Processing and Control*, 58,.
- Esmaelpour, J., Moradi, M. H., and Kadkhodamohammadi, A., (2020), A multistage deep neural network model for blood pressure estimation using photoplethysmogram signals, *Computer in Biology and Medicine*, 120, 103719.
- He, K., Zhang, X., Ren, S., and Sun, J., (2016), Deep Residual Learning for Image Recognition, 2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), pp. 770-778, doi: 10.1109/CVPR.2016.90.
- Johnston, William S., (2006), Development of a Signal Processing Library for Extraction of SpO₂, HR, HRV, and RR from Photoplethysmographic Waveforms, Masters Theses (All Theses, All Years), 919, <https://digitalcommons.wpi.edu/etd-theses/919>.
- Kachuee, M., Kiani, M. M., Mohammadzade, H., and Shabany, M., (2017), Cuffless Blood Pressure Estimation Algorithms for Continuous Health-Care Monitoring, *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 64,(4), 859-869.
- Kachuee, M., Kiani, M. M., Mohammadzade, H., and Shabany, M., (2015), Cuff-less high-accuracy calibration-free blood pressure estimation using pulse transit time, 2015 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS), pp. 1006-1009.
- Kayadelen, C., Altay, G., Önal, S., & Önal, Y., (2022) Sequential minimal optimization for local scour around bridge piers, *Marine Georesources & Geotechnology*, 40:4, 462-472, DOI: [10.1080/1064119X.2021.1907635](https://doi.org/10.1080/1064119X.2021.1907635)
- Kim, B.S., & Yoo S. K.,(2006), Motion artifact reduction in photoplethysmography using independent component analysis, *IEEE Transactions on Bio-Medical Engineering*, 53 (3), 566–568.

- Kraitl J, Ewald H (2005), Optical non-invasive methods for characterization of the human health status. In: Presented at the 21st international conference on sensing technology, Palmerston North, New Zealand.
- Kurylyak, Y., Lamonaca, F., and Grimaldi, D., (2013), A Neural Network-based method for continuous blood pressure estimation from a PPG signal, 2013 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC), pp. 280-283.
- Lang, N., Kalischek, N., Armston, J., Schindler, K., Dubayah, R., & Wegner, J. D. (2022). Global canopy height regression and uncertainty estimation from GEDI LIDAR waveforms with deep ensembles. *Remote Sensing of Environment*, 268, 112760.
- Lázaro, J., Gil, E., Vergara, J. M., & Laguna, P., (2014), Pulse rate variability analysis for discrimination of sleep-apnea-related decreases in the amplitude fluctuations of pulse photoplethysmographic signal in children. *IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics*, 18(1), 240-246.
- Liang, Y., Chen, Z., Ward, R., & Elgendi, M. (2018), Photoplethysmography and deep learning: enhancing hypertension risk stratification, *Biosensors*, 8(4), 101.
- Liu Z, Zhou B, Li Y, Tang M, Miao F. (2020), Continuous Blood Pressure Estimation From Electrocardiogram and Photoplethysmogram During Arrhythmias. *Front Physiol*. Sep 9;11:575407. doi: 10.3389/fphys.2020.575407. PMID: 33013491; PMCID: PMC7509183.
- McDuff D., Gontarek S. & Picard R. W., (2014), Remote detection of photoplethysmographic systolic and diastolic peaks using a digital camera, *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 61(12), 2948-2954.
- O'brien E., Waeber B., Parati G., Staessen J., Myers M.G. (2001), Blood pressure measuring devices: Recommendations of the European Society of Hypertension. *BMJ.*; 322:531–536.
- Oğuz, F.E., Alkan, A. & Schöler, T. (2023), Emotion detection from ECG signals with different learning algorithms and automated feature engineering. *SIViP*, 17, 3783–3791. <https://doi.org/10.1007/s11760-023-02606-y>
- Pour Ebrahim, M., Heydari, F., Wu, T. et al. (2019), Blood Pressure Estimation Using On-body Continuous Wave Radar and Photoplethysmogram in Various Posture and Exercise Conditions. *Sci Rep* 9, 16346.
- Rodríguez, Juan C.R., et al. (2013), Innovative continuous non-invasive cuffless blood pressure monitoring based on photoplethysmography technology. *Intensive Care Medicine* 39.9: 1618-1625.
- Saeed, M., Villarroel, M., Reisner, A.T., Clifford, G., Lehman, L., Moody, G.B., Heldt, T., Kyaw, T.H., Moody, B.E., Mark, R.G.. (2011 May), Multiparameter intelligent monitoring in intensive care II (MIMIC-II): A public-access ICU database. *Critical Care Medicine*, 39(5):952-960; DO: 10.1097/CCM.0b013e31820a92c6.
- Salehizadeh, S. M., Dao, D. K., Chong, J. W., McManus, D., Darling, C., Mendelson, Y., & Chon, K. H.,(2014), Photoplethysmograph signal reconstruction based on a novel motion artifact detection-reduction approach. Part II: Motion and noise artifact removal, *Annals of Biomedical Engineering*, 42(11), 2251–2263.
- Shin H. S., Lee C., & Lee M., (2009), Adaptive threshold method for the peak detection of photoplethysmographic waveform, *Computers in Biology and Medicine*, 39(12), 1145-1152.
- Silva, I, Moody, G. (2014), An Open-source Toolbox for Analysing and Processing PhysioNet Databases in MATLAB and Octave. *Journal of Open Research Software* 2(1):e27 [<http://dx.doi.org/10.5334/jors.bi>].
- Slapničar G, Mlakar N, Luštrek M. (2019), Blood Pressure Estimation from Photoplethysmogram Using a Spectro-Temporal Deep Neural Network. *Sensors* (Basel). Aug 4;19(15):3420. doi: 10.3390/s19153420.
- Sun, X., Zhou, L., Chang, S., & Liu, Z. (2021), Using CNN and HHT to predict blood pressure level based on photoplethysmography and its derivatives, *Biosensors*, 11(4), 120.
- Sunnetci, KM, Kaba, E, Beyazal Çeliker, F, Alkan, A. (2023), Comparative parotid gland segmentation by using ResNet-18 and MobileNetV2 based DeepLab v3+ architectures from magnetic resonance images. *Concurrency Computat Pract Exper.* ; 35(1):e7405. doi:[10.1002/cpe.7405](https://doi.org/10.1002/cpe.7405)
- Suzuki, T., Kameyama, K., & Tamura, T., (2009), Development of the irregular pulse detection method in daily life using wearable photoplethysmographic sensor, Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society. Annual International Conference, 6080-6083.

Tanveer, M.S., Hasan, M.K. (2019), Cuffless blood pressure estimation from electrocardiogram and photoplethysmogram using waveform based ANN-LSTM network, *Biomedical Signal Processing and Control*, 51, 382-392.

Tazarv, A. and Levorato, M., (2021), A deep learning approach to predict blood pressure from ppg signals, in 2021 43rd Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine & Biology Society (EMBC), pp. 5658–5662, Mexico.

Teng, X. F., and Y. T. Zhang. (2003), Continuous and noninvasive estimation of arterial blood pressure using a photoplethysmographic approach, Proceedings of the 25th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (IEEE Cat. No. 03CH37439). Vol. 4. IEEE.

Tjahjadi, H., Ramli, K., & Murfi, H. (2020). Noninvasive classification of blood pressure based on photoplethysmography signals using bidirectional long short-term memory and time-frequency analysis. *IEEE Access*, 8, 20735-20748.

World Health Organization [2022-05-22]. Hypertension. <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/hypertension>

Xing, X., & Sun, M. (2016). Optical blood pressure estimation with photoplethysmography and FFT-based neural networks. *Biomedical Optics Express*, 7(8), 3007-3020.

Yousef Q., Reaz M. B. I., Ali, M. A. M., (2012), The analysis of PPG morphology: investigating the effects of aging on arterial compliance, *Measurement Science Review*, 12(6), 266-271.



Kahramanmaraş Sütçü İmam University

Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 17.10.2023
Kabul Tarihi : 16.11.2023

Received Date : 17.10.2023
Accepted Date : 16.11.2023

KOMPOZİT BİR SİLİNDİR GÖMLEĞİNDE İKİ BOYUTLU SICAKLIK DAĞILIMIN SAYISAL İNCELENMESİ

NUMERICAL INVESTIGATION OF TWO DIMENSIONAL TEMPERATURE DISTRIBUTION OF A COMPOSITE CYLINDER LINER

Ali YILDIRIM¹* (ORCID: 0000-0001-5894-8986)
Durmuş YARIMPABUÇ² (ORCID: 0000-0002-8763-1125)
Kerimcan ÇELEBİ³ (ORCID: 0000-0001-6294-0872)

¹ Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi, Osmaniye Meslek Yüksekokulu, Osmaniye, Türkiye,

² Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi, Matematik Bölümü, Osmaniye, Türkiye,

³ Çukurova Üniversitesi, Ceyhan Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Adana, Türkiye.

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Ali YILDIRIM, aliyildirim@osmaniye.edu.tr

ÖZET

Bu çalışmada sınırlarında sıcaklığın lineer değiştiği düşünülen alüminyum ve SiC'den oluşan kompozit bir silindir gömleğinde kararlı durumdaki iki boyutlu sıcaklık dağılımı pseudospektral Chebyshev yöntemi kullanılarak incelenmiştir. Sabit sıcaklık sınır koşulu altında iki boyutlu pseudospektral Chebyshev yöntemi kullanılarak elde edilen sayısal sonuçlar analitik çözümlerle karşılaştırılarak yöntemin doğruluğu gösterilmiştir. Silindir gömleğindeki sıcaklık dağılımlarının iki boyutlu ve üç boyutlu grafikleri verilmiş ve tartışılmıştır. Elde edilen sayısal sonuçlar, pseudospektral Chebyshev yönteminin bu tür problemlerin çözümlerinde alternatif olarak kullanılabileceği gösterilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Silindir gömleği, sıcaklık dağılımı, kompozit malzeme, pseudospektral Chebyshev yöntemi.

ABSTRACT

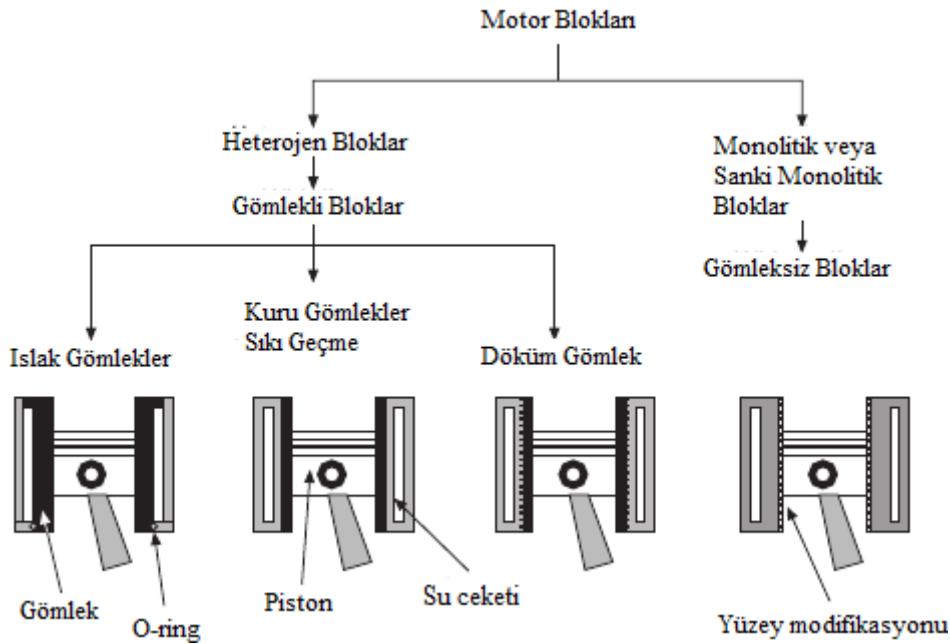
In this study, the steady-state two-dimensional temperature distribution in a composite cylinder liner consisting of aluminum and SiC, at the boundaries of which the temperature is thought to vary linearly, is examined using the pseudospectral Chebyshev method. The accuracy of the method has been demonstrated by comparing the numerical results obtained using the two-dimensional pseudospectral Chebyshev method under constant temperature boundary condition with the analytical solution. Two-dimensional and three-dimensional graphs of temperature distributions in the cylinder liner are given and discussed. The numerical results obtained show that the pseudospectral Chebyshev method can be used as an alternative in solving such problems.

Keywords: Cylinder liner, temperature distribution, composite material, pseudospectral Chebyshev method.

GİRİŞ

İçten yanmalı motorlarda, piston ve segmandan kaynaklanan aşınmaya karşı dayanıklı bir yüzey oluşturan ve silindir içerisine yerleştirilen silindirik şeklindeki parça, silindir gömleği olarak tanımlanır. İçten yanmalı motorlarda kullanılan silindir blokları, monolitik, yarı-monolitik ve heterojen silindir blokları olarak sınıflandırılır. Gömleksiz silindir blokları olarak da tanımlanan monolitik silindir bloklarında silindir bloğu tek bir malzemeden yapılır. Yarı-monolitik silindir blokları tek malzemeden yapılmıştır, fakat bu bloklarda pistonun çalıştığı silindir deliği gözenekli Cr veya Nİ-SiC ile kaplanarak, veya çelik esaslı alaşımlar ile yüzeylerine plazma püskürtme yapılarak daha sert yüzeyler elde edilir. Heterojen silindir bloklarında ise genellikle silindir bloğu ile piston ve sekmanın hareketine kılavuzluk yapan silindir gömlekleri farklı malzemelerden yapılmıştır. Günümüzde herhangi bir arıza durumunda daha ucuz maliyetli çözümler sunması, silindir bloğuna göre aşınma direnci ve sürtünme özellikleri iyi olan malzemeler kullanılması gibi nedenlerden ötürü heterojen silindir blokları daha çok tercih edilmektedir (Heywood, 2008; Yamagata, 2005; MAHLE GmbH, 2016).

Heterojen silindir bloklarında kullanılan silindir gömlekleri direkt su ile temas edip etmemesine göre ıslak veya kuru gömlekler olarak sınıflandırılır. Kuru gömlekler silindir bloklarına sıkı geçme bir şekilde monte edilmiş olup silindir blokları ile temas halindedir. Islak gömlekler ise direkt soğutma suyu ile temas halinde olup ısı soğutma suyuna direkt olarak aktarılmaktadır. Islak silindir gömlekleri, silindir bloklarından destek almadan oluşan yüksek iç basınçlar ve ısıya dayanabilmesi için genellikle kuru gömleklere göre daha kalın olarak imal edilmelidir. Heterojen silindir bloklarında kullanılan bir diğer gömlek tipi ise dökme silindir gömleği olup silindir bloğunun dökümü esnasında silindir gömleğinin geleceği bölgeye dökülmesi ile elde edilir (Yamagata, 2005). Silindir bloklarının sınıflandırılması ve bu silindir bloklarında kullanılan silindir gömlek çeşitleri Yamagata (Yamagata, 2005) tarafından Şekil 1'deki gibi aşağıda verilmiştir.



Şekil 1. Motor Blokları ve Kullanılan Silindir Gömlek Çeşitleri (Yamagata, 2005)

Richardson (Richardson, 2000) içten yanmalı motorlarda toplam kaybın %50-60'ını termal kayıpların oluşturduğu ve motor performansını optimize ederken dikkate alınması gereken önemli faktörlerden birisi olduğu bildirilmiştir. Silindir duvar sıcaklığı yanma gazı sıcaklığı değerlerine ne kadar yakın olursa, termal kayıplar ideal olarak o kadar az olacaktır. Bununla birlikte silindir duvar sıcaklığının yüksek olmasının HC emisyonları üzerine olumlu bir etkisi varken, NOx emisyonunu artırıcı bir etkisi vardır. Benzinli motorlarda, silindir içi aşırı sıcaklık kontrolsüz patlamalara yani motorda vuruntuya sebep olmasından dolayı bu motorlarda parça sıcaklıklarını belli bir seviyenin altında tutulması gerekir. Ancak, aşırı soğutulmuş parçalar ise istenmeyen kompresör kaçaqlarına sebebiyet vereceğinden, bu parçalarda sıcaklığın aşırı düşürülmemesi gerekir (Dehghani, 2013; Holger, 2001; Lapuerta, 2000;

Rakopoulos, 1998; Richardson, 2000; Wang, 2008). Bu tür nedenlerden dolayı silindir gömlek sıcaklığını belli bir seviyede tutmak ve bunu önceden belirleyebilmek önem arz etmektedir.

İçten yanmalı motorlarda kullanılan silindir gömleklerinde sıcaklık dağılımı genellikle bilgisayar destekli paket programlar yardımı ile elde edilmiştir. (Ertek, 2020; Gustof, 2008; Roy, 2020; Trung, 2021(a, b); Wang et al., 2012). Trung (Trung, 2021(a)) farklı motor devri ve motor yükündeki bir V-12 motorunun silindir gömleğindeki sıcaklık dağılımlarını, ANSYS Parametrik Tasarım Dili'nde (APDL) yazılmış sonlu elemanlar yöntemi kullanarak belirlemiştir. Elde edilen sonuçları deneysel sonuçlarla karşılaştırarak doğrulamış, testlerin sonuçları, teorik modelin oldukça güvenilir olduğunu ve en büyük bağıl hatanın %5,49 olduğunu göstermiştir. Turbo dizel bir motorun başlangıç fazında ıslak silindir gömleğindeki sıcaklık dağılımı Gustof ve Hornik (Gustof and Hornik, 2008) tarafından iki bölgeli yanma modeli ve sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak elde edilmiştir. İki bölgeli yanma modeli kullanılarak ısı yükleri belirlenmiş, sonlu elemanlar yöntemi ile gömlek üzerindeki sıcaklık dağılımları belirlenmiştir. Motor gömleğindeki sıcaklığın ilk 20 saniye içinde çok hızlı arttığı (ortalama olarak yaklaşık 3 K) daha sonra sıcaklık artışındaki hızın azaldığı ve 40. saniye sonunda maksimum sıcaklığın gömleğin üst kısmında 444 K olduğu tespit edilmiş ve bu süreden sonra sıcaklık artış hızının düştüğü belirlenmiştir. Uygulanan matematiksel modelin kullanılabilirliğinin mümkün olduğu sonucuna varılmıştır. Su soğutmalı 4 valfli, 4 zamanlı, turbo sarjlı benzinli bir motordaki ve soğutma suyu ceketindeki sıcaklık dağılımı Wang vd. (Wang et al., 2012) tarafından hesaplamalı akışkanlar dinamiğinin bir yazılımı olan Ansys Fluent kullanılarak elde edilmiştir. Motor ilk olarak Pro/E kullanılarak basitleştirilmiştir. Elde edilen verileri daha küçük parçalardan oluşan elemanlara ayırmak için ICM kullanılmıştır. Elde edilen sonuçların doğrulanması için motorun belli bölgelerinden sıcaklık ölçümü alınmış, hesaplanan sıcaklık değerleri ile ölçümler arasındaki farkın makul ve silindirlerin birleştiği yerde maksimum olup en fazla 20 K olduğu gözlemlenmiştir. Sonuçların sonraki çalışmalarda ve soğutma suyu ceketlerinin optimizasyonunda kullanılabilmesi belirtilmiştir. Su ceketini, silindir gömleği iç kısmı ve yanma odasının üst kısmındaki sıcaklık dağılımları, üçüncü tip sınır koşulu ve bir boyutlu modele dayalı bir yazılım kullanılarak elde edilen sınır koşulları kullanılarak elde edilmiştir. Wang vd. (Wang et al., 2021) silindir gömlekleri etrafındaki soğutma suyu akışının, sıcaklık dağılımı ve termal deformasyon üzerindeki etkisini ortaya koymuşlardır. Bunun için bir dizel motorun simülasyon modeli ABAQUS paket programında geliştirilerek analizler yapılmıştır. Paket programlarla yapılan çalışmalara ek olarak Trung ve Trong (Trung and Trong, 2022), Hohenberg korelasyonunu kullanarak farklı alkol-dizel karışımları kullanılarak çalıştırılan bir dizel motorda silindir gömleklerinde meydana gelen ısı transferi ve sıcaklık dağılımlarını araştırmışlardır. Trung (Trung, 2021(b)), eski bir dizel motoru turboşarjlı bir motora dönüştürürken ısı transfer korelasyonunun silindir gömleklerindeki sıcaklık dağılımına etkisini incelemiştir. Woschini ve Hohenberg korelasyon denklemlerini kullanarak elde edilen sonuçları deneysel sonuçlar ile karşılaştırmışlardır.

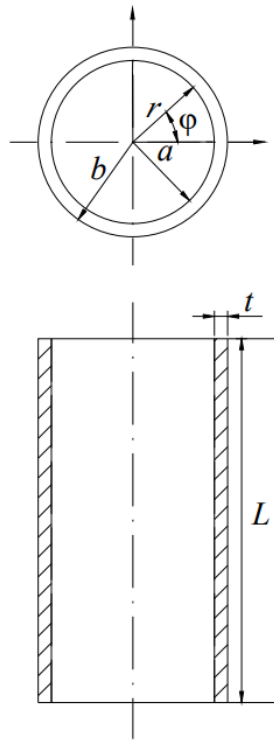
Sıkı geçme yöntemi ile silindir bloklarına yerleştirilen kuru silindir gömlekleri silindirik yapıdadır (Şekil 1). Kısa silindirlerde ısı gerilmeleriyle ilgili literatürde birçok çalışma mevcuttur. Shojaefard ve Najibi (Shojaefard and Najibi, 2014(a)) geçici düzgün olmayan eksenel simetrik termal yüklere tabi tutulan içi boş iki boyutlu işlevsel olarak derecelendirilmiş kalın silindir için lineer olmayan geçici rejimde ısı transferi analizi geliştirmişlerdir. Elde edilen sıcaklık dağılımının doğruluğunu arttırmak için kademeli sonlu elemanlar yöntemi ve ikinci dereceden Lagrange şekil fonksiyonunu birlikte kullanmışlardır. Geçici termal yüklemeye koşullarına maruz kalan sonlu uzunluk ve sıcaklık ile değişen malzeme özelliklerine sahip kalın içi boş 2D fonksiyonel olarak derecelendirilmiş bir silindirin doğrusal olmayan geçici ısı iletimi analizi Shojaefard ve Najibi (Shojaefard and Najibi, 2014(b)) tarafından sunulmuştur. Sonlu uzunluğa sahip kalın içi boş 1D-FDM silindirin doğrusal olmayan geçici termal gerilme analizi, dereceli sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak Najibi, Alizadeh ve Ghazifard (Najibi, Alizadeh and Ghazifard, 2021) tarafından incelenmiştir. Can ve Keles (Can ve Keles, 2023) seramik ve metalin üssel olarak derecelendirildiği düşünülen bir silindir ve küredeki anlık sıcaklık dağılımı ve ısı akısını tepkisini Tamamlayıcı fonksiyonlar yöntemini kullanarak sayısal olarak incelemiştir. Fourier olmayan ısı iletim teorisinin kullanıldığı bu çalışmada problem Laplace uzayında tamamlayıcı fonksiyonlar yöntemi kullanılarak çözülmüştür. Problemin ters Laplace dönüşümü Durbin yöntemi kullanılarak sayısal olarak gerçekleştirilmiştir. Homojensizlik parametrelerinin sıcaklık dağılımı, ısı akısı ve ısı dalga hızı üzerinde etkisi olduğu sonucu varmışlardır.

Bu çalışmada sınırlarında sıcaklığın doğrusal değiştiği varsayılan alüminyum ve SiC'den oluşan kompozit bir silindir gömleğinde kararlı durumdaki iki boyutlu sıcaklık dağılımı pseudospektral Chebyshev yöntemi kullanılarak incelenmiştir. Sabit sıcaklık sınır koşulu altında iki boyutlu pseudospektral Chebyshev yöntemi kullanılarak elde edilen sayısal sonuçlar analitik çözümlerle karşılaştırılarak yöntemin doğruluğu gösterilmiştir. Silindir gömleğindeki sıcaklık dağılımlarının iki boyutlu ve üç boyutlu grafikleri verilmiş ve tartışılmıştır. Elde edilen sayısal sonuçlar,

pseudospektral Chebyshev yönteminin bu tür problemlerin çözümlerinde alternatif olarak kullanılabileceği gösterilmiştir.

MATERYAL VE YÖNTEM

SiC takviyelerin Al matris içerisinde homojen olarak dağıldığı, aksel simetrik ısı yüküne maruz kalan bir silindir gömleği (Şekil 2) ele alalım. Isıl dengeye ulaştığı düşünülen silindir gömleğinin iç ve dış kısmında z ekseninde boyunca ve gömleğin alt ve üst kısmında r ekseninde boyunca sıcaklıkların sabit olduğu varsayılmıştır. Ayrıca silindir gömleğinde herhangi bir iç ısı üretimi ya da tüketimi olmayıp sıcaklık değişimi ile mekanik ve ısıl özelliklerinin değişmediği varsayılmıştır. Şekil 2’de verilen silindir gömleğinde radyal yönde herhangi bir noktadaki yarıçap “ r ” ile temsil edilmekte olup, “ a ” iç çapı “ b ” ise silindir gömleğinin dış çapını temsil etmektedir. “ t ” silindir gömleğinin kalınlığını ifade ederken “ z ” ise silindir gömleğinin herhangi bir noktasındaki aksel mesafeyi göstermektedir. Ayrıca silindir gömleğinin üst yüzeyi ile alt yüzeyi arasındaki mesafe “ L ” ile ifade edilmiştir. Bu çalışmada kullanılan silindir gömleğinin boyutları iç ve dış çapı sırası ile 74 ve 86 mm boyu ise 165 mm olacak şekilde Ertek’in çalışmasından uyarlanmıştır (Ertek, 2020).



Şekil 2. Silindir Gömleği

Halpin-Tsai Malzeme Modeli

Farklı mekanik ve ısıl özelliklere sahip en az iki malzemenin birbiri içinde çözünmeden karışması sonucu oluşan kompozit malzemelerdeki mekanik ve ısıl özellikleri belirlemek için bir çok mikromekanik model olup (Vignoli et al., 2019), parçacık takviyeli kompozitler ve parçacık takviyeli kompozitin bir uygulaması olan Fonksiyonel Derecelendirilmiş Malzemeler (FGM)’ler için Halpin-Tsai oldukça iyi sonuçlar vermektedir (Arslan, Mack and Apatay, 2021). Halpin-Tsai parçacık takviyeli kompozit malzemelerde termal iletkenlik, elastisite modülü, lineer termal genişleme ve Poisson oranı gibi malzeme özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan bir yöntem olup, deneysel verilerden elde edilen değerlerin birleştirilmesi ve oluşturulan eğriye uydurulması ile elde edilen ampirik bir malzeme modelidir (Halpin, 1969; Halpin, 1992; Gibson R.F. 2016;). Halpin-Tsai modeline göre malzeme özelliklerinin belirlenmesinde kullanılan formül

$$\frac{p}{p_m} = \frac{1 + \xi \eta V_f}{1 - \eta V_f} \quad (1)$$

şeklinde olup, η ve ξ aşağıdaki tanımlanmaktadır.

$$\eta = \frac{p_f - 1}{\frac{p_m}{p_f + \xi}}, \quad \xi = 2(l/m) \quad (2)$$

Burada p parçacık takviyeli kompozitte herhangi bir malzeme özelliğini, p_f fiberin özelliğini ve p_m matris malzemesinin özelliğini ifade etmektedir. ξ fiber geometrisine bağlı bir parametre olup l fiberin uzunluğunu m ise fiberin genişliğini ifade eder. V_f fiberin hacimsel oranını ifade ederken V_m matrisin hacimsel oranını ifade etmektedir. Fiberin ve matrisin hacimsel oranları ise aşağıdaki gibi tanımlanmıştır (Shariyat, 2012; Eker vd., 2021).

$$V_f = \left(\frac{r-a}{b-a}\right)^n, \quad V_m = 1 - V_f \quad (3)$$

n hacimsel oran indeksi olup $n \geq 0$ dır. Hacim oranı indeksi, fonksiyonel olarak derecelendirilmiş silindirik parçaların iç ve dış duvarlarında kullanılan malzeme miktarının yoğunluğunu kontrol etmek için kullanılan bir parametredir. Hacim oranı indeksi arttıkça iç duvarda kullanılan malzeme oranı artmakta, azaldıkça dış duvarda kullanılan malzeme oranı artmaktadır.

Sıcaklık Dağılımın Analitik İncelenmesi

Isıl dengeye ulaşmış, iç ısı üretimin ve tüketiminin olmadığı, çevresel olarak simetrik olan silindirik yapıdaki bir silindir gömleğindeki enerji denge denklemi aşağıdaki gibidir (Arpacı, 1966; Carslaw, 1959; Jacob, 1949).

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(kr \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) = 0 \quad (4)$$

Bu denklemde geçen “ k ” ısı iletim katsayısını göstermektedir. Silindir gömleğinde metal matris olarak kullanılan alüminyumun ısı iletkenlik katsayısı 222 W/(mK) iken seramik takviyenin ısı iletkenlik katsayısı 39 W/(mK) dir (Callister, 2009). Bu çalışmada analitik çözüm yapılırken silindir gömleğinin iç ve dış kısmında z eksenini boyunca ve gömleğin alt ve üst kısmında r eksenini boyunca sıcaklıkların sabit olduğu varsayılmıştır. Bu sınır koşulları literatürde bulunan çalışmadaki (Ertek, 2020) sınır koşullarının ortalaması alınarak aşağıdaki gibi elde edilmiş ve bu sınır koşulları birinci sınır koşulu durumu olarak tarif edilmiştir. Sıcaklığın sınır koşullarında lineer olarak değiştiği durum ise ikinci sınır koşulu durumu olarak tarif edilmiştir. İkinci sınır koşulunda silindirin uç noktalarındaki değerler yine literatürden alınmıştır (Ertek, 2020). Buna göre birinci sınır koşulu durumu

$$T(r, 0) = 418 \text{ (K)}, \quad T(r, l) = 375 \text{ (K)} \quad (5)$$

$$T(a, z) = 423 \text{ (K)}, \quad T(b, z) = 370 \text{ (K)}$$

şeklinde alınırken ikinci sınır koşulu durumu ise

$$T(r, 0) = 453 + \frac{70(r-a)}{a-b} \text{ (K)}, \quad T(r, l) = 393 + \frac{35(r-a)}{a-b} \text{ (K)} \quad (6)$$

$$T(a, z) = 453 - \frac{60z}{L} \text{ (K)}, \quad T(b, z) = 383 - \frac{30z}{L} \text{ (K)}$$

şeklinde alınmıştır. Metal matris olarak alüminyum, seramik takviye olarak ise SiC'ün kullanıldığı silindirde, malzeme özellikleri, seramik ve metal malzemelerin özellikleri kullanılarak Halpin-Tsai yöntemi ile elde edilecektir. (4) numaralı diferansiyel denklemdeki türevler alınıp denklem düzenlenirse enerji denge denklemi

$$k \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{k}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + k \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = 0 \quad (7)$$

şeklinde elde edilir. (7) numaralı denklemde verilen diferansiyel denklem homojen olmasına rağmen (5) numaralı eşitlikte verilen uzay değişkenlerinde homojen değildir. Bu sınır şartlarından herhangi bir tanesi homojen sınır şartına dönüştürülerek diferansiyel denklem, değişkenlere ayırma yöntemi kullanılarak çözülebilir. Bu nedenle aranan $T(r, z)$ sıcaklık değeri aşağıdaki şekilde iki parçaya ayrılır.

$$T(r, z) = \theta_1(r, z) + \theta_2(z) \quad (8)$$

Bu sıcaklık ifadesi (7) numaralı diferansiyel denklemde yerine yazılırsa

$$k \frac{d^2 \theta_2}{dz^2} = 0 \quad (9)$$

$$\theta_2(0) = 418 \text{ K}, \quad \theta_2(l) = 375 \text{ K} \quad (10)$$

şeklinde bir adi diferansiyel denklem ile

$$k \frac{\partial^2 \theta_1}{\partial r^2} + \frac{k}{r} \frac{\partial \theta_1}{\partial r} + k \frac{\partial^2 \theta_1}{\partial z^2} = 0 \quad (11)$$

$$\theta_1(r, 0) = 0, \quad \theta_1(r, l) = 0 \quad (12a)$$

$$\theta_1(a, z) = 423 - \theta_2(z), \quad \theta_1(b, z) = 370 - \theta_2(z) \quad (12b)$$

şeklinde homojen bir kısmi diferansiyel denkleme elde edilebilir. Adi diferansiyel denklemin (9) sınır koşulları (10) altındaki çözümü

$$\theta_2(z) = -\frac{43}{l}z + 418 \quad (13)$$

şeklinde elde edilir. Kısmi diferansiyel denklem (11) ve bir yöndeki sınır koşulları (12) homojen olduğundan θ_1 ifadesi

$$\theta_1(r, z) = R(r)Z(z) \quad (14)$$

şeklinde değişkenlerine ayrılabilir. Bu ifade (14), kısmi diferansiyel denklemde (11) yerine yazılırsa,

$$\frac{1}{R} \frac{d^2 R}{dr^2} + \frac{1}{Rr} \frac{dR}{dr} = -\frac{1}{Z} \frac{d^2 Z}{dz^2} \quad (15)$$

gibi sol tarafı r sağ tarafı ise z bağımsız değişkenine bağlı bir denklem elde edilir. Bu nedenle bu ifadenin sonucu bir sabit sayıya eşit olmalıdır. Sabit ifade λ^2 olarak seçilirse

$$\frac{1}{R} \frac{d^2 R}{dr^2} + \frac{1}{Rr} \frac{dR}{dr} - \lambda^2 = 0 \quad (16)$$

$$\frac{1}{Z} \frac{d^2 Z}{dz^2} + \lambda^2 = 0 \quad (17)$$

Adi diferansiyel denklemleri elde edilir. Değişken katsayılı lineer diferansiyel denklem olan (16) numaralı denklem Bessel fonksiyonuna indirgenmesi Kraus vd. (Kraus, Aziz and Welty, 2001) tarafından açıklanmış ve bu denklemin çözümü Bessel fonksiyonu formunda aşağıdaki gibi verilmiştir.

$$R(r) = D_1 I_0(\lambda r) + D_2 K_0(\lambda r) \quad (18)$$

(18) numaralı denklemde geçen I_0 sıfırıncı dereceden birinci tip modifiye Bessel fonksiyonunu K_0 ise sıfırıncı dereceden ikinci tip modifiye Bessel fonksiyonunu ifade etmektedir. (17) numaralı denklem sabit katsayılı lineer bir diferansiyel denklem olup çözümü aşağıdaki gibi verilmiştir.

$$Z(z) = E_1 \cos(\lambda z) + E_2 \sin(\lambda z) \quad (19)$$

Homojen sınır koşulları (12a) kullanılarak, E_1 ve λ sabitleri aşağıdaki gibi elde edilir.

$$E_1 = 0, \quad \lambda = \frac{n\pi}{l}, \quad n = 0, \mp 1, \mp 2, \dots \quad (20)$$

$R(r)$ ve $Z(z)$ fonksiyonları, θ_1 fonksiyonunda (14) yerine yazılırsa,

$$\theta_1(r, z) = \sum_{n=1}^{\infty} \left[A_n I_0 \left(\frac{n\pi}{l} r \right) + B_n K_0 \left(\frac{n\pi}{l} r \right) \right] \sin \left(\frac{n\pi}{l} z \right) \quad (21)$$

elde edilir. (12b) numaralı eşitlikte geçen r yönündeki sınır koşulları kullanılarak, A_n ve B_n sabitleri aşağıdaki gibi elde edilir.

$$A_n = -\frac{1}{n\pi} \left(\frac{K_0 \left(\frac{n\pi}{l} b \right) (10 - 96(-1)^n) - K_0 \left(\frac{n\pi}{l} a \right) (10(-1)^n - 96)}{I_0 \left(\frac{n\pi}{l} b \right) K_0 \left(\frac{n\pi}{l} a \right) - I_0 \left(\frac{n\pi}{l} a \right) K_0 \left(\frac{n\pi}{l} b \right)} \right) \quad (22)$$

$$B_n = -\frac{1}{n\pi} \left(\frac{I_0 \left(\frac{n\pi}{l} a \right) (10(-1)^n - 96) - I_0 \left(\frac{n\pi}{l} b \right) (10 - 96(-1)^n)}{I_0 \left(\frac{n\pi}{l} b \right) K_0 \left(\frac{n\pi}{l} a \right) - I_0 \left(\frac{n\pi}{l} a \right) K_0 \left(\frac{n\pi}{l} b \right)} \right) \quad (23)$$

aranan sıcaklık fonksiyonu (8)

$$T(r, z) = \sum_{n=1}^{\infty} \left[A_n I_0 \left(\frac{n\pi}{l} r \right) + B_n K_0 \left(\frac{n\pi}{l} r \right) \right] \sin \left(\frac{n\pi}{l} z \right) - \frac{43}{l} z + 418 \quad (24)$$

olarak bulunur.

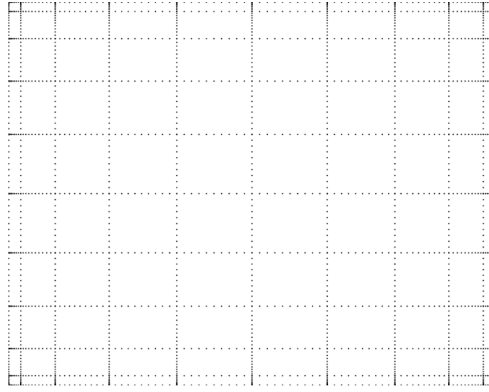
Pseudospektral Chebyshev Yöntemi ve Sıcaklık Dağılımın Sayısal İncelenmesi

Pseudospektral Chebyshev yöntemi, bir veya birden fazla bağımsız değişkene göre elde edilmiş diferansiyel denklemi doğrusal veya doğrusal olmayan denklem sistemine dönüştüren bir yöntemdir (Gottlieb, 1981; Trefethen, 2000; Bazan, 2008). Daha az sayıda nokta kullanarak yüksek hassasiyet elde etme prensibine dayanan bu yöntemdeki örgü noktaları, sınıra yakın bölgelerde orta noktalara göre daha sık olacak şekilde seçilir. Böylece sınır değer problemlerinin çözümünde diğer yöntemlere göre daha yüksek hassasiyet verir. Bu tanıma uyan, yani sınır noktalarında daha fazla örgü noktalarına sahip olan Chebyshev noktaları (Gauss- Lobatta noktaları)

$$r_j = \cos \left(\frac{j\pi}{N} \right), \quad j = 0, 1, 2, 3 \dots N \quad (25)$$

kullanılarak birinci dereceden Chebyshev diferansiyel matrisi D hesaplanabilir. Elde edilen Chebyshev diferansiyel matrisi ve vektörün sonlu sayıda çarpımı ile vektörün türevleri $T'(r_j) = (DT)_j, T''(r_j) = (D^2T)_j \dots$ yüksek hassasiyetle elde edilir. Burada $T = [T_0 \ T_1 \ \dots \ T_n]^T$, r_j noktalarındaki vektör verileridir. Chebyshev türev matrisinin hesaplama prosedürü ve m-dosyası Trefethen (Trefethen, 2000) tarafından verilmiş, bölüntüleme noktaları r_j sağdan sola numaralanmış ve $[-1, 1]$ aralığında tanımlanmıştır. Matlab m-dosyasında küçük bir revizyonla herhangi bir aralıktaki D türevleme matrisi hesaplanabilir.

Tek boyutlu problemlerin çözümünde kullanılacak yukarıdaki prosedüre ek olarak iki boyutlu problemlerin çözümünde de Chebyshev türevleme matrisi D istenilen yönde elde edilerek o yöndeki vektörlerin türevleri yüksek hassasiyet ile elde edilebilir. Kısmi diferansiyel denklemlerle sınır değer problemlerinin çözümünde Pseudospektral Chebyshev yöntemini kullanabilmek için Chebyshev türevleme matrisi D 'nin her bağımsız değişken için ayrı ayrı oluşturulması gerekmektedir. Bu şekilde oluşturulan örgü sistemine tensörlü çarpım örgüsü adı verilmektedir (Trefethen, 2000).



Şekil 3. İki Boyutlu Tensör Örgü Noktalarının Dağılımı

Bu çalışmada sunulan pseudospektral Chebyshev yönteminde, Gauss-Lobatto noktaları kullanılmaktadır. Gauss-Lobatto noktaları kullanılarak oluşturulan örgü noktalarının dağılımı bir boyutlu problemlerde, eşit aralıklı dağılıma göre $2/\pi$ kat orta bölgelere yoğunlaşmış olup, bu durum d boyut için $(2/\pi)d$ kat olmaktadır. Bundan dolayı örgü noktalarının büyük çoğunluğunun sınıra yakın konumlandırılması nedeni ile sınır değer problemlerinin çözümünde eşit aralıklı dağılıma göre daha hassas sonuçlar üretmektedir (Trefethen, 2000).

Spektral örgü noktalarında Chebyshev türevleme matrislerini kullanılarak bağımsız değişkenlere göre türev matrislerini elde edebilmek için doğrusal cebir konularından olan tensörel çarpım (Knocker çarpım) kullanılması gerekir (Trefethen, 2000). Sistemin sıcaklık dağılımını modelleyen homojen kısmi diferansiyel denklem (7)

$$L[T] = kT_{rr} + \frac{k}{r}T_r + kT_{zz} \quad (26)$$

ele alınsın. Bu denklem r ve z yönünde birbirinden bağımsız şekilde oluşturulan Chebyshev türevleme matrisi " D " ve Knocker çarpım kullanılarak ayrıklaştırılır ve sağ taraf denklemini ile lineer operatör " L " kullanılarak bilinmeyen ve aranan ifade olan " T " elde edilir.

$$T = [T_{rz}] = [T(r_i, z_j)], \quad 0 \leq i \leq N, \quad 0 \leq j \leq M$$

şeklinde olsun. (26) numaralı eşitlikte geçen " T_r " ve " T_{rr} " T 'nin r yönündeki birinci ve ikinci türevlerini ifade ederken " T_{zz} " z yönündeki ikinci derece türevlerini ifade etmektedir. " D_r ve D_z " sırası ile r ve z yönünde elde edilmiş olan ve birinci derece türeve karşılık gelen Chebyshev türevleme matrisleri olsun. Buna göre r ve z yönündeki ikinci derece türeve karşılık gelen Chebyshev türevleme matrisleri sırası ile $D_r^2 = D_r D_r$ ve $D_z^2 = D_z D_z$ olmak üzere çözüm matrisindeki r yönündeki ikinci derece türevleme matrisi (Trefethen, 2000)

$$D_r^2 T = D_r^2 \begin{bmatrix} T_{:,0} & \dots & T_{:,z} \\ \downarrow & & \downarrow \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_r^2 T_{:,0} & \dots & D_r^2 T_{:,z} \\ \downarrow & & \downarrow \end{bmatrix} \quad (27)$$

şeklinde olup z yönündeki türevleme matrisi ise

$$D_z^2 T^T = D_z^2 \begin{bmatrix} T^T_{:,0} & \dots & T^T_{:,r} \\ \downarrow & & \downarrow \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_z^2 T^T_{:,0} & \dots & D_z^2 T^T_{:,r} \\ \downarrow & & \downarrow \end{bmatrix} \quad (28)$$

şeklinde elde edilir. Herhangi iki matris çarpımının transpozu, bu matrislerin transpozlarının ters sıradan çarpımına eşittir. Buna göre

$$(D_z^2 T^T)^T = T(D_z^2)^T$$

olarak yazılabilir. A ve B , $M \times M$ ve $N \times N$ boyutunda herhangi iki farklı kare matris olmak üzere $vec(AYB) = (B^T \otimes A)vec(Y)$ özelliği kullanılarak r yönü için

$$\text{vec}(D_r T) = \text{vec}(D_r T I_z) = (I_z \otimes D_r) \text{vec}(T) \quad (29)$$

$$\text{vec}(D_r^2 T) = \text{vec}(D_r^2 T I_z) = (I_z \otimes D_r^2) \text{vec}(T) \quad (30)$$

ve z yönü içinde

$$\text{vec}(T (D_z^2)^T) = \text{vec}(I_r T (D_z^2)^T) = (D_z^2 \otimes I_r) \text{vec}(T) \quad (31)$$

elde edilir. (29-31) denklemlerinde geçen " I_r " ve " I_z " sırası ile r ve z yönündeki birim matrisleri ifade etmektedir. Buna göre (26) numaralı denklemin sağ tarafı

$$\text{vec}(D_r^2 T + \frac{1}{r} D_r T + T (D_z^2)^T) = \left(I_z \otimes D_r^2 + \left(I_z \otimes \frac{1}{r} \right) (I_z \otimes D_r) + D_z^2 \otimes I_r \right) \text{vec}(T) \quad (32)$$

şeklinde elde edilir. Böylece (7) numaralı denklemin doğrusal matris operatörü aşağıdaki gibi elde edilir.

$$L = k \left(I_z \otimes D_r^2 + \left(I_z \otimes \frac{1}{r} \right) (I_z \otimes D_r) + D_z^2 \otimes I_r \right) \quad (33)$$

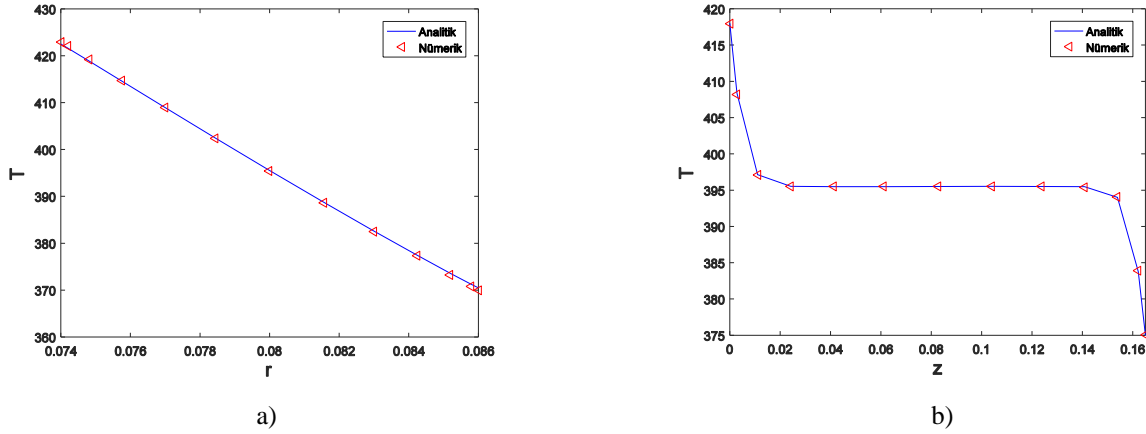
İkinci dereceden sıcaklığa bağlı kısmi diferansiyel denklem (7) Klocker çarpım ve Chebyshev türevleme matrisleri kullanılarak aşağıdaki gibi ayrıştırılabilir.

$$LT = 0 \quad (34)$$

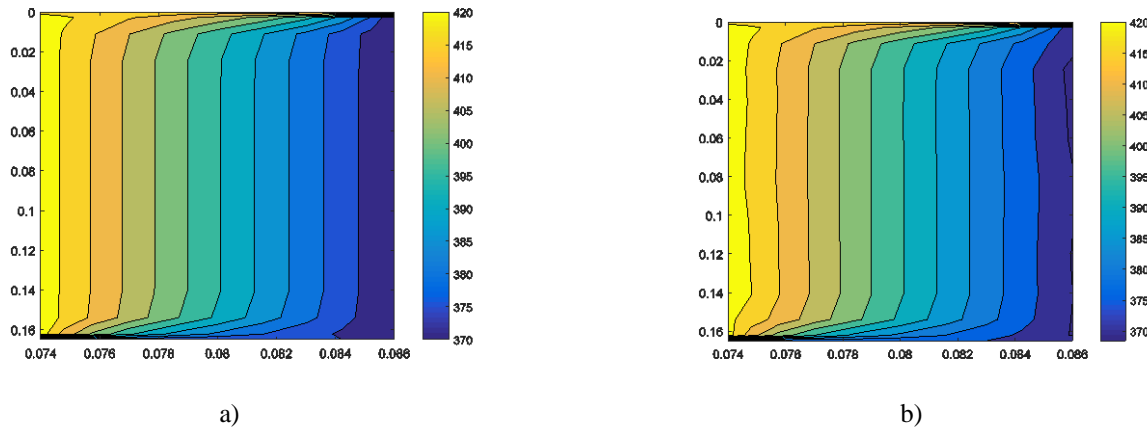
Bu sistem, lineer matris operatörü (33) kullanılarak sınır koşullarında (6) çözümlerse, ikinci sınır koşulu için aşikar olmayan çözümler elde edilmiş olur.

BULGULAR VE TARTIŞMA

SiC takviyelerin Al matris içerisinde homojen olarak dağıldığı, eksenel simetrik ısı yüklerine maruz kalan ve ısı dengeye ulaştığı düşünülen kompozit bir silindir gömleğindeki sıcaklık dağılımı pseudospektral Chebyshev yöntemi kullanılarak sayısal olarak incelenmiştir. Silindir gömleğinde herhangi bir iç ısı üretimi ya da tüketimi olmayıp sıcaklık değişimi ile mekanik ve ısı özelliklerinin değişmediği varsayılmıştır. Sabit sıcaklık sınır koşulu altında iki boyutlu pseudospektral Chebyshev yöntemi kullanılarak elde edilen sayısal sonuçlar r ve z eksenin orta noktalarında analitik çözümle karşılaştırılarak yöntemin doğruluğu Şekil 4'de gösterilmiştir. Şekil 5'de ise silindir gömleğin tamamındaki sıcaklık dağılımları hem sayısal hem de analitik olarak sunulmuştur. Hem r eksenini hem de z eksenini boyunca 12 nokta kullanılarak elde edilen analitik ve sayısal sonuçlar arasındaki en büyük bağıl hata r ve z eksenini için sırası ile %0.1264 ve %0.05 dir. Şekil 5'de verilen analitik ve sayısal sonuçlar incelendiğinde eksenel yön boyunca sıcaklık dağılımını sınırlara yakın bölgelerde değişiyor olsa da eksenel yönün büyük bir kısmında sıcaklık değişimi olmamaktadır. Bu durum analitik çözümün elde edilmesi için kullanılan sınır koşulları ile ilgidir. Daha karmaşık veya daha gerçekçi sınır koşulları sayısal çözüm kullanılarak elde edilebilir.

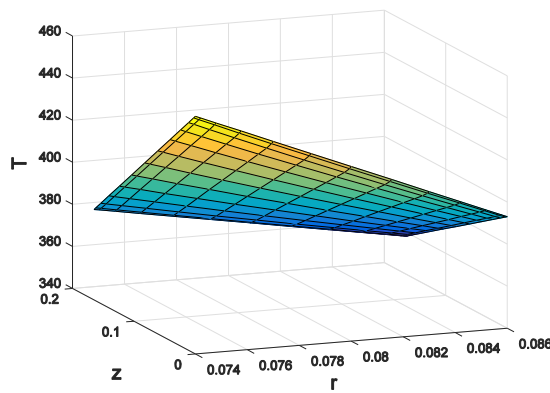


Şekil 4. z Eksenine Orta Noktasında r Eksenine Boyunca (a) ve r Eksenine Orta Noktasındaki z Eksenine Boyunca (b) Sıcaklık Dağılımı

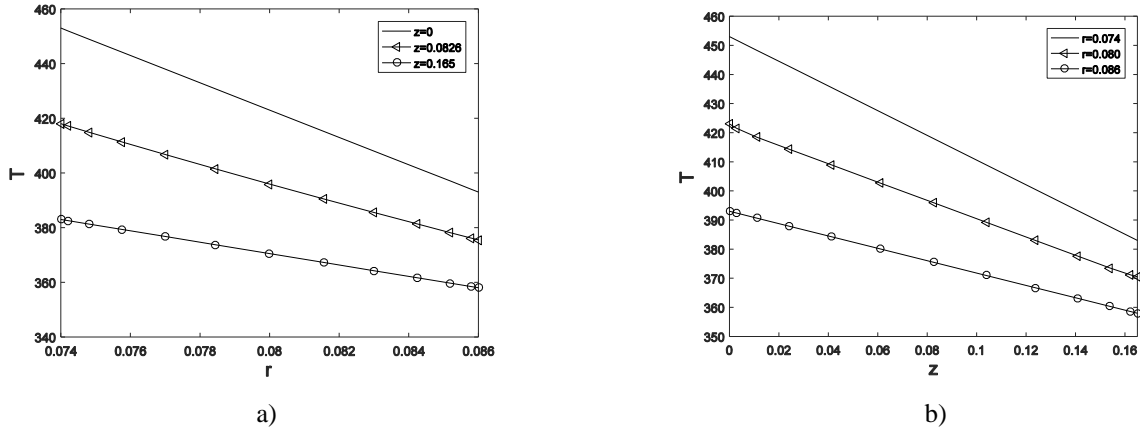


Şekil 5. Silindir Gömleği Sıcaklık Dağılımı Analitik Çözüm (a) ve Sayısal Çözüm (b)

İkinci tip sınır koşulunda elde edilen sıcaklık dağılımı ise Şekil 6'da üç boyutlu grafik olarak sunulmuştur. Farklı r ve z noktalarında r ve z eksenine boyunca sıcaklık dağılımları Şekil 7'de verilmiştir. Şekil 7a ve 7b incelendiğinde silindir gömleğindeki r eksenine boyunca sıcaklık farkı silindirin üst kısmından alt kısmına gidildikçe, z eksenine boyunca da sıcaklık farkı silindirin iç kısmından dış kısmına gidildikçe azaldığı gözlemlenmiştir.



Şekil 6. Silindir Gömleğindeki Sıcaklık Dağılımı (İkinci Sınır Koşulu)



Şekil 7. Silindir Gömleğinde Verilen Bazı Noktalardaki r Eksenini (a) ve z Eksenini (b) Boyunca Sıcaklık Dağılımı

SONUÇ

Bu makalede, SiC'ün takviye Al'nın ise matris olarak kullanıldığı kompozit bir silindir gömleğindeki sıcaklık dağılımı sabit sıcaklık sınır şartı altında analitik ve numerik olarak incelenmiştir. Seramik takviyenin metal matris içinde homojen olarak dağılması, silindir gömleğinde kararlı duruma ulaşılması ve sabit sıcaklık sınır koşulları alınması nedeni ile kompozit malzemenin ısı iletim katsayısı değerinin sıcaklık dağılımı üzerine etkisi yoktur. Buna rağmen problemin geçici rejimde incelenmesi ya da karışık tip sınır koşullarında incelenmesi durumunda ısı iletimlik değeri sıcaklık dağılımı üzerine etkisi olmaktadır. Bu sebeple ısı iletim katsayısının belirlenebilmesi için Halpin-Tsai malzeme modeli bu makalede anlatılmıştır. Bu çalışma neticesinde

- Pseudospektral Chebyshev yönteminin, kompozit silindir gömleklerinde sıcaklık dağılımının belirlenmesinde alternatif olarak kullanılabilmesi gösterilmiştir. Daha karmaşık veya gerçeğe yakın sınır koşullarının kullanıldığı problemlerin çözümünde hızlı ve etkili olduğu kanaatine varılmıştır.
- Sonlu uzunlukta Fourier Serisi ile elde edilen analitik çözümlerde bir miktar kabul edilebilir hata oluşur. Bu koşullar altında Pseudospektral Chebyshev yöntemi ile elde edilen sonuçların maksimum bağıl hatası %0.1264 mertebesinde dir.

KAYNAKLAR

Arpaci, V. S. (1966). *Conduction Heat Transfer*, Addison-Wesley, Reading, MA.

Arslan, E., Mack, W., & Apatay, T. (2021), Thermo-mechanically loaded steel/aluminum functionally graded spherical containers and pressure vessels. *Int. J. Press. Vessels Pip.*, 191, 104334. <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2021.104334>

Bazan, F.S.V. (2008). Chebyshev Pseudospectral Method for Computing Numerical Solution of Convection-Diffusion Equation. *Applied Mathematics and Computation*, 200(2), 537-546. <https://doi.org/10.1016/j.amc.2007.11.026>

Bi, Y., Wang, P., Xiang, R., Wen, J., Lei, J., Shen, L., & Xin, Q. (2021). Numerical investigation on the operating characteristics of the cylinder liners of a turbocharged diesel engine. *Sādhanā*, 46, 1-14. <https://doi.org/10.1007/s12046-021-01679-0>

Callister Jr, W. D., & Rethwisch, D. G. (2009). *Material science and engineering an introduction (8th edition)*. John Wiley & Sons.

Can, N., & Keles, I. (2023). A practical jointed approach to transient hyperbolic heat conduction of FGM cylinders and spheres. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 37(3), 1223-1231. <https://doi.org/10.1007/s12206-023-0209-z>

Carslaw, H. S., & Jaeger, J. C. (1959). *Conduction of Heat in Solids, (2nd edition)*. Oxford University Press, New York.

- Firoozabadi, M. D., Shahbakhti, M., Koch, C.R., & Jazayeri, S.A. (2013). Thermodynamic control-oriented modeling of cycle-to-cycle exhaust gas temperature in an HCCI engine. *Applied Energy*, 110, 236–243. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.04.055>
- Eker, M., Yarımpabuç, D., Yıldırım, A., & Celebi K. (2021). Elastic Solutions Based On The Mori–Tanaka Scheme For Pressurized Functionally Graded Cylinder. *Journal of Applied Mathematics and Computational Mechanics* 19(4), 24–37. <https://doi.org/10.17512/jamcm.2020.4.05>
- Ertek, C., & Civelek, F. (2020). Comparison of functionally graded and ungraded cylinder liners with finite element analysis. *Cumhuriyet Science Journal*, 41(2), 506–520. <http://dx.doi.org/10.17776/cs.j.632197>
- Gibson, R.F. (2016). *Principles of composite material mechanics (Fourth Edition)*. CRC Press, Boca Raton,
- Gottlieb, D. (1981). The Stability of Pseudospectral-Chebyshev Methods, *Mathematics of Computation*, 36(153), 107-118. ISSN 1088-6842 (online) ISSN 0025-5718 (print)
- Gustof, P., & Hornik, A. (2008). Determination of the temperature distribution in the wet cylinder sleeve in turbo Diesel engine. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 27(2), 159-162. http://jamme.acmsse.h2.pl/papers_vol27_2/27211.pdf
- Halpin, J.C. (1969). Stiffness and expansion estimates for oriented short fiber composites. *Journal of Composite Materials*, 3(4), 732-734. <https://doi.org/10.1177/002199836900300419>
- Heywood, J.B. (2008). *Internal combustion engine Fundamentals (Second Edition)*. McGraw-Hill International Editions, London.
- Halpin, J.C. (1992). *Primer on Composite Materials Analysis Second Edition, Revised*, CRC Press, Boca Raton, Florida. <https://doi.org/10.1201/9780203742235>
- Holger, P., Worret, R., & Spicher, U. (2001, July). Numerical analyses of the combustion process in spark ignition engine. *In The fifth international symposium on diagnostics and modelling of combustion in internal combustion engines*, Nagaya.
- Jacob, M. (1949). *Heat Transfer*, John Wiley and Sons, New York.
- Kraus, A.D., Aziz, A., & Welty, J.R. (2001). *Extended Surface Heat Transfer*. John 155 Wiley and Sons, New York.
- Lapuerta, M., Armas, O., & Bermúdez, V. (2000). Sensitivity of diesel engine thermodynamic cycle calculation to measurement errors and estimated parameters. *Applied Thermal Engineering*, 20(9), 843-861. [https://doi.org/10.1016/S1359-4311\(99\)00069-1](https://doi.org/10.1016/S1359-4311(99)00069-1)
- MAHLE GmbH, (2016.). *Cylinder Components Properties, applications, materials (Second Edition)*. Springer, Stuttgart, Germany.
- Najibi, A., Alizadeh, P., & Ghazifard, P. (2021). Transient thermal stress analysis for a short thick hollow FGM cylinder with nonlinear temperature-dependent material properties. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 1-12. <https://doi.org/10.1007/s10973-020-10442-2>
- Rakopoulos, C. D., & Mavropoulos, G. C. (1998). Components heat transfer studies in a low heat rejection DI diesel engine using a hybrid thermostructural finite element model. *Applied thermal engineering*, 18(5), 301-316. [https://doi.org/10.1016/S1359-4311\(97\)00055-0](https://doi.org/10.1016/S1359-4311(97)00055-0)
- Roy, S., Ganesh, N., Kumarasamy, A., & Viswanathan, P. (2020). Thermomechanical Analysis of a Cylindrical Liner. *In Advances in Engineering Design and Simulation: Select Proceedings of NIRC 2018* (pp. 33-40). Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-13-8468-4_3
- Richardson, D. E. (2000). Review of power cylinder friction for diesel engines. *J. Eng. Gas Turbines Power*, 122(4), 506-519. <https://doi.org/10.1115/1.1290592>
- Shariyat, M. (2012). Nonlinear transient stress and wave propagation analyses of the FGM thick cylinders, employing a unified generalized thermoelasticity theory, *International Journal of Mechanical Sciences*, 65(1), 57–68. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2012.09.001>
- Shojaeefard, M. H., & Najibi, A. (2014a). Nonlinear transient heat conduction analysis of hollow thick temperature-dependent 2D-FGM cylinders with finite length using numerical method. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 28, 3825-3835. <https://doi.org/10.1007/s12206-014-0846-3>

Shojaeefard, M. H., & Najibi, A. (2014b). Nonlinear transient heat conduction analysis for a thick hollow 2D-FGM cylinder with finite length. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 39, 9001-9014. <https://doi.org/10.1007/s13369-014-1403-1>

Timoshenko, S.P., & Goodier, J.N. (1970) *Theory of Elasticity*. McGraw-Hili, New York.

Trefethen, L.N. (2000). *Spectral Methods in Matlab*. SIAM, Philadelphia, PA.

Trung, K. N. (2021a). The temperature distribution of the wet cylinder liner of V-12 engine according to calculation and experiment. *Journal of Thermal Engineering*, 7(Supp 14), 1872-1884. <https://doi.org/10.18186/thermal.1051265>

Trung, K. N. (2021b). Effect of heat transfer correlation on wet cylinder liner temperature distribution when converting an old engine into a turbocharged engine. *Archives of Thermodynamics*, 42(3). <https://doi.org/10.24425/ather.2021.138114>

Trung, K. N., & Trong, Q. N. (2022). The Cylinder Liner Temperature Distribution Evaluation of a Diesel Engine Operating with M10, E10, and B10 Fuels. *International Journal of Heat & Technology*, 40(1). <https://doi.org/10.18280/ijht.400133>

Yamagata, H. (2005). *The science and technology of materials in automotive engines*. Elsevier.

Vignoli, L. L., Savi, M. A., Pacheco, P. M., & Kalamkarov, A. L. (2019). Comparative analysis of micromechanical models for the elastic composite laminae. *Composites Part B: Engineering*, 174, 106961. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.106961>

Wang, G. X., Chen, H. B., Yuan, Z. C., & Lu, W. (2012). Numerical Study on Three-Dimensional Steady-State Temperature Field of a Gasoline Engine. *Advanced Materials Research*, 569, 610-614. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.569.610>

Wang, X., & Stone, C. R. (2008). A study of combustion, instantaneous heat transfer, and emissions in a spark ignition engine during warm-up. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 222(4), 607-618. <https://doi.org/10.1243/09544070JAUTO610>



Kahramanmaraş Sütçü İmam University

Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 19.10.2023
Kabul Tarihi : 15.01.2024

Received Date : 19.10.2023
Accepted Date : 15.01.2024

EKLEMELİ İMALAT YÖNTEMİYLE ÜRETİLEN ABS CIVATA NUMUNESİNİN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

ABS BOLT SAMPLE FABRICATED BY ADDITIVE MANUFACTURING METHOD INVESTIGATION OF MECHANICAL PROPERTIES

Muhammed Tayyip KOÇAK^{1,2} (ORCID: 0000-0003-2276-2658)
*Mehmet Said BAYRAKLILAR*³ (ORCID: 0000-0002-5365-4441)
Osman ÜLKİR^{4*} (ORCID: 0000-0002-1095-0160)

¹ Siirt Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Siirt, Türkiye

² İstanbul Sağlık ve Teknoloji Üniversitesi, Yazılım Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

³ Siirt Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Siirt, Türkiye

⁴ Muş Alparslan Üniversitesi, Elektrik ve Enerji Bölümü, Muş, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Osman ÜLKİR, o.ulkir@alparslan.edu.tr

ÖZET

Bu çalışmada, eklemeli imalat (Eİ) yöntemiyle üretilen civata numunesinin boyutsal doğruluğu ve elastisite modülü hesaplanmıştır. Basılı civata örneğinin boyutu, etkin elastisite modülü ve bilgisayar destekli tasarım (CAD) modeliyle karşılaştırılarak tespit edildi. Bu model, katı modelleme yazılımı olan SolidWorks kullanılarak tasarlandı. Numunelerin üretiminde Eİ yöntemlerinden olan eriyik yığıma modellemesi (EYM) kullanılmıştır. Bu yöntemde birçok termoplastik malzeme kullanılmakla birlikte, mevcut çalışmada civataların üretiminde akrilonitril bütadien stiren (ABS) tipi malzeme tercih edilmiştir. Gerçekleştirilen deneysel çalışmalar ile civata numunelerin tek eksenli çekme mukavemeti gözlemlenmiş ve gerilme-gerinim eğrileri kullanılarak esneklikleri tespit edilmiştir. Etkin elastisite modülü, ANSYS yazılımı kullanılarak bilgisayar simülasyonu ile sonlu elemanlar analizi yapılarak oluşturuldu. Gerçek zamanlı uygulanan çekme testi sonucunda en yüksek mukavemet değeri 35.258 MPa olarak ölçülmüştür. Deneysel çalışmalar neticesinde ölçülen çekme mukavemeti değerleri ile simülasyon sonuçlarının uyumlu olduğu tespit edilmiştir. Bu çalışma, gerçek dünya uygulamalarında kullanılmak üzere 3 boyutlu baskılı ABS civatalarının oluşturulması, test edilmesi ve optimize edilmesinin birçok yönünün anlaşılmasına yardımcı olacaktır.

Anahtar Kelimeler: Eklemeli imalat, EYM, sonlu elemanlar analizi, ABS.

ABSTRACT

In this study, the dimensional accuracy and elasticity modulus of the bolt sample produced by the additive manufacturing (AM) were calculated. The size of the printed bolt sample was determined by comparing it with the effective modulus of elasticity and the computer-aided design (CAD). This model was designed using SolidWorks, a solid modeling. Fused deposition modeling (FDM), one of the AM methods, was used in the fabrication of the samples. Although many thermoplastic materials are used in this method, acrylonitrile butadiene styrene (ABS) type material was preferred in the of bolts in the current study. The uniaxial tensile strength of the bolt samples was observed and their flexibility was determined using stress-strain. The effective elasticity module was created by performing finite element analysis with computer simulation using ANSYS. As a result of the real-time tensile test, the highest strength value was measured as 35.258 MPa. As a result of experimental studies, it was determined that the measured tensile strength values and simulation results were compatible. This work will help understand many aspects of creating, testing, and optimizing 3D printed ABS bolts for use in real-world applications.

Keywords: Additive manufacturing, FDM, finite element analysis, ABS.

To Cite: KOÇAK, M. T., BAYRAKLILAR, M. S., & ÜLKİR, O., (2024). EKLEMELİ İMALAT YÖNTEMİYLE ÜRETİLEN ABS CIVATA NUMUNESİNİN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 27(1), 269-277.

GİRİŞ

Eklemeli imalat (Eİ) veya 3D baskı olarak da bilinen dijital üretim teknolojisini kullanarak üç boyutlu bir nesne oluşturma süreci, ilgili bilgisayar destekli tasarım (CAD) modeliyle başlamaktadır. Ayrıca malzemenin sıralı olarak eklenmesiyle biriktirilmesini, sertleştirilmesini ve bağlanmasını içerir. Geleneksel üretim süreci, son kırk yılda 3D baskı sayesinde istikrarlı bir geçiş yaşadı (Jiang & Stringer, 2018; Singh vd., 2017). Tasarım ve modifikasyon özgürlüğü, ekonomik ve hızlı üretim ve üretim hatası olasılığının azalması gibi birçok fayda nedeniyle birçok endüstride karlı bir seçenek haline gelmiştir. Son derece karmaşık geometrileri nispeten az zorlukla oluşturma kapasitesi, 3D baskının geleneksel üretim süreçlerine göre temel avantajlarından biridir (Meng vd., 2020; Prakash vd., 2018).

Nihai ürünün ihtiyaçlarına bağlı olarak Eİ tekniklerinin farklı çeşitleri vardır. Bunları genel olarak sınıflandırmak için yedi kategori kullanılmaktadır: malzeme ekstrüzyonu, bağlama püskürtme, vat fotopolimerizasyonu, tabaka laminasyonu, yönlendirilmiş enerji biriktirme ve malzeme püskürtme (Goh vd., 2019; Liv vd., 2020; Magazine vd., 2022). Eriyik yığma modelleme (EYM) olarak da bilinen kaynaşmış filament üretimi (FFF), malzeme ekstrüzyonu şemsiyesi altına giren bir tür eklemeli imalat (Eİ) tekniğidir.

EYM teknolojisi, önceden belirlenmiş bir rota boyunca hangi erimiş malzemenin biriktirileceğini dikkatlice seçerek, parçaları katman katman oluşturur. Bitmiş fiziksel parçalar, termoplastik polimerlerin filamentleri kullanarak oluşturulur (Alafaghani vd., 2017; Nieto & Molina, 2019). EYM yazıcılar, üretilen parçaya bağlı olarak çok çeşitli filament malzemeleri kullanabilir. Malzemeler arasında akrilonitril bütadiyen stiren (ABS), plastik, poliaktik asit (PLA), polimer plastik, naylon, Polietilen tereftalat glikol (PETG), ahşap filamentler, metal filamentler ve daha fazlası bulunur.

Dünya çapında 3D yazıcıların en büyük kurulu tabanını oluşturan EYM, çoğu endüstride en yaygın olarak kullanılan teknolojidir (Cattenone vd., 2018; Chacon vd., 2017). Hâlihazırda kullanımda olan yöntemlerden biri olan EYM, şu anda yaygın olarak kullanılan bir 3 boyutlu yazdırma yöntemidir. Sürekli bir termoplastik filament, yarı akışkan bir duruma ısıtılır ve daha sonra bir dizi küçük malzeme boncuklarının biriktirilmesi için malzeme ekstrüzyonuna dayalı bir işlem olan EYM'de kullanılır (Turan vd., 2022). Basılı ürüne destek olarak hizmet etmek için, serbest bırakılabilir malzeme parçaları sıklıkla biriktirilir. EYM, bilimsel araştırmalarda güncel bir konu olmuştur. Bu araştırma makaleleri, sayısal simülasyonlar, çevresel etkiler, parametrelerin optimizasyonu ve işlem sonrası teknikler gibi EYM sürecinin önemli özelliklerini analiz etmiştir (Arif vd., 2018; Durao vd., 2019). Vahed vd. EYM kullanılarak işlenen ABS viskoelastik özelliklerini geliştirmek için bu araştırma, kısıtlı veri testlerinin kara kutu yapay zeka modellemesi ile entegre edilmesine ve ardından buluşsal optimizasyonun gerçekleştirilmesine dayanan iki aşamalı bir metodoloji önermiştir (Vahed vd., 2022). Süreç parametrelerinin önemini ölçmek için Lenth'in istatistiksel tekniği kullanıldı. EYM ortamlarının birleşik etkilerinde önemli derecede doğrusal olmama ve karmaşıklık gözlemlendi. Andrzejewski vd. (2022), sunulan araştırmanın odak noktası, üç farklı türde polimer dolgu maddesinin, EYM prosesi için tasarlanan yüksek kristalli PLA üzerindeki etkilerinin karşılaştırılmasıdır. Oluşturulan materyallerin etkililiğini belirlemek yapılan çalışmanın amacıydı. Ekstrüzyon birkaç farklı kompozit malzeme oluşturmak için kullanıldı. BC ve talk dolgu maddesi için izin verilen maksimum içerik ağırlıkça yüzde 20 ve MMT için ağırlıkça %5'ti. Hazırlanan numuneler üzerinde çekme, eğilme ve charpy testleri, termal analiz (DSC, DMTA), HDT/Vicat testleri ve yapı analizi dâhil olmak üzere derinlemesine malzeme analizleri yapıldı. Testin sonuçları, nano tip dolgu maddelerinin çok küçük miktarlarda bile mikro metrik parçacıklardan daha etkili olabileceğini kesin olarak kanıtlamıştır.

Geçtiğimiz on yılda bilgi işlem teknolojisindeki hızlı ilerleme, yenilikçi tasarımlar oluşturmak, tasarım maliyetlerini azaltmak ve üretilen parçanın çeşitli niteliklerinin daha iyi anlaşılmasını sağlamak için simülasyon teknolojisinin fiziksel üretimle birlikte kullanılmasına neden oldu. Fiziksel test ve süreç simülasyonu arasındaki bu sinerjiyi kolaylaştırmak için çok sayıda gelişmiş yazılım aracı kullanılmaktadır. Eklemeli üretim bağlamında, gelişen tüm teknolojilerde olduğu gibi, tek eksenli çekme testi gibi testler kullanılarak elde edilen sonuçlardan elde edilen noktaların, SolidWorks gibi bilgisayar destekli tasarım ve bilgisayar destekli mühendislik uygulamalarından elde edilen sonuçlara bağlanması büyük önem taşımaktadır. Bu doğrultuda, mevcut çalışma, eriyik yığma modellemesi yöntemiyle üretilen dişli civata numunesini evrensel bir test makinesinde çekme gerilimi testi kullanarak analiz etmeyi ve aynı mekanik özelliklere sahip bir numune için elde edilen simülasyon sonuçlarını karşılaştırmayı amaçlamıştır.

MATERYAL VE METOT

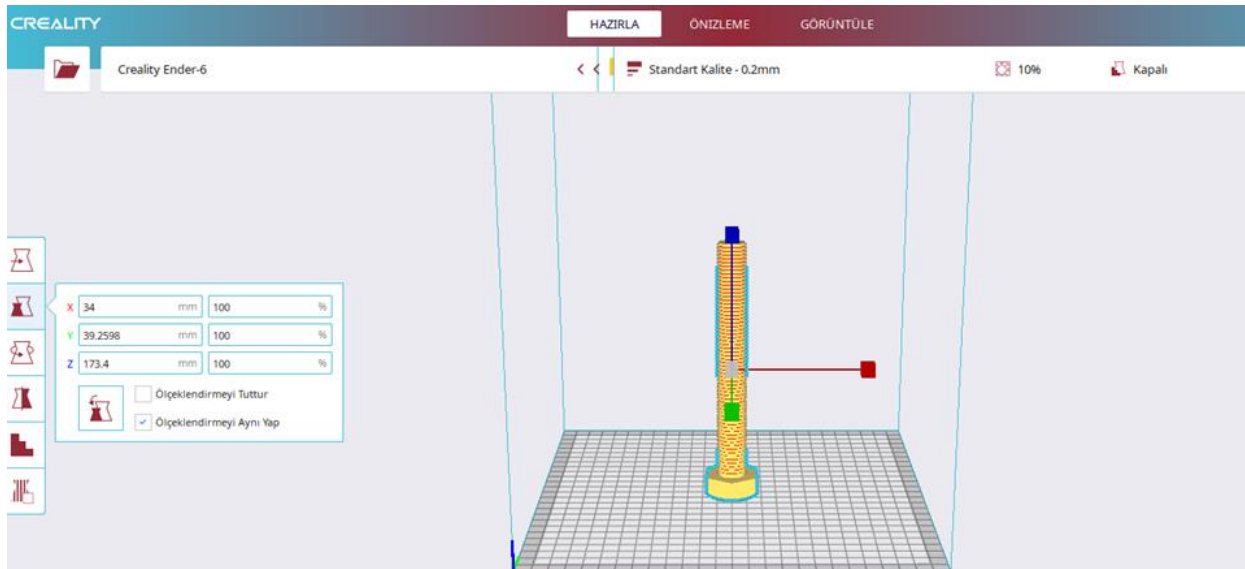
3D Yazıcı

Creality Ender 6, katı bir termoplastik malzemeyi sıcak bir nozul dan tabaka halinde platform üzerinde çıkarmak için bir ekstrüder (Şekil 1) kullanan, ardından termoplastik malzemenin istenen nesneyi oluşturmak için hızla katılaştığı modern bir 3D yazıcıdır. Bu yazıcı ile EYM tabanlı 3 boyutlu baskı elde edilebilmektedir. Creality Ender 6 marka yazıcı 250x250x400 mm geniş baskı hacmine sahiptir. Ayrıca 0.1 mm çözünürlükte baskı hızı 150 mm/s'ye ulaşabilmektedir. Creality yazıcı ile polilaktik asit (PLA), akrilonitril bütadien stiren (ABS), termoplastik poliüretan (TPU), naylon, yüksek etkili polistiren (HIPS) ve iletken filament türleri ile baskı yapmak mümkündür. Bu çalışmada cıvata numunelerinin üretiminde ABS malzeme kullanılmıştır. Bu malzemenin bazı teknik özellikleri Tablo 2'de verilmiştir. ABS plastiği asit ve bazlara karşı dayanıklı olduğu gibi elektriksel yalıtımı da çok iyidir. Bu plastik, polibütadien içerisinde stiren akrilonitrilin polimerizasyonu ile elde edilen bir kopolimerdir. İçerdiği madde oranları %20 akrilonitril, %20 bütadien, %60 stiren şeklinde oluşarak malzemenin karakteristiklerini meydana getirmektedir. Stiren maddesi plastiğe parlaklık ve iyi yüzey verir (Ulker, 2023).



Şekil 1. Numunelerin Üretiminde Kullanılan 3D Yazıcı Cihazı

Katı modelleme yazılımı olan SolidWorks de 3D olarak tasarlanan dişli cıvata numuneleri standart üçgen dili (STL) formatında kaydedilir. STL, 3D yazdırma ve bilgisayar destekli tasarım (CAD) için yaygın olarak kullanılan bir dosya formatıdır. Daha sonraki süreçte bu dosya Creality yazıcının dilimleme programına aktarılır. Bu yazıcı dilimlere programı olarak Creality Slicer 4.8 yazılımını kullanmaktadır. Şekil 2, dilimleme programı hakkında önemli bilgileri göstermektedir. Numunelerin üretiminde Tablo 1'deki parametreler kullanıldı.



Şekil 2. Dilimleme Yazılımının Ana Ara Yüzü

Tablo 1'deki parametreler, katı modeli oluşturulmuş numunelerin G kodlarını ortaya çıkarmak için 3D yazıcının dilimleme programında tanımlanmıştır. Bütün cıvata numuneleri aynı baskı parametreleri kullanılarak üretilmiştir. G kodları, yazdırılacak parçanın yazıcı masası üzerindeki konumu ve açısı gibi ayarları tanımlamaktadır. Dilimleme programında üretilen G kodları USB yardımıyla 3D yazıcıya aktarılarak parça baskıya hazır hale getirilir. Bu işlemden sonra gerekli ABS filament malzeme yazıcıya takılır ve imalata geçilir. İmalat işlemine başlamadan önce, numunenin ilk katmanının imalat sırasında cam baskı yatağına daha iyi yapışmasını sağlamak için baskı yatağına ince bir yapışkan film uygulandı.

Tablo 1. 3D Yazıcı Baskı Parametreleri

Özellik	Değer
Doluluk Oranı	%80
Katman Yüksekliği	0,1 mm
Duvar Kalınlığı	3 mm
Dolgu Deseni	Üçgen
Baskı Sıcaklığı	230 °C
Tabla Sıcaklığı	70 °C
Baskı Hızı	60 mm/s
Materyal	ABS

Deney Düzenegi

Cıvata test numunelerinin üretimi yapılırken numunelerin kalitesini ve açılarının doğruluğunu etkileyen en önemli parametre plastik filament malzemesi seçimidir. Bu çalışma, baskı sıcaklığı ve yatak sıcaklığı gibi diğer parametrelerin ele alınmasında zorlukla karşılaştı. Yazıcının nozul kısmı termoplastik malzemeyi eritmesi ve istenilen nesneyi oluşturması için 200°C -230°C arasında farklı baskı sıcaklıkları düzenlenerek birçok numunenin doğru bir şekilde yazdırılması denenmiştir. Ayrıca yatak sıcaklığının nozul hareket ederken nesneyi sabitleyeceği düşünülmüştür. Nesneyi katman katman yazdırmak için verilen G kodunu çevirerek bir eksen üzerinde uygun tabla sıcaklığının 70°C olduğu tespit edildi. Belirlenen optimum parametreler neticesinde ABS malzeme kullanılarak üretilen M20 cıvata numunesi Şekil 3'te verilmiştir. Aynı özellikler belirlenerek bu cıvata numunesinden beş adet üretilmiştir.

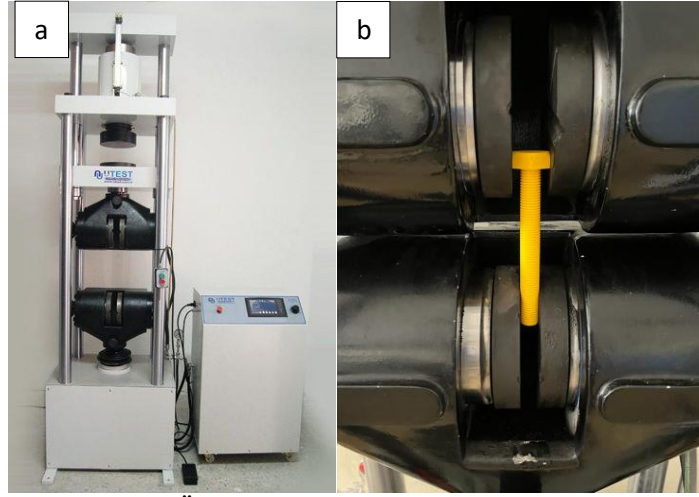


Şekil 3. 3D Yazıcıyla Üretilen M20 Cıvata

Bu çalışma, somunla bağlantı sırasında ve elemanları tutmak için somuna bağlandığında cıvataya etki eden olası gerilmeleri araştırmaktadır. Bunun için üretilen numunelere çekme testi uygulanmıştır. Çekme testi, tasarım ve kalite kontrol açısından en önemli testlerden biridir. Bu test ile numunenin mekanik özellikler açısından maksimum verime sahip olup olmadığı tespit edilebilmektedir. Çekme testi için Şekil 4'deki cihaz kullanılmıştır. Üniversal test makinesi, çekme dayanımı, basınç dayanımı gibi birçok uygulamaya sahiptir. Cıvata bu araştırmada örnek numune olduğundan, orijinal uzunluğu ve çapı ayarlamak için parametreleri manuel olarak alınmıştır. Daha sonra cıvata başı üst kelepçeye sabitlenir ve cıvata tamamen pimlenmişken tek eksenli bir yük uygulanmaktadır. Bu yük için cıvata ucunu alt kelepçeye sabitleyerek maksimum cıvata başı alanını almalı ve tam pim konumuna yerleştirmelidir. Deneysel çalışmalar 1.5 mm/s'lik bir çekme hızında gerçekleştirilmiştir. ABS malzeme ile üretilen numunelerin çekme testi sonucu ortaya çıkan gerilme-gerinim diyagramları Şekil 5'de verilmiştir. Uygulanan kuvvet ve uzama miktarına göre hesaplanan gerilme, gerinim ve elastite modülü değerleri ise hesaplanmıştır.

Tablo 2. ABS Malzemenin Teknik Özellikleri

Baskı Sıcaklığı (°C)	Yoğunluk (g/cm ³)	Çekme Mukavemeti (MPa)	Kopma Uzaması (%)	Eğilme Direnci (MPa)	Etki Direnci (kJ/m ²)
210-230	1,04	40	40	75	7,6



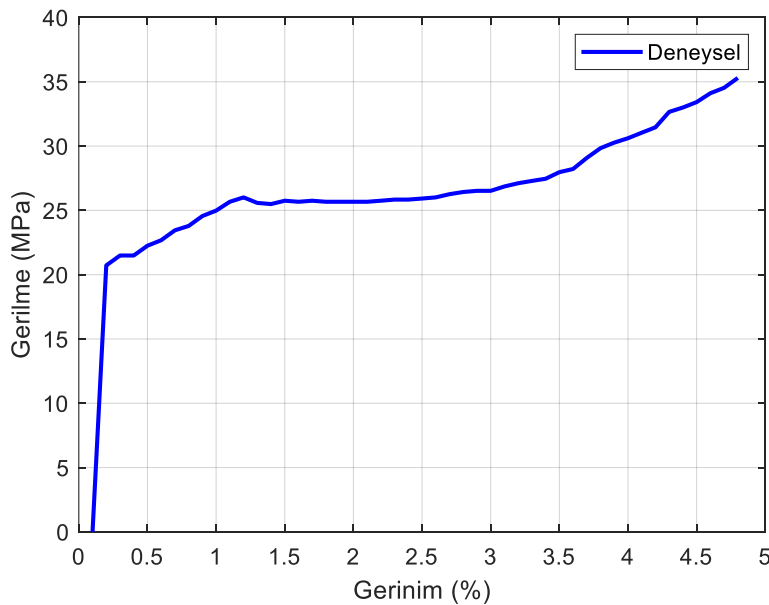
Şekil 4. a. Üniversal Test Makinesi b. Sabit Numune

SONUÇLAR

Bu bölümde hem deneysel hem de simülasyon çalışmaları neticesinde elde edilen sonuçlar sunulmuştur. Deneysel çalışmalar, cıvata numunelerine yapılan çekme testlerini kapsamaktadır. Daha sonra sonlu elemanlar analizi sonucundaki çekme mukavemeti değerleriyle ölçülen değerler karşılaştırılmıştır. Test numunesi olarak EYM yöntemiyle ABS malzemeden üretilmiş dişli cıvata kullanılmıştır. Tutarlı bir analiz elde etmek ve oluşabilecek herhangi bir istatistiksel hatayı ortadan kaldırmak için beş özdeş test numunesi üretildi ve deneysel aşamalar tamamlandı. Test numuneleri Tablo 1'deki kriterlere göre aynı baskı parametreleri kullanılarak üretildi. Üretilen numunelere aynı test parametreleri girilerek çekme testleri yapılmıştır. Buradaki asıl amaç, aynı üretim ve test parametresine göre beş özdeş numunenin davranışlarında farklılık olup olmadığını tespit etmektir.

Çekme Testi için Deneysel Sonuçlar

Çekme testi sonucu elde edilen mukavemet bulguları bu bölümde sunulmuştur. Yük ve gerinim için test boyunca ölçüm birimleri olarak sırasıyla kilo Newton ve milimetre kullanıldı. ABS malzemesi kırılğan olduğu için nihai gerilme mukavemeti düşük çıkmıştır. Bu durumda bir numune kullanılarak yapılan çekme testinden sonra tekrar tekrar kırılmasına neden olur. Test edilen beş özdeş cıvata numunesinden üç numunenin güvenilir sonuçlar ürettiğini ve bunların ek çalışma ve simülasyon sonuçlarıyla karşılaştırma için dikkate alındığını, diğer iki hatalı sonucun ise göz ardı edildiğini belirtmek gerekir. Bir tane cıvata numunesinin çekme testi sonucu ortaya çıkan gerilme-gerinim eğrisi Şekil 5'de gösterilmiştir.



Şekil 5. Cıvata Çekme Testi Numunesi İçin Gerilme-Gerinim Eğrisi

Çekme deneyi sırasında elde edilen gerilme, gerinim ve elastisite modülü değerleri aşağıdaki denklemlerle bulunur.

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (1)$$

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (2)$$

$$\% \epsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \times 100 \quad (3)$$

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad (4)$$

Burada; F çekme kuvvetini, A deney örneğinin ilk kesit alanını, L_0 örneğin ilk ölçü boyunu ve ΔL örnekte meydana gelen uzama miktarını gösterir. Çekme deneyi sonucunda kuvvet (F) - uzama (ΔL) eğrisi elde edilir. Ancak, bu eğri ile birlikte kullanılan örneğin boyutlarını da vermek gerekir. Bu nedenle, bu eğri yerine daha evrensel olan gerilme - gerinim eğrisi kullanılır. F ve ΔL için elde edilen okuma çiftlerinden, F başlangıçtaki kesit alanına (A) bölünerek σ ve ΔL numunenin başlangıçtaki boyuna (L_0) bölünerek ϵ hesaplanır. Apsise ϵ ve ordinata σ değerleri yerleştirilerek gerilme-gerinim diyagramı elde edilir (Şekil 5). Elastik şekil değişimi, σ - ϵ diyagramının doğrusal olarak değiştiği ilk bölümünde gerçekleşmektedir. Burada uygulanan gerilme ve bu gerilmenin meydana getirdiği elastik birim şekil değişimi arasında Hooke kanunu geçerlidir. Hooke kanunu olarak bilinen bu denklemdeki (Denklem 4) E oranı sabiti elastisite modülü olarak adlandırılır. Uygulanan kuvvet ve uzama miktarına göre beş özdeş numune için hesaplanan gerilme, gerinim ve elastisite modülü değerleri Tablo 3'de verilmiştir.

Tablo 3. Cıvata Çekme Testi Numunelerin Sonuçları

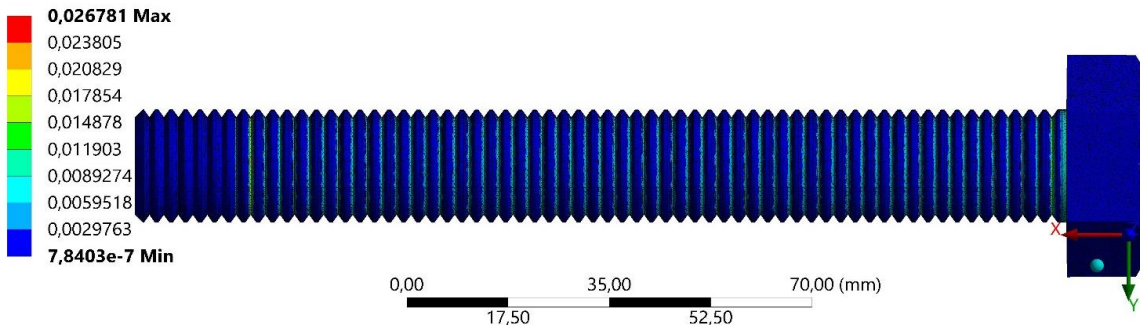
ABS	Gerilme (MPa)	Gerinim (%)	Elastisite Modülü (MPa)
Numune-1	34,259	3,768	909,581
Numune-2	35,746	3,867	924,385
Numune-3	35,258	3,951	915,862
Numune-4	32,589	3,329	978,942
Numune-5	33,985	3,526	963,845

Çekme Testi için Simülasyon Sonuçları

Gerçek zamanlı elde edilen deneysel sonuçların doğruluğunu ispat etmek için cıvata numunesine sonlu elemanlar analizi uygulanmıştır. Bu analiz ANSYS yazılımı ile gerçekleştirilmiştir. Bu yazılım, bilgisayar destekli olarak mühendislik çalışmalarında analiz ve simülasyonların yapılabildiği bir bilgisayar destekli mühendislik programıdır. ANSYS programı mekanik, yapısal analiz, hesaplamalı akışkanlar dinamiği ve ısı transferi gibi farklı disiplinlerde etkili çalışmalara olanak verir. Literatürde fiziksel deneylerden elde edilen sonuçlarla karşılaştırıldığında sayısal simülasyonların daha doğru sonuçlar verdiği genel olarak kabul edilmektedir. Bunun nedeni, deneylerin sonuçlarının doğası gereği insan hatasından, yanlış kalibrasyondan ve diğer dış etkilerden arınmış olmasıdır.

D: Static Structural

Equivalent Elastic Strain
Type: Equivalent Elastic Strain
Unit: mm/mm
Time: 49 s
14.12.2023 22:03

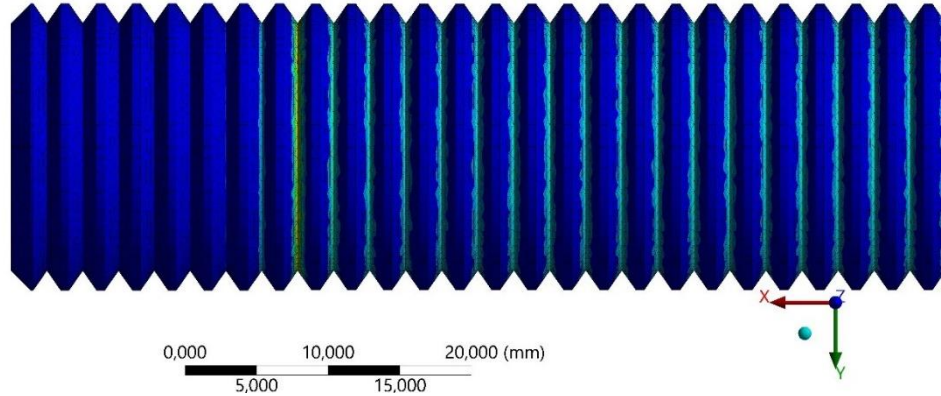


Şekil 6. Sonlu Elemanlar Analiz Sonuçları

Şekil 6 ve 7’de gösterilen modelleme sonuçlarından, civatanın dış açma kısmının düzgün şekilde dağılmış birçok kırılma noktasına sahip olduğu, buna karşılık civatanın gövdesinde herhangi bir kırılma noktasının olmadığı görülebilir. Gerilme-gerinim eğrisi mühendislik açısından önemlidir çünkü bir malzemenin yüklendiğinde nasıl deforme olduğuna ışık tutar. Sağlamlık, dayanıklılık ve daha fazlasını içeren çok çeşitli önemli mekanik nitelikler sunar.

D: Static Structural
Equivalent Elastic Strain
Type: Equivalent Elastic Strain
Unit: mm/mm
Time: 49 s
14.12.2023 22:05

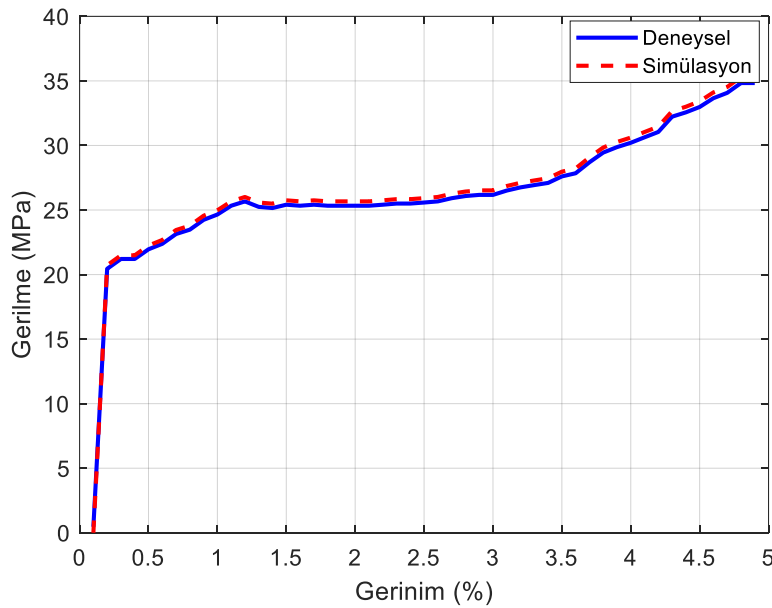
0,026781 Max
0,023805
0,020829
0,017854
0,014878
0,011903
0,0089274
0,0059518
0,0029763
7,8403e-7 Min



Şekil 7. Simülasyon Sonuçlarındaki Kırılma Noktası

TARTIŞMA

Deneyel ve simülasyon çekme testi sonuçları tamamlandıktan sonra gerilme-gerinim ilişkisinin karşılaştırılması gerçekleştirilmiştir. Gerilim ve gerinimler Y ve X eksenleri boyunca gösterilmiştir. Deneyel verilere dayalı olarak aynı bağlantıyı gösteren yeşil çizginin aksine, kırmızı çizgi sonlu elemanlar simülasyonundaki gerilme-gerinim ilişkisini yansıtır. Gerilme değerleri MPa cinsinden gösterilmiştir. Şekil 8’de simülasyon ve deney için gerilme-gerinim ilişkilerinin karşılaştırması gösterilmektedir. Simülasyona karşılık gelen çizginin grafikteki iki çizgiden daha doğru olduğu bilinmesine rağmen, deneyel sonuçla eşleşen çizgi davranışı da yakından taklit etmektedir. Yaklaşık 21.56 MPa’lık bir gerilme değerine ve yaklaşık %0.25’lik bir gerinim değerine kadar her iki çizgi de aynı özellikleri göstermiştir. Deneyel veriler söz konusu olduğunda bu eşik noktasından sonra gerilme değerlerinde küçük bir düşüş görülebilir. Bu tür bir davranış, literatürdeki daha önceki ilgili bulgularla tutarlıdır.



Şekil 8. Deneyel ve Simülasyon Sonuçlarını Karşılaştıran Gerilme-Gerinim Diyagramı

SONUÇ

Bu çalışma, eklemeli imalat yöntemlerinden olan EYM tekniği kullanılarak üretilen dişli cıvatanın çekme testi dayanımı üzerine elde edilen sonuçları sunmuştur. Test sonucu elde edilen mukavemet değerleri ile sonlu elemanlar analizi neticesindeki bulgular karşılaştırılmıştır. Sonuçlar, simülasyon ve deneysel değerler arasındaki farkın oldukça düşük olduğunu göstermiştir. İki sonucun da benzer eğilim gösterdiği tespit edilmiştir. Deneysel çalışmalar neticesinde cıvata maksimum 35.258 MPa çekme dayanımı göstermiştir. Bu gerilimdeki gerinim miktarı ise %4.76 olarak tespit edilmiştir. Cıvatanın etkin elastisite modülü 915.862 MPa olarak hesaplanmıştır. Bu çalışma, gerçek dünya uygulamalarında kullanılmak üzere 3 boyutlu baskılı ABS cıvatalarının oluşturulması, test edilmesi ve optimize edilmesinin birçok yönünün anlaşılmasına yardımcı olacaktır.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma Siirt Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Katmanlı İmalat ve Sismik İzolatör Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Bu makalenin yazarları, laboratuvar çalışanlarına teşekkür ederler. Katmanlı Üretim ve Sismik İzolatör Laboratuvarı'na destekleri için teşekkür ederiz.

KAYNAKLAR

- Alafaghani, A., Qattawi, A., & Ablat, M. A. (2017). Design Consideration for Additive Manufacturing: Fused Deposition Modelling. *Open Journal of Applied Sciences*. <https://doi.org/10.4236/ojapps.2017.76024>
- Andrzejewski, J., Gronikowski, M., & Aniśko, J. (2022). A Novel Manufacturing Concept of LCP Fiber-Reinforced GPET-Based Sandwich Structures With an FDM 3d-Printed Core. *Materials*. <https://doi.org/10.3390/ma15155405>
- Arif, M. F., Kumar, S., Varadarajan, K. M., & Cantwell, W. (2018). Performance of Biocompatible PEEK Processed by Fused Deposition Additive Manufacturing. *Materials & Design*. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.03.015>
- Cattenone, A., Morganti, S., Alaimo, G., & Auricchio, F. (2018). Finite Element Analysis of Additive Manufacturing Based on Fused Deposition Modeling: Distortions Prediction and Comparison With Experimental Data. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. <https://doi.org/10.1115/1.4041626>
- Chacón, J. M., Caminero, M. A., Plaza, E. G., & Núñez, P. J. (2017). Additive Manufacturing of PLA Structures Using Fused Deposition Modelling: Effect of Process Parameters on Mechanical Properties And their Optimal Selection. *Materials & Design*. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.03.065>
- Durão, L. F. C. S., Barkoczy, R., Zancul, E. de S., Ho, L. L., & Bonnard, R. (2019). Optimizing Additive Manufacturing Parameters for the Fused Deposition Modeling Technology Using a Design of Experiments. *Progress in Additive Manufacturing*. <https://doi.org/10.1007/s40964-019-00075-9>
- Goh, G. D., Yap, Y. L., Tan, H. K. J., Sing, S. L., & Yeong, W. Y. (2019). Process–Structure–Properties in Polymer Additive Manufacturing via Material Extrusion: A Review. *Critical Reviews in Solid State and Material Sciences*. <https://doi.org/10.1080/10408436.2018.1549977>
- Jiang, J., Xu, X., & Stringer, J. (2018). Support Structures for Additive Manufacturing: A Review. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*. <https://doi.org/10.3390/jmmp2040064>
- Li, M., Lü, T., Dai, J., Jia, X., Gu, X., & Taguchi, D. (2020). Microstructure and Mechanical Properties of 308L Stainless Steel Fabricated by Laminar Plasma Additive Manufacturing. *Materials Science and Engineering A*. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.138523>
- Magazine, R., Bochove, B. van, Borandeh, S., & Seppälä, J. (2022). 3D Inkjet-Printing of Photo-Crosslinkable Resins for Microlens Fabrication. *Additive Manufacturing*. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.102534>
- Meng, L., McWilliams, B., Jarosinski, W., Park, H.-Y., Jung, Y., Lee, J.-H., & Zhang, J. (2020). Machine Learning in Additive Manufacturing: A Review. *Jom*. <https://doi.org/10.1007/s11837-020-04155-y>
- Nieto, D. M., & Molina, S. I. (2019). Large-Format Fused Deposition Additive Manufacturing: A Review. *Rapid Prototyping Journal*. <https://doi.org/10.1108/rpj-05-2018-0126>
- Prakash, K. S., Nancharaih, T., & Rao, V. V. S. (2018). Additive Manufacturing Techniques in Manufacturing -an Overview. *Materials Today Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.11.642>

Singh, S., Ramakrishna, S., & Singh, R. (2017). Material Issues in Additive Manufacturing: A Review. *Journal of Manufacturing Processes*. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2016.11.006>

Turan, S. R., Ülker, O., Kuncan, M., & Buldu, A. (2022). Stereolithografi Eklemeli İmalat Yöntemleriyle Farklı Doluluk Oranlarında Üretilen Numunelerin Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi. *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*. <https://doi.org/10.46519/ij3dptdi.1138450>

Ulker, O. (2023). Conductive Additive Manufactured Acrylonitrile Butadiene Styrene Filaments: Statistical Approach to Mechanical and Electrical Behaviors. *3D Printing and Additive Manufacturing*. <https://doi.org/10.1089/3dp.2022.0287>

Vahed, R., Rajani, H. R. Z., & Milani, A. S. (2022). Can a Black-Box AI Replace Costly DMA Testing?—A Case Study on Prediction and Optimization of Dynamic Mechanical Properties of 3D Printed Acrylonitrile Butadiene Styrene. *Materials*. <https://doi.org/10.3390/ma15082855>



Kahramanmaraş Sütçü İmam University

Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 30.10.2023
Kabul Tarihi : 11.02.2024

Received Date : 30.10.2023
Accepted Date : 11.02.2024

SOĞUKTA ŞEKİL VERİLMİŞ ÇELİK KESİTLERİN GÖVDE EZİLMESİ DAYANIMI BELİLENMESİNDE KULLANILAN GÜNCEL İKİ STANDARTIN İNCELENMESİ

AN INVESTIGATION OF TWO CURRENT STANDARDS FOR DETERMINING THE WEB-CRIPPLING STRENGTH OF COLD-FORMED STEEL SECTIONS

Yakup BÖLÜKBAŞ¹ (ORCID: 0000-0003-4466-6245)

¹ Aksaray Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Aksaray, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Yakup BÖLÜKBAŞ, ybolukbas@aksaray.edu.tr

ÖZET

İnşaat sektöründe kullanımı son yıllarda oldukça popüler hale gelen soğukta şekil verilmiş çelik (Cold Formed Steel, CFS) kesitlerin mesnet ve diğer elemanlardan kaynaklı tekil yükleme durumunda oluşan gövde ezilmesi davranışı tasarım açısından oldukça önemli bir davranıştır. Bu çalışmada CFS kanal kesitlerin gövde ezilmesi dayanımını belirlemek amacıyla kullanımı öne çıkan TS EN 1993-1-3 ve AISI S100-16 standartlarının uygulanması ve yaklaşım farklılıklarını göstermek amaçlanmıştır. Ayrıca bu iki standardın dayanım tahminleri sonlu elemanlar yöntemi kullanılarak oluşturulan modellerin tahminleri ile karşılaştırılmıştır. Çalışma sonucunda TS EN 1993-1-3 standardının genel olarak güvenli tarafta kalarak tutucu sonuçlar verdiği görülmüştür. Ancak her iki standardın sonlu elemanlar analizi sonuçlarına göre oldukça tutucu tahminlerinin olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Soğuk şekil verilmiş çelik, gövde ezilmesi, AISI S100-16, TS EN 1993-1-3, Sonlu elemanlar analizi

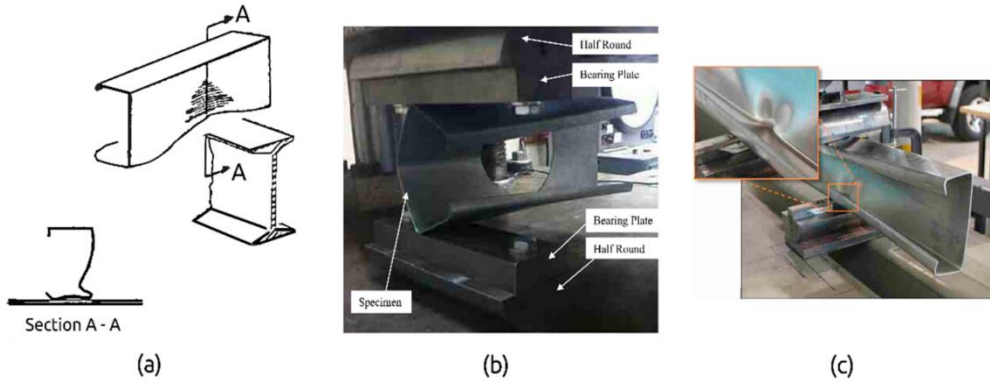
ABSTRACT

The web-crippling behavior of cold-formed steel (CFS) sections, which have become very popular in the construction industry in recent years, is critical in design. In this study, the following results were obtained from applying TS EN 1993-1-3 and AISI S100-16 standards, which are prominently used to determine the body crushing strength of CFS channel sections and to show the differences in approach. In addition, the strength predictions of these two standards were compared with the predictions of the models created using the finite element method. As a result of the study, it was seen that the TS EN 1993-1-3 standard generally gives conservative results by staying on the safe side. However, according to the effects of finite element analysis of both measures, it is seen that they have very conservative predictions.

Keywords: Cold-formed steel, web crippling, AISI S100-16, TS EN 1993-1-3, Finite element analysis

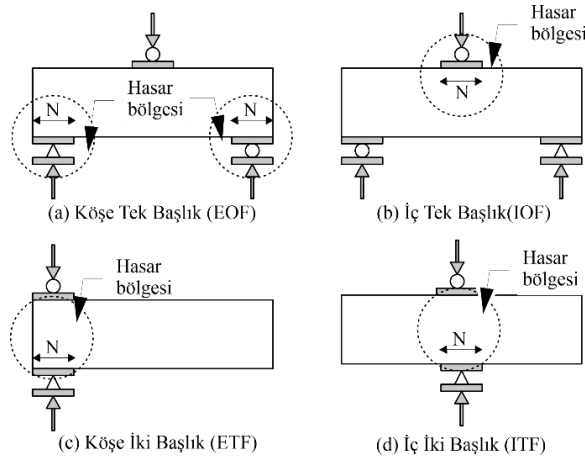
GİRİŞ

Son yıllarda soğuk şekil verilmiş çelik elemanların (Cold formed steel, CFS) gerek taşıyıcı gerekse tamamlayıcı yapı elemanı olarak kullanımı oldukça popüler hale gelmiştir. Bu elemanlar, yapısal çeliğe göre yüksek taşıma gücü-ağırlık oranına sahip olmaları, kesit şeklinde sağladığı esneklik ve kolay montaj imkânı sunması gibi avantajlar sebebiyle tercih edilmektedir. Soğukta şekil verilmiş çelik elemanlar oluşturduğu sistemin mesnetlerinden kaynaklanan tekil kuvvetlere maruz kalırlar (Şekil 1). Bu kuvvetler kesit gövdesinin ezilerek burkulmasına sebebiyet veren ve gövde ezilmesi (web crippling) adlı verilen davranışın ortaya çıkmasına sebep olur. Özellikle büyük gövde yüksekliği-kalınlık oranına sahip narin soğukta şekil verilmiş çelik elemanlarda bu davranışın tasarımı oldukça önemlidir (Prabakaran ve Schuster 1998).



Şekil 1. Mesnetlenme Durumu Sebebiyle Oluşan Gövde Ezilmesi (Alsanaat vd. 2019)

CFS kesitlerin gövde ezilmesi dayanımı hesabı, gövdenin stabilitesi, yük uygulama bölgesi yakınındaki yerel deformasyonlar ve başlangıç kusurları gibi belirsizlikler nedeniyle çok karmaşıktır (Yu vd, 2000). Bu nedenle, Kuzey Amerika standardında gövde ezilmesi dayanımının tahmini için geçmiş çalışmalara dayanan ampirik bir formül önerilmiştir (Winter ve Pian 1946, Yu ve Hetrakul 1978, Santaputra vd.1989, Bhakta vd. 1992, AISI S100 2012). Standart CFS kesitlerin gövde ezilmesi taşıma gücü hesabında 4 farklı yükleme durumu için denklem önerilmiştir. Bu yükleme durumu sırasıyla uç tek başlık (EOF), iç tek gövde (IOF), uç iki başlık (ETF) ve iç iki başlık (ITF) (Şekil 2) olarak sunulmuştur. Amerikan standardını takiben Eurocode, CFS kesitlerinin gövde ezilmesi dayanımını tahmin etmek için bir denklem önermiştir (Eurocode 3 2007). Oldukça popüler olan bu iki standart, CFS kesitlerin gövde ezilmesi dayanımını iki farklı yaklaşımla tahmin etmeye çalışmaktadır. Eurocode 3'te (1993-1-3) sunulan tasarım yönteminde yükleme durumu ve kesit tipine bağlı olarak farklı formüller ve farklı katsayı denklemleri önerilmektedir. Kuzey Amerika standardında (AISI S100-16 2012) ise Prabakaran ve Schuster tarafından 1998 yılında önerilen çalışma temel alınarak tek bir denklem oluşturulmuştur (Prabakaran ve Schuster 1998). Bu denklemdeki katsayılar kesit tipine ve yükleme koşullarına bağlı olarak tablolaştırılmıştır. Eurocode 3'e göre uygulaması daha kolay bir tasarım yöntemine sahip olsa da her iki standardın yaklaşımı da kesit tipleri ve malzeme özellikleri ile sınırlıdır.



Şekil 3. Gövde Ezilmesi Dayanımının Belirlenmesi Amacıyla Önerilen 4 Farklı Yükleme Durumu Standartların yararlandığı çalışmalarda test edilmeyen farklı malzemeler, kesit şekilleri ve yükleme durumları ile karşılaştırıldığında standartların tahminlerinin yetersiz kaldığı görülmüştür. Araştırmacılar yaptıkları deneysel

çalışmalarda AISI standardının gövde ezilmesi dayanımının tahmini için önerdiği denklemin yetersiz olduğunu belirterek yeni yaklaşımlar önermişlerdir. Beshara ve Schuster (2000) standartta önerdiği denklemdeki katsayıların değişmesi gerektiğini belirtirken, Young ve Hancock (2012), gövde narınlığını temel alan yeni bir denklem önermiştir. Macdonald vd. (2011) yaptıkları çalışma ile soğukta şekil verilmiş çelik C kesitlerin gövde ezilmesi davranışı AISI'nin önerdiği 4 yükleme türü için deneyler yapılmıştır. Deney sonuçları ile sonlu elemanlar analizleri karşılaştırılmıştır. Ayrıca Eurocode 3 ve Polonya standartlarının gövde ezilmesi tahminleri ile deneysel sonuçlar karşılaştırılmıştır. Araştırmacıların yaptığı diğer çalışmada ise gövde bozulması dayanımının tahmini için sonlu elemanlar tabanlı tasarım önerilmiştir (Macdonald ve Heiyantuduwa 2012). Gövde ezilmesi davranışını sadece iki başlık yüklemesi altında inceleyen Gunalan ve Mahedran (2015) 450 MPa akma dayanımına sahip C kesitlerden hazırlanan 42 test numunesi üzerine deneyler yapılmıştır. Kesit başlıkların mesnetlerde sabitlenerek yapılan çalışma sonuçları ile Doğrudan dayanım yöntemi (Direct Strength Method, DSM) ile tahmin sonuçları karşılaştırılmıştır. Benzer bir çalışma sadece ETF yükleme durumu için gövde ezilmesi dayanımının tahmini için DSM kullanılan bir yöntem geliştirilmiştir. Yeni yöntem sonuçları ile AISI ve Eurocode 3 standartlarının tahmini karşılaştırılmıştır (Natario vd.2016). Köşe başlık yüklemeye durumundaki soğukta şekil verilmiş çelik kirişlerin gövde ezilmesi davranışını inceleyen Holesapple ve LaBoube (2003) yaptıkları çalışmada, köşe mesnetten taşan kesit parçasının gövde bozulması davranışa olan etkisi ve mevcut tasarım standartlarının bu şekildeki mesnetlenme durumundaki sınırlamaları test edilmiştir. İki başlık yüklemeye altındaki turnaklı C kesit üzerinde gövde ezilmesi davranışını incelemek amacıyla yapılan çalışmada deney sonuçları ile tasarım standardının tahmini karşılaştırılmıştır. Çalışma sonucunda DSM tabanlı geliştirilen tasarım deney sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Tasarlanan bu yeni yöntem SupaCEE olarak bilinen gövde rijitleştiricili kesitlerin gövde ezilmesi tasarımında da test edilmiştir (Sundararajah vd. 2016,2017).

Literatürde, CFS kesitlerinin gövde ezilmesi davranışı ile ilgili yayınlar çoğunlukla standartların hesaplama doğruluğunu ve alternatif hesaplama yöntemlerini sunmaktadır. Araştırmacılar, farklı malzeme özelliklerinin, kesit tiplerinin ve yükleme koşullarının gövde ezilmesi davranışı üzerindeki etkilerini araştırarak literatüre ve çelik endüstrisine önemli katkılarda bulunmuşlardır. Ülkemizde çoğunlukla sanayi yapılarının çatılarında aşık olarak kullanılan CFS kesitlerin tasarımında gövde ezilmesi davranışının tam olarak belirlenmesi oldukça önemlidir.

Bu çalışmada, CFS kanal kesitlerinin iç tek başlık (IOF) ve dış tek başlık (EOF) yüklemesi altında gövde ezilmesi dayanımının hesaplanmasında kullanılan güncel iki standardın (AISI ve Eurocode) yaklaşımları ele alınacaktır. Bu hesaplamalarda kesitlerin gövde yükseklikleri, kesit kalınlıkları ve yükleme plaka genişlikleri değiştirilerek farklı kesit tipleri için dayanım değerleri sunulacaktır. Ayrıca seçilen CFS kesitlerin gövde ezilmesi davranışını sonlu elemanlar modeli ABAQUS programı ile oluşturulmuştur. Çalışma sonucunda standartlarda hesaplanan taşıma gücü değerleri sonlu elemanlar analizi ile tahmin edilen değerler karşılaştırılmıştır.

MATERYAL VE YÖNTEM

Çalışmada CFS kanal kesitlerin EOF ve IOF yükleme durumu için gövde ezilmesi dayanımını belirlemek amacıyla sektörde tedariki kolay olan kesitler seçilmiştir. Kesit boyutları, yükleme plakası genişliği ve kesit kalınlığının değişimi ile gövde ezilmesi dayanımının tahmini için önerilen denklemler karşılaştırılmıştır. Üç farklı gruba ayrılan kesitlerde; 1. Grupta kesit kalınlığı ve yükleme plakası genişliği sabit tutulurken kesit yüksekliği değiştirilmiştir. 2. gruptaki kesitlerde ise gövde yüksekliği ve kesit kalınlığı sabit tutulurken, yükleme plakası genişliği değiştirilmiştir. Son grupta kesit yüksekliği ve yükleme plakası genişliği sabit bırakılırken, kesit kalınlığı değiştirilerek hesaplamalar yapılmıştır. Numunelerin kesit ölçüleri ve bu kesitlerin değişimleri Tablo 1'de verilmiştir. Numune isimlendirmesi C100-t1.5-N75 şeklinde yapılmıştır. Burada gövde yüksekliği (h) 100 mm, kesit kalınlığı (t) 1.5 mm ve yükleme plakası genişliği (N) 75 mm olan CFS kanal kesit ifade edilmektedir. Tüm kesitler için akma dayanımı (σ_y) 275 MPa, kopma dayanımı (σ_u) 430 MPa ve Elastisite modülü 205 GPa olarak alınmıştır.

AISI S100-16 Standardı

CFS kesitlerin gövde ezilme dayanımının tahmini için Amerikan (AISI S100-16) standartlarının önerdiği eşitlik aşağıda verilmiştir. AISI S100'de gövde ezilmesi dayanımı (P_n) aşağıda verilen denklem ile hesaplanmaktadır.

$$P_n = Ct^2F_y \sin \theta \left(1 - C_R \sqrt{\frac{R}{t}} \right) \left(1 + C_N \sqrt{\frac{N}{t}} \right) \left(1 - C_h \sqrt{\frac{h}{t}} \right) \quad (1)$$

Tablo 1. Çalışmada Kullanılan CFS Kanal Kesitlerin Boyutları ve Kesit Özellikleri

Numune	Y. D.	h	b	c	t	N
C100-t1.5-N75	EOF	100	50	25	1.5	75
	IOF	100	50	25	1.5	75
C150-t1.5-N75	EOF	150	50	25	1.5	75
	IOF	150	50	25	1.5	75
C200-t1.5-N75	EOF	200	50	25	1.5	75
	IOF	200	50	25	1.5	75
C150-t1.5-N100	EOF	150	50	25	1.5	100
	IOF	150	50	25	1.5	100
C150-t1.5-N150	EOF	150	50	25	1.5	150
	IOF	150	50	25	1.5	150
C150-t1.5-N200	EOF	150	50	25	1.5	200
	IOF	150	50	25	1.5	200
C150-t2-N75	EOF	150	50	25	2	75
	IOF	150	50	25	2	75
C150-t3-N75	EOF	150	50	25	3	75
	IOF	150	50	25	3	75
C150-t4-N75	EOF	150	50	25	4	75
	IOF	150	50	25	4	75

Burada C standartta verilen tablodan alınan katsayı, t kesit gövdesinin kalınlığı, F_y tasarım akma dayanımı, θ kesit gövdesi ile başlık arasındaki açı, C_R büküm yarıçapı katsayısı, R büküm yarıçapı, C_N yükleme plakası genişliği katsayısı, N yükleme plakası genişliği, C_h gövde yükseklik katsayısı ve h gövde yüksekliği (düz) ifade etmektedir. Eşitlikteki katsayılar kesitin yükleme durumuna göre değişiklik göstermektedir.

AISI S100-16 standardı bölüm G5' de verilen eşitlik çalışmamızda seçilen kesitler ve yükleme durumları için belirlenen katsayılar Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. CFS Kanal Kesitlerin Gövde Ezilmesi Dayanımının Tahmininde Kullanılan AISI S100-16'da Önerilen Eşitlikte Bulunan Katsayılar ve Bu Katsayıların Çalışmada Kullanılan Karşılıkları

Numune	Y.D.	C	C_R	C_N	C_h
C100-t1.5-N75	EOF	4	0,14	0,35	0,02
	IOF	13	0,23	0,14	0,01
C150-t1.5-N75	EOF	4	0,14	0,35	0,02
	IOF	13	0,23	0,14	0,01
C200-t1.5-N75	EOF	4	0,14	0,35	0,02
	IOF	13	0,23	0,14	0,01
C150-t1.5-N100	EOF	4	0,14	0,35	0,02
	IOF	13	0,23	0,14	0,01
C150-t1.5-N150	EOF	4	0,14	0,35	0,02
	IOF	13	0,23	0,14	0,01
C150-t1.5-N200	EOF	4	0,14	0,35	0,02
	IOF	13	0,23	0,14	0,01
C150-t2-N150	EOF	4	0,14	0,35	0,02
	IOF	13	0,23	0,14	0,01
C150-t3-N150	EOF	4	0,14	0,35	0,02
	IOF	13	0,23	0,14	0,01
C150-t4-N150	EOF	4	0,14	0,35	0,02
	IOF	13	0,23	0,14	0,01

TS EN 1993-1-3 Standardı

TS EN 1993-1-3'e gövde ezilmesi dayanımı ($R_{w,Rd}$) aşağıda verilen denklemler ile hesaplanmaktadır. Uç yükleme durumu için Denklem 2, iç yükleme durumu ise Denklem 3 ile hesaplanmaktadır.

$$R_{w,Rd} = \frac{k_1 k_2 k_3 \left[9.04 - \frac{h_w}{60} \right] \left[1 + 0.01 \frac{s_s}{t} \right] t^2 f_{yb}}{\gamma_{M1}} \quad (2)$$

$$R_{w,Rd} = \frac{k_3 k_4 k_5 \left[14.7 - \frac{h_w}{49.5} \right] \left[0.75 + 0.011 \frac{s_s}{t} \right] t^2 f_{yb}}{\gamma_{M1}} \quad (3)$$

Burada k_1 , k_2 , k_3 , k_4 ve k_5 standartta verilen katsayılar, t kesit gövdesinin kalınlığı, f_{yb} tasarım akma dayanımı, h_w gövde yüksekliği (düz) ve s_s ise yükleme plakası genişliğini ifade etmektedir. Eşitlikteki katsayılar kesitin yükleme durumuna göre değişiklik göstermektedir.

TS EN 1993-1-3 standardı bölüm 6.1.7' de verilen eşitlik çalışmamızda seçilen kesitler ve yükleme durumları için belirlenen katsayılar Tablo 3'de verilmiştir.

Tablo 3. CFS Kanal Kesitlerin Gövde Ezilmesi Dayanımının Tahmininde Kullanılan TS EN 1993-1-3'de Önerilen Eşitlikte Bulunan Katsayılar ve Bu Katsayıların Çalışmada Kullanılan Karşılıkları

Numune	Y.D	k	k ₁	k ₂	k ₃	k ₄	k ₅
C100-t1.5-N75	EOF	1,20	0,93	0,85	1	-	-
	IOF	1,2	-	-	1	0,95	0,94
C150-t1.5-N75	EOF	1,20	0,93	0,85	1	-	-
	IOF	1,2	-	-	1	0,95	0,94
C200-t1.5-N75	EOF	1,20	0,93	0,92	1	-	-
	IOF	1,2	-	-	1	0,95	0,97
C150-t1.5-N100	EOF	1,20	0,93	0,85	1	-	-
	IOF	1,2	-	-	1	0,95	0,94
C150-t1.5-N150	EOF	1,20	0,93	0,85	1	-	-
	IOF	1,2	-	-	1	0,95	0,94
C150-t1.5-N200	EOF	1,20	0,93	0,85	1	-	-
	IOF	1,2	-	-	1	0,95	0,94
C150-t2-N150	EOF	1,20	0,93	0,92	1	-	-
	IOF	1,2	-	-	1	0,95	0,97
C150-t3-N150	EOF	1,20	0,93	0,92	1	-	-
	IOF	1,2	-	-	1	0,95	0,97
C150-t4-N150	EOF	1,20	0,93	0,92	1	-	-
	IOF	1,2	-	-	1	0,95	0,97

Nümerik Çalışmalar

Çalışmanın bu bölümünde AISI S100-16 ve TS EN 1993-1-3' de gövde ezilmesi dayanımı tahmini yapılan kesitlerin EOF ve IOF yüklemeleri altındaki gövde ezilmesi dayanımını tahmin etmek amacıyla sonlu elemanlar modeli oluşturulmuştur. Sonlu elemanlar analizi için ABAQUS yazılımı kullanılmıştır.

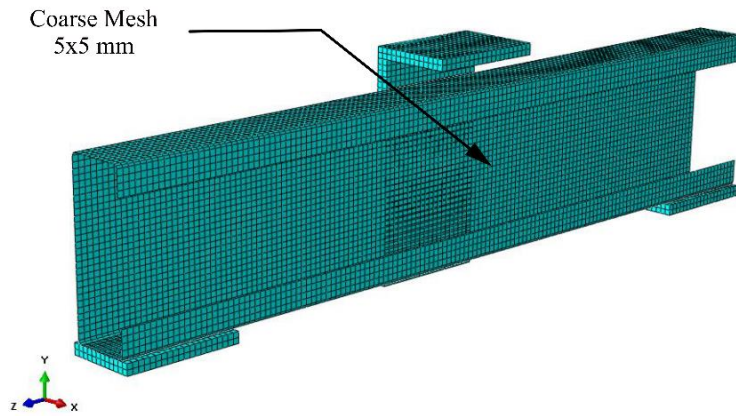
Sonlu elemanlar analizi başarımını test edebilmek amacıyla Lian ve diğerlerinin 2017 yılında yaptıkları çalışmada test edilen iki kesit modellenerek test sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Test modeli için referans çalışmadan alınan iki CFS kesit ölçüleri Tablo 4' de verilmiştir.

Tablo 4. Çalışmada Kullanılan Referans CFS Kanal Kesitlerin Boyutları ve Kesit Özellikleri

Numune	h	b	c	t	N
142×60×13-t1.3-N100-A0-FR	142	60,6	13,6	1,2	100
202×65×15-t1.4-N100-A0-FR	202	64,7	14,7	1,3	100

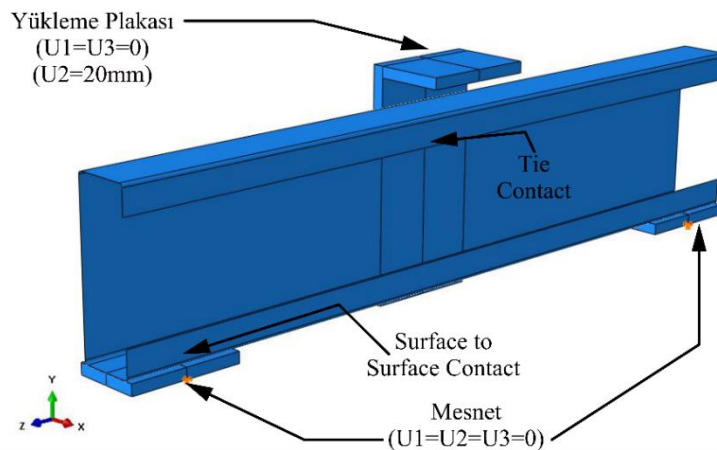
Sonlu elemanlar referans test modelinden tatminkâr sonuç elde edilmesinin ardından çalışmada teorik hesapları yapılan ve kesit özellikleri ve yükleme koşulları Çizelge 1’de verilen kesitlerin sonlu elemanlar modeli oluşturulmuştur.

Sonlu elemanlar modeli oluşturulurken tüm kesitler gerçek ölçülerine sadık kalınarak modele aktarılmıştır. Modelin malzeme özellikleri tanımlanırken elastik-mükemmel plastik malzeme davranışı olarak tanımlanmıştır. Keist akma dayanımı 275 MPa, kopma dayanımı 430 MPa olarak modele tanımlanırken; Elstisite modülü 205000 MPa ve poisson oranı 0.3 olarak alınmıştır. Modelde CFS elemanlar ve yükleme plakaları 5x5 mm mesh boyutlarına sahiptir (Şekil 3). CFS elemanların modelinde Abaqus programı kütüphanesinden S4R kabuk model seçilmiştir. Yükleme plakaları ise C3D8R katı model seçilmiştir. Her iki kesit elemanı seçiminde literatürdeki kullanımları seçimi etkilemiştir.



Şekil 4. Sonlu Elemanlar Modeli Mesh Durumu

Hazırlanan modelde, yükleme plakası ve CFS eleman arasında surface to surface contact tasarlanmıştır. Burada yükleme plakası master, CFS eleman ise slave olarak ayarlanmıştır. Alt kısımda yer alan yükleme noktası pin mesnet oluşturmak amacıyla her yönde deplasman tutulurken dönmeler serbest bırakılmıştır. Üst kısımda ise yükleme plakası x ve z yönünde deplasmanlar tutulurken, yükleme için y yönünde plaka 20 mm aşağı yönde deplasman tanımlanmıştır. Üst plaka tüm yönlerde dönmeleri tutulmuştur. Yükleme plakası ve cfs eleman arasındaki birleşim tie contact elemanı ile tanımlanmıştır (Şekil 4).



Şekil 5. EOF Yükleme Durumu Mesnet ve Birleşim Sonlu Elemanlar Modeli

BULGULAR VE TARTIŞMA

CFS kanal kesitlerin gövde ezilmesi davranışını güncel iki standart ışığında inceleyen çalışma sonucunda, gövde ezilmesi dayanımının tahmin sonuçları karşılaştırılmıştır. AISI S100 ve TS EN 1993-1-3 ile tahmin edilen gövde ezilmesi dayanım sonuçları sonlu elemanlar analiz ile elde edilen sonuçlar ile karşılaştırılmıştır. Bu sonuçlar aşağıda verilmiştir.

Tablo 5. Çalışmada Kullanılan Referans CFS Kanal Kesitlerin Boyutları ve Kesit Özellikleri

Numune	Y.D.	PAISI	PEN	PFEM	PAISI/PTS EN	PFEM/PAISI	PFEM/PEN
C100-t1.5-N75	EOF	5,77	5,83	8,4	0,99	1,45	1,44
C150-t1.5-N75	EOF	5,52	5,42	7,28	1,02	1,31	1,34
C200-t1.5-N75	EOF	5,30	5,01	6,7	1,06	1,26	1,33
C150-t1.5-1005	EOF	6,13	6,02	7,91	1,02	1,29	1,31
C150-t1.5-N150	EOF	7,15	7,23	8,72	0,99	1,22	1,20
C150-t1.5-N200	EOF	8,01	8,43	9,15	0,95	1,14	1,08
C150-t2-N150	EOF	9,47	10,1	12,5	0,93	1,32	1,23
C150-t3-N150	EOF	20,1	23,6	25,0	0,85	1,24	1,05
C150-t4-N150	EOF	34,1	40,9	42,1	0,83	1,23	1,02
C100-t1.5-N75	IOF	9,92	9,64	14,8	1,03	1,49	1,53
C150-t1.5-N75	IOF	9,72	9,15	13,3	1,06	1,36	1,45
C200-t1.5-N75	IOF	9,55	8,67	12,0	1,10	1,26	1,39
C150-t1.5-1005	IOF	10,4	10,4	14,6	1,00	1,39	1,39
C150-t1.5-N150	IOF	11,7	11,9	16,0	0,98	1,37	1,34
C150-t1.5-N200	IOF	12,7	13,6	17,1	0,94	1,33	1,25
C150-t2-N150	IOF	17,4	15,6	19,2	1,12	1,10	1,23
C150-t3-N150	IOF	39,1	33,1	47,2	1,18	1,20	1,42
C150-t4-N150	IOF	69,0	56,0	78,6	1,23	1,13	1,40

Çizelge incelendiğinde EOF yükleme durumu için kesit gövde yüksekliğinin artması, gövde ezilmesi dayanımını azalttığı görülmüştür. Kesit gövde yüksekliği 2 kat artırıldığında taşıma gücü %8 ile %14 oranında azalmaktadır. Gövde yüksekliğine bağlı kesit gövde ezilmesi dayanım tahmininde TS EN 1993-1-3 daha güvenli tarafta kalmaktadır. Yükleme plakası genişliğinin artması taşıma gücünde %23 ile %28 oranında artış hesaplanmıştır. Kesit kalınlığında 2 mm'den 4 mm çıkarıldığında, taşıma gücü %70 oranında artmaktadır. Kesit kalınlığının artması ile taşıma gücü tahminlerinde AISI 'ın daha güvenli tarafta kaldığı görülmektedir.

IOF yükleme durumu için kesit gövde yüksekliğinin artması, gövde ezilmesi dayanımını azalttığı görülmüştür. Kesit gövde yüksekliği 2 kat artırıldığında taşıma gücü %3 ile %10 oranında azalmaktadır. Gövde yüksekliğine bağlı kesit gövde ezilmesi dayanım tahmininde TS EN 1993-1-3 daha güvenli tarafta kalmaktadır. Yükleme plakası genişliğinin artması taşıma gücünde %18 ile %23 oranında artış hesaplanmıştır. Kesit kalınlığında 2 mm'den 4 mm çıkarıldığında, taşıma gücü %75 oranında artmaktadır. Kesit kalınlığının artması ile taşıma gücü tahminlerinde TS EN 1993-1-3 'ün daha güvenli tarafta kaldığı görülmektedir.

Sonlu elemanlar analizi ile modellenen CFS kanal kesitlerin gövde ezilmesi dayanım tahminleri incelendiğinde (Çizelge 5), genel olarak sonlu elemanlar analiz tahminlerine göre standartların tahminin daha güvenli tarafta olduğu gözlenmiştir. Sonlu elemanlar analizi ile tahmin edilen gövde ezilmesi dayanım tahminleri AISI'a göre %28 daha TS EN' ye göre ise %30 daha yüksek değerler tahmin edilmiştir.

SONUÇLAR

CFS kanal kesitlerin gövde ezilmesi dayanımını belirlemek amacıyla kullanılan öne çıkan TS EN 1993-1-3 ve AISI S100-16 standartlarının uygulanması ve yaklaşım farklılıklarını göstermek amacıyla yapılan çalışmada aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

- CFS kesitlerin karmaşık doğası gereği gövde ezilmesi dayanımının tahmini için her iki standartta ampirik denklemler kullanan yaklaşımlar geliştirmiştir. Bu durum sonucunda kesit özelliklerinin değişimi tahmin sapmalarını oldukça artırdığı görülmüştür. Örnek olarak kesit gövdesi yüksekliğinin artışı TS EN 1993-1-3 standardını daha tutucu tahminler yapmasına sebep olmuştur.
- Genel olarak TS EN 1993-1-3 standardının gövde ezilmesi dayanım tahminleri AISI S100-16 'ya göre daha güvenli tarafta kalmakla beraber özellikle kesit kalınlığının artırıldığı kesitlerde AISI dayanım tahminleri daha güvenli tarafta kalmaktadır.
- CFS kesitlerin gövde ezilmesi dayanım tahmininde daha kabul edilebilir çözüm sunabilmek amacıyla deneysel çalışmalar ile desteklenen araştırmaların yapılması planlanmaktadır.
- Gövde ezilmesi davranışını ülkemizde sıklıkla kullanılan CFS kesitler özelinde tam olarak incelemek amacıyla deneysel çalışmaların yapılması gereklidir.

TEŞEKKÜR

Bu çalışmada bulunan sonlu elemanlar analizlerinde sunduğu yardımlar için Bursa Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği bölümü öğretim üyesi Prof. Dr. BABÜR DELİKTAŞ' teşekkürlerimi sunarım.

KAYNAKLAR

- AISI S100-16. (2012). Specifications for the cold-formed steel structural members, cold-formed steel design manual. American Iron and Steel Institute (AISI).
- Alsanat, H., Gunalan, S., Guan, H., Keerthan, P., & Bull, J. (2019) Experimental study of aluminium lipped channel sections subjected to web crippling under two flange load cases. *Thin-Walled Struct.* 141, 460–476.
- Bhakta, B.H., LaBoube, R.A., & Yu, W.W. (1992). The effect of flange restraint on web crippling strength. *Missouri University of Science and Technology, CCFSS Library (1939 - present)*, 90.
- Beshara, B., & Schuster, R. (2000) Web crippling of cold formed steel C-and Z-sections. 15th International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures. University of Missouri—Rolla.
- Eurocode. (2007). Eurocode 3: Design of steel structures - Part 1-3: General rules - Supplementary rules for cold-formed members and sheeting. European Committee for Standardization.
- Holesapple, and R. LaBoube. (2003). Web crippling of cold-formed steel beams at end supports,” *Engineering structures*, vol. 25, no. 9, pp. 1211-1216. [https://doi.org/10.1016/S0141-0296\(03\)00076-2](https://doi.org/10.1016/S0141-0296(03)00076-2).
- Gunalan, S. & Mahendran, M. (2015). Web crippling tests of cold-formed steel channels under two flange load cases. *Journal of Constructional Steel Research*, vol. 110, pp. 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2015.01.018>.
- Lian, Y., Uzzaman, A., Lim, J. B., Abdelal, G., Nash, D., & Young, B. (2016). Effect of web holes on web crippling strength of cold-formed steel channel sections under end-one-flange loading condition—Part I: Tests and finite element analysis. *Thin-Walled Structures*, 107, 443-452. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2016.06.025>.
- Macdonald, M., Don, M. A. H., Kotelko, M., & Rhodes, J. (2011). Web crippling behaviour of thin-walled lipped channel beams. *Thin-Walled Structures*, vol. 49, no. 5, pp. 682-690. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2010.09.010>.
- Macdonald, M., & Heiyantuduwa, M. A. (2012) A design rule for web crippling of cold-formed steel lipped channel beams based on nonlinear FEA. *Thin-Walled Structures*, vol. 53, pp. 123-130. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2012.01.003>.
- Natario, P., Silvestre, N., & Camotim, D. (2016). Direct strength prediction of web crippling failure of beams under ETF loading. *Thin-Walled Structures*, vol. 98, pp. 360-374. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2015.09.012>.
- Prabakaran, K., & Schuster, R. (1998). Web Crippling of Cold-Formed Steel Members. 14th International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures (151-164). Department of Civil Engineering Center for Cold-formed Steel Structures University of Missouri – Rolla.
- Rhodes, J., & Nash, D. (1998). An investigation of web crushing behaviour in thin-walled beams. *Thin-Walled Structures*, 32(1-3), 207-230. [https://doi.org/10.1016/S0263-8231\(98\)00035-4](https://doi.org/10.1016/S0263-8231(98)00035-4).
- Santaputra, C., Parks, M.B., & Yu, W.W. (1989). Web crippling strength of cold-formed steel beams. *Journal of structural engineering*, 115(10): 2511-2527. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1989\)115:10\(2511\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1989)115:10(2511)).
- Sundararajah, L., Mahendran, M., & Keerthan, P. (2016). Experimental Studies of Lipped Channel Beams Subject to Web Crippling under Two-Flange Load Case. *Journal of Structural Engineering*, 142-9. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0001523](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001523).
- Sundararajah, L., Mahendran, M., & Keerthan, P. (2017). Web crippling studies of SupaCee sections under two flange load cases. *Engineering Structures*, vol. 153, pp. 582-597. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.09.058>.
- Young, B., & Hancock, G. J. (2001) Design of cold-formed channels subjected to web crippling. *Journal of Structural Engineering-Asce*, vol. 127, no. 10, pp. 1137-1144. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2001\)127:10\(1137\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2001)127:10(1137)).
- Yu, W. W., & Hetrakul, N. (1978). Webs for cold formed steel flexural members structural behavior of beam webs subjected to web crippling and a combination of web crippling and bending. *Missouri University of Science and Technology, CCFSS Library (1939- present)*, 194.
- Yu, W. W., LaBoube, R. A., & Chen H. (2000). *Cold-formed steel design*. John Wiley & Sons.

Winter, G., & Pian, R.H.J. (1946). Crushing strength of thin steel webs. Cornell Bulletin 35:Part 1. Cornell University.



Kahramanmaraş Sütçü İmam University

Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 07.11.2023
Kabul Tarihi : 08.12.2023

Received Date : 07.11.2023
Accepted Date : 08.12.2023

THE EFFECT OF IMMOBILIZED ENZYME ON TEXTILE WASTEWATER

İMMOBİLİZE ENZİMİN TEKSTİL ATIK SULARINA ETKİSİ

İrem AYRANPINAR,^{1*} (ORCID: 0000-0001-8132-3490)
Melike KOZAK,² (ORCID: 0000-0001-6985-3587)
Serdar GÖÇER,² (ORCID: 0000-0003-0443-8045)
Kevser CIRIK,³ (ORCID: 0000-0002-1756-553X)

¹Kahramanmaraş Sütçü İmam University, Department of Bioengineering and Sciences, Kahramanmaraş, Türkiye

²Cukurova University, Department of Environmental Engineering, Adana, Türkiye

³Kahramanmaraş Sütçü İmam University, Department of Environmental Engineering, Kahramanmaraş, Türkiye

*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: İrem AYRANPINAR, iremayrpnr@hotmail.com

ABSTRACT

Textile wastewater has a complex composition characterized by high dye content and chemical oxygen demand. Therefore, textile wastewaters have serious environmental impacts, such as aesthetic degradation, and carcinogenic properties. Treatment and the recovery of textile wastewater are important due to their high volume and toxicity. The effects of peroxidase enzyme immobilized on magnetic chitosan-clay beads of synthetic textile wastewater were investigated in a batch reactor. System performance was determined by chemical oxygen demand (COD) and color. The batch reactor was operated in three different pH (5, 7, 10), temperatures (25, 35, 45 °C), and reaction times (0-5-10-20-30 min.) with synthetic textile wastewater. As a result, COD and color removal efficiencies were determined as 44% and 56%, respectively, corresponding effluent concentrations are 1442 mg/L, 450 Pt-Co. The results of this study show that using the enzyme immobilization process is an effective method to remove color and COD concentration from textile wastewater.

Keywords: enzyme, immobilization, textile wastewater

ÖZET

Tekstil atıksuları, yüksek boya içeriği ve kimyasal oksijen ihtiyacı ile karakterize edilen karmaşık bir bileşime sahiptir. Bu nedenle tekstil atıksuları estetik bozulma ve kanserojen özellikler gibi ciddi çevresel etkilere sahiptir. Tekstil atık sularının arıtılması ve geri kazanılması, yüksek hacimleri ve toksisiteleri nedeniyle önemlidir. Sentetik tekstil atıksularının manyetik kitosan-kil tanecikleri üzerine immobilize edilen peroksidaz enziminin etkileri kesikli reaktörde araştırılmıştır. Sistem performansı kimyasal oksijen ihtiyacı (KOİ) ve renk ile belirlendi. Kesikli reaktör, sentetik tekstil atıksuyu ile üç farklı pH (5, 7, 10), sıcaklık (25, 35, 45 °C) ve reaksiyon süresinde (0-5-10-20-30 dk.) çalıştırılmıştır. Sonuç olarak KOİ ve renk giderme verimleri sırasıyla %44 ve %56 olarak belirlenmiş olup, buna karşılık gelen atık su konsantrasyonları 1442 mg/L, 450 Pt-Co' dur. Bu çalışmanın sonuçları, enzim immobilizasyon prosesinin tekstil atıksularından renk ve KOİ konsantrasyonunu gidermek için etkili bir yöntem olduğunu göstermektedir.

Anahtar Kelimeler: enzim, immobilizasyon, tekstil atıksuyu

INTRODUCTION

With the rapid population growth in the world, the demand for textile products is increasing. This increase brings with it the resulting wastewater, creating one of the most important industrial wastewater in the world. The textile industry which has the most complex structure among production industries, consists of dyes, suspended solids matter, inorganic salts, and other chemicals (Han et al., 2018; Sun et al., 2015). Textile wastewater is a serious source of pollution due to its high organic load (Bhimani, 2011). The most important pollutant parameter of such wastewater is that it contains dye components. Most organic dyes have carcinogenic and mutagenic properties (Weisburger, 2002). In addition to having negative environmental impacts, these dyes wastewater are toxic and have serious dyeing effects on water streams (Imtiazuddin et al., 2012). These are harmful pollutants that must be treated before being discharged into the environment. Treatment methods vary depending on the characteristics of the textile wastewater. The physical methods such as adsorption, sedimentation, flotation, flocculation, coagulation, ultrafiltration, photoionization, and incineration, as well as the chemical methods (e.g., neutralization, reduction, oxidation, electrolysis, ion exchange, wet-air oxidation) and biological methods (stabilization ponds, aerated lagoons, trickling filters, activated sludge, anaerobic digestion, and various types of microbial strains) have been widely used to removal color from textile wastewater (Darwesh et al., 2019).

Enzymes as biological catalysts could be used in free or immobilized forms, and are more advantageous compared to other methods. Immobilized enzymes are preferred for many reasons such as long-term operational stability, easy recovery, reuse, and being easier to separate from the product in textile wastewater. Immobilized enzymes are prepared by different physical and chemical methods, which affect the properties of the resulting enzymes and therefore their use in certain processes (Abid, et al., 2016; Sheldon, 2007; Cao, 2005; Adamczak and Krishna, 2004; Bommarius and Riebel-Bommarius, 2004). Peroxidase, laccase, lignin peroxidase, horseradish peroxidase, and tyrosinase enzymes were generally used in studies for color removal. A support material is required for the immobilization of enzymes. The support material should be cheap, and biocompatible. Chitosan has many interesting properties such as biocompatibility, hydrophilicity, mechanical stability, renewability, and ease of preparation in different geometric configurations suitable for a chosen biotransformation (Aydemir et al., 2015). Magnetic nanoparticles (MNPs), one of the support materials, increase immobilization efficiency by providing a large surface area for enzyme binding. MNPs are generally made from biocompatible materials such as Fe_3O_4 , as they reduce the risk of particles aggregating (Shaw and Murthy, 2011). Therefore, MNPs are commonly used together including enzymes (Mohamed et al., 2017; Sarno et al., 2017; Wu et al., 2008; Kouassi et al., 2005).

This study aimed to investigate the color and COD removal performances (temperature, pH, and reaction time) of peroxidase enzyme attached to magnetic chitosan clay beads in synthetic textile wastewater.

MATERIAL AND METHOD

Simulated Textile Wastewater

Synthetic textile wastewater fed into the reactor contained nutrients required for microbiological growth. The synthetic textile wastewater content is given in Table 1.

Table 1. Synthetic Textile Wastewater (Cırık, 2010)

Nutrients (mg/L)	
NH ₄ Cl (80)	FeCl ₃ .6H ₂ O (5)
H ₃ BO ₃ (0.04)	NiCl ₂ .6H ₂ O (0.092)
MnCl ₂ .4H ₂ O (0.5)	CoCl ₂ .6H ₂ O (1)
ZnCl ₂ (0.05)	Na ₂ MoO ₄ .2H ₂ O (0.265)
K ₂ HPO ₄ (35)	NaCl (127)
KH ₂ PO ₄ (30)	EDTA (5.4)
CaCl ₂ .2H ₂ O (367)	Glucose (1000)
MgCl ₂ .6H ₂ O (500)	Remazol brilliant violet 5R (100)
CuCl ₂ .2H ₂ O (0.038)	

Reactor Setup and Experimental Design

The schematic diagram of the reactors used in the study is shown in Figure 1. The reactors consisted of 100 mL of three different vessels. The peroxidase enzyme immobilization used in the study was according to Ayranpınar, (2022). HCl or NaOH was used to adjust the pH of wastewater.

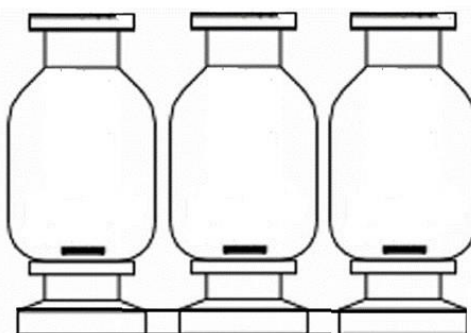


Figure 1. The Experimental Setup

Table 2. Experimental Plan

Parts	pH	Temperature (°C)	Reaction Time (min.)
I	5	25	0-5-10-20-30
	7		
	10		
II	Opt.	25	0-5-10-20-30
		35	
		45	

In this study, the system performance was evaluated in two different parts, and the experimental plan is shown in Table 2. In the first part of the study, the effect of different pH (5-7-10) and reaction times (0-5-10-20-30) at 25 °C was investigated in synthetic textile wastewater. In the remaining part of the study (part II), the system was operated under varying temperatures (25-35-45 °C) and reaction times (0-5-10-20-30) at the optimum pH.

Analysis

The pH and temperature were measured by a pH meter (WTW Multi 340i, Weilheim, Germany). All samples were centrifuged at 4000 rpm for 5 min (Labor-technik, Wehingen, Germany) and then, were filtered using a sterile syringe 0.45µm filter (Sartorius AG, Gottingen, Germany). The COD measurements 1.5 ml of disintegration solution (15,324 g of $K_2Cr_2O_7$, 49.95 g of $HgSO_4$ and 250.5 g of H_2SO_4 was added to the flask and made up to 1000 ml) on top of the 2 ml sample, and 3.5 ml of sulfuric acid-mercuric sulfate solution (10,12 g Ag_2SO_4 was added to 1000 ml (complete with H_2SO_4) in a flask and left in a thermoreactor (ECO 16 Thermoreactor, Velp Scientifica, Milan, Italy) for 2 hours at 150°C, then at 600 nm in the HACH-DR 5000 brand spectrometer (Hach-Lange, Dusseldorf), Germany). Color analyses were performed with a HACH DR 5000 (Loveland, CO., USA) spectrophotometer.

RESULTS AND DISCUSSION

Effect of pH on COD and Color Removal

In this study, the effect of different pH (5-7-9) and reaction times (0-5-10-20-30 min.) using an immobilized peroxidase enzyme on COD and color removal was investigated in textile wastewater. The effect of pH on COD and color removal is shown in Figure 2. The influent COD and color values of synthetic textile wastewater were around 2556 mg/L and 1030 Pt-Co, respectively. The maximum color removal efficiency as Pt-Co was obtained at 400, corresponding to 61% at 10 pH and 5. min. This was an indication that the immobilized peroxidase was more stable under alkaline conditions (Darwish et al., 2019). Sekuljica et al. (2015), obtained 94.7% color removal efficiency at pH 4 and a reaction time of 15 min using horseradish peroxidase enzyme. Han F. et al. (2020) observed in their activities that the pepsin enzyme had max. color removal efficiency at pH 2. They obtained higher results compared to our study. COD removal efficiency remained relatively unchanged at 5. min. at all pH values. The maximum COD removal efficiency was obtained at 1614 mg/L, corresponding to 37% at 5 pH and 5. min.

Effect of Temperature on COD and Color Removal

The effect of different temperatures (25-35-45°C) and reaction times (0-5-10-20-30 min.) using an immobilized peroxidase enzyme is shown in Figure 3. When evaluated in terms of COD and color, the treatment efficiency was 44% and 56% at 35°C temperature at 5. min and 5 pH, while the corresponding COD and color values were observed as 1442 mg/L and 450 Pt-Co. Sökmen et al. (2018) studied the effect of temperature on immobilized tyrosinase

enzyme and observed that the treatment efficiency reached 47% at 35°C. Çelebi et al. (2013) investigated the removal efficiency of R-active Blue 19 dye for 60 minutes at different temperatures using immobilized peroxidase enzyme and concluded that the maximum dye removal efficiency was at 30°C.

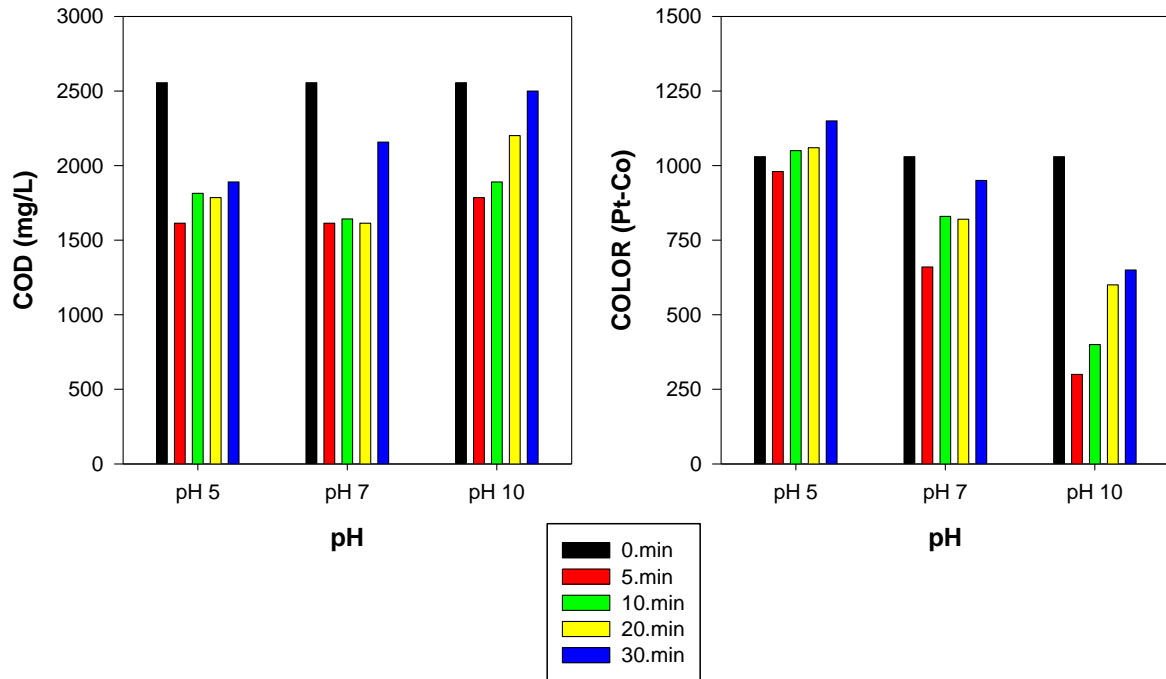


Figure 2. The Effect of pH on DOC and Color Removal

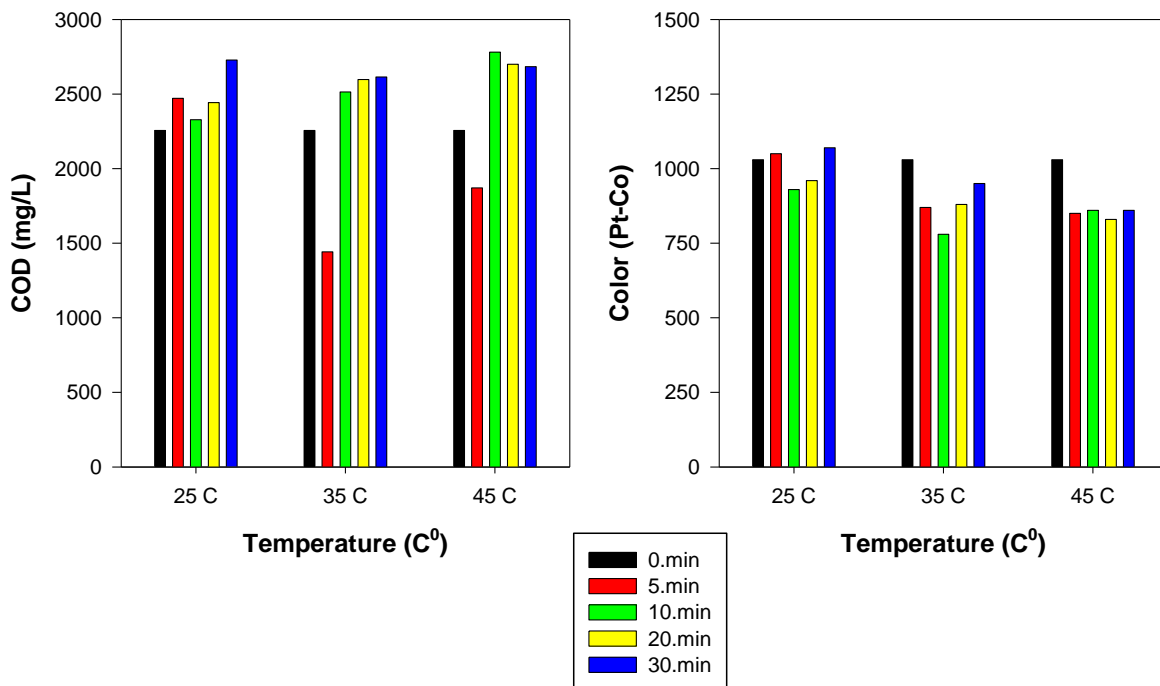


Figure 3. The Effect of Temperature on DOC and Color Removal

CONCLUSION

This study investigated different pH, temperatures (°C), and reaction times (min.) with an immobilization process using synthetic textile wastewater. The optimum pH, temperature, and reaction time were found as 10, 35, and 5, respectively. At optimum pH, temperature, and reaction time 56% color removal efficiency, while COD removal was 44%, corresponding to effluent Pt-Co and COD values of 1442 mg/L and 450 Pt-Co, respectively. This study showed that enzyme-by-immobilizing processes were an effective strategy for COD removal. However, the temperature

parameter was ineffective in terms of color removal efficiency as observed. Effluent color and COD values still do not meet the discharge standards of 280 Pt-Co and 700 mg COD/L in the Water Pollution Control Regulation of Turkey. Therefore, the treatment performance of the immobilization process to meet the discharge standards can be improved by integration.

ACKNOWLEDGMENTS

This work was funded by the Scientific Research Project Coordination Unit of Kahramanmaraş Sutcu Imam University, Turkey (Project No: 2021/2-1 M(YLS)).

REFERENCES

- Abid, O. U. R., Ayaz, M., Rehman, W., Mehdi, K., Ali, A., Wadood, A., ... & Qureshi, M. T. (2016). Synthesis, Enzyme Inhibition, and Molecular Docking Studies of Hydrazones from Dichlorophenylacetic Acids. *Journal of the Chinese Chemical Society*, 63(12), 1015-1021.
- Adamczak, M., & Krishna, S. H. (2004). Strategies for improving enzymes for efficient biocatalysis. *Food Technology and Biotechnology*, 42(4), 251-264.
- Aydemir, T., & Güler, S. (2015). Characterization and immobilization of *Trametes versicolor* laccase on magnetic chitosan-clay composite beads for phenol removal. *Artificial Cells, Nanomedicine, and Biotechnology*, 43(6), 425-432.
- Ayranpınar, i., (2022) Comparison of peroxidase enzyme and free peroxidase enzyme immobilized on magnetic chitosan clay beads and application to waste leakage anaerobic membrane bioreactor (AnMBR) outlet water.57s.
- Bhimani, H. B. (2011). Bacterial degradation of Azo Dyes and its derivatives (Doctoral dissertation, Saurashtra University).
- Bommarius, A. S., & Riebel-Bommarius, B. R. (2004). Biocatalysis: fundamentals and applications. John Wiley & Sons.
- Cao, L. (2005). Immobilised enzymes: science or art?. *Current Opinion in Chemical Biology*, 9(2), 217-226.
- Celebi, M., Kaya, M. A., Altikatoglu, M., & Yildirim, H. (2013). Enzymatic decolorization of anthraquinone and diazo dyes using horseradish peroxidase enzyme immobilized onto various polysulfide supports. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, 171, 716-730.
- Cırık, K., & Çınar, Ö. (2010) Parameters Affecting Anaerobic Color Removal of Textile Wastewaters: An Overview.
- Darwesh, O.M., Matter, I. A., & Eida, M. F. (2019). Development of peroxidase enzyme immobilized magnetic nanoparticles for bioremediation of textile wastewater dye. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 7(1), 102-805.
- G.K. Kouassi, J. Irudayaraj, G. McCarty (2005), Activity of glucose oxidase functionalized onto magnetic nanoparticles, *Biomagn. Res. Technol.* 3 (1), (2005) 1, <https://doi.org/10.1186/1477-044X-3-1>.
- H.B. Bhimani, (2011). Bacterial Degradation of Azo Dyes and its Derivatives, Saurashtra University.
- Han, F., (2020). Ferrosen küpeli çitosanın enzim immobilizasyonu Doktora Tezi. Medeniyet Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü. İstanbul, 47.s.
- Han, G., Chung, T.-S., Weber, M., Maletzko, C., (2018). Low-pressure nanofiltration hollow fiber membranes for effective fractionation of dyes and inorganic salts in textile wastewater. *Environ. Sci. Technol.* 52, 3676–3684.
- Intiazuddin, S. M., Mumtaz, M., & Mallick, K. A. (2012). Pollutants of wastewater characteristics in textile industries. *J Basic App Sci*, 8, 554-556.
- L. Cao, (2005). Immobilised enzymes: science or art? *Curr. Opin. Chem. Boil.* 9 (2), 217–226, <https://doi.org/10.1016/j.cbpa.2005.02.014>.
- M. Adamczak, S.H. Krishna, (2004). Strategies for improving enzymes for efficient biocatalysis, *Food Technol. Biotechnol.* 42 (4), 251–264.

- M. Sarno, M. Iuliano, M. Polichetti, P. Ciambelli, (2017). High activity and selectivity immobilized lipase on Fe₃O₄ nanoparticles for banana flavour synthesis, *Proc. Biochem.* 56, 98–108, <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2017.02.004>.
- R.A. Sheldon, (2007). Enzyme immobilization: the quest for optimum performance, *Adv. Synth. Catal.* 349 (8,9), 1289–1307, <https://doi.org/10.1002/adsc.200700082>.
- S. Intiazuddin, M. Mumtaz, K.A. Mallick, (2012). Pollutants of wastewater characteristics in textile industries, *J. Bas. Appl. Sci.* 8, 554–556, <https://doi.org/10.6000/1927-5129.2012.08.02.47>.
- S. Shaw, P. Murthy, (2011). The effect of shape factor on the magnetic targeting in the permeable microvessel with two-phase Casson fluid model, *J. Nanotechnol. Engin. Med.* 2 (4), 041003, <https://doi.org/10.1115/1.4005675>.
- S.A. Mohamed, M.H. Al-Harbi, Y.Q. Almulaiky, I.H. Ibrahim, R.M. El-Shishtawy, (2017). Immobilization of horseradish peroxidase on Fe₃O₄ magnetic nanoparticles, *Electron. J. Biotechnol.* 27, 84–90, <https://doi.org/10.1016/j.ejbt.2017.03.010>.
- Sekuljica, N., Prlainović, N., Lukić, N. M., Jakovljević, A. M., Grbavčić, S., Mijin, D., & Knežević-Jugović, Z. (2015). Immobilization of peroxidase from fresh horseradish extract for anthraquinone dye decolorization. *Zaštita materijala*, 56(3), 335-339.
- Sheldon, R. A. (2007). Enzyme immobilization: the quest for optimum performance. *Advanced Synthesis & Catalysis*, 349(8-9), 1289-1307.
- Sökmen, B., Yılmazoğlu, B., (2017) Tirozinaz enziminin giresun yöresinde yetişen yenilebilir kanlıca mantarından saflaştırılması ve karakterizasyonu. *Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, Trabzon, 8, 10-23.
- Sun, F., Sun, B., Hu, J., He, Y., Wu, W., (2015). Organics and nitrogen removal from textile auxiliaries wastewater with A2O-MBR in a pilot-scale. *J. Hazard. Mater.* 286, 416–424.
- W. Wu, Q. He, C. Jiang, (2008). Magnetic iron oxide nanoparticles: synthesis and surface functionalization strategies, *Nanosc. Res. Let.* 3 (11), 397, <https://doi.org/10.1002/chin.200924219>.
- Weisburger, J. H. (2002). Comments on the history of eight commercial dyes and heterocyclic amines in public health. *Muta. Res.*, 506, 9-20.
- Y.Y. Sultan, M.A. Ali, O.M. Darwesh, M.A. Embaby, D.A. Marrez, (2016). Influence of nitrogen source in culture media on antimicrobial activity of *Microcoleus lacustris* and *Oscillatoria rubescens*, *Res. J. Pharm. Biol. Chem. Sci.* 7 (2), 1444–1452.