



# KAHRAMANMARAŞ SÜTÇÜ İMAM ÜNİVERSİTESİ

e-ISSN 1309-1751

## Mühendislik Bilimleri Dergisi Journal of Engineering Sciences

2024

SAYI / NUMBER : 2

CILT / VOLUME : 27



# Kahramanmaraş Sütçü İmam University

## Journal of Engineering Sciences



### Yazışma Adresi / Corresponding Address

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

### E - Posta

**jes@ksu.edu.tr**

### Web

**<http://jes.ksu.edu.tr/>**

**Bu dergi hakemli olup yılda 4 kez yayınlanır.**

**This journal is peer - reviewed and published 4 issues per year.**





### Sahibi / Owner

**Prof.Dr. Alptekin YASIM**  
KSU Rector

### Baş Editör / Editor in Chief

**Prof. Dr. Mehmet ÜNSAL**  
munsal@ksu.edu.tr

### Baş Editör Yardımcısı / Vice Editor in Chief

**Assoc. Prof. Dr. Zeynep Banu ÖZGER**  
zeynepozger@ksu.edu.tr

### Editörler / Editors

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

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

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

**Prof. Dr. 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

**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](mailto:koc@cs.ucsb.edu)

**Prof. Dr. Ayhan ÖZDEMİR**

Dep. of Elect. & Elcn Eng.  
Sakarya Univ. Sakarya,  
TURKEY  
[aozdemir@sakarya.edu.tr](mailto:aozdemir@sakarya.edu.tr)

**Prof. Dr. Hüseyin AKILLI**

Dep. of Mechanical Eng.  
ÇU Univ.  
Adana, TURKEY  
[hakilli@cu.edu.tr](mailto:hakilli@cu.edu.tr)

**Prof. Dr. Mehmet KORÜREK**

Dep. Of Elcn & Comm Eng.  
İTU Univ.  
İstanbul. TURKEY  
[korurek@itu.edu.tr](mailto:korurek@itu.edu.tr)

**Prof. Dr. Yasemin KORKMAZ**

Dep. of Textile Eng.  
KSU Univ.  
TURKEY  
[ykorkmaz@ksu.edu.tr](mailto:ykorkmaz@ksu.edu.tr)

**Prof. Dr. Ahmet PINARBAŞI**

Dep. of Mechanical Eng.  
Alanya Alaaddin Keykubat  
Univ. Antalya, TURKEY  
[apinarbasi@alanya.edu.tr](mailto:apinarbasi@alanya.edu.tr)

**Prof. Dr. S. Serhat ŞEKER**

Dep. Of Elect. Eng.  
İTU Univ. İstanbul.  
TURKEY  
[sekers@itu.edu.tr](mailto:sekers@itu.edu.tr)

**Prof. Dr. Şerafettin EREL**

Dep. of Elect. & Elcn Eng.  
YBU Univ.  
Ankara, TURKEY  
[serel@ybu.edu.tr](mailto:serel@ybu.edu.tr)

**Assoc. Prof. Dr. Mustafa ONAT**

Dep. of Computer Eng.  
Marmara Univ.  
İstanbul. TURKEY  
[monat@marmara.edu.tr](mailto:monat@marmara.edu.tr)

**Prof. Dr. Eyüp DEBİK**

Dep. of Environmental Eng.  
Yıldız Technical Univ.  
İstanbul. TURKEY  
[debik@yildiz.edu.tr](mailto:debik@yildiz.edu.tr)

**Prof. Dr. Fan MIZI**

Dep. of Civil Eng.  
Brunel Univ.  
Uxbridge,UK  
[mizi.fan@brunel.ac.uk](mailto:mizi.fan@brunel.ac.uk)

**Prof. Dr. A. Fevzi BABA**

Dep. of Elect. & Elcn Eng.  
Marmara Univ. İst.,  
TURKEY  
[fbaba@marmara.edu.tr](mailto:fbaba@marmara.edu.tr)

**Dr. Amit CHAUDHRY**

Dep. of Microelectronics  
Panjab Univ,  
Chandigarh, India  
[amit\\_chaudhry01@yahoo.com](mailto:amit_chaudhry01@yahoo.com)

**Assoc. Prof. Dr. Nazmi EKREN**

Dep. of Elect. & Elcn. Eng.  
Marmara Univ.  
İstanbul, TURKEY  
[nekren@marmara.edu.tr](mailto:nekren@marmara.edu.tr)

**Prof. Dr. Mustafa YAZICI**

Dep. of Physics Education.  
KSU Univ.  
K.Maras. TURKEY  
[yazici@ksu.edu.tr](mailto:yazici@ksu.edu.tr)

**Prof. Dr. Selim AY**

Dep. Of Elect. Eng.  
YTU Univ.  
İstanbul. TURKEY  
[selimay@yildiz.edu.tr](mailto:selimay@yildiz.edu.tr)

**Prof. Dr. Musa GÖĞEBAKAN**

Dep. of Physics  
KSU Univ.  
K.Maraş, TURKEY  
[gogebakan@ksu.edu.tr](mailto:gogebakan@ksu.edu.tr)

**Prof. Dr. Murat PALA**

Dep. of Civil Eng.  
Adıyaman Univ.  
Adıyaman. TURKEY  
[pala@adiyaman.edu.tr](mailto:pala@adiyaman.edu.tr)

**Prof. Dr. İ.Taner OKUMUŞ**

Dep. of Computer Eng  
KSU Univ.  
K.Maraş. TURKEY  
[iokumus@ksu.edu.tr](mailto:iokumus@ksu.edu.tr)



# Kahramanmaraş Sütçü İmam University Journal of Engineering Sciences



**BU SAYIYA (CİLT 27 SAYI 2) KATKI VEREN HAKEMLER**

**Şeyda EYÜPOĞLU**

**Erol KILIÇKAP**

**Yılmaz KÜÇÜK**

**Oğuz TUNÇEL**

**Adem IŞIK**

**Burak EVİRGEN**

**Ramazan SOLMAZ**

**Gözdem DURAL**

**Sezin GÜLERYÜZ ERGÜL**

**Cengizhan DURUCAN**

**Mehmet TEKEREK**

**Uğur KAPLANCALI**

**Rabia DEMİR**

**Oğuz AKPOLAT**

**Kemal Dinçer DİNGEÇ**

**Abdullah SAKALLI**

**Selin SARAÇ GÜLERYÜZ**

**İrfan KOCA**

**Sinan CANSIZ**

**Burcu KÜÇÜKOĞLU DOĞAN**

**Sezgin ESER**

**İsrafil KARADÖL**

**Saadettin ONAT**

**Sami ŞİT**

**Mustafa DOLAZ**

**Neslihan AYDIN**

**Ahmet Serdar YILMAZ**

**Furkan DİNÇER**

**Meliha OKTAV BULUT**

**Yavuz KAPLAN**

**Mehmet Şükrü ADİN**

**Arslan KAPTAN**

**Müge Elif FIRAT**

**Erdal KILIÇ**

**Mehmet Ali ÖZÇELİK**

**Oktay KARABAĞ**

**Fuat KORKUT**

**Memduh KARALAR**

**Bilgehan GÜRÜNLÜ**

**Abdullah ÇALIŞKAN**

**Muhammed ORDU**

**Abdulkadir ATALAN**

**Zeynep D. UNUTMAZ DURMUŞOĞLU**

**Durdu Hakan UTKU**

**Nefise ÖZÇELİK**

**Mehmet Fatih ALTAN**

**Sinan MARAŞ**

**Faruk MERT**

**Mahit GÜNEŞ**

**Tuncer DİLİK**

**Mustafa TEKİN**

**Kevser CIRIK**

**Bahadır Erman YÜCE**

**Muhammed Safa KAMER**

**Erkan MEŞE**

**İlker MERT**

**Hasan Hüseyin BİLGİÇ**

**Yavuz CANBAY**

**Umut ÖZKAYA**

**Esra TUĞRUL TUNÇ**

**Hasan VARDİN**

**Osman BABAYİĞİT**

**Mustafa Alptekin ENGİN**

**Hüseyin Bilal MACİT**

**Ali ÇALHAN**

**Ahmet Levent İNANÇ**

**Hüseyin Turan ARAT**

**Tufan YILMAZ**



## İÇİNDEKİLER

### ARAŞTIRMA MAKALESİ – RESEARCH ARTICLE

- Dyeing Of Cotton Fabrics With Sodium Copper Chlorophyll**  
**Pamuklu Kumaşların Sodyum Bakır Klorofil İle Boyanması** 293-300  
Deniz Mutlu ALA, Gamze Gülşen BAKICI
- Cam Elyaf Takviyesinin Poli-Eter-İmid Numunelerin Kuru Kayma Aşınma Davranışına Etkisi**  
**Effect Of Glass Fiber Reinforcement On Dry Sliding Wear Behavior Of Poly-Ether-Imide Specimens** 301-310  
Ahmet MASLAVI, Hüseyin ÜNAL, Alim KAŞTAN
- Tig Kaynak Yöntemiyle Alaşımlandırılan Fe Matrisli Karbür Tabakaların Mikroyapı Ve Sertlik İncelemesi**  
**Microstructure And Hardness Investigation Of Fe Matrix Carbide Layers Alloyed By Tig Welding Method** 311-324  
Serkan ÖZEL
- Evaluation Of Bearing Capacity Increase For Woven Geotextile Reinforced Soils In Terms Of Width Of Footing**  
**Örgülü Geotekstil İle Güçlendirilmiş Zeminler İçin Taşıma Kapasitesi Artışının Temel Genişliği Açısından Değerlendirilmesi** 325-339  
Bayram ATEŞ, Erol ŞADOĞLU
- Elektrikli Araç Şarj İstasyonlarının Enerji Dağıtım Hatlarına Optimum Şekilde Konumlandırılması**  
**Optimal Allocation Of Electric Vehicle Charging Stations On Energy Distribution Networks** 340-363  
Murat ÇIKAN, Nisa NACAR ÇIKAN
- Marmara Denizi'nde Görülen Müsilajın Ortadan Kaldırılmasına Yönelik Politikaların Sistem Dinamiği İle İncelenmesi**  
**Examining The Policies For Elimination Of Mucilage In The Sea Of Marmara Via System Dynamics** 364-385  
Duygun Fatih DEMİREL, Eylül Damla GÖNÜL-SEZER
- Investigation Of The Fracture Behavior Of Geopolymer Concrete Reinforced With Recycled Steel And Glass Fibers**  
**Geri Dönüştürülmüş Çelik Lif Ve Cam Elyafı Kullanılarak Güçlendirilmiş Geopolimer Betonların Kırılma Davranışının İncelenmesi** 386-400  
Hakan BAYRAK, Muhammed GÜMÜŞ
- İnsan Kaynaklarında Etkili İşe Alım Süreci İçin Türkçe Bir Ontoloji Geliştirilmesi**  
**Developing A Turkish Ontology For Effective Recruitment Process In Human Resources** 401-414  
Selin BİTİRİM, Duygu ÇELİK ERTUĞRUL

<b>Güncel Sanatta Bir Üretim Biçimi Olarak Çekişmeli Üretken Ağlar</b> <b>Generative Adversarial Networks As A Practice In Contemporary Art</b> <b>Serdar ÇİFTÇİ, Dilara KARAKAŞ TABAK</b>	<b>415-425</b>
<b>Simülasyon Ve Matematiksel Model Yaklaşımları İle Müşteri Şikayetlerini Çözme Süresi Ve Maliyetinin Araştırılması</b> <b>Investigating The Time And The Cost Of Solving Customer Complaints With Simulation And Mathematical Model Approaches</b> <b>Vedat ÇEKİCİ</b>	<b>426-446</b>
<b>Pirazol Türevi Bir Bileşiğin Kuramsal Hesaplamaları Ve Hirshfeld Yüzey Analizi</b> <b>Theoretical Calculations And Hirshfeld Surface Analysis Of A Pyroazole-Derived Compound</b> <b>Gonca ÖZDEMİR TARI</b>	<b>447-458</b>
<b>Geri Dönüştürülmüş Agrega İçeren Kendiliğinden Yerleşen Betonun Mühendislik Özelliklerinin Optimizasyonu</b> <b>Optimization Of Engineering Properties Of Self-Compacting Concrete Containing Recycled Aggregate</b> <b>Şevin EKMEK</b>	<b>459-469</b>
<b>Lazer Kesim Makinelerinde İş Parçası Kalınlığının Titreşim Kaynaklı Üretim Hatalarına Etkisi: Deneysel Bir İnceleme</b> <b>The Effect Of Workpiece Thickness On Vibration-Induced Production Errors In Laser Cutting Machines:An Experimental Study</b> <b>Deniz KAYA, Derya MERT, Ahmet KAHRAMAN, Murat REİS</b>	<b>470-480</b>
<b>Derin Öğrenme Tabanlı Modellerle Akciğer X-Ray Görüntülerinden Covid-19 Tespiti</b> <b>Detection Of Covid-19 From Chest X-Ray Images With Deep Learning Based Models</b> <b>Hacı Ömer DOKUMACI</b>	<b>481-487</b>
<b>Impact Of Electric Cars On The Crash Performance Of Longitudinal Barriers</b> <b>Elektrikli Araçların Güvenlik Bariyerlerinin Çarpışma Performansına Etkisi</b> <b>Ayhan Öner YÜCEL</b>	<b>488-501</b>
<b>Karaçam Odunundan Üretilen Çapraz Lamine Ahşabın Seçilmiş Mekanik Özellikleri Üzerine Rutubetin Etkisi</b> <b>The Effect Of Moisture On Selected Mechanical Properties Of Cross-Laminated Timber Manufactured From Black Pine Wood</b> <b>Aydanur HIDIR, Bekir Cihad BAL, Ela AVŞAROĞLU</b>	<b>502-510</b>
<b>A Deep Learning-Based Demand Forecasting System For Planning Electricity Generation</b> <b>Elektrik Üretimini Planlanması İçin Derin Öğrenme Tabanlı Talep Tahmin Sistemi</b> <b>Muhammet Mustafa GÖKÇE, Erkan DUMAN</b>	<b>511-522</b>
<b>Sentezlenen Metal Oksit Nanokompozit Yardımıyla Sucul Çözeltilerden Reaktif Azo Boya Giderimi</b> <b>Reactive Azo Dye Removal From Aquatic Solutions Using Synthesized Metal Oxide Nanocomposite</b> <b>İlknur ŞENTÜRK</b>	<b>523-538</b>
<b>Kenevir Tohumu Yağı Ve Naoh-Koh Kullanılarak Üretilen Metil Esterlerin Motorinle Harmanlanması İle Elde Edilen Biyoyakıtların Kinematik Viskozite Değerlerinin Karşılaştırılması</b> <b>Comparison Of Kinematic Viscosity Values Of Biofuels Produced By Blending Methyl Esters Produced Using Hemp Seed Oil And Naoh-Koh With Diesel Fuel</b> <b>Fatmanur DEMİRBAŞ, Volkan ASLAN</b>	<b>539-553</b>

- Manyetik Kontrollü Şönt Reaktör Fem Analizi Ve Uygulaması**  
**Magnetic Controlled Shunt Reactor Fem Analysis And Application** 554-566  
İsmet KAYMAZ, Mehmet BAYRAK, Semih TURSUN
- Dahili İç Reformer İle Çalışan Erimiş Karbonat Yakıt Pilinin (Dir-Mcfc) Performans Parametrelerinin İncelenmesi, Enerji Ve Ekserji Analizi**  
**Investigation Of Performance Parameters, Energy And Exergy Analysis Of Molten Carbonate Fuel Cell (Dir-Mcfc) Working With Internal Reformer** 567-578  
Elvan DEMİRYÜREK, Yıldız KOÇ, Özkan KÖSE, Hüseyin YAĞLI
- 3b Yazıcıda Abs Ve Pla Malzeme İle Üretilmiş Levhalarla Oluşturulan Tek Tesirli Yapıştırma Bağlantılarının Araştırılması**  
**Investigation Of Single Lap Joints Created With Plates Produced In 3d Printer With Abs And Pla Material** 579-588  
Muhammed Safa KAMER, Şemsettin TEMİZ
- Bentonit Kum Karışımlarında Elastik Drenajsız Modul-Serbest Basınç Mukavemeti İlişkisi**  
**The Relationship Between Elastic Undrained Modulus-Undrained Shear Strength For Bentonite Sand Mixtures** 589-600  
Eyyüb KARAKAN
- A Bit-Level Audio Encryption Algorithm Using A New Hybrid Chaotic Map**  
**Yeni Bir Hibrit Kaotik Harita İle Bit-Seviyesi Ses Şifreleme Algoritması** 601-614  
Mehmet DEMİRTAS
- Deniz Yırtıcıları Algoritması İle Türkiye'nin Enerji Talebinin Tahmin Edilmesine Yönelik Kapsamlı Bir Çalışma**  
**A Comprehensive Study On Forecasting Turkey's Energy Demand With The Marine Predators Algorithm** 615-630  
Ahmet ÖZKİŞ
- Atık Cam Tozu Katkılı Betonların Yüksek Sıcaklık Altındaki Performanslarının İncelenmesi**  
**Investigation Of The Performance Of Waste Glass Powder Substituted Concretes Under High Temperatures** 631-642  
Tuba DEMİR, Bahar DEMİREL, Ayşe Çiğdem ŞİRECİ

***DERLEME MAKALESİ – REVIEW ARTICLE***

- Multispektral Ve Hiperspektral Görüntüleme Tekniklerinin Meyve - Sebze İşleme Tesislerinde Kullanım Olanakları**  
**Potentials Of Multispectral And Hyperspectral Imaging Techniques In Fruit And Vegetable Processing Plants** 643-656  
Özgür Neşe ÖZEN, Fatih AKKOYUN, Ahmet GÖRGÜÇ, Fatih Mehmet YILMAZ





# Kahramanmaraş Sutcu Imam University

## Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 28.09.2024  
Kabul Tarihi : 30.04.2024

Received Date : 28.09.2024  
Accepted Date : 30.04.2024

### DYEING OF COTTON FABRICS WITH SODIUM COPPER CHLOROPHYLL PAMUKLU KUMAŞLARIN SODYUM BAKIR KLOROFİL İLE BOYANMASI

Deniz Mutlu ALA<sup>1</sup> (ORCID: 0000-0002-5864-308X)  
Gamze GÜLŞEN BAKICI<sup>1\*</sup> (ORCID: 0000-0002-4241-7096)

<sup>1</sup> Çukurova Üniversitesi, AOSB Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu Tekstil, Giyim Ayakkabı ve Deri Bölümü, Adana, Türkiye

\*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Gamze GÜLŞEN BAKICI, gamzegulsenbakici@gmail.com

#### ABSTRACT

The aim of this study is to determine the dyeing temperature at which cotton fabrics will absorb the most sodium copper chlorophyll (SCC) dyestuff. Bleached 100% cotton rib knitted fabrics were dyed with SCC at different times without mordanting. The dye absorption of the fabrics was determined by a spectrophotometric method depending on the dyeing time. Firstly, SCC solutions with known concentrations were measured and the calibration (absorbance-concentration) curve was obtained. Then, the SCC concentrations remaining in the dye liquors after dyeing at different times were determined. The dye exhaustion of the fabrics was calculated using the concentrations of the dye baths before and after dyeing. Color measurements and fastness tests of the dyed samples were performed.

**Keywords:** Sodium copper chlorophyllin, natural dyeing, color, UV-Vis

#### ÖZET

Bu çalışmanın amacı, pamuklu kumaşların sodyum bakır klorofil (SCC) boyarmaddesini en fazla çekeceği boyama sıcaklığını tespit etmektir. Ağartılmış %100 pamuklu ribana örme kumaşlar, SCC ile mordanlama yapılmadan farklı sürelerde boyanmıştır. Kumaşların boya çekimi boyama süresine bağlı olarak spektrofotometrik yöntem ile belirlenmiştir. İlk olarak konsantrasyonları bilinen SCC çözeltileri ölçülünerek kalibrasyon (absorbans-konsantrasyon) eğrisi elde edilmiştir. Ardından farklı sürelerde yapılan boyama işlemlerinden sonra boya flotteleri içerisinde kalan SCC konsantrasyonları tespit edilmiştir. Kumaşların boya çekimi, boya banyolarının boyama öncesi ve boyama sonrası konsantrasyonları kullanılarak hesaplanmıştır. Boyanmış numunelerin renk ölçümleri ve haslık testleri yapılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Sodyum bakır klorofil, doğal boyama, renk, UV-Vis

## INTRODUCTION

Natural dyes have been widely used in the coloring of natural fibers including wool, silk, and cotton since ancient times. Although at present synthetic dyes are dominating over natural dyes as they have advantages such as the complete range of colors and excellent color fastness, they have important disadvantages as they have adverse effects on human health and the environment (Mirjalili et al., 2022; Hossain et al. 2021; Jia et al., 2017). Whereas natural dyes are nontoxic, non-carcinogenic, biodegradable, and more eco-friendly compared with their synthetic counterparts (Baig et al., 2021; Tayade & Adivarekar, 2013). Concerning the growing awareness of environmental and health related problems, natural dyes have been receiving more attention for textile applications on account of their renewability, biodegradability, low toxicity, and environmentally friendly nature (Wang et al., 2017; Oh & Na, 2014; Islam et al., 2013). Many natural dye sources including plant, animal, and mineral extracts have been successfully applied for textile dyeing and printing (Ala & Gülşen Bakıcı, 2020; Rekaby et al., 2009; Karadağ, 2007).

Natural green dyes consisting of chlorophylls are used in many approaches as fabric dyeing colorants. Chlorophyll is the pigment that gives plants their characteristic green color. As a natural derivative of natural chlorophyll, sodium copper chlorophyll (SCC) is a natural edible pigment and can also be used as a green natural colorant for natural fibres (Liu et al., 2020; Hou et al., 2012; Ferruzi et al., 2002).

Recently, researchers have focused on investigating the natural dyeing of textile materials and their dyeability. Research has been conducted in the literature on “dyeing silk using Dwarf Elder fruit dye and Alkannin dye from *Alkanna tinctoria*” (Dayioglu et al., 2015; Adeel et al., 2022), “dyeing wool using *Chamaecyparis Lawsoniana* cone extract and madder and *resedaluteola*” (Kilinc et al., 2015; Hosseinnazhad et al., 2022), “dyeing of banana fibers with natural dye extracted from the turmeric plant”(Canbolat et al., 2015), “dyeing of cotton with *Helichrysum Arenarium* extract and a natural dye extracted from *Syzygium cumini* fruits” (Akkaya & Eyupoglu, 2016; Periyasamy, 2022), “dyeing of mohair fibers with natural dye extracted from *Candelariella reflexa*” (Eyupoglu et al., 2022), “dyeing of organic cotton fabrics with gardenia yellow from *Gardeniae fructus* seeds” (Jiang et al., 2022), “dyeing hemp with extract dye from stinging nettle” (Gürbüz, 2022). In this study, natural dyeing was carried out using sodium copper chlorophyll. Summarizing the research conducted using SCC, it can be expressed as follows. Hou et al., (2012) investigated the kinetics and thermodynamics of SCC adsorption on silk in dye bath and they reported that SCC can be used for dyeing protein-based fibers. Tsatsaroni and Liakopoulou-Kyriakides, (1995) studied the fastness properties of natural fabrics dyed with the natural dyes chlorophyll and carmine after treatment with the enzymes. Yoo et al., (2013) investigated the possibility of dyeing wool and silk fabrics with chlorophyll without chemical alteration by using methanol, acetone, and water to extract spinach and mate powders. Usop et al., (2016) investigated the color stability of natural green dye coating films consisting of chlorophyll from *Cassia alata* leaves, which were exposed to ultraviolet A (UV-A). Zhao et al., (2020) used ethylene-diaminetetraacetic acid disodium salt and sodium citrate to treat the cotton fabrics dyed with SCC and gardenia yellow.

SCC, derived from chlorophyll, is a green natural dye extensively employed for coloring food and beverages (Zhong et al., 2020). Research on the use of SCC in the dyeing of textile materials is limited. The main objective of this study was to determine the dyeing temperature of SCC for dyeing cotton materials and to investigate its color and retention properties.

## EXPERIMENTAL STUDY

### *Material*

100% cotton 1 x 1 rib knitted fabric was produced on a 10 gauge flat knitting machine using Ne 20/1 cotton carded ring yarn. Commercial sodium copper chlorophyll dye ( $C_34H_{31}CuN_4Na_3O_6$ , SCC) liquid was provided from Tito Co. Ltd., Turkey.

### *Method*

#### *Pre-treatment*

The bleaching processes for cotton fabric were conducted within the laboratory type machine operating at 95°C. Employing a specific recipe represented in Table 1, the bleaching process involved the application of hydrogen peroxide alongside auxiliary chemicals. The bleaching process of the fabrics was done according to the exhaust method.

**Table 1.** Pretreatment Recipe and Diagram

Liquor ratio	1:30
Oil remover soap (g/L)	0.5
Anti-crease (g/L)	0.5
İon trapping (g/L)	0.8
Wetting agent (g/L)	0.5
Peroxide Stabilizer (g/L)	0.8
Sodium Hydroxide (46°Be) (g/L)	4
Hydrogen peroxide (%35) (%)	6
pH	10

After the bleaching procedures, the samples underwent rinsing and neutralization in a neutralizing solution containing 1 cm<sup>3</sup>/L of acetic acid, maintained at 50°C for a duration of 20 minutes. Subsequently, an anti-peroxide treatment was conducted in a solution composed of 1 g/L antiperoxide and 0.5 cm<sup>3</sup>/L acetic acid, also held at 50°C for 20 minutes. The process concluded with a final rinse before drying.

### **Dyeing**

The dyeing process was performed at a temperature of 60°C, maintaining a liquor ratio of 10:1. Upon reaching the prescribed dyeing temperature, cotton fabrics were immersed for varying durations ranging from 10 to 90 minutes, while the SSC remained constant at 7 ml/L throughout the dyeing processes. After dyeing, the samples underwent two consecutive rinse cycles before being air-dried under ambient conditions.

### **UV-Vis Spectroscopy**

A UV-Visible light spectrophotometer (UV-1800 Shimadzu) was employed to examine the dye exhaustion of the cotton fabric.

### **Color Measurement & Color Strength & Color Fastness**

The CIELab color values (L\*, a\*, b\*, ΔE) of the dyed samples were determined using a Datacolor 850 spectrophotometer from Eksoy Chemical Industry, Turkey, with illuminant D65 and a 10° standard observer. Colorfastness to rubbing and washing of fabric were determined according to TS EN ISO 105-X12 and TS EN ISO 105-C06, respectively. Additionally, the color strength of cotton fabric samples was assessed by obtaining K/S values at the maximum wavelength using the spectrophotometer (Equation 1).

$$K/S = (1-R)^2/2R$$

Equation 1

where, R=reflectance, K=absorption coefficient, and S=scattering coefficient of dye (Periyasami, 2022).

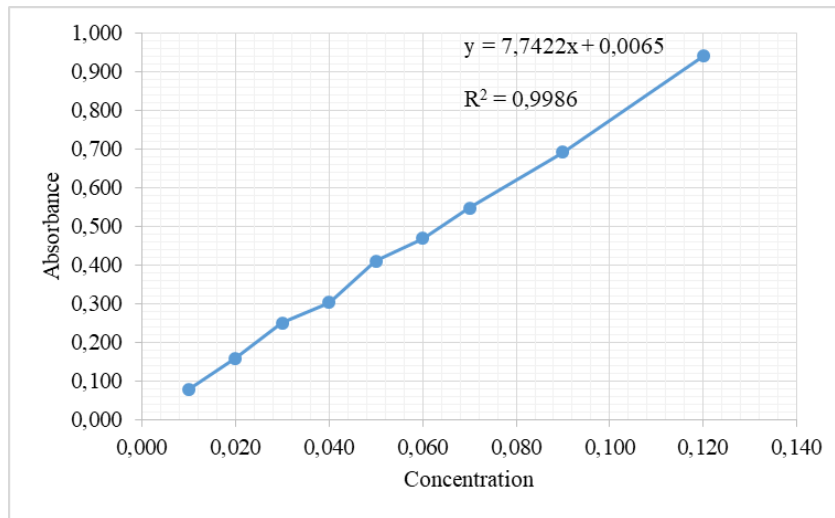
## **RESULTS AND DISCUSSION**

### **UV-Vis Spectroscopy**

#### **Calibration Curve**

To determine the concentration of dyestuff remaining in the dye bath after dyeing, the maximum absorbance wavelength of the sodium copper chlorophyll dyestuff was first determined with the UV-1800 Shimadzu Spectrophotometer device in the laboratory of Eksoy Chemical Industry, which can measure in the range of 190-1100 nm. For this purpose, a 0.1% dilute solution of copper chlorophyll dye was prepared. The absorbance wavelength measurement of the dyestuff was made from this dilute solution. The measured wavelength range was 400-800 nm, the photometric method was chosen, and  $\lambda_{max} = 626.5$  nm (Figure 2). To create the calibration curve, the wavelength was set as 626.5 nm and dye solutions (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 9, 12) at 9 different concentrations were used.

The solutions containing specified dye concentrations were individually subjected to analysis within the UV-VIS spectrophotometer, whereupon the respective absorbance values were determined. Subsequently, a graphical representation delineating absorbance against concentrations, termed herein as the absorbance graph or calibration curve, was constructed (Figure 1).



**Figure 1.** Absorbance Graph (calibration curve) for SCC

### Examination of Dye Exhaustion Depending on Time

To determine suitable dyeing time for the natural dyeing process of cotton with SCC, dyeing processes were performed at 60°C with different dyeing times (10 to 90 minutes) by using the same concentration of SCC (7 ml/L) in the dyeing bath. The liquor ratio for dyeing was chosen as 10:1. Dye exhaustion was determined by the spectrophotometric method. Dye exhaustion was calculated according to the Equation (2).

$$\text{Dye Exhaustion (\%)} = (C_b - C_a)/C_b * 100 \tag{Equation 2}$$

where  $C_b$  is the concentration of the dye bath before dyeing and  $C_a$  is the concentration of the dye bath after dyeing (Yolaçan, 2009). The unexhausted amounts of SCC were determined by the difference in the dye concentration in the dye bath before and after dyeing.

As seen in Table 2, the dyeing time had a significant effect on the dye exhaustion. It is seen that approximately 15% of the dye in the dye bath is exhausted during the first 10 minutes. It is seen that the dye exhaustion value was gradually increasing up to 60 minutes of dyeing time. The opportunity for migration of the SCC molecules from the dyeing bath to the surface of the cotton fabric increases till it reaches the optimum dyeing time. The maximum value of dye exhaustion (%25.71) was obtained at 60 minutes of dyeing time. Further increase in the dyeing time is accompanied by either staying constant or even a decrease in dye exhaustion. Hence, it may be concluded that the optimum dyeing time is 60 minutes for reaching the dyeing saturation of cotton fabrics when it was dyed with SCC under the conditions in this study.

**Table 2.** Dye Exhaustion

Sample Code	Dye Exhaustion (%)	Unexhausted Dye (%)
P10	15.71	84.29
P20	17.14	82.86
P30	20.00	80.00
P40	21.42	78.58
P50	21.42	78.58
P60	25.71	74.29
P70	25.71	74.29
P80	22.85	73.15
P90	25.71	71.43

### Color Measurement & Color Strength

Color measurements were made to assess the color of dyed samples. The color values given as CIELab coordinates are shown in Table 3 when the sample P60 was selected as the reference. As seen in Table 3, dyeing time influences the color of dyed fabrics. L\* values decrease with increasing dyeing time, and the dyed samples are darker with longer dyeing time with regard the L\* coordinate. Negative a\* value means the greenness of a shade, and positive b\* is the yellowness of the shade. With the longer dyeing time, the changes in the values of a\* and b\* were not fluent. The results also revealed that the K/S value is affected by the dyeing time and increases with the longer dyeing time. The K/S value was improved from 0.76 to 1.16 over time from 10 minutes up to 90 minutes.

**Table 3.** Color Measurement Results

Sample Code	L*	a*	b*	$\Delta E$	K/S
P60	78.12	-8.80	9.09		1.08
P10	79.03	-6.58	8.94	1.99	0.76
P20	79.11	-6.75	9.36	1.95	0.81
P30	78.85	-8.38	8.96	0.45	1.02
P40	78.94	-8.82	8.75	0.43	0.97
P50	78.38	-9.05	8.83	0.37	1.11
P70	78.25	-8.36	9.16	0.41	1.12
P80	78.22	-8.39	9.20	0.40	1.12
P90	77.33	-9.21	9.26	0.46	1.16

### Color Fastness

Color fastnesses to rubbing and washing were determined (Table 4). The wet and dry rubbing fastness values of the samples dyed for 40-50-60-70-80 and 90 minutes were observed at a very good level (4 and 5). In the color fastness test to washing, level 4 staining was observed on the cotton fabric. It can be concluded that SCC dye exhibits good fastness to dry and wet rubbing and washing fastness.

**Table 4.** Color Fastness to Rubbing and Washing

Sample Code	Rub Fastness		Washing Fastness						
	Dry	Wet	Acetate	Cotton	Polyamide	Polyester	Acrylic	Wool	Fading
P10	4/5	4	4/5	4	5	5	4/5	5	4
P20	4/5	4	4/5	4	5	5	4/5	5	4
P30	4/5	4	4/5	4	5	5	5	5	4
P40	4/5	4/5	5	4	5	5	5	5	4
P50	4/5	4/5	5	4	5	5	5	5	4
P60	4/5	4/5	5	4	5	5	5	5	4/5
P70	4/5	4/5	5	4/5	5	5	5	5	4/5
P80	5	4/5	5	4/5	5	5	5	5	4/5
P90	5	4/5	5	4/5	5	5	5	5	4/5

### CONCLUSIONS

The objective of this investigation is to examine the impact of dyeing duration on the dyeing process of cotton utilizing sodium copper chlorophyllin. 100% cotton textiles underwent dyeing with SCC as a natural dye without mordanting, and the influence of dyeing duration on SCC exhaustion was evaluated using the UV-Vis spectrophotometer. In the dyeing of cotton with reactive dyestuffs, dye uptake increased rapidly for a certain period depending on the dyeing time and then increased with decreasing acceleration (Özdemir & Tutak, 2013). When the % dye exhaustion behaviour of SCC was examined in response to increasing dyeing time, a similar behaviour was observed. Spectrophotometric analysis reveals that the dye exhaustion value steadily rises up to 60 minutes of dyeing time, after which further increases do not significantly enhance dye exhaustion. This suggests that a dyeing time of 60 minutes is optimal for achieving maximum dye uptake when dyeing cotton with SCC.



Color strength increases with increasing dyeing concentration and time (Shahid et al., 2016; Kamel et al., 2007). K/S values of the dyed cotton samples exhibit a noteworthy increase from 0.76 to 1.16 as the dyeing time extends from 10 to 90 minutes, indicating improved color strength with prolonged dyeing time. Notably, it reveals a positive correlation between dyeing time, dye exhaustion, and color strength (K/S).

Additionally, the color measurements and the fastness properties were assessed. Both dry and wet rubbing, as well as washing fastness, are rated as good to excellent, underscoring the suitability of the dyeing process for practical applications. These findings collectively contribute to a better understanding of the dynamics involved in dyeing cotton with SCC, paving the way for enhanced practices in environmentally friendly textile production.

### **Acknowledgments**

This work was supported by the Research Fund of Çukurova University, project number: FBA-2018-10278. The authors wish to thank Eksoy Company, Turkey.

### **REFERENCES**

- Adeel, S., Liaqat, S., Hussaan, M., Mia, R., Ahmed, B., & Wafa, H. (2022). Environmental friendly bio-dyeing of silk using *Alkanna tinctoria* based Alkannin natural dye. *Industrial Crops and Products*, 186, 115301.
- Akkaya, M., & Eyupoglu, S. (2016, February). The examination of the effects of quercus aegilops extract used as natural mordant on colourfulness features of natural dyeing. In *2016 IEEE NW Russia Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference (EIconRusNW)* (pp. 108-111). IEEE.
- Ala, D.M. & Gülşen Bakıcı, G. (2020). Investigation of the usability of eastern groundsel (*Senecio Vernalis*) plant in natural dyeing. *Journal of the Textiles and Engineer*, 27(4), 236-242. <https://doi.org/10.7216/1300759920202712003>
- Baig, U., Khatri, A., Ali, S., Sanbhal, N., Ishaque, F. & Junejo, N. (2021). Ultrasound-assisted dyeing of cotton fabric with natural dye extracted from Marigold flower. *The Journal of the Textile Institute*, 112(5), 801-808. <https://doi.org/10.1080/00405000.2020.1779907>
- Canbolat, Ş., Merdan, N., Dayıoğlu, H., & Koçak, D. (2015). Investigation of the dyeability behavior of banana fibers with natural dye extract obtained from turmeric plants. *Marmara Journal of Pure and Applied Sciences 2015*, Special Issue-1: 40-44
- Dayıoglu, H., Kut, D., Merdan, N., & Canbolat, S. (2015). The effect of dyeing properties of fixing agent and plasma treatment on silk fabric dyed with natural dye extract obtained from *Sambucus ebulus* L. plant. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 195, 1609-1617.
- Eyupoglu, C., Eyupoglu, S., & Merdan, N. (2022). Investigation of dyeing properties of mohair fiber dyed with natural dyes obtained from *candelariella reflexa*. *Journal of Natural Fibers*, 19(16), 12829-12848.
- Ferruzzi, M.G., Failla, M.L. & Schwartz, S.J. (2002). Sodium Copper chlorophyllin: In vitro digestive stability and accumulation by Caco-2 human intestinal cells. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 50, 2173-2179. <https://doi.org/10.1021/jf010869g>
- Gürbüz, Ö. Ü. D. (2022). Isırgan bitkisinden elde edilen boyarmadde ile kenevir lifinin boyanması. *Yenilenebilir Kaynaklardan*, 17.
- Hossain, S., Jalil, M.A., Kamal, S.A.B. & Kader, A. (2021). A natural dye extracted from the leaves of *Mimusops Elengi* Linn and its dyeing properties on cotton and silk fabrics. *The Journal of the Textile Institute*, 112(3), 455-461. <https://doi.org/10.1080/00405000.2020.1763057>
- Hosseinnezhad, M., Gharanjig, K., Imani, H., & Razani, N. (2022). Green dyeing of wool yarns with yellow and black myrobalan extract as bio-mordant with natural dyes. *Journal of Natural Fibers*, 19(10), 3893-3915.

- Hou, X., Yang, R., Xu, H. & Yang, Y. (2012). Adsorption kinetic and thermodynamic studies of silk dyed with sodium copper chlorophyllin. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 51, 8341-8347. <https://doi.org/10.1021/ie300201j>
- Islam, S., Shahid, M. & Mohammad, F. (2013). Perspectives for natural product based agents derived from industrial plants in textile applications-a review. *Journal of Cleaner Production*, 57, 2-18. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.06.004>
- Jia, Y., Liu, B., Cheng, D., Li, J., Huang, F. & Lu, Y. (2017). Dyeing characteristics and functionability of tussah silk fabric with oak bark extract. *Textile Research Journal*, 87(15), 1806-1817. <https://doi.org/10.1177/0040517516659378>
- Jiang, H., Guo, R., Mia, R., Zhang, H., Lü, S., Yang, F., ... & Liu, H. (2022). Eco-friendly dyeing and finishing of organic cotton fabric using natural dye (gardenia yellow) reduced-stabilized nanosilver: full factorial design. *Cellulose*, 29(4), 2663-2679.
- Kamel, M. M., El-Shishtawy, R. M., Youssef, B. M., & Mashaly, H. (2007). Ultrasonic assisted dyeing. IV. Dyeing of cationised cotton with lac natural dye. *Dyes and Pigments*, 73(3), 279-284.
- Karadağ, R. (2007). Doğal Boyamacılık. Geleneksel El Sanatları ve Mağazalar İşletme Müdürlüğü Yayınları.
- Kilinc, M., Canbolat, S., Merdan, N., Dayioglu, H., & Akin, F. (2015). Investigation of the color, fastness and antimicrobial properties of wool fabrics dyed with the natural dye extracted from the cone of *Chamaecyparis lawsoniana*. *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 195, 2152-2159.
- Liu, Y., Guo, Y., Ren, Y., Wang, Y., Guo, X. & Liu, X. (2020). Phosphorylation of sodium copper chlorophyll enables color-fasten and durable flame retardant wool fibers. *Polymer Degradation and Stability*, 179(September), 109286. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2020.109286>
- Mirjalili, M., Nazarpour, K. & Karimi, L. (2011). Eco-friendly dyeing of wool using natural dye from weld as co-partner with synthetic dye. *Journal of Cleaner Production*, 19(9-10), 1045-1051. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.02.001>
- Oh, K.W. & Na, Y.J. (2014). Antimicrobial activity of cotton fabric treated with extracts from the lotus plant. *Textile Research Journal*, 84(15), 1650-1660. <https://doi.org/10.1177/0040517513503725>
- Özdemir, A. O., Tutak, M. (2013). Pamuklu örme kumaşların reaktif boya ile boyanması esnasında tuz ve boyarmadde miktarına bağlı olarak boyama kinetiğinin incelenmesi. *Erciyes Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Fen Bilimleri Dergisi*, 29(3), 200-205.
- Periyasamy, A. P. (2022). Natural dyeing of cellulose fibers using syzygium cumini fruit extracts and a bio-mordant: A step toward sustainable dyeing. *Sustainable Materials and Technologies*, 33, e00472.
- Rekaby, M., Salem, A.A. & Nassar, S.H. (2009). Eco-friendly printing of natural fabrics using natural dyes from alkanet and rhubarb. *The Journal of the Textile Institute*, 100(6), 486-495. <https://doi.org/10.1080/00405000801962177>
- Shahid, M. A., Hossain, M. I., Hossain, D., & Ali, A. (2016). Effect of different dyeing parameters on color strength & fastness properties of cotton-elastane (ce) and lyocell-elastane (le) knit fabric. *International Journal of Textile Science*, 5(1), 1-7.
- Tayade, P.B. & Adivarekar, R.V. (2013). Dyeing of cotton fabrics with *Cuminum cyminum* L. as a natural dye and its comparison with synthetic dye. *The Journal of the Textile Institute*, 104(10), 1080-1088. <https://doi.org/10.1080/00405000.2013.774944>
- Tsatsaroni, E. & Liakopoulou-Kyriakides, M. (1995). Effect of enzymatic treatment on the dyeing of cotton and wool fibres with natural dyes. *Dyes and Pigments*, 29(3), 203-209. [https://doi.org/10.1016/0143-7208\(95\)00044-G](https://doi.org/10.1016/0143-7208(95)00044-G)

Usop, R., Abidin, Z.H.Z., Mazni, N.A., Hadi, A. N., Halim, N.A., Taha, R.M., Careem, M.A., Majid, S.R. & Arof, A.K. (2016). The color stability of natural dye coating films consisting of chlorophyll after exposed to UV-A. *Pigment&Resin Technology*, 45(3), 149-157. <https://doi.org/10.1108/PRT-10-2014-0097>

Wang, C., Li, M., Zhang, L., Fu, S. & Wang, C. (2017). Extraction of natural dyes from *Cinnamomum camphora* (L.) presl fruit and their application on wool fabric. *Textile Research Journal*, 87(20), 2550-2560. <https://doi.org/10.1177/0040517516665266>

Yoo, H.J., Ahn, C. & Narantuya, L. (2013). Extractions of chlorophyll from spinach and mate powders and their dyeability on fabrics. *Journal of the Korean Society of Clothing and Textiles*, 37(3), 413-423. <https://doi.org/10.5850/JKSCT.2013.37.3.413>

Zhao, Z., Zhang, M., Hurren, C., Zhou, L., Wu, J. & Sun, L. (2020). Study on photofading of two natural dyes sodium copper chlorophyllin and gardenia yellow on cotton. *Cellulose*, 27, 8405-8427. <https://doi.org/10.1007/s10570-020-03351-y>





# Kahramanmaraş Sütçü İmam University

## Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 29.05.2023  
Kabul Tarihi : 21.03.2023

Received Date : 29.05.2023  
Accepted Date : 21.03.2023

### CAM ELYAF TAKVİYESİNİN POLİ-ETER-İMİD NUMUNELERİN KURU KAYMA AŞINMA DAVRANIŞINA ETKİSİ

#### EFFECT OF GLASS FIBER REINFORCEMENT ON DRY SLIDING WEAR BEHAVIOR OF POLY-ETHER-IMIDE SPECIMENS

Ahmet MASLAVI<sup>1</sup> (ORCID: 0000-0002-9571-0640)

Hüseyin ÜNAL<sup>2</sup> (ORCID: 0000-0003-0521-6647)

Alim KAŞTAN<sup>3\*</sup> (ORCID: 0000-0002-6514-3796)

<sup>1</sup>Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Sakarya, Türkiye

<sup>2</sup>Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Sakarya, Türkiye

<sup>3</sup>Düden Mesleki ve Teknik Anadolu Lisesi, Kepez/Antalya, Türkiye

\*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Alim KAŞTAN, kastanalim@gmail.com

#### ÖZET

Özellikle gıda sektörü başta olmak üzere otomotiv, havacılık, elektrik/elektronik ve tekstil sektörleri gibi endüstrinin birçok alanlarında çok farklı makinalar kullanılmaktadır. Bu makinalarda ise hareket iletimlerinde bazen plastik bazen de plastik esaslı kompozitlerden imal edilmiş dişli malzemeleri kullanılmaktadır. Bu deneysel çalışmada, saf poli-eter-imid (PEI) polimeri ile ağırlık olarak %30 oranında cam elyaf (CE) takviyeli poli-eter-imid (PEI-30CE) kompozitin tribolojik performansları incelenmiştir. Aşınma ve sürtünme deneyleri disk üzerinde pim cihazı kullanılarak yaklaşık oda sıcaklığında ve kuru kayma şartlarında gerçekleştirilmiştir. Deneylerde üç farklı yük (30N, 60N, 100N) ve 1.0 m/s kayma hızı kullanılmıştır. Deneyler sonucunda saf PEI polimer ve %30 oranında cam elyaf takviyeli PEI kompozitinin sürtünme katsayısı, pim/disk sıcaklığı ve spesifik aşınma oranı belirlenmiştir. Ayrıca optik mikroskop kullanılarak deneylerde kullanılan malzemelerinin aşınma yüzeyi mikroyapı incelemeleri gerçekleştirilmiştir. Deneyler sonucunda uygulanan yüke bağlı olarak hem saf PEI hem de cam elyaf takviyeli PEI kompozitin sürtünme katsayısı ve aşınma oranının azaldığı tespit edilmiştir. Cam elyaf takviyeli PEI kompozitin saf PEI polimerine göre yaklaşık %95 oranında daha yüksek aşınma direncine sahip olduğu belirlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** PEI, cam elyaf, kompozit, aşınma oranı, sürtünme katsayısı

#### ABSTRACT

Many different machines are used in many areas of the industry such as automotive, aviation, electrical/electronic and textile sectors, especially in the food sector. In these machines, gear materials made of plastic and sometimes plastic-based composites are used in motion transmission. In this experimental study, the tribological performances of pure poly-ether-imide (PEI) polymer and 30wt.% by weight glass fiber (GF) reinforced poly-ether-imide (PEI-30GF) composite were investigated. Wear and friction tests were carried out using pin-on-disk device at approximately room temperature and dry sliding conditions. Three different loads (30N, 60N, 100N) and a sliding speed of 1.0 m/s were used in the experiments. As a result of the experiments, the friction coefficient, pin/disc temperature and specific wear rate of pure PEI polymer and PEI-30GF composite were determined. In addition, microstructure examinations of the wear surface of the materials used in the experiments were carried out using an optical microscope. As a result of the experiments, it was determined that the friction coefficient and wear rate of both pure PEI and PEI-30GF composite decreased depending on the applied load. It was determined that PEI-30GF composite has approximately 95% higher wear resistance than pure PEI polymer.

**Keywords:** PEI, glass fiber, composite, wear rate, friction coefficient

## GİRİŞ

Kompozitler, güvenli otomobillerin, uzun menzilli uçakların ve son derece hafif makine bileşenlerinin yapılmasına katkı sağlamaktadır. Bu malzemeler sayesinde binaların, köprülerin yenilenmesi ve tıbbi implantların imalatı gerçekleştirilebilmektedir. Kompozitler, dünyada sürdürülebilir kalkınmaya sürekli şekilde katkıda bulunan üstün özellikli malzemelerdir (Chou, 1986). Günümüzde gelişen teknolojinin tek bir malzemenin sağlayamayacağı özellik kombinasyonlarına ihtiyaç duyulduğu her alanda, kompozitler tercih edilen malzemeler haline gelmiştir. Bir maddenin liflerini veya parçacıklarını başka bir matriste veya bağlayıcıda dağıtarak hazırlayan bir kompozit tasarımcısı, hiçbir malzemenin kendi başına göstermediği özelliklere ulaşabilir. Sertlik, mukavemet, düşük yoğunluk gibi üstün özelliklerinden dolayı, askeri ve ticari uçak, spor ekipmanı ve araba tasarımcılarının birçok bileşenler için kompozitlere yönelmesine yol açmıştır. Örneğin, kompozit malzemenin ısı ve elektriği iletme yeteneği, matrisin iletkenliğinden büyük ölçüde etkilenir. Kompozitin mekanik davranışı ise tek başına lifler tarafından değil, lifler ve matris arasındaki sinerji tarafından yönetilir (Friedrich and Almajid, 2013). PEI ilk olarak General Electric Şirketi tarafından 1982 yılında ULTEM ticari adı ile üretilmiştir (Craver and Carraher, 2000). PEI amorf yapıya sahip yüksek performanslı bir termoplastiktir. PEI polimerinin camsı geçiş sıcaklığı yüksek olduğundan (yaklaşık T<sub>g</sub>: 217°C) servis sırasında geniş sıcaklık aralığında kullanılabilir. PEI polimerinin işlenebilmesi için diğer polimerlere kıyasla daha yüksek erime sıcaklığı gereklidir. Yüksek termal kararlılığın önemli olduğu tribolojik uygulamalar için PEI doğru bir tercihtir. Fakat PEI polimerinin aşınma direnci düşük olduğu için içerisine katkı maddelerinin ilave edilmesi gerekmektedir (Xiana and Zhang, 2005). PEI polimerinin hem oda sıcaklığında hem de yüksek sıcaklıklarda mükemmel boyutsal kararlılık, iyi elektriksel özellikler ve kimyasal direnç özellikleri gösterirken aynı zamanda yüksek mukavemet, yanmayı geciktiricilik, düşük duman yoğunluğu, optik özellikler ve yüksek sertlik özellikleri de gösterir (McKeen, 2016). PEI polimeri uçak motoru parçalarında, kaplamalarında, mühimmat gövdelerinde, dişli imalatında, mikrodalga fırınlarda, elektrik ve elektronik alanında, otomotiv ve ulaştırma ekipmanlarında sıklıkla kullanılmaktadır (Tatlıdilli, 2020). Cam fiberler polimer malzemelerin hemen hemen %90'ında kullanılmaktadır. Bu kadar yaygın kullanılmasının sebebi cam fiberlerin ekonomik ve ağırlık/mukavemet performansının oldukça iyi olmasıdır. Cam fiberler, 1600 °C civarında ısıtılmış fırında alüminyum oksit ve bazı metal oksitlerle kolemanit, kireç taşı, soda, kil, gibi maddelerin sıvı hale getirilip çok ince kovanlardan geçirilerek (9-25 mikron) üretilir (Pemberton vd. 2018). Cam fiberlerin çekme mukavemetinin demir esaslı malzemelere göre bir hayli yüksek olması, kimyasallara karşı dirençli olmaları, nem çekmemeleri, yalıtkan olmaları ve yanmazlık gibi üstün özelliklerinden dolayı üretimin değişik alanlarında sıklıkla tercih edilmesini sağlamıştır (Özer, 2015). Daha önce birçok araştırmacı PEI polimerinin özelliklerini geliştirmek için cam fiber takviyeli polimer kompozitler üretmiş ve bu konuda araştırmalar yapmışlardır. Şekil 1'de PEI polimerinden imal edilmiş dişli uygulamaları görülmektedir. Bu araştırmalardan bazıları Stuart, 1998; Demir, 2006; Xian and Zhang, 2004; Ünal ve Mimaroglu, 2012; Chen vd. 2013; Mimaroglu ve Ünal, 2007; Chen vd. 2012; Maslavi vd. 2022; Demir vd. 2019; İhan ve Feyzullahoğlu, 2018; Yuan vd. 2021; Meng vd. 2022; Sathishkumar vd. 2014; Vina vd. 2008; Cai, 2011; Harsha vd. 2017; Li vd. 2013; Song vd. 2017; Yılmaz, 2013 yaptığı çalışmalardır. Tribolojik araştırmalarda malzeme kompozisyonunun ve deney proses parametrelerinin değişmesinin farklı sonuçlar ortaya çıkardığı herkes tarafından bilinen bir gerçektir. Bu çalışmada %30 oranında cam elyaf takviyeli PEI kompozitin üç farklı yük (30N, 60N,100N) ve 1.0 m/s kayma hızında yapılan deneylerden elde edilen sürtünme ve aşınma davranışları incelenmiştir.



Şekil 1. PEI Polimerinden İmal Edilmiş Dişli Uygulamaları (Www.Polymershapes.Com/Application/Gears)

## MATERYAL VE METOT

Aşınma deneylerinde kullanılan saf PEI, Ultem 1000 ticari koduyla, %30 oranında kısa cam elyaf takviyeli (PEI/30CE) PEI kompoziti ise Ultem 2300 ticari koduyla 10 mm çapında ve 1000 mm uzunluğunda çubuk formunda SABIC firmasından temin edilmiştir. Polimer kompozit malzemelerde genellikle %30 oranında elyaf kullanımı optimum fiyat/performans ilişkisi sağladığından endüstride büyük talep görmektedir. Bu sebeple malzeme seçiminde, saf PEI polimer malzeme ile kıyaslama yapmak için endüstride yaygın olarak tercih edilen PEI/30CE kompozitinin endüstri talepleri için daha uygun olduğu düşünülmüştür. Muhtemel elyaf oranının %30' dan fazla olması aşınma direncinin artmasına sebep olacaktır. Aşınma test numuneleri 6 mm çapında ve 50 mm uzunluğunda olacak şekilde Revolver tornada işlenmiştir. Deneylerde kullanılan saf PEI ve %30 kısa cam elyaf takviyeli PEI kompozitin üretici firmadan alınan fiziksel, mekanik ve termal özellikleri Tablo 1'de verilmiştir. Aşınma testleri pin on disk cihazında oda sıcaklığında yapılmıştır. Deneylerde üç farklı aşındırma (30N, 60N, 100N) yükü kullanılmıştır. Kayma hızı 1m/s ve kayma mesafesi ise 2000 metre seçilmiştir. Uygulanan yük, kayma hızı ve kayma mesafesi seçiminde yük, hız ve kayma mesafesinin optimize edilmesi gerekir. Düşük yük ve hızlarda test numunesi az aşınmakta bunun sonucu ağırlık farkı ölçümlerinde hata oranı artabilmektedir. Yüksek yüklerde ve hızlarda ise aşırı aşınma ve plastik deformasyon meydana gelerek çalışma ortamında kullanılabilirliği tartışılır seviyeye ulaşmaktadır. Bu konular dikkate alınarak ön deneme çalışmaları ile uygulanan yük, kayma hızı ve kayma mesafesi şartları belirlenmiştir. Kayma mesafesi süresince her 5 dakikada bir 500°C maksimum sıcaklık ölçüm kapasitesine sahip TFA marka kızılötesi lazerli termometre kullanılarak hem pim hem de disk yüzey sıcaklıkları ölçülmüştür. Şekil 3 ve Şekil 4'de verilen pim ve disk yüzey sıcaklıkları aşınma deneyi son dakikası içinde alınan sıcaklık değerleridir.

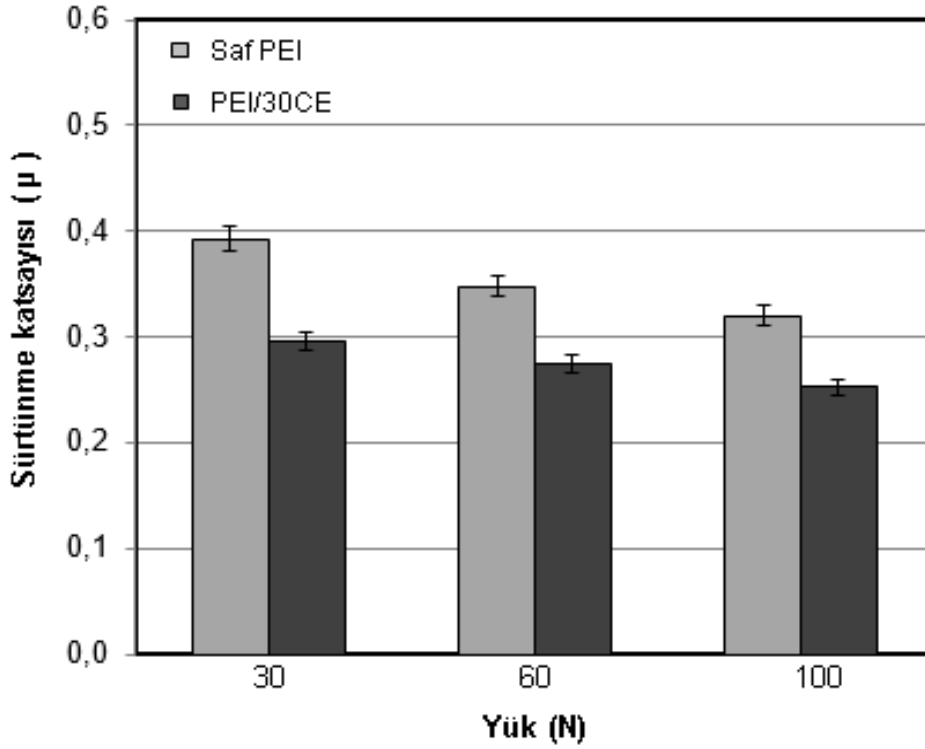
**Tablo 1.** Saf PEI ve % PEI/30CE Kompozitin Fiziksel, Mekanik ve Termal Özellikleri

Malzemeler			Saf PEI	PEI/30CE
Özellik	Birimi	Test standardı	Değeri	
Yoğunluk	g/cm <sup>3</sup>	ASTM D792	1.28	1.51
Su emme, (24 saat)	%	ASTM D570(2)	0.25	0.16
Çekme mukavemeti	MPa	ASTM D638	115	175
Elastiklik modülü (çekmede)	MPa	ASTM D638	3450	10400
Kopmadaki % uzama	%	ASTM D638	7	2,5
İzod darbe mukavemeti, 23°C	Kj/m <sup>2</sup>	ISO 180/1A	5	10
Termal iletkenlik	W/ m.°K	ISO 8302	0,177	0,31
Sertlik	Rockwell M	ASTM D785	112	114
Ergime sıcaklığı	°C	ASTM D3418	348	398
Camsı geçiş sıcaklığı	°C	ASTM D3418	210	217
Maksimum sürekli çalışma sıcaklığı	°C	-	171	250
Oksijen indeksi	%	ASTM D2863	44	50

## BULGULAR VE TARTIŞMA

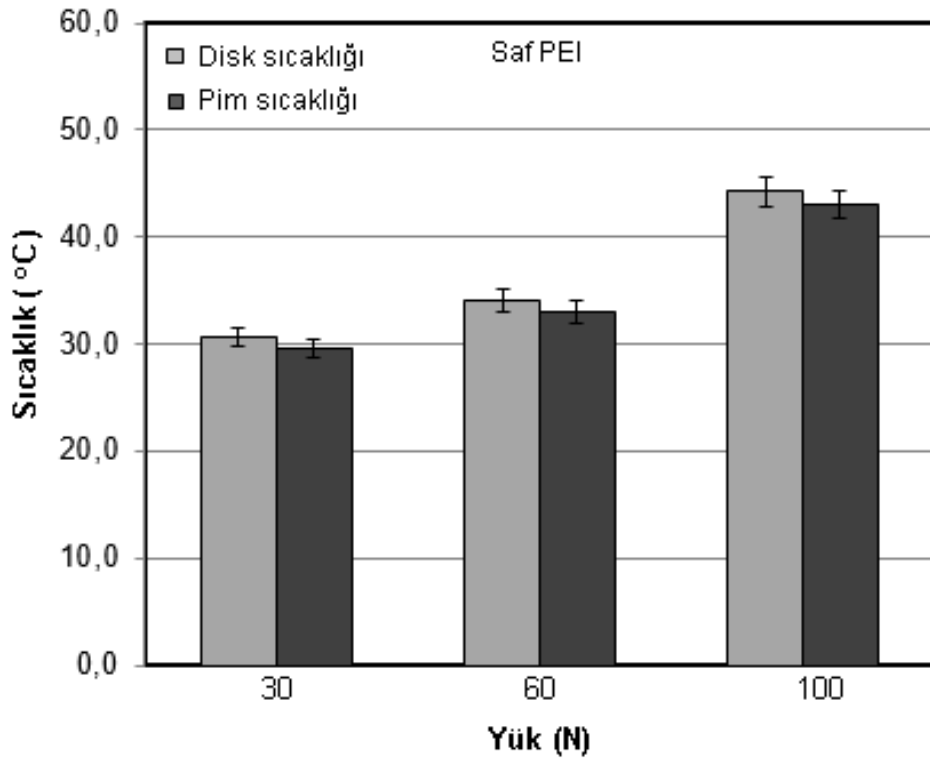
Şekil 2'de saf PEI polimeri ile %30 oranında kısa cam elyaf takviyeli PEI polimer kompozitin 1 m/s hız ve değişik yükler (30N, 60N ve 100N) altındaki sürtünme katsayısı değişimi görülmektedir. Katkısız PEI'nin 30N yük altındaki sürtünme katsayısı 0,392 iken %30 kısa cam elyaf takviyeli PEI polimerin ise 0.295 olarak ölçülmüştür. 60N yükte katkısız PEI'nin sürtünme katsayısı 0,348 iken %30 kısa cam elyaf takviyeli PEI polimer kompozitin 0.275, ve 100N yük altında ise sürtünme katsayısı sırasıyla 0.32 ve 0.27 olarak tespit edilmiştir. Hem katkısız PEI'in hem de %30 oranında kısa cam elyaf takviyeli PEI kompozitinde uygulanan yükün artırılması ile sürtünme katsayısında azalma tespit edilmiştir. Tüm yükler altında %30 oranında kısa cam elyaf takviyeli PEI polimer kompozitin sürtünme katsayısı katkısız PEI polimerinin sürtünme katsayısına göre daha düşük değerlerde ölçülmüştür. Sürtünme katsayısı 30N yükte %25, 60N yükte %21 ve 100N yükte %22 oranında azalmıştır. Bu azalma özellikle sürtünmeli ortamda çalışacak makine parçalarının servis ömrü açısından son derece önemlidir. Cai (2011) yaptığı çalışmada PEI bünyesine %0.1-1.0 oranında cam fiber ilave ederek ürettiği kompozitin sürtünme katsayısının saf PEI'e göre daha düşük olduğunu rapor etmiştir. Ayrıca yükün artırılması ile sürtünme katsayısının azaldığı belirtilmiştir. Mimaroglu vd. (2007) %20 oranında cam fiber takviyeli PEI kompozitinin aşınma deneylerinde aşındırman yükünün %200 oranında artırılması sonucunda sürtünme katsayısında ortalama %50 oranında azalma olduğunu rapor etmişlerdir. Sürtünme katsayısındaki değişimin polimerin viskoelastik davranış göstermesi ile ifade etmişlerdir. Vina vd. (2008)

PEI bünyesine cam fiber ilave ederek 20°C - 200°C arasındaki sıcaklıklarda yaptıkları çalışmada katkısız PEI'nin sürtünme katsayısı 0.7 civarında tespit edilirken cam fiber takviyeli PEI kompozitlerin ise 0.38-0.48 aralığında değiştiğini bildirmişlerdir. Cam fiber katkının PEI polimer kompozitinin sürtünme katsayısı üzerinde etkin rol oynadığını ifade ederken sıcaklık artışı ile birlikte sürtünme katsayısında artış tespit etmişlerdir. Sürtünme katsayısında artışın sebebi olarak polimerin yumuşaması ile ifade ederlerken polimer malzemenin mukavemetinin azalmasına bağlamışlardır.

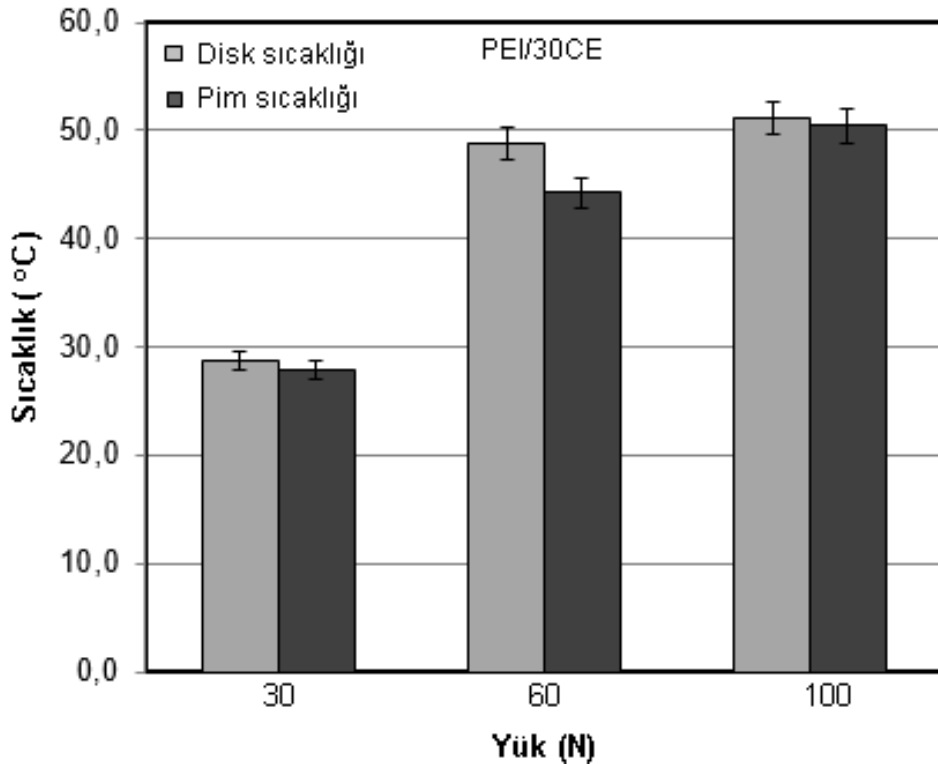


**Şekil 2.** Saf PEI Polimeri ve PEI/30CE Kompozitin Farklı Yükler Altındaki Sürtünme Katsayısı Değişimi

Şekil 3’de saf PEI polimerinin 30N, 60N ve 100N yüklerde yapılan deneylerden elde edilen pim ve disk sıcaklıkları verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi aşındırma yükünün artırılması ile birlikte hem disk, hem de pim sıcaklıklarında belirgin artışlar gözlemlenmiştir. 30N aşındırma yükünde disk sıcaklığı 30.6°C pim sıcaklığı 29.6°C, 60N aşındırma yükünde disk sıcaklığı 34°C pim sıcaklığı 33°C ve 100N aşındırma yükünde disk sıcaklığı 44.2°C pim sıcaklığı ise 43°C olarak ölçülmüştür. Yapılan tüm deneylerde disk sıcaklıklarının pim sıcaklıklarından hafif daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Bu farkın malzemeler arasındaki ısı iletim katsayısı farklılığından kaynaklandığı düşünülmektedir. Benzer şekilde Şekil 4’de %30 oranında kısa cam elyaf takviyeli PEI polimer kompozitin farklı yükler altındaki pim ve disk sıcaklığı değişimi verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi katkısız PEI polimerinde olduğu gibi %30 cam elyaf takviyeli PEI kompozitin artan aşındırma yükü ile birlikte hem pim, hem de disk sıcaklıklarında artış gözlemlenmiştir. Pim ve disk sıcaklıkları arasındaki sıcaklık farkı 30N yükte 1°C, 60N yük altında 1.6°C ve 100N yükte ise 0.8°C olarak tespit edilmiştir. Pim ve disk sıcaklık farkları açısından incelendiğinde katkısız PEI ve %30 kısa cam elyaf takviyeli PEI’nin benzer sonuçlar verdiği söylenebilir. Ancak deneyler sırasında ulaşılan maksimum pim ve disk sıcaklıkları incelendiğinde PEI/30CE kompozitin 60N ve 100N aşındırma yükünde katkısız PEI polimerine göre yaklaşık 7°C civarında daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Maslavi vd. (2022) PEEK+%30CE’nin pim sıcaklığının artan aşındırma yüküne bağlı olarak arttığını ve pim sıcaklığının 40°C ile 83°C aralığında değiştiğini belirtmiştir.



Şekil 3. Saf PEI Polimerinin Farklı Yükler Altındaki Pim ve Disk Sıcaklığı Değişimi

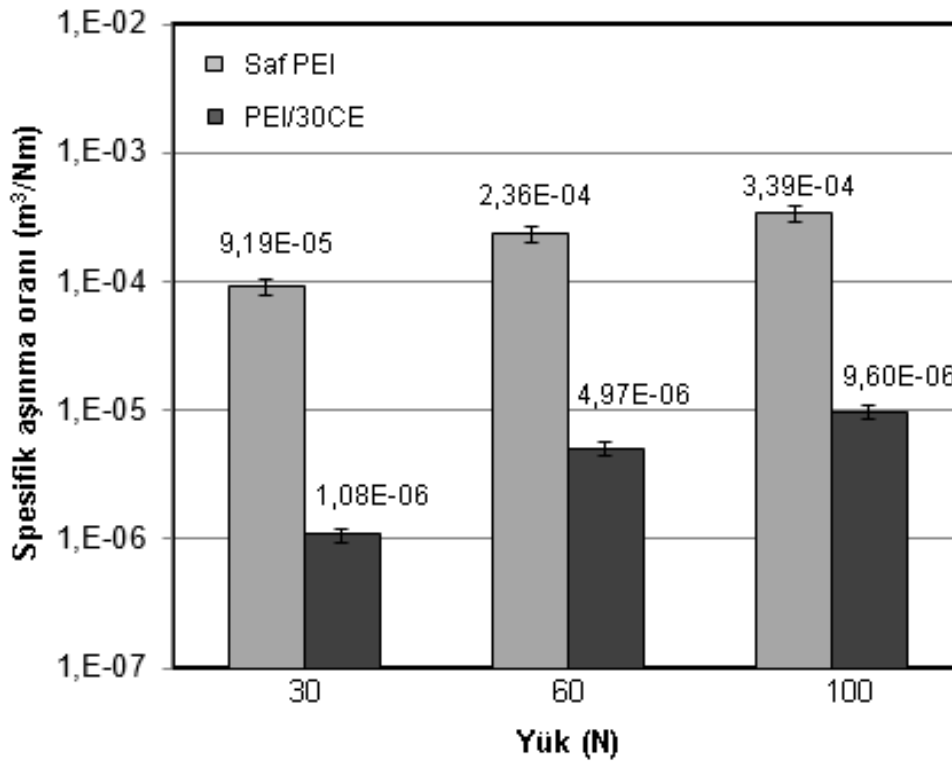


Şekil 4. PEI/30CE Kompozitin Farklı Yükler Altındaki Pim ve Disk Sıcaklığı Değişimi

Şekil 5'te saf PEI polimeri ve %30 kısa cam elyaf takviyeli PEI polimer kompozitin 30N, 60N ve 100N yükler altındaki aşınma oranındaki değişim verilmiştir. Artan yüke bağlı olarak spesifik aşınma oranında artış meydana gelmiştir. Grafikten de anlaşılacağı üzere matristeki kısa cam fiberlerin aşınma oranı üzerinde olumlu yönde son derece etkili olduğu söylenebilir. 30N aşındırma yükünde katkısız PEI'nin aşınma oranı  $9.19 \times 10^{-5} \text{ mm}^3/\text{Nm}$  iken cam fiber katkılı PEI'nin aşınma oranı %84 azalarak  $1.08 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{Nm}$  değerine düşmüştür. 60N'da katkısız PEI'nin aşınma oranı  $2.36 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/\text{Nm}$  olan aşınma oranı yaklaşık %95 azalarak  $4.97 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{Nm}$  olarak hesaplanmıştır.



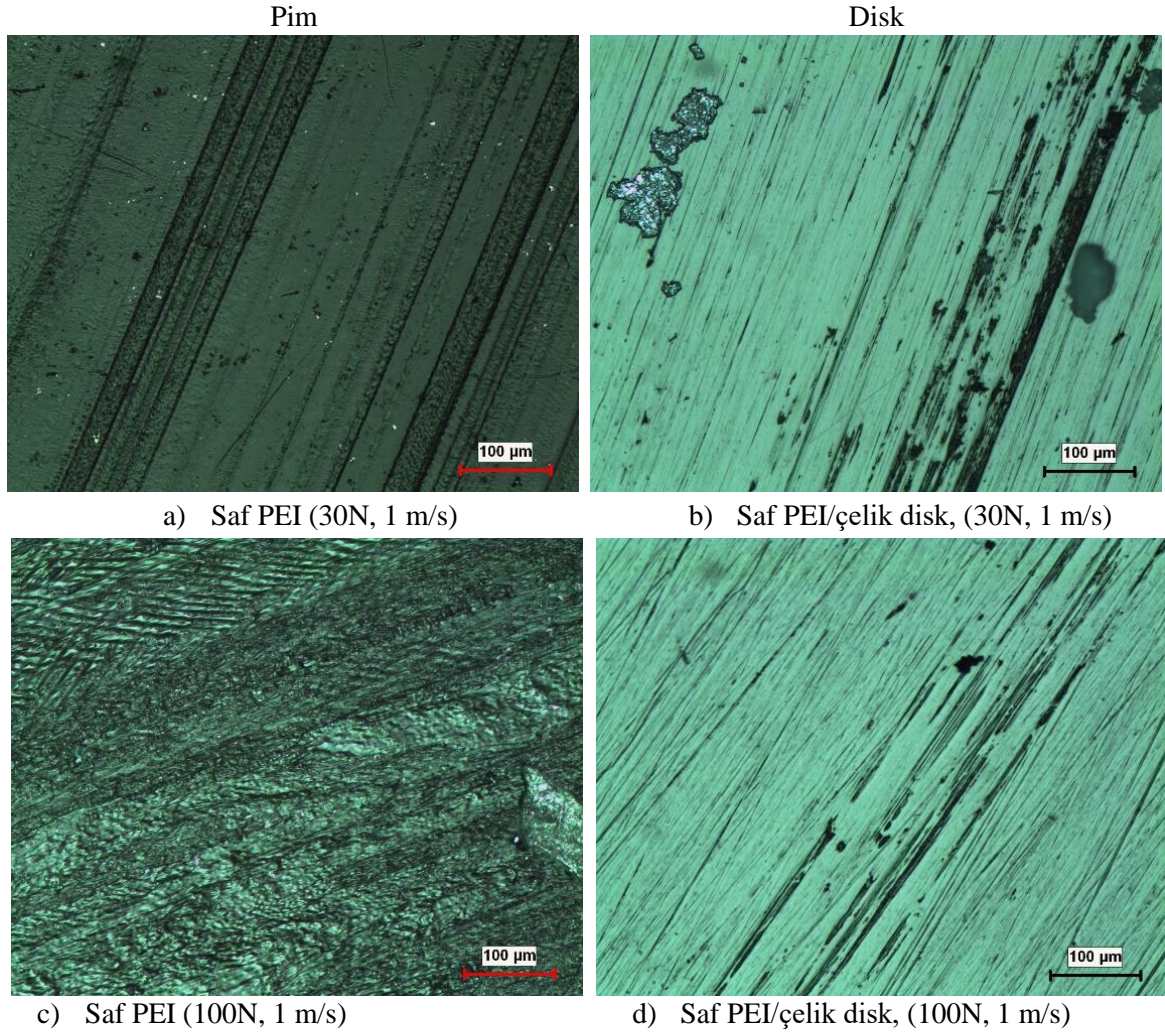
100N aşındırma yükünde ise katkısız PEI'nin  $3.39 \times 10^{-4} \text{ mm}^3/\text{Nm}$  olan aşınma oranı cam fiber ilave edilmesiyle yaklaşık %65 oranında azalarak  $9.06 \times 10^{-6} \text{ mm}^3/\text{Nm}$  değerine gerilemiştir. Araştırmacılar kısa cam elyaf takviyeli PEI kompozitin aşınma oranındaki azalmayı Archard denkleminde göre, pimin sertliğinin artması sonucunda malzemenin temas alanının azalması şeklinde açıklamışlardır. Buradan hareketle saf PEI polimer matrisine kıyasla cam fiberlerin sert ve aşınma direncinin yüksek olmasının spesifik aşınma oranında azalmaya sebep olduğu tahmin edilmektedir. Harsha vd. (2017) PEI içerisine %10 oranında cam fiber ilave ederek ürettikleri polimer esaslı kompozitlerle yapmış oldukları çalışmada artan aşındırma yüküne bağlı olarak aşınma oranında belirgin oranda artış olduğunu belirtmişlerdir. Ayrıca oda sıcaklığında yapılan deneylere kıyasla yüksek sıcaklıklarda matrise cam fiber ilave edilmesinin kompozitin aşınma oranı üzerinde daha etkin olduğunu ifade etmişlerdir. Bu durumu cam fiberlerin matrisin sıcaklık karşısındaki yumuşamasını geciktirmesi olarak açıklanmıştır. Demir vd. (2019) vinil ester polimer bünyesine cam ve karbon elyaf ilave ederek hazırladıkları kompozitlerle yaptıkları çalışmada uygulanan yükün artması ile aşınma deneyinde kütle kaybın arttığını, karbon elyaf katkının cam elyaf katkıya göre aşınma üzerinde daha etkin olduğunu belirtmişlerdir. Bu çalışmada elde edilen aşınma oranı ile ilgili deney sonuçları literatür ile benzerlik göstermektedir.



Şekil 5. Saf PEI Polimeri ve PEI/30CE Kompozitin Farklı Yükler Altındaki Aşınma Oranı Değişimi

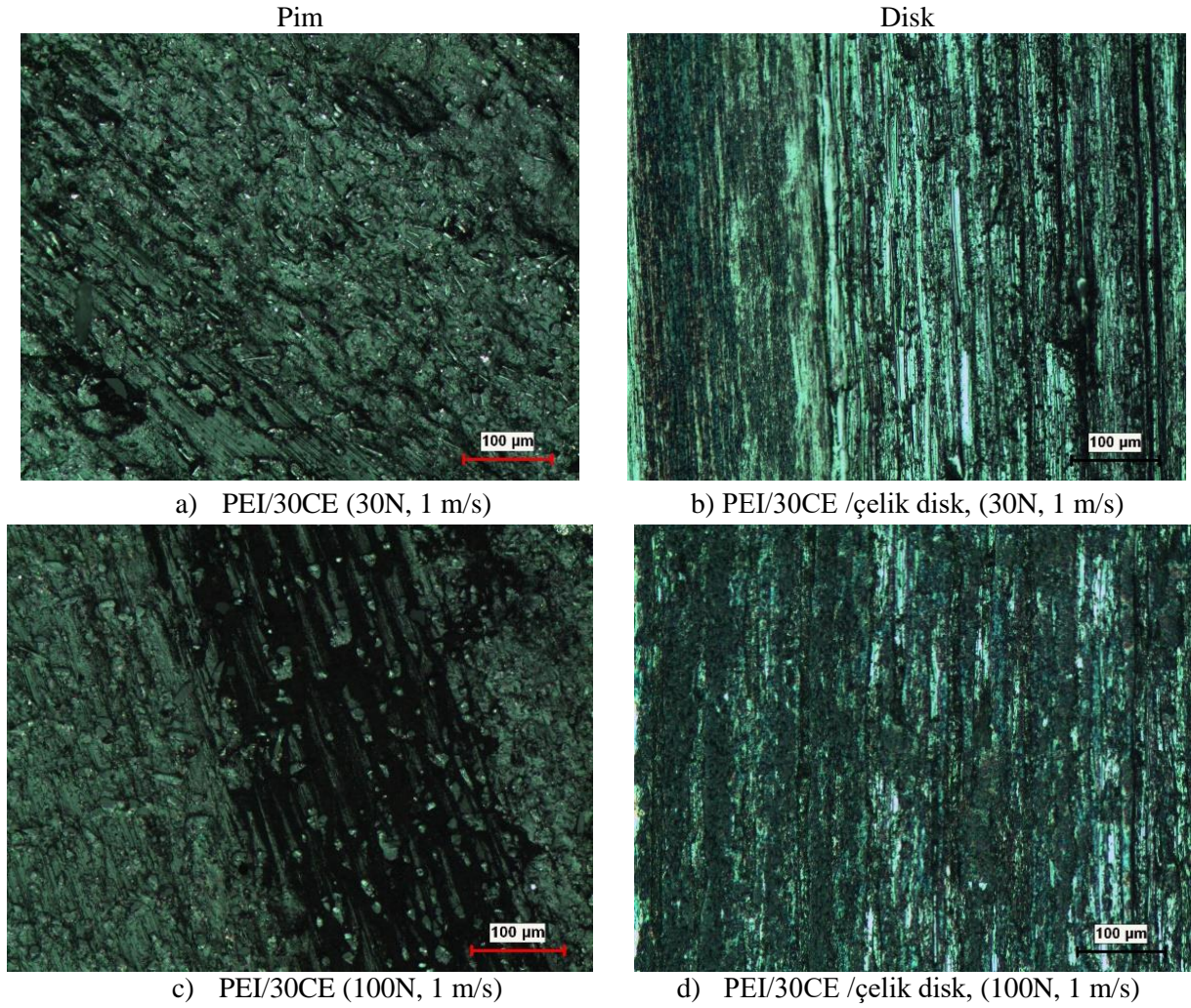
Şekil 6'da saf PEI polimerinin 30N ve 100N aşındırma yükleri altında yapılan deneylerden elde edilen pim ve disk yüzeylerinin optik mikroskop görüntüleri verilmiştir. Saf PEI polimerin aşınan pim yüzeyleri incelendiğinde (Şekil 6a ve c) hem 30N ve hem de 100N aşındırma yüklerinde pim yüzeylerinde kayma yönünde derin aşınma izlerinin olduğu görülmektedir. Buradan aşınmanın şiddetli ve abradif aşınma şeklinde olduğu söylenebilir. Bu durumu Şekil 6b'deki disk yüzeyinde kopmuş olarak görülen polimer parçacıkları desteklemektedir. Disk yüzeylerinin optik mikroskop görüntülerine bakıldığında (Şekil 6b ve 6d) aşınma sırasında kısmi olarak ince bir film tabakasının oluştuğu ifade edilebilir. Ancak oluşan film tabakasının çok az ve yetersiz olduğu da açık bir şekilde görülmektedir. Bu durum kayma yolu boyunca aşınmanın etkin bir şekilde devam etmesine neden olmuştur. Şekil 7'de PEI/30CE kompozitin 30N ve 100N aşındırma yükü altında yapılan deneylerden elde edilen pim ve disk yüzeylerinin optik mikroskop görüntüleri yer almaktadır. Aşınma pim yüzey görüntüleri (Şekil 7a ve 7c) incelendiğinde ana matrise ilave edilen kısa cam fiberlerden dolayı aşınma yüzeylerinin daha düzgün olduğu söylenebilir. Ayrıca kopan polimer parçacıklarının pim yüzeylerine tekrar yapıştığı görülmektedir. Optik mikroskoptan elde edilen disk yüzey (Şekil 7b ve d) görüntüleri doğrultusunda hem 30N hem de 100N yüklerde aşınma sırasında disk yüzeyinde etkin bir film tabakasının oluştuğu söylenebilir. Bu film tabakası ve sert cam fiberler sayesinde PEI/30CE'nin aşınma oranı saf PEI polimerine göre önemli oranda azalmıştır. Bu sayede adhezif ve abradif aşınmanın birlikte etkin olduğu söylenebilir. Disk yüzeyindeki film tabakasının oluşumuna PEI içerisine ilave edilen kısa cam fiberlerin önemli oranda katkı

sağladığı söylenebilir. Yani polimer matris ile çelik disk teması neticesinde aşınan polimer matris malzemeleri yada partiküller cam fiberler arasına girmekte ve yapışmaktadır. Li vd. (2013) ve Song vd. (2017) yaptıkları çalışmalarda polimer matris içerisine ilave edilen fiberlerin aşınma sırasında pimlerin yüzeyinde oluşacak muhtemel derin aşınma izlerinin azaltılmasında etkin olduklarını belirtmişlerdir. Matris içerisindeki fiberlere yakın yerlerde malzeme kaybının kesintiye uğrayarak etraflarında aşınma kalıntılarının birikerek aşınma yüzeyinde koruyucu film tabakasının oluşumunu teşvik ettiğini vurgulamışlardır. Yılmaz (2013) aşınma sırasında hem adhezif hem de abrazif aşınma mekanizmalarının etkisiyle açığa çıkan toz şeklinde aşınan partiküllerin numune ile aşındırıcı disk ara-yüzeyinde sürtünme sonucu ortaya çıkan ısı ile matris malzemesinin yumuşamasına neden olup toz şeklindeki aşınma kalıntılarının matris içerisine gömülmesiyle oluşan koruyucu tabakanın kompozit malzemelerin aşınma davranışını önemli ölçüde etkilediğini ifade etmiştir. Elde edilen görüntüler ve sonuçlar literatürle uyum göstermektedir.



**Şekil 6.** Saf PEI Polimerinin 30N ve 100N Aşındırma Yükleri Altında Yapılan Aşınma Deneylerinden Elde Edilen Pim ve Disk Yüzeylerinin Optik Mikroskop Görüntüleri. (Hız:1.0 m/s)





**Şekil 7.** 30N ve 100N Aşındırma Yükleri Altında Yapılan Aşınma Deneylerinden Elde Edilen PEI/30CE Kompozitinin Pim ve Disk Yüzeylerinin Optik Mikroskop Görüntüleri (Hız:1.0 m/s)

## SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Saf PEI polimeri ile PEI/30CE kompozitin farklı yükler altındaki aşınma davranışları deneysel olarak incelenmiş ve aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır.

1. PEI/30CE kompozitin sürtünme katsayısının saf PEI polimere kıyasla 30N yükte %25, 60N yükte %21 ve 100N yükte %22 oranında daha düşük olduğu tespit edilmiştir.
2. Saf PEI polimerinin farklı aşındırma yükleri altındaki pim sıcaklığının 29.6°C - 43°C ve disk sıcaklığının 30.6°C - 44.2°C aralığında gözlemlenmiştir.
3. PEI/30CE kompozitin pim ve disk sıcaklıkları genel olarak saf PEI polimerine göre özellikle yüksek yükler altında (60N ve 100N) daha yüksek (7°C - 15°C aralığında) elde edilmiştir.
4. Saf PEI polimere kıyasla PEI/30CE kompozitin aşınma oranı yaklaşık %95 oranında azalmıştır.
5. Aşınmanın etkin olduğu uygulamalarda (özellikle gıda sektöründe) dişli malzemelerin imalatında kullanılması düşünüldüğünde servis ömrünün daha uzun olması açısından saf PEI polimer yerine %30 oranında kısa cam elyaf ile takviye edilmiş PEI polimer kompozitin tercih edilmesi önerilir.

## TEŞEKKÜR

Yazarlar, desteklerinden dolayı Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi, Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü'ne (Proje No: 008-2020) teşekkürü bir borç bilir.



## YAZARLARIN KATKISI

Tüm yazarlar çalışmaya eşit katkıda bulunmuştur.

## ÇIKAR ÇATIŞMASI BEYANI

Yazarlar arasında herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır.

## ARAŞTIRMA VE YAYIN ETİĞİ BEYANI

Yapılan çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

## KAYNAKLAR

- Cai, C. L. (2011). Evaluation of the friction and wear properties of PEI composites filled with glass and carbon fiber. *Advanced Materials Research*, 299, 21-24. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.299-300.21>
- Chen, J., Guo, Q., Zhang, S., Wang, X., & Shao, X. (2012). Research on friction and wear behaviors of PEEK/PEI/PES plastics alloys under sliding contact condition. *Procedia Engineering*, 36, 285-291. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.03.042>
- Chen, J., Guo, Q., Zhao, Z., Shao, X., Wang, X., & Duan, C. (2013). Thermal, crystalline, and tribological properties of PEEK/PEI/PES plastics alloys. *Journal of applied polymer science*, 127(3), 2220-2226. <https://doi.org/10.1002/app.37923>
- Chou, T.W., McCullough, R.L., Pipes, R.B.: *Composites. Sci. Am.* 254, 193–203 (1986).
- Craver, C., & Carraher, C. (Eds.). (2000). *Applied polymer science: 21st century*. Elsevier.
- Demir, M. E., Çelik, Y. H., & Kılıçkap, E. (2019). Cam ve karbon elyaf takviyeli kompozitlerde elyaf cinsinin, yükün, kayma hızı ve mesafesinin abrazif aşınmaya etkisi. *Politeknik Dergisi*, 22(4), 811-817. <https://doi.org/10.2339/politeknik.429642>
- Demir, Z. (2006). Tribological Performance of Electrical Insulating Poly-ether-imide Polymers. *Science and Engineering of Composite Materials*, 13(1), 55-64. <https://doi.org/10.1515/SECM.2006.13.1.55>
- Feyzulloğlu, E., & Recep, İ. (2018). Farklı Yük ve Hızlarda Cam Elyaf Takviyeli Polyester Kompozit Malzemelerin Aşınması. *El-Cezeri*, 5(1), 259-266. <https://doi.org/10.31202/ecjse.370504>
- Friedrich, K., & Almajid, A. A. (2013). Manufacturing aspects of advanced polymer composites for automotive applications. *Applied Composite Materials*, 20, 107-128. DOI 10.1007/s10443-012-9258-7  
<https://www.Polymershapes.Com/Application/Gears/>
- Harsha, A. P., Wäsche, R., & Hartelt, M. (2017). Friction and wear studies of polyetherimide composites under oscillating sliding condition against steel cylinder. *Polymer Composites*, 38(1), 48-60. <https://doi.org/10.1002/pc.23559>
- Li E.Z., Xu B.S., Wang H.D., & Guo W.L. (2013). The tribological behaviour of glass fiber-reinforced poly-ether-ether-ketone composite under dry sliding and water lubrication. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. 32(5) 318–329.
- Maslavi, A., Ünal H., & Kaştan, A. (2022). Saf ve Cam Elyaf Katkılı PEEK Polimerin Sürtünme ve Aşınma Performanslarına Yük ve Kayma Hızının Etkisi. *Journal of the Institute of Science and Technology*, 12(4), 2437-2449. <https://doi.org/10.21597/jist.1131369>
- McKeen, L. W. (2016). Permeability properties of plastics and elastomers. *William Andrew*.
- Meng, Z., Wang, Y., Liu, H., & Yan, F. (2022). Carbon fiber modified by attapulgite for preparing ultra-high molecular weight polyethylene composite with enhanced thermal, mechanical, and tribological properties. *Polymers for Advanced Technologies*, 33(12), 4142-4151. <https://doi.org/10.1002/pat.5845>
- Mimaroglu, A., Ünal, H., & Arda, T. (2007). Friction and wear performance of pure and glass fibre reinforced poly-ether-imide on polymer and steel counter-face materials. *Wear*, 262(11-12), 1407-1413. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2007.01.015>

- Özer, H. (2015). Sürekli Cam elyaf takviyeli termoplastik kompozit malzemelerin geliştirilmesi ve mekanik özelliklerinin deneysel olarak belirlenmesi (Yüksek lisans tezi, Bursa Uludağ Üniversitesi, Türkiye).
- Pemberton, R., Summerscales, J., & Graham-Jones, J. (Eds.). (2018). Marine composites: design and performance. Woodhead Publishing.
- Sathishkumar, T. P., Satheeshkumar, S., & Naveen, J. (2014). Glass fiber reinforced polymer composites—a review. *Journal of reinforced plastics and composites*, 33(13), 1258-1275. <https://doi.org/10.1177/0731684414530>
- Song J, Lioa Z., Shi H, Xiang D., Liu Y., Liu W., & Peng Z, 2017. Fretting wear study of peek-based composites for bio-implant application. *Tribology Letters*, 65:150. DOI 10.1007/s11249-017-0931-8
- Stuart, B. H. (1998). Tribological studies of poly (ether-ether-ketone) blends. *Tribology International*, 31(11), 647-651. [https://doi.org/10.1016/S0301-679X\(98\)00090-5](https://doi.org/10.1016/S0301-679X(98)00090-5)
- Tatlıdilli, A. (2020). Karbon elyaf dolgulu Poli-eter-imid kompozitlerin üretimi ve karakterizasyonu.
- Ünal, H., & Mimaroglu, A. (2012). Comparison of tribological performance of PEEK, UHMWPE, glass fiber reinforced PTFE and PTFE reinforced PEI composite materials under dry and lubricated conditions. *Journal of Polymer Engineering*, 32(6-7), 349-354. <https://doi.org/10.1515/polyeng-2012-0052>
- Vina, J., Garcia, M. A., Castrillo, M. A., Vina, I., & Argüelles, A. (2008). Wear behaviour of a glass fiber reinforced PEI composite. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 21(3), 279-286. <https://doi.org/10.1177/0892705708089481>
- Xian, G., & Zhang, Z. (2004). Effects of the combination of solid lubricants and short carbon fibers on the sliding performance of poly (ether imide) matrix composites. *Journal of applied polymer science*, 94(4), 1428-1434. <https://doi.org/10.1002/app.20980>
- Xian, G., & Zhang, Z. (2005). Sliding wear of poly-ether-imide matrix composites: I. Influence of short carbon fibre reinforcement. *Wear*, 258(5-6), 776-782. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2004.09.054>
- Yılmaz, M. (2013). Kompozitlerin kuru kaymadaki aşınma davranışlarının deneysel olarak araştırılması (Doktora tezi, DEÜ Fen Bilimleri Enstitüsü).
- Yuan, J., Zhang, Z., Yang, M., Zhao, X., Wu, L., Li, P. & Liu, W. (2021). Combined effects of interface modification and micro-filler reinforcements on the thermal and tribological performances of fabric composites. *Friction*, 9, 1110-1126. <https://doi.org/10.1007/s40544-020-0405-0>



# Kahramanmaraş Sutcu Imam University

## Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 28.07.2023  
Kabul Tarihi : 08.12.2023

Received Date : 28.07.2023  
Accepted Date : 08.12.2023

### TIG KAYNAK YÖNTEMİYLE ALAŞIMLANDIRILAN Fe MATRİSLİ KARBÜR TABAKALARIN MİKROYAPI VE SERTLİK İNCELEMESİ

#### MICROSTRUCTURE AND HARDNESS INVESTIGATION OF Fe MATRIX CARBIDE LAYERS ALLOYED BY TIG WELDING METHOD

Serkan ÖZEL<sup>1\*</sup> (ORCID: 0000-0003-0700-1295)

<sup>1</sup> Bitlis Eren Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Bitlis, Türkiye

\*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Serkan ÖZEL, sozel@beu.edu.tr

#### ÖZET

Bu çalışmada, Fe tozu içerisine farklı oranlarda (% 5 ve 10) ilave edilen  $Cr_3C_2$  toz karışımları, TIG (Tungsten Inert Gaz) yöntemiyle Ç1020 çelik malzeme yüzeyine alaşımlandırılmıştır. TIG yöntemiyle gerçekleştirilecek olan alaşımlamada üç farklı akım (110, 120 ve 130 Amper) şiddeti kullanılmıştır. Yüzey alaşımlama sonrası alaşım tabakasından kesitler alınarak sertlik ve mikro yapı karakterizasyonu yapılmıştır. Mikro yapılar incelenirken optik mikroskop, SEM+EDS analizleri kullanıldı. Sonuç olarak alaşım tabakalarında dendritik bir mikroyapı oluşmuştur. XRD analizinde  $Cr_3C_2$  ve  $Cr_7C_3$  bileşiklerinin oluştuğu tespit edilmiştir. Alaşımlanmış numune yüzeylerinden alınmış mikrosertlik testleri sonucunda akım şiddetinin artmasıyla numunelerin genelinde sertlik değerinde artış olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca ilave edilen  $Cr_3C_2$  tozunun, ilave oranının artmasıyla da sertlik artmıştır. Yüzeyi alaşımlanmış numunelerde en yüksek mikrosertlik değeri 130 A akım şiddetinde %10  $Cr_3C_2$  ilave edilen numunede 485 HV olarak ölçülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** Yüzey alaşımlama,  $Cr_3C_2$ , mikroyapı, mikrosertlik

#### ABSTRACT

In this study,  $Cr_3C_2$  powder mixtures added to Fe powder at different rates (5 and 10%) were alloyed to the surface of Ç1020 steel material by TIG (Tungsten Inert Gas) method. Three different current (110, 120 and 130 Ampere) intensities were used in the alloying to be carried out by the TIG method. After surface alloying, sections were taken from the alloy layer, and hardness and microstructure characterization were made. Optical microscopy and SEM+EDS analyzes were used while examining the microstructures. A dendritic microstructure was formed in the alloy layers. In XRD analysis, it was determined that  $Cr_3C_2$  and  $Cr_7C_3$  compounds were formed. As a result of the hardness tests taken from the alloyed sample surfaces, it was determined that the hardness value increased throughout the samples with the increase of the current intensity. In addition, the hardness increased with the increase in the addition rate of  $Cr_3C_2$  powder. In the surface alloyed samples, the highest microhardness value was measured as 485 HV in the sample with 10%  $Cr_3C_2$  added at 130 A current intensity.

**Keywords:** Surface alloying,  $Cr_3C_2$ , microstructure, microhardness

## GİRİŞ

Yüzey teknolojisi, alt tabaka yüzeyinde sert malzeme tabakası oluşturarak aşınma direnci, mikrosertlik, oksidasyon ve korozyon direnci özelliklerinin iyileştirilmesini hedefleyen bir teknolojidir. Malzemelerin yüzey özelliklerini iyileştirmek için Lazer, TIG, MIG/MAG, Toz altı, plazma transferli ark ve elektron ışını yöntemleri gibi çeşitli yüzey teknikleri kullanılmaktadır (Liu vd., 2023; Zhao vd., Diken, 2020; Akın, 2020; 2019; Özel vd., 2008; Özel, 2004). Bu yüzey teknikleri arasında tungsten inert gaz (TIG) yöntemi, alt tabaka üzerinde kalın bir tabaka geliştirmek için pahalı olmayan bir yöntem olarak kabul edilmiştir (Kumar & Das, 2022). Bu yöntem, kaplama malzemesi ile altlık malzemesi arasında mükemmel metalurjik bağ sergiler ve yüzey alaşımlama için çok yaygın bir yöntemdir. Kaplama ve altlık malzemesi arasında iyi metalurjik aderans göstermesi, kolay çalışması nedeniyle kaplama işleminde yaygın olarak kullanılmaktadır. Tel besleme tekniği, toz enjeksiyon tekniği ve önceden yerleştirilmiş toz tekniği gibi alt tabakanın yüzeyine kaplama malzemesi yerleştirmenin üç farklı yolu vardır. Önceden yerleştirilmiş toz tekniği, basit ve kolay çalıştırıldığı için TIG kaplama işleminde yaygın şekilde kullanılmaktadır (Das, 2022).

Sermet kaplamalar, üstün oksidasyon ve aşınma direnci, daha yüksek refrakterlik ve mekanik özellikler gibi avantajlı özelliklere sahiptir. Bu nedenle genellikle şekillendirme ve kesme uygulamaları, yataklar, aşındırıcı bulamaç için nozullar ve korozyona erozyona dirençli kaplamalar için kullanılır. Krom ve tungsten karbür kaplamalar normalde hem kayma aşınmasını, aşındırıcı ve sıcak korozyon direncini arttırmak hem de eşleşen makine bileşenlerinin sürtünme katsayısını azaltmak için kullanılır (Alam & Das, 2022). Krom karbürün mükemmel oksidasyon direncine sahip olduğu bilinmektedir. Bu nedenle CrC bazlı kompozitler, aşınmaya ve korozyon-oksidasyon karşısında dirençli olmalarından dolayı sıcaklığın fazla olduğu uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır. Genellikle krom karbür, termal püskürtme uygulamalarında nikel ile birleştirilir. Yukarıda belirtilen özelliklerden dolayı, oluşturulan alaşım tabakası ile yüksek sıcaklıktaki aşınma uygulamalarında kullanılabilir (Bendikiene vd., 2020).

TIG yöntemi ile çeşitli yüzey alaşımlandırma işlemleri gerçekleştirilerek farklı türde alaşım tabakaları elde edilmektedir. Yüzeyde aşınma ve korozyon direncini arttırmaya yönelik  $Al_3Ti$ ,  $TiB$ ,  $TiB_2$ ,  $TiC$ ,  $SiC$  ve  $WC$  bileşikleri ile güçlendirilmiş kompozit alaşım tabakaları oluşturulabilmektedir. (Singh vd., 2020; Kumar vd., 2021; Sahami-Nejad vd., 2019; Tavoosi & Arjmand, 2017; An vd., 2017; Saroj vd., 2017).

Debta ve Masanta yapmış oldukları çalışmalarında (Debta & Masanta, 2023),  $Ti-6Al-4V$  alaşımının mekanik performansını iyileştirmek için,  $TiC-Co-nY_2O_3$  kaplama tabakasını  $Ti-6Al-4V$  alaşımlı levha üzerinde TIG kaplama yolu ile oluşturmuşlardır. Farklı ağırlık yüzdelerinde (n) Nano- $Y_2O_3$  tozu,  $TiC-Co$  toz harmanı ile karıştırılarak farklı toz karışımları elde etmişlerdir. Kaplama tabakalarının incelenmesinde Nano- $Y_2O_3$ 'ün eklenmesiyle,  $TiC$  parçacıklarını tamamen eriten ve katılma sırasında uzun dendrite dönüştüren bir yapının oluştuğunu tespit etmişlerdir. Nano- $Y_2O_3$  ilavesi ile aşınma ve sürtünme katsayısında (COF) önemli azalma ile birlikte ortalama mikro sertlikte bir iyileşme gözlemlenmiştir.  $TiC-Co-2\%Y_2O_3$  kaplamada,  $TiC-Co$  kaplamaya kıyasla neredeyse dört kat daha az aşınma tespit etmişlerdir.

TIG kaynak yöntemi ile  $Co-Cr$  esaslı  $WC$  takviyeli tozların  $St52$  çeliğinin yüzeyi üzerine kaplanması ile yapılan çalışmada (Kırık vd., 2019), kaplamaların mikroyapı ve fazların analizleri, SEM, EDS ve X-Ray incelemeleri ile gerçekleştirilmiştir. X-Ray incelemesinde, kaplama tabakalarında ötektik yapıların, dentritik fazların,  $WC$  ve  $W_2C$  ile  $CrC$  ve  $Cr_3C_2$  karbürlerinin oluştuğunu tespit etmişlerdir.

TIG kaynak yöntemi ile sert dolgu gerçekleştirerek oluşan artık gerilme ve deformasyonların modellenmesinin gerçekleştirildiği çalışmada (Savaş, 2021), oluşacak gerilme ve deformasyonların en düşük seviyeye indirilmesinde kaynak dikişlerini sayısal olarak incelemiştir. TIG kaynak yöntemiyle sert dolgu kaynak dikişlerinin seyrek bir şekilde plaka üzerine uygulanmasını gerçekleştirmiştir. ANSYS sonlu elemanlar yazılımını kullanarak model oluşturulmuş ve deneysel sonuçlar ile doğruluğunu kontrol etmiştir. Dikdörtgenimsi plakaların enlemesine gerçekleştirilen kaynak dikişlerinde, daha az deformasyon ve artık gerilmelerin oluştuğunu tespit etmiştir.

Can ve arkadaşları çalışmalarında (Can vd., 2022), GTAW kaynak yöntemi ile gerçekleştirdikleri yüzey kaplama tabakalarında kaplama kalitesi ve verimliliği arttırmak için PLC kontrollü yarı-otomatik kaynak makinesinin tasarımını gerçekleştirmişlerdir. Tasarladıkları bu kaynak makinesi ile çeşitli deneyler gerçekleştirmişlerdir. Mikroyapıyı optik ve elektron mikroskobu ile incelemiştir. Mikrosertlik ölçümleri almışlardır.  $FeCrC + FeTi + Ni$  toz karışımları ile AISI 1040 çelik malzeme yüzeyi kaplanmıştır. Kaplama tabakasında  $377,5 HV_{0,2}$  mikro sertlik

değeri tespit edilmiştir. PLC kontrollü yarı-otomatik GTAW kaynak makinesinin yüzeylerin kaplanması ve değişik kaynak uygulamalarında optimum şartlarında tespitinde etkin bir yöntem olabileceği tespit edilmiştir.

Çömez ve arkadaşları (Çömez vd., 2021), Fe-Cr-C alaşımı içerisinde krom, molibden ve vanadyum ilave ederek St-37 çeliği yüzeyine kaplamalar gerçekleştirmişlerdir. Ferro alaşımı olarak ilave edilen elementlerle oluşturulan kaplama tabakalarında  $M_7C_3$  (M: Fe, Cr) ve  $M_2C$  (M: Mo, Fe, Cr) karbürleri birinci karbür oluşumu olarak tespit edilmiştir. En yüksek makrosertlik ve en düşük aşınma kaybını % 4 ferro-molibden + % 10 ferro-vanadyum ilave edilerek oluşturulan kaplama tabakalarında tespit etmişlerdir.

Sıcak iş takım çeliğinin yüzeyi üzerine, TIG kaynak yöntemi kullanılarak özel elektrod ile kaplama gerçekleştirilen çalışmada (Gençalp İrizalp vd., 2018), numunelerin sertlik, mikroyapı, SEM, EDS, XRD, aşınma test analizleri gerçekleştirilmiştir. Bilgisayar programı yardımıyla akma gerilmesinin ve genleşme katsayısının tespiti yapılmıştır. Aşınma deneyi sonrasında aşınma direncinin arttığını tespit etmişlerdir. Dolgu malzemesi olarak kullanılan elektrotta mevcut krom ve vanadyum elementlerinin karbür yapıcı etkisiyle sertlik miktarı da artmıştır.

Yitria stabilizeli zirkonya (%5-25 ağırlık) takviyeli Inconel 625 kompozit kaplamaların TIG kaynak yöntemi kullanılarak geliştirildiği çalışmada (Kamboj & Thakur, 2023), optimum TIG kaynak işlemi parametrelerini, Box-Behnken tasarımına (BBD) dayalı tepki yüzey metodolojisi (RSM) aracılığıyla tahmin etmişlerdir. Kaplamalar optik mikroskop, SEM, EDS ve XRD analiz teknikleri kullanılarak incelenmiştir. Kaplamaların 650 °C'deki kayma aşınma davranışı, yüksek sıcaklıktaki pin-on-disk tribometre ile değerlendirilmiştir. YSZ-Inconel 625 kompozit kaplamalarda,  $\gamma$ -Ni,  $Cr_2O_3$  ve  $ZrO_2$  gibi kararlı fazların oluştuğunu tespit etmişlerdir. Kaplamalar yüksek sıcaklıkta esas olarak yapışkan tipte bir aşınma sergilemiştir. Optimize edilmiş bir ayarla geliştirilen kaplamadaki kompakt katı oksit katmanların, diğer kaplamalara kıyasla üstün aşınma direnci sağladığını tespit etmişlerdir.

Padhee ve arkadaşları yapmış oldukları çalışmalarında (2020), AZ91 Mg alaşımının yüzey özelliklerini geliştirmek amacıyla TIG yöntemini ısı kaynağı olarak kullanarak Al ve TiC karışımının yüzey alaşımlamışlar ve yüzey özelliklerini incelemişlerdir. AZ91 alaşımı üzerindeki alaşımlı katmanın mikroyapısal incelemesinde, SEM ve XRD tekniğini kullanmışlardır. Aşınma ve mikrosertlik incelemelerinde de bulunmuşlardır. Yüzeyde oluşturulan alaşım tabakası, 305 HV<sub>0.25</sub>'e kadar sertlik değeri ve teslim alınan AZ91 alaşımlı alt tabaka ile karşılaştırıldığında neredeyse ihmal edilebilir düzeyde aşınma sergilediğini tespit etmişlerdir.

Fesharaki ve arkadaşları yapmış oldukları çalışmalarında (Fesharaki vd., 2018), lazer kaplama ve TIG kaplama olmak üzere iki işlemle Inconel 738 altlık malzeme üzerine Ni bazlı Inconel 625 kaplama tabakaları oluşturmuşlardır. Lazer kaplama yönteminde lazer gücü, lazer tarama hızı ve toz besleme hızı değişken olarak, TIG yönteminde ise akım ve türü değişken olarak kullanmışlardır. Mikroyapısal, elementel ve faz karakterizasyonu için EDS ve XRD ile donatılmış alan emisyonlu taramalı elektron mikroskobu (FESEM) kullanmışlardır. Sonuçta, mikroyapının sütunlu ve hücreli yapı dendritlerinden oluştuğunu ve lazer kaplamanın, daha yüksek soğutma hızı nedeniyle daha ince bir mikro yapıya sahip olduğunu tespit etmişlerdir. Ayrıca her iki kaplamada da östenit, karbür ve Laves fazları tespit etmişlerdir.

$Cr_3C_2$  tozu termal püskürtme kaplama yöntemlerinden bir tanesi olan HVOF (yüksek hızlı oksijen yakıt) yöntemiyle kaplama işlemi yapılan bir tozdur (Liu, 2023; He, 2022; Şap, 2020). HVOF yöntemine ait kaplama ünitesinin maliyetinin yüksek oluşu, yüzeye uygulanacak kaplama maliyetinin artmasına neden olmaktadır. Bu nedenle yüzeyde ergitme işlemi için ısı kaynağı olarak kullanılan TIG kaynak yönteminde üretim maliyeti oldukça düşük seviyelere çekilmektedir. Ayrıca TIG kaynak yönteminde, yüzey tabakasının kalınlığının da yüksek olması sağlanarak yeni bir teknoloji olarak kullanılabilir.

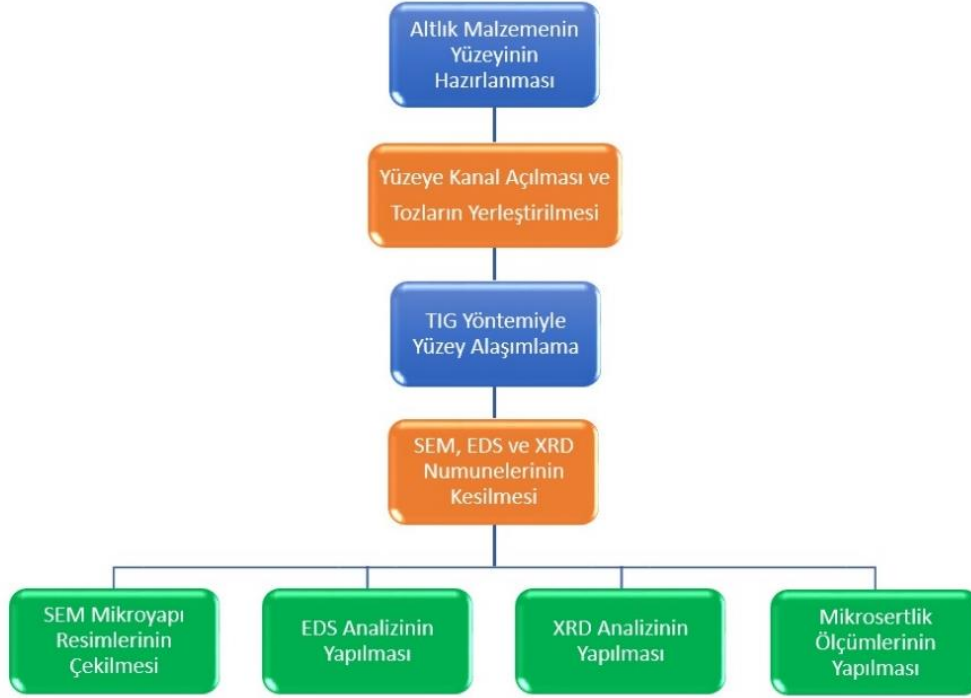
Bu çalışmada, Fe esaslı toz karışımı içerisinde %5 ve %10 oranlarında ilave edilen  $Cr_3C_2$  toz karışımları altlık malzeme yüzeyine önceden yerleştirilmiş toz tekniği kullanılarak yerleştirilmiş ve TIG yöntemiyle Ç1020 çelik malzemenin yüzeyi üzerine alaşımlanmıştır. Alaşımlama esnasında 110 A, 120 A ve 130 A akım şiddetleri kullanılmıştır. Bu işlem esnasında kullanılan farklı akım şiddeti ve ilave oranlarının, mikroyapı ve sertlik üzerine etkisi araştırılmıştır.



## MATERYAL METOD

### *Kullanılan Malzemeler*

Ç 1020 çelik malzeme yüzeyi TIG yöntemiyle alaşımlandırılmış ve oluşturulan tabakaların mikroyapı ve sertlik incelemesi gerçekleştirilmiştir. Numunelerin hazırlanmasından analizlerin yapılmasına kadar olan işlemlere ait akış şeması Şekil 1’de verilmiştir. Yüzey alaşımlamanın yapılarak Altlık olarak kullanılan düşük karbonlu çelik malzemesinin kimyasal bileşiminin içeriği Tablo 1’de verilmiştir.



Şekil 1. Yüzey Alaşımlama İşlemine Ait Akış Şeması

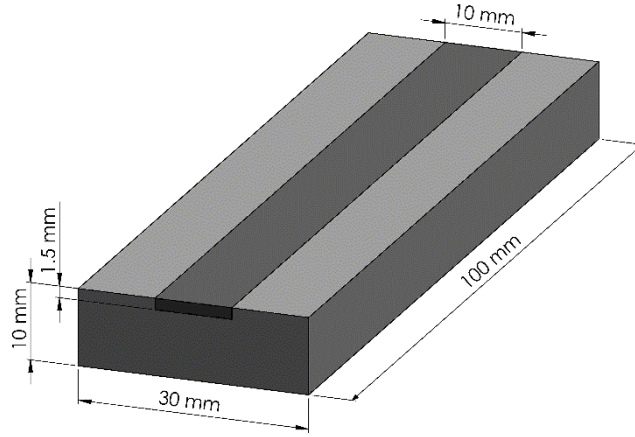
Tablo 1. Altlık Malzemede Kullanılan Ç1020 Çeliğinin Kimyasal İçerik Değerleri (%Ağırlık)

Malzeme/Element	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Fe
Ç1020	0,20	0,04	0,5	0,065	0,022	0,07	0,08	0,08	Kalan

TIG yöntemi ile yüzey alaşımlandırılırken, alt malzeme için kullanılan numune 100x30x10 mm boyutlarında az miktarda karbona sahip Ç1020 çelik malzemeler ve alaşım malzemesi olarak da Fe esaslı toz içerisinde kimyasal bileşim içeriği Tablo 2’de verilmiş olan farklı oranlarda (% 5 ve % 10) Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> tozları ilave edilerek karışımlar elde edilmiştir. Bu toz karışımları Şekil 2’deki gösterildiği gibi, 1,5 mm derinlik ve 10 mm genişlik ölçüsünde hazırlanan kanallar içerisinde tozları sabitleyerek tutunmasını sağlamak amacıyla sodyum silikat ile karıştırılarak yerleştirilmiştir.

Tablo 2. Yüzey Alaşımlamada Kullanılan Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> Tozunun Kimyasal İçeriği (% ağırlık)

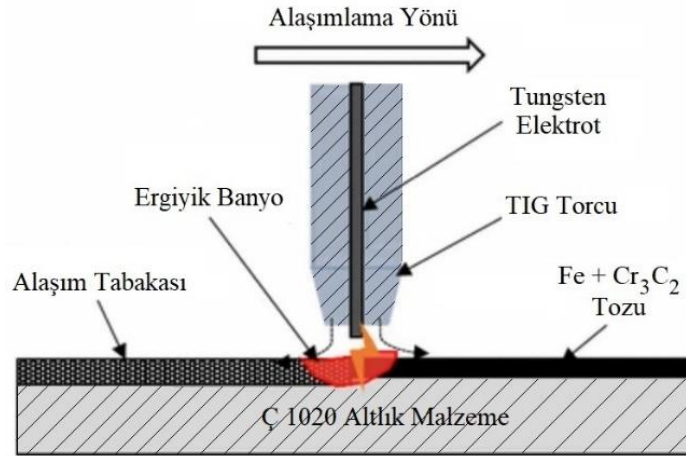
Alaşım elementi	% Oranı
C	12-14
Si	0.3
Cr	84-87
Fe	0.5



Şekil 2. Yüzey Alaşımlamada Kullanılan Numunenin Şematik Resmi

### Yüzey Alaşımlama Yöntemi

Yüzey alaşımlandırma işlemi esnasında değişik akım şiddetleriyle denemeler yapılarak, kararlı ark ve parçayı deforme etmeden optimum akım değerlerinin 110A, 120A ve 130A'lık akım şiddeti değerleri olduğu belirlenmiştir. Ç1020 çelik malzemenin yüzeyi üzerine TIG yöntemi kullanılarak Fe esaslı toz karışımı içerisinde farklı oranlarda (% 5 ve % 10) ilave edilen  $Cr_3C_2$  tozları, daha önce belirlenen akım şiddetleri ile alaşımlama işlemi gerçekleştirilmiştir. Şekil 3'de TIG yöntemiyle numunenin kanalı içerisine yerleştirilen tozlarla gerçekleştirilen alaşımlandırma işlemi verilmiştir.



Şekil 3. TIG Yöntemiyle Yüzeyi Alaşımlandırmanın Şematik Gösterilişi (Sahoo & Masanta; 2018)

Tablo 3'te TIG yöntemiyle yüzeyi alaşımlandırmada kullanılmış işlem parametreleri verilmiştir. TIG torcunun içerisindeki elektrot ile alt malzeme arasında meydana gelen ark ile yüzeye yerleştirilen toz karışımı ergitilerek Ç1020 alt malzeme yüzeyinde alaşım tabakası oluşturulmuştur. Şekil 4-a'da yüzey alaşımlama sonrasında altlık malzeme ve alaşım tabakasının, Şekil 4-b'de ise mikroyapı analizi için kesit alınarak çıkarılan numunenin makro resimleri verilmiştir.



Şekil 4. a) Yüzey Alaşımlama Sonrası Numunenin, b) Mikroyapı İncelemesi İçin Kesit Numunenin Makro Resimleri

**Tablo 3.** Numunelerin Kodları ve Parametreleri

Numune	Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub> tozu karışım oranı (%)	Akım Şiddeti (A)
M1	5	110
M2		120
M3		130
M4	10	110
M5		120
M6		130

### **Metalografik Muayene ve Sertlik Ölçümü**

Yüzey alaşımlama sonrası kaynak ilerleme yönüne dik pozisyonda yüzeyden kesit alınıp numune çıkartılmıştır. Numunelerin kesiti alınan yüzeyler sırasıyla 300, 600, 800 ve 1200 mesh'lik zımparalar ile zımparalama işlemi sonrası 3 mikron elmas pasta ve çuha ile yüzeyler parlatılmıştır. Parlatılan yüzeyler 5 s sürede 1 gr FeCl<sub>3</sub>+10 ml HCl+100 ml H<sub>2</sub>O çözeltisiyle dağlanmıştır. Dağlama sonrası numunelerin SEM fotoğrafları alınmış ve EDS analizi ile elementel analizi gerçekleştirilmiştir. Yüzeyle alaşımlandırılan tabaka içerisinde oluşan muhtemel bileşikler tespit için yüzeyden XRD analizi alınmıştır. Tüm numunelerin alaşımlanan tabakalarından mikrosertlik ölçümleri, Qness marka QM-10 model mikrosertlik cihazı (Şekil 5) ile Vickers cinsinden ölçülmüştür. Alaşımlanan tabakanın 5 farklı noktasından ölçümler alınarak aritmetik ortalamaları hesaplanmıştır.

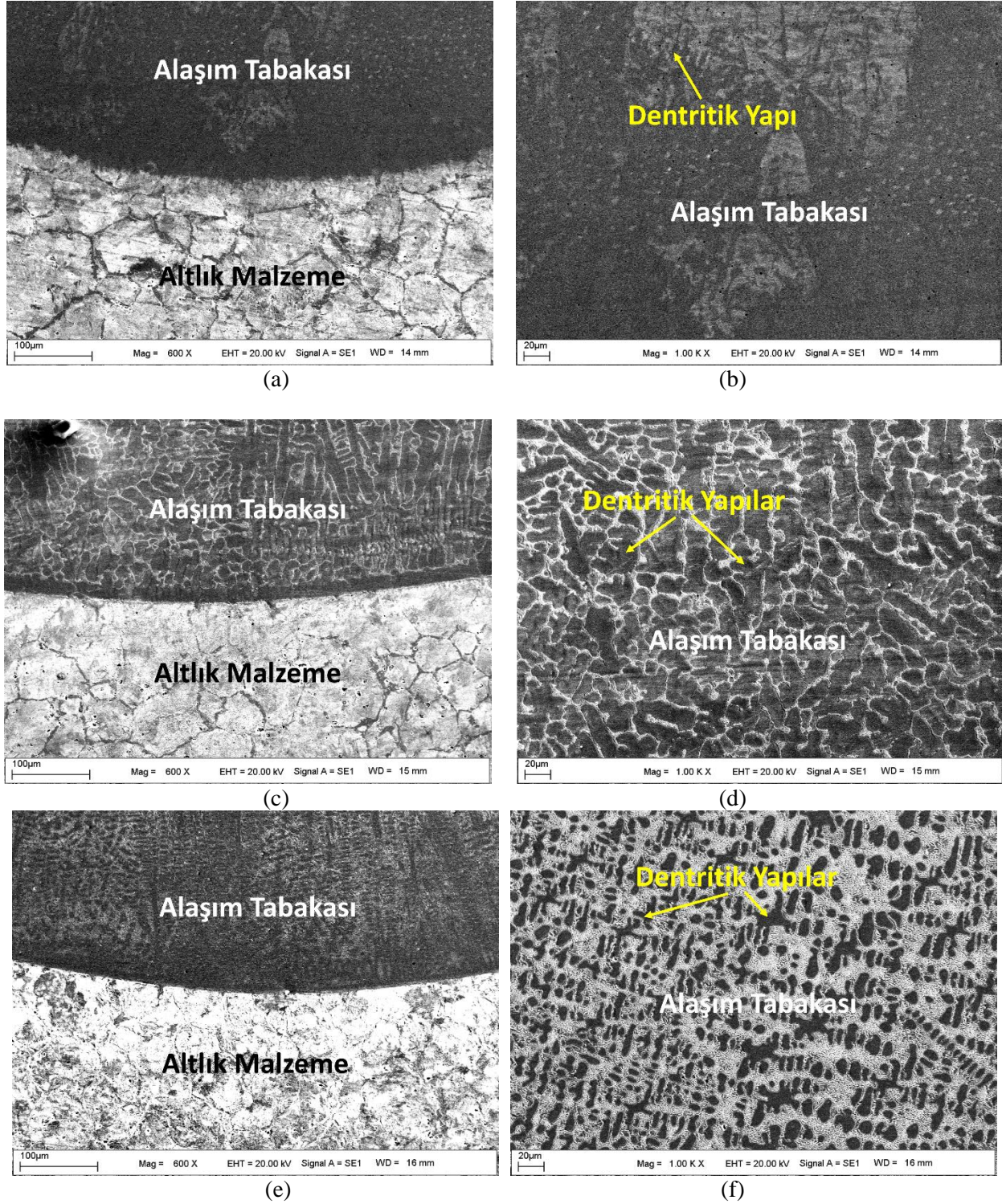
**Şekil 5.** Mikrosertlik Ölçüm Cihazı

## **BULGULAR**

### **Mikroyapı İncelemesi**

Düşük karbonlu çelik malzemesi yüzeyine, Fe esaslı toz içerisinde farklı oranlarda (% 5 ve % 10) Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> tozları karıştırılmış ve TIG kaynak yöntemiyle yüzeye alaşımlandırılmıştır. Şekil 6'da M1, M2 ve M3 numunelerinin yüzeyde oluşturulan alaşım tabakalarından alınan SEM fotoğrafları görülmektedir. Fotoğraflar incelendiğinde, üst yüzeyden altlık malzemeye doğru yönelmiş mikroyapının olduğu görülmektedir. Oluşan mikroyapı katılaşma hızına bağlı olarak farklılık gösteren dendritik yapıdadır. M3 nolu numunede dendritik yapının, akım şiddetinin artmasıyla daha belirgin olarak olduğu görülmektedir. Akım şiddetinin artmasıyla ısı girdisindeki artış, dendritik yapının kısmen daha iri tanelerden meydana gelmesine neden olmuştur. Isı girdisi arttıkça dendrit kolları genişler ve gerilir (Şenol, 2021). Isı girdisinin değişmesiyle altlık malzemenin erime miktarının değişmesi ve dolayısıyla alaşım tabakasının kimyasal bileşiminin değişmesi söz konusudur (Gürgeç & Özel 2017). Yüksek ısı girdisi, dendritik yapıda meydana gelen karbür bileşiklerinin erime sonucu homojen olarak mikroyapıda oluşmasına neden olarak mekanik performansta olumlu etki yapmaktadır (Gür vd., 2018). Yüzey alaşımlama esnasında, alaşımlanacak toz malzemelerinden ve alt tabakadan gelen erimiş demir akışı, kaplanacak tozun taneler arası boşluğuna tamamen yayılır ve alaşım tabakasının optimum şekilde oluşmasını sağlar. Fe tozunun ağırlıkça fazla olması, üretilen alaşım tabakasında geçiş bölgesinde arayüz boşluğu oluşmamasına ve bu da üstün bağlanmanın oluşmasına neden olmaktadır (Kumar & Das, 2022).

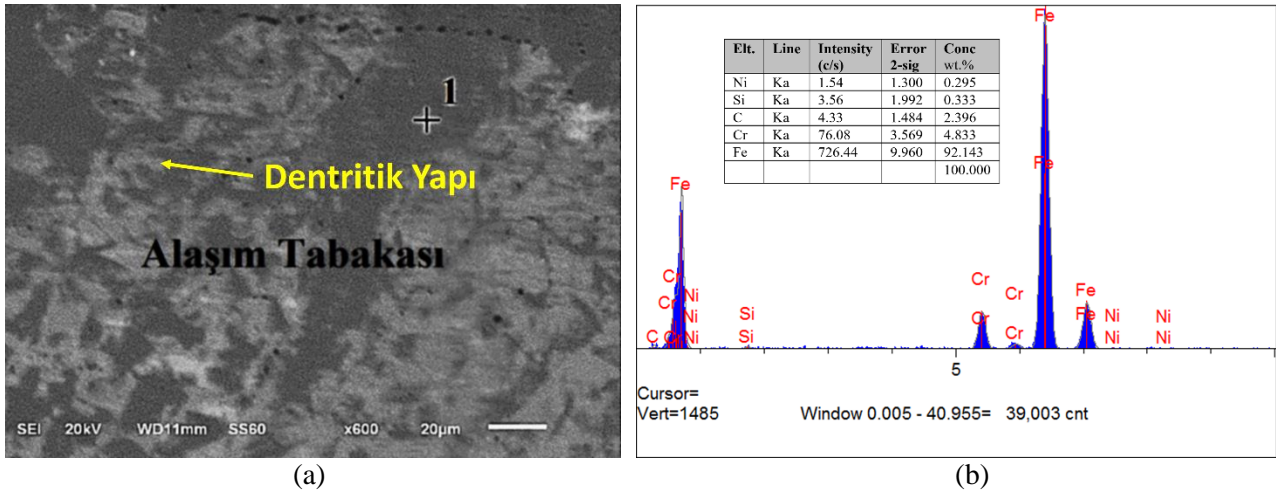




Şekil 6. (a) ve (b) M1 Numunesi, (c) ve (d) M2 Numunesi, (e) ve (f) M3 Numunesine Ait SEM Görüntüleri

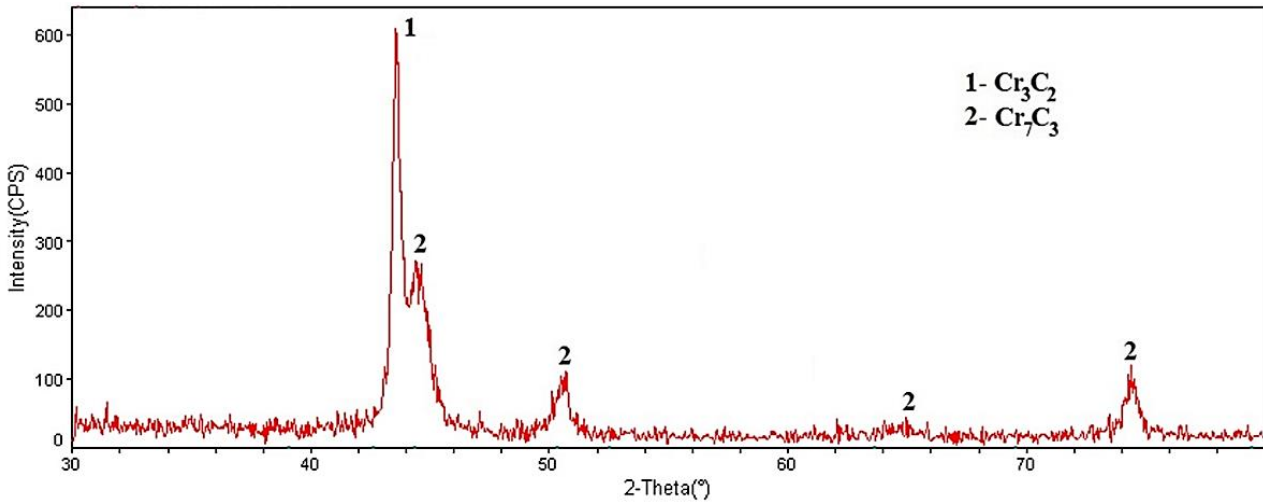
M1 numunesinin alaşımlandırılan tabakasından alınan EDS analizi Şekil 7’de verilmiştir. 1 nolu noktadan alınan EDS analizinde, Fe element yüzdesinin yüksekliği ile birlikte % 4.833 değeriyle Cr elementinin ve % 2.396 değeriyle C elementinin varlığı tespit edilmiştir. 1 nolu noktada, Cr ve C elementleri ile yüzey üzerine alaşımlandırılmak üzere yerleştirilen  $Cr_3C_2$  bileşiğinin oluştuğu düşünülmektedir. Ayrıca M1 numunesinin alaşım tabakasında, EDS analizindeki değerlere bağlı olarak  $Cr_xC_y$  tipi karbürlerden de bahsedebiliriz.





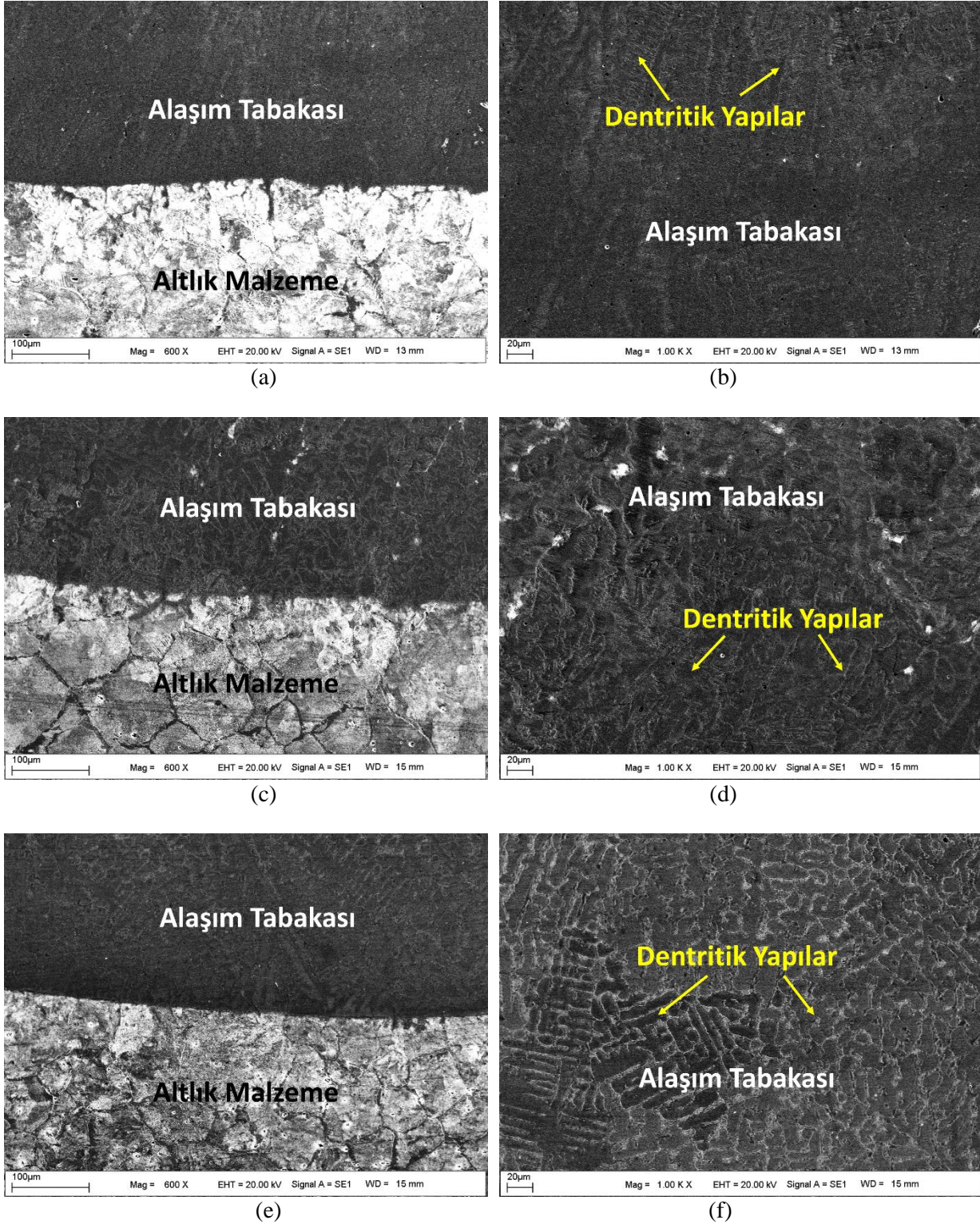
Şekil 7. M1 Numunesinin Alaşım Tabakasından Alınmış SEM Resmi ve EDS Analizi

M1 numunesinin alaşım tabakası üzerinden alınan XRD analizine ait grafik Şekil 8’de verilmiştir. Analiz sonucu incelendiğinde, M1 numunesinin alaşım tabakasında  $Cr_3C_2$  ve  $Cr_7C_3$  bileşiklerinin oluştuğu görülmektedir. Bu sonuçlar EDS analizinde verilen değerleri doğrulamaktadır.  $Cr_{23}C_6$ ,  $Cr_7C_3$  ve  $Cr_3C_2$ ’nin krom karbür malzemelerin üç kararlı kristalografik fazı olduğu ve  $Cr_3C_2$ ’nin en kararlı faz olduğu yaygın olarak bilinmektedir.  $Cr_7C_3$  ve  $Cr_3C_2$  ortorombik kristalografik yapıya sahiptir.  $Cr_3C_2$ , üç krom karbür arasında en yüksek erime noktasına sahiptir (Ganguly, 2019; Hirota vd., 2005).  $Cr_3C_2$  oluşumunun stokiyometrik olarak  $3Cr + 2C = Cr_3C_2$  şeklindeki reaksiyon ile oluştuğu düşünülmektedir. (Myshlyayev, 2011) Ayrıca  $Cr_3C_2$  bileşiğinden  $Cr_7C_3$  bileşiğine de  $7Cr_3C_2 \rightarrow 3 Cr_7C_3 + 5C$  reaksiyonu ile dönüşüm olmaktadır (Kevin vd., 2020)



Şekil 8. M1 Numunesine Ait XRD Grafiği

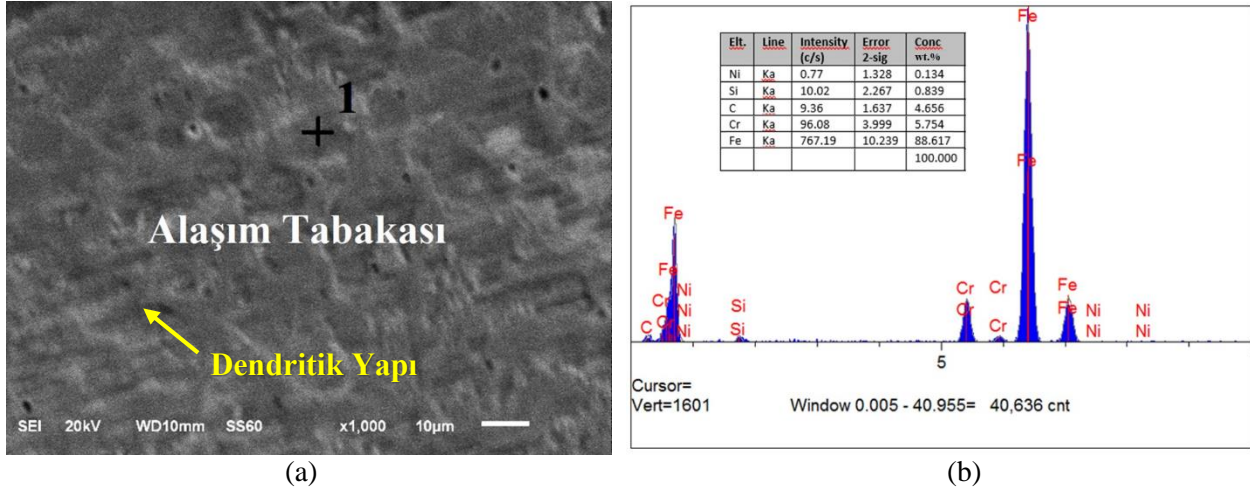
Şekil 9’de yüzeyde oluşturulan alaşım tabakalarının SEM fotoğrafı görülmektedir. % 10  $Cr_3C_2$  ilave edilen numunelerde de fotoğraflarda üst yüzeyden altlık malzemeye doğru yönelmiş mikroyapının oluştuğu görülmektedir. Oluşan mikroyapı katılaşma hızına bağlı olarak farklılık gösteren dendritik yapıdadır. Akım şiddetinin artmasına bağlı olarak dendritlerin M6 numunesinde M4 numunesine göre daha belirgin ve irileştiği söylenebilmektedir.



Şekil 9. (a) ve (b) M4 Numunesi, (c) ve (d) M5 Numunesi, (e) ve (f) M6 Numunesine Ait SEM Görüntüleri

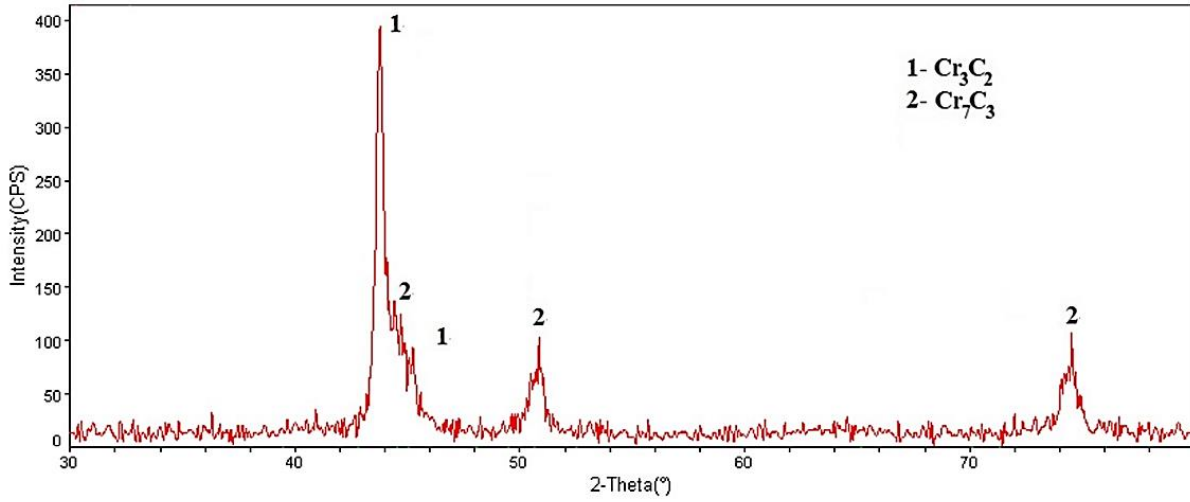
Şekil 10.a'da verilen ve alaişım tabakasının 1 nolu noktadan alınan EDS analizi Şekil 10.b'de görölmektedir. 1 nolu EDS analizde, Fe element yüzdesinin yüksekliği ile birlikte % 5.754 değeriyle Cr elementinin ve % 4.656 değeriyle C elementinin varlığı tespit edilmiştir. 1 nolu noktada, Cr ve C elementleri ile yüzey üzerine alaişımlandırılmak üzere yerleştirilen  $Cr_3C_2$  bileşiğinin oluştuğu düşünülmektedir. Ayrıca M4 numunesinin alaişım tabakasında, EDS analizindeki değerlere bağlı olarak  $Cr_xC_y$  tipi karbürlerden de bahsedebiliriz.





Şekil 10. M4 Numunesinin Alaşım Tabakasından Alınmış SEM Resmi Ve EDS Analizi

Şekil 11’de verilen XRD analizi sonucu incelendiğinde, M4 numunesinin alaşım tabakasında  $Cr_3C_2$  ve  $Cr_7C_3$  bileşiklerinin oluştuğu görülmektedir. Bu sonuçlar EDS analizinde verilen değerleri doğrulamaktadır.

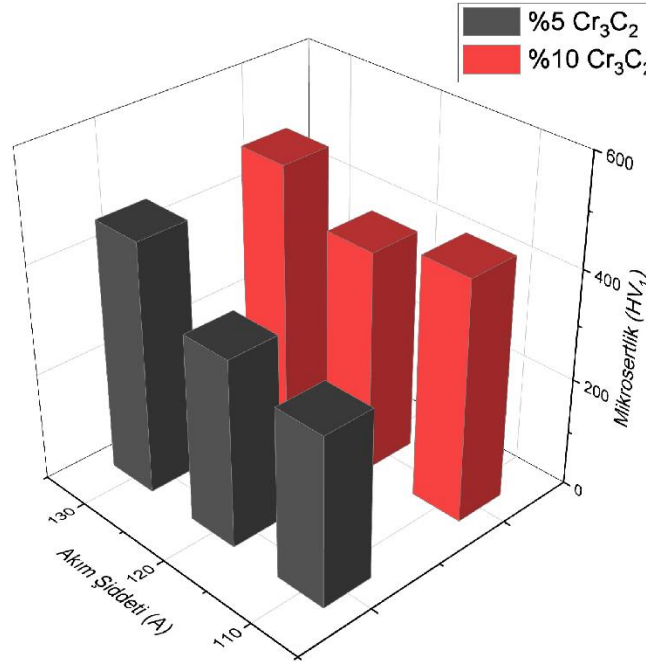


Şekil 11. M4 Numunesine Ait XRD Grafiği

%5  $Cr_3C_2$  ilaveli numunelerin (M1, M2 ve M3) toz karışımında Fe tozunun karışım oranı, %10  $Cr_3C_2$  ilave edilen numunelere (M4, M5 ve M6) göre daha yüksektir. Akım şiddetinin artmasıyla ısı girdisi artmış ve altlık malzemeden ergiyerek gelen demir miktarı daha fazla olmuştur. Demir içeriğindeki bu artışla alaşım tabakası,  $Cr_xC_y$  açısından daha seyrelmiş olmaktadır (Kumar & Das, 2022).

### Mikrosertlik İncelemesi

Şekil 12’de yüzeyde oluşturulan alaşım tabakalarından alınan mikrosertlik değerlerine ait grafik görülmektedir. Fe tozu içerisine %10  $Cr_3C_2$  ilave edilerek elde edilen ve 130 A akım şiddetinde alaşımlandırılan M6 numunesinde 485 HV ile en yüksek sertlik değeri tespit edilmiştir. Yüzey meydana getirilen alaşım tabakalarında  $Cr_3C_2$  dağılımı mikroyapı resimlerinde de görülmüştür. Akım şiddetinin artmasıyla sıcaklık artmış ve Fe ile  $Cr_3C_2$  tozlarının eriyerek homojen bir dağılım ile ergiyiği oluşturduğu mikroyapı resimlerine dayanılarak söylenebilmiştir.  $Cr_3C_2$  bileşiğinin ergime derecesinin yüksek oluşundan ( $\approx 1895$  °C) dolayı katılaşma öncelikle  $Cr_3C_2$  bileşiğinin olduğu bölgelerle başlamıştır (Gür vd., 2018). Bu nedenle akım şiddetinin artışıyla öncelikli katılaşan  $Cr_3C_2$  etkisiyle sertlik miktarında artış meydana geldiği düşünülmektedir. M1 nolu numuneden M3 nolu numuneye gidildikçe sertlikte artış görülmüştür. %10 değerinde  $Cr_3C_2$  bileşiğinin ilavesi, alaşım tabakasında sertliğin yüksek çıkmasına neden olmuştur. Maksimum mikrosertlik miktarı en yüksek akım şiddetinde alaşımlama gerçekleştirilen M6 numunesinin alaşım tabakasında 485 HV değeriyle, minimum mikrosertlik miktarı ise M1 numunesinin alaşım tabakasında 311 HV değeriyle tespit edilmiştir.



Şekil 12. Mikrosertlik Değerleri Grafiği

## SONUÇLAR

TIG kaynak yöntemi kullanılarak Fe tozu içerisine farklı oranlarda (% 5 ve 10) ilave edilen Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> toz karışımları, Ç1020 çelik malzeme yüzeyine alaşımlandırılabilmiştir. Yüzey alaşımlama sonrasında yapılan incelemelerde, yüzeyde oluşturulan alaşım tabakalarında dendritik bir mikroyapının oluştuğu ve tüm numunelerde dendrit yapı oluşumunun altlık malzemeye doğru yönelerek ilerlediği tespit edilmiştir. Alaşımlandırma işleminde kullanılan akım değerlerinin artmasıyla dendritik yapının irileştiği görülmüştür. Alaşım tabakalarından alınan XRD analizlerinde, alaşım tabakasında Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> ve Cr<sub>7</sub>C<sub>3</sub> bileşiklerinin oluştuğu tespit edilmiştir. Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> tozunun ilavesi ile alaşım tabakasının sertlik miktarının arttığı ve en yüksek mikrosertlik değerinin %10 Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> tozu ilave edilerek 130 A akım şiddeti kullanılan M6 numunesinde 485 HV olarak tespit edilmiştir.

Yüzey alaşımlama işlemiyle Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> tozunun ilavesi ile yüzeyde oluşturulan tabakalar, kırıncıların yüzeylerinde daha mukavemetli bir yüzey elde edilmesini sağlayabilecektir. Taş, Pomza vb. kayaçların kırıncı yüzeylerinde endüstriyel olarak uygulanabilecek tabakaların oluşturulduğu düşünülmektedir. 130 A akım şiddeti ve %10 Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> tozunun ilave edilmesi parametreleri ile bu çalışmada en iyi performanslı tabakalar elde edilebilmiştir.

## TEŞEKKÜR

BEBAP 2019.03 numaralı proje ile verdiği destekten dolayı Bitlis Eren Üniversitesi Bilimsel Araştırma Proje (BEBAP) Koordinatörlüğüne teşekkür ederim.

## KAYNAKLAR

Akın, B. (2020). Toz Altı Kaynak Yöntemiyle Çelik Yüzeyine Alaşımlandırılan Karbür Tabakaların Mikro Yapı ve Aşınma Özelliklerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi. Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Anabilim Dalı, Bitlis 75s

Alam, M.S., & Das, A.K. (2022). Advancement in cermet based coating on steel substrate: A review. *Materials Today: Proceedings*, 56(2), 805-810. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.02.260>



- An, Q., Huang, L., Jiang, S., Li, X., Gao, Y., Liu, Y. & Geng, L. (2017). Microstructure evolution and mechanical properties of TIG cladded TiB reinforced composite coating on Ti-6Al-4V alloy. *Vacuum*, 145, 312-319. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2017.09.019>
- Bendikiene, R., Ciuplys, A., Sertvytis, R., Surzhenkov, A., Tkachivskyi, D., Viljus, M., Traksmas, R., Antonov, M., & Kulu, P. (2020). Wear behaviour of Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-Ni cermet reinforced hardfacings. *Journal of Materials Research and Technology*, 9(4), 7068-7078. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.05.042>
- Can, K. , Dalmış, F. & Dalmış, İ. (2022). Design and Implementation of PLC Based Special Purpose Machine for Surface Coating . *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (33) , 338-343. DOI: 10.31590/ejosat.1019912
- Çömez, N. , Gül, C. & Durmuş, H. (2021). Molibden ve Vanadyum İlavesinin Fe-Cr-C Sert Dolgu Alaşımlarının Aşınma Direncine Etkisi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 36 (3), 691-700. DOI: 10.21605/cukurovaumfd.1005460
- Das, A.K. (2022). Recent developments in TIG torch assisted coating on austenitic stainless steel: A critical review. *Materials Today: Proceedings*, 57(4), 1846-1851. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.01.077>.
- Debta, M.K., & Masanta, M. (2023). Effect of nano-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> on the microstructure and wear behaviour of TIG cladded TiC-Co-nY<sub>2</sub>O<sub>3</sub> coating. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 111, 106078. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2022.106078>
- Diken, R. (2020). MAG Yöntemi Kullanılarak Özlü Elektrot ile Çelik Yüzeyine Alaşımlandırılan Tabakaların Mikro Yapı ve Aşınma Özelliklerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi. Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Bitlis 69s
- Fesharaki, M.N., Shoja-Razavi, R., Mansouri, H.A., & Jamali, H. (2018). Microstructure investigation of Inconel 625 coating obtained by laser cladding and TIG cladding methods. *Surface and Coatings Technology*, 353, 25-31. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2018.08.061>
- Ganguly, A. (2019). Theoretical Investigations Of Surface Interactions On Chromium Carbide And Fe-Substituted Chromium Carbide Surfaces. Master Thesis. College Of Health And Human Sciences Charles Darwin University Northern Territory, Australia 470p
- Gençalp İrizalp, S. , Saklakoğlu, N. , İldaş, G. & Demirok, S. (2018). 1.2714 Çeliği Üzerine Sert Dolgu Kaynağı ile Kaplanmış Fe-Cr-V Esaslı Alaşımın Malzeme Özelliklerinin İncelenmesi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 33 (1) , 35-46. DOI: 10.21605/cukurovaumfd.420400
- Gür, A. K. , Cengiz, M. H. , Yıldız, T. & Taşkaya, S. (2018). Plazma Transferli Ark Kaynak Yöntemiyle Hardox 400 Çelik Malzemenin Yüzeyinin Farklı Oranlardaki FeCrC Tozuyla Alaşımlandırılması. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 30 (1) , 233-242. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/fumbd/issue/35837/400490>
- Gürgeç, T. & Özel, C. (2017). Effect of Heat Input on Microstructure, Friction and Wear Properties of Fe-Cr-B-C Coating on AISI 1020 Surface Coated by PTA Method. *Turkish Journal of Science and Technology*, 12 (2), 43-52. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/tjst/issue/31261/340395>
- He, B., Zhang, L., Yun, X., Wang, J., Zhou, G., Chen, Z., Yuan, X. (2022). Comparative Study of HVOF Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-NiCr Coating with Different Bonding Layer on the Interactive Behavior of Fatigue and Corrosion. *Coatings*, 12, 307. <https://doi.org/10.3390/coatings12030307>
- Hirota, K., Mitani, K., Yoshinaka, M., Yamaguchi, O. (2005). Simultaneous synthesis and consolidation of chromium carbides (Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>, Cr<sub>7</sub>C<sub>3</sub> and Cr<sub>23</sub>C<sub>6</sub>) by pulsed electric-current pressure sintering. *Materials Science and Engineering: A*, 399(1-2), 154-160. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2005.02.062>.
- Kamboj, N., & Thakur, L. (2023). Experimental investigation of the high temperature sliding wear behaviour of RSM optimized YSZ-Inconel 625 TIG weld cladding. *Tribology International*, 187, 108741. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2023.108741>.
- Kevin, P.S., Tiwari, A., Seman, S., Mohamed S.A.B. & Jayaganthan, R. (2020). Erosion-Corrosion Protection Due to Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-NiCr Cermet Coating on Stainless Steel, *Coatings*, 10 (1042), 1-17. <https://doi.org/10.3390/coatings10111042>

- Kırık, İ. , Balalan, Z. , Andan, Y. & Yaz, M. (2019). St52 Çeliğinin TIG Kaynak Yöntemi ile WC Takviyeli Tozla Kaplanması. *International Journal of Innovative Engineering Applications*, 3 (1) , 22-26. <https://dergipark.org.tr/tr/pub/ijiea/issue/48178/587454>
- Kumar, A., Batham, H., & Das, A.K. (2021). Microhardness of Fe-TiB<sub>2</sub> composite coating on AISI 304 stainless steel by TIG coating technique. *Materials Today: Proceedings*, 39(4), 1291-1295. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.04.365>
- Kumar, S., & Das, A.K. (2022). Wear resistance and hardness properties of TiB<sub>2</sub>- Fe coating developed on AISI 1020 steel by tungsten inert gas (TIG) cladding. *Ceramics International*, 48(20), 30052-30065. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2022.06.274>
- Liu, S., Wu, H., Xie, S., Yu, Z., Luo, H., Yazdi, M.A.P., Planche, M.P., Moliere, M., & Liao, H. (2023). Effect of stoichiometry conditions on the erosion and sliding wear behaviors of Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-NiCr coatings deposited by a novel ethanol-fueled HVOF process. *Surface and Coatings Technology*, 454, 129084. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2022.129084>.
- Liu, Y., Rogachev, A.V., Tan, X., Rogachev, A.A., Jiang, X., Pyzh, A.E., Yarmolenko, V.A., Yarmolenko, M.A., & Rudenkov, A.S. (2023). Low-energy electron beam deposition of metal-containing organic-inorganic coatings with selective activity against microorganisms. *Vacuum*, 209, 111803. <https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2022.111803>
- Myshlyaev, L.P. (2011). Newsletter Of Mining And Metallurgical Section, Thermodynamic Analysis Of The Processes Of Plasma Synthesis Of Chrome Carbide, Siberian State Industrial University" Russian Academy of Natural Sciences, Vol. 28, Moscow 95 pp.
- Özel, S. (2004). Cu, Sn, Zn, Al Bronz Alaşımı Yüzeyine Ferromangan Kaplamasının Aşınma Direncine Etkisinin Değerlendirilmesi. Yüksek Lisans Tezi. Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Metalurji Eğitimi Anabilim Dalı, Elazığ 96s
- Özel, S., Kurt, B., Somunkiran, İ., Orhan, N. (2008). Microstructural characteristic of NiTi coating on stainless steel by plasma transferred arc process. *Surface and Coatings Technology*, 202(15), 3633-3637. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2008.01.006>
- Padhee, C.K., Masanta, M., & Mondal, A.K. (2020). Feasibility of Al-TiC coating on AZ91 magnesium alloy by TIG alloying method for tribological application. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 30(6), 1550-1559. [https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(20\)65318-3](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(20)65318-3)
- Sahami-Nejad, M., Lashgari, H.R., Zangeneh, Sh., & Kong, C. (2019). Determination of residual stress on TIG-treated surface via nanoindentation technique in Co-Cr-Mo-C alloy. *Surface and Coatings Technology*, 380, 125020. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.125020>
- Sahoo, C.K., & Masanta, M. (2018). Microstructure and wear characteristic of hard and wear resistance TiC coating deposited on aluminium by tungsten inert gas (TIG) cladding process. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 40(247), 1-11. <https://doi.org/10.1007/s40430-018-1178-5>
- Saroj, S., Sahoo, C.K., & Masanta, M. (2017). Microstructure and mechanical performance of TiC-Inconel 825 composite coating deposited on AISI 304 steel by TIG cladding process. *Journal of Materials Processing Technology*, 249, 490-501. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.06.042>
- Savaş, A. (2021). TIG Kaynağı İle Gerçekleştirilen Sert Dolgu Sırasında Oluşan Artık Gerilme Ve Deformasyonların Modellenmesi. *Mühendis ve Makina*, 62 (704), 620-636. DOI: 10.46399/muhendismakina.937623
- Singh, J., Thakur, L., & Angra, S. (2020). Abrasive wear behavior of WC-10Co-4Cr cladding deposited by TIG welding process. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 88, 105198. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2020.105198>
- Şap, S., Hazar, H. & Şap, E. (2020). Investigation of the Effect of Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub> Coating by Plasma Spray Process on Exhaust Pipe of a Diesel Engine. *Journal of the Institute of Science and Technology*, 10 (1), 499-508. DOI: 10.21597/jist.553118
- Şenol, M. (2021). Gaz Metal Ark Kaynaklı AISI 430 Ferritik Paslanmaz Çelik Levhaların İyapı Ve Mekanik Özelliklerinin Belirlenmesi. Yüksek Lisans Tezi. İskenderun Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Hatay 46s

Tavoosi, M., & Arjmand, S. (2017). In situ formation of Al/Al<sub>3</sub>Ti composite coating on pure Ti surface by TIG surfacing process. *Surfaces and Interfaces*, 8, 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.surfin.2017.04.002>

Zhao, J., Gao, Q., Wang, H., Shu, F., Zhao, H., He, W., & Yu, Z. (2019). Microstructure and mechanical properties of Co-based alloy coatings fabricated by laser cladding and plasma arc spray welding. *Journal of Alloys and Compounds*, 785, 846-854. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.01.056>



# Kahramanmaraş Sütçü İmam University

## Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 10.09.2023  
Kabul Tarihi : 12.01.2024

Received Date : 10.09.2023  
Accepted Date : 12.01.2024

### EVALUATION OF BEARING CAPACITY INCREASE FOR WOVEN GEOTEXTILE REINFORCED SOILS IN TERMS OF WIDTH OF FOOTING

### ÖRGÜLÜ GEOTEKSTİL İLE GÜÇLENDİRİLMİŞ ZEMİNLER İÇİN TAŞIMA KAPASİTESİ ARTIŞININ TEMEL GENİŞLİĞİ AÇISINDAN DEĞERLENDİRİLMESİ

Bayram ATEŞ<sup>1\*</sup> (ORCID: 0000-0002-1251-7053)  
Erol ŞADOĞLU<sup>1</sup> (ORCID: 0000-0003-3757-5126)

<sup>1</sup> Karadeniz Technical University, Department of Civil Engineering, Trabzon, Türkiye

\*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Bayram ATEŞ, bayramates61@hotmail.com

#### ABSTRACT

If it is understood that a soil medium cannot safely support the planned structure from the point of bearing capacity and settlement, various options can be applied in geotechnical engineering. These are relocation of the structure, usage of deep foundation, stabilisation of the soil, substitution of weak soil with well-graded coarse-grained soil by compaction, usage of geosynthetics, etc. These alternatives are evaluated according to the cost and availability of necessary materials and equipment. Geotextiles, one of the geosynthetic products, have been widely used for soil reinforcement recently. Therefore, the study intends to specify the soil's bearing capacity increase with geotextile and its dependence on footing width. For this aim, a testing apparatus has been produced, and the experiments have been conducted with a strip footing model on soil with various relative densities. Besides, this test setup was simulated with PLAXIS 2D software depending on the finite element method (FEM), and numerical analyses were performed. The numerical results were compared with the laboratory tests to verify parameters of M-C material model. Consequently, the study stated that the relative density of the sand, footing width, and reinforcement layer are significant factors for the bearing capacity increase of granular soils.

**Keywords:** Geotextile, reinforced soil, model test, numerical analysis, width of footing

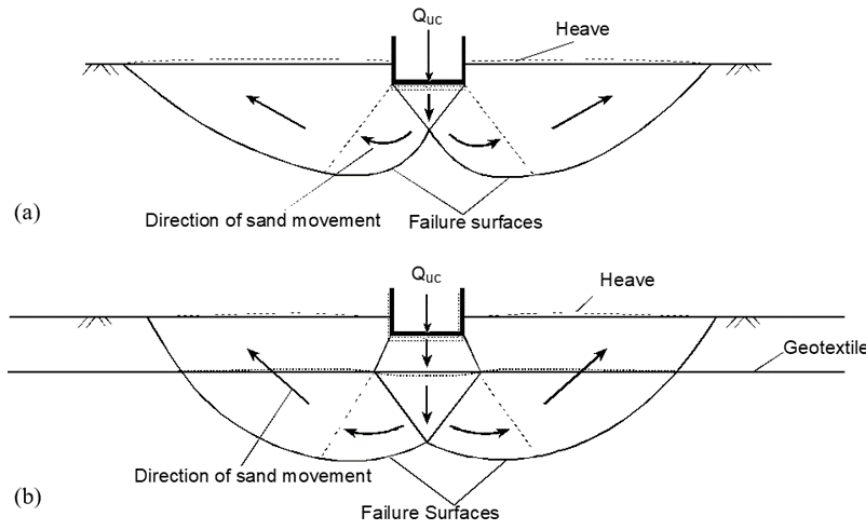
#### ÖZET

Bir zemin ortamının, düşünülen yapıyı taşıma gücü ve oturma açılardan güvenli olarak taşıyamayacağı tespit edilirse, geoteknik mühendisliği açısından alternatif yollara başvurulabilir. Bunlar; yapının yerinin değiştirilmesi, derin temel kullanılması, zeminin stabilizasyonu, kötü zeminin kaldırılarak, yerine iyi derecelenmiş iri taneli zeminin kompaksiyonla yerleştirilmesi, geosentetik kullanılması vb. dir. Bu seçenekler; maliyet, eldeki araç-gereç durumuna göre değerlendirilir. Geosentetik ürünlerden biri olan geotekstiller son yıllarda zemin güçlendirilmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu çalışmada geotekstille güçlendirilmiş zeminlerin taşıma kapasitesi artışının ve bunun temel genişliği ile ilişkisinin tespit edilmesi hedeflenmiştir. Bu bağlamda, bir deney mekanizması kurulmuş ve çeşitli sıklıklarda yerleştirilmiş kum zemine oturan temeller yardımı ile deneyler yürütülmüştür. İlave olarak; mevcut deney düzeneği sonlu elemanlar tabanında çözümlene yapan PLAXIS 2D programı ile modellendi ve sayısal analizler yapıldı. Böylece bu numerik sonuçlar model deneylerden elde edilen sonuçlar ile M-C malzeme modeli parametrelerini doğrulamak için karşılaştırıldı. Sonuç olarak, zeminin sıklığı, donatı tabakası ve temel genişliği, granüler zeminlerin taşıma gücü artışı üzerinde etkili parametreler olduğu belirlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Geotekstil, güçlendirilmiş zemin, model deney, nümerik analiz, temel genişliği

## INTRODUCTION

Geosynthetics have significantly been preferred in geotechnical applications to advance the bearing capacity (BC) of soils and to decrease shallow footings' settlement (s) for fifty years. Geotextiles are one of the most preferred geosynthetic materials used in these applications. There are differences in the BC and failure behaviour of the sand with reinforcement and sand without reinforcement. Failure surfaces, and sand movements of the footing on the soil without reinforcement are illustrated in Fig. 1 (a). A wedge under the footing occurs with the loading of the footing, and then the wedge moves downward with the footing. Shear surfaces that can be accepted as approximately symmetric formed on both sides of the symmetry axis. The failure of the reinforced soil is similar to the soil without reinforcement case (see Fig 1 (b)). In the failure mechanism of the reinforced soil, a soil wedge (trapezoidal+triangular) occurs under the footing, moves downwards with the footing, and pushes adjacent soil towards the sides (Takemura et al., 1992; Michalowski and Shi, 2003; Şadoğlu and Uzuner, 2010; Xu et al., 2019; Venkateswarlu et al., 2020; Gao et al., 2022). Heaves occur at the sides of the footing in dense soil.



**Figure 1.** Failure Mechanism in Granular Soil **a.** Soil Without Reinforcement **b.** Soil with Reinforcement (Takemura et al., 1992)

Many researchers have performed theoretical, numerical, and laboratory tests to determine the importance of reinforcement materials in terms of enhancing BC. The load-settlement responses of the foundations on reinforced soil have been engaged attention for a long time by many researchers (Adams and Collin, 1997; Wayne et al., 1998; Michalowski, 2004; Patra et al., 2006; Ghazavi and Lavasan, 2008; Lavasan and Ghazavi, 2012; Ateş and Şadoğlu, 2014; Ateş and Şadoğlu, 2020; Kahraman et al., 2022). The improvement of the ultimate bearing capacity ( $Q_u$ ) of the footing on the reinforced soil is, as a rule, presented by using a non-dimensional parameter that is called as bearing capacity ratio (BCR) (Biquet and Lee, 1975; Guido et al., 1986; Omar et al., 1993; Patra et al., 2005; Lai and Yang, 2017; Saha Roy and Deb, 2017; Wang et al., 2018; Xu et al., 2018; Useche-Infante et al., 2019; Hussein et al., 2019). The ratio of ultimate bearing capacity is determined by the following equation:

$$BCR_u = Q_{u, \text{reinf}} / Q_{u, \text{unreinf}} \quad (1)$$

The following equation specifies the bearing capacity rate ( $BCR_s$ ) for a given settlement:

$$BCR_s = Q_{\text{reinf}} / Q_{\text{unreinf}} \quad (2)$$

Asakereh et al. (2013) performed experiments on a small-scale foundation on unreinforced and reinforced sand. The reinforcement layer numbers were examined in terms of cyclic load and cycle number. This study demonstrates that the settlement values of the foundation enhance quickly during the initial loading. Abu-Farsakh et al. (2013) carried out small-scale experiments to study the effect of reinforcement on the advancement in the BC of the foundation soil bed. As a result of these tests, it has been reported that design parameters such as depth and length of first reinforcement and soil type are effective parameters in improving the BC of the reinforced soil. Chakraborty and Kumar (2014) studied the  $Q_u$  of a circular foundation resting on the reinforced soil. In these studies, as a method,



finite elements were specified and investigated the limit analysis for a foundation resting on soil with reinforcement. Eventually, the optimal depth and the diameters of the reinforcements have been determined to ensure maximum BC of the foundation soil bed. It has also been seen that two reinforcement layers instead of a single reinforcement layer provide a significant enhancement in the BC of this circular foundation. These studies demonstrate the significance of the reinforcement for the BC of the foundation soil bed. Even though many researches were performed to examine the effects of various design variables on the performance of reinforced soil, very few studies were carried out to determine the effects of footing width and relative density on the bearing capacity of reinforced soils with geotextile. The main purpose of this study is to reveal the bearing capacity increase of the soil reinforced with polypropylene fiber-originated woven geotextile and its dependence on the footing width and the relative density with 1-g physical model tests and numerical analysis. In this context, a testing apparatus was first connected in conformity with plane strain condition, and the tests on strip footing resting on granular soils reinforced with geotextile were conducted. Then, the test setup was simulated with PLAXIS 2D software based on the FEM, and numerical analyses were performed.

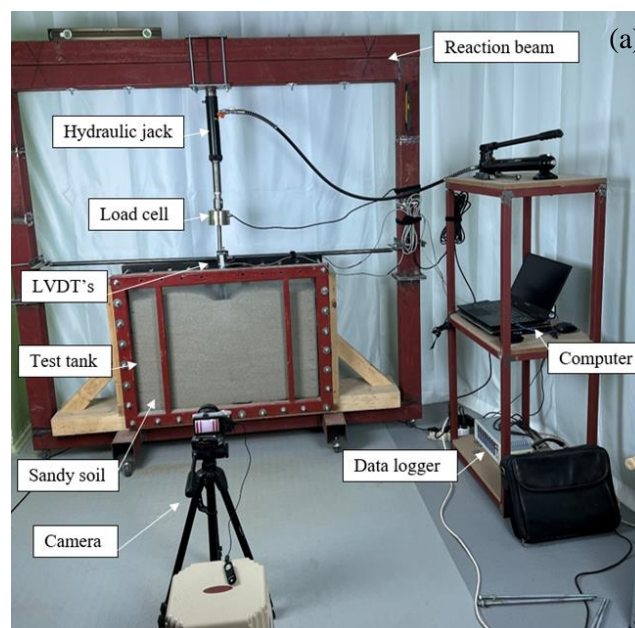
## MATERIAL AND METHODS

### *Experimental Study*

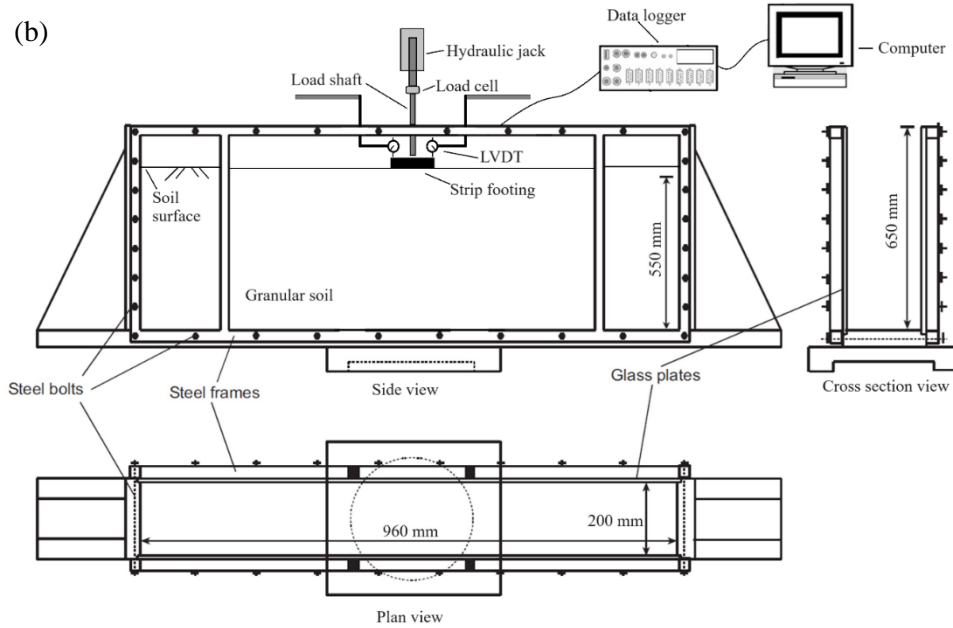
Scaled tests are made a choice in many geotechnical investigations because of their cost-efficiency, time-saving, and applicability. Moreover, failure surface geometry in most reinforced soil studies was investigated with these tests. Within this scope, a testing apparatus has been carried out, and loading tests have been performed with the help of the strip footing on the sand. The test setup includes a testing tank, strip footing, linear variable displacement transducers (LVDT), a hydraulic jack as the loading apparatus, a load cell, a computer, a data logger and sand.

### *Testing Tank*

The testing tank is a rectangular hollow prism, and the internal sizes of the test tank are 960 x 200 x 650 mm<sup>3</sup> (Moroglu et al., 2005; Ateş and Şadoğlu, 2014; Ateş and Şadoğlu, 2020; Chen et al., 2021). The tank's frame used in laboratory tests was made of steel profiles. The rigidity of the tank is ensured by welding steel supports to certain points of the test tank (see Figure 2). Ideally, thin latex sheets should be placed on the internal faces of the lightly lubricated glass plates to achieve almost frictionless side faces. This application has difficulties due to the movements of the sand mass in different directions. The sand is in contact with glass faces directly in this experimental work. Kirkpatrick and Uzuner (1975) showed that the effect of side friction between glass sides and sand on bearing capacity is less than 10% for a surface footing sitting on medium-dense sand. The conditions of this experimental work are close to the conditions of the work done by Kirkpatrick and Uzuner (1975). Moreover, the effect of side friction is approximately eliminated in this experimental work due to the usage of the bearing capacity ratio (BRC), bearing capacity increase (%) and settlement ratio instead of the ultimate loads.



**Figure 2.** Test Setup **a.** A General View **b.** Schematic Diagram

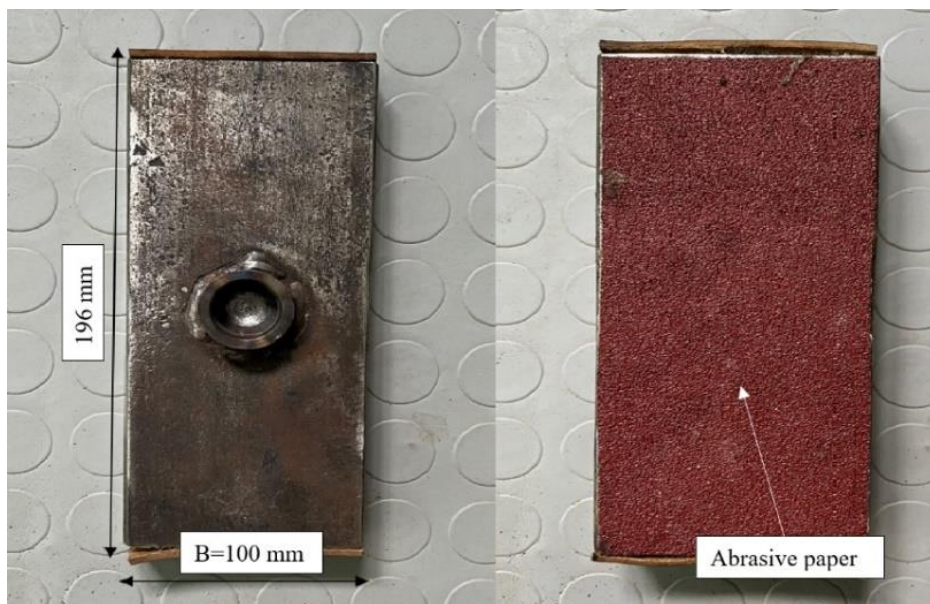


**Figure 2.** Test Setup **a.** A General View **b.** Schematic Diagram

Kirkpatrick and Yanikian (1975) proposed that  $\varepsilon_y=0$  should be less than 0.1% for plane strain models. Two steel frames made of hollow sections were produced and connected with steel bolts along the sides of the frames. Steel elements made of solid profiles were welded in the middle part of the frames to prevent the deformation of the glass plates. The surface of the steel frame that the glass plates touched was produced to be almost perfectly plane so that no glass was broken during the tests. Two dial gauges were placed on the external faces of the glass plates to measure lateral deformations. Measured horizontal displacements revealed that the horizontal strains of the sides were found to be considerably less than 0.1% in the tests.

### **Small-Scale Foundation**

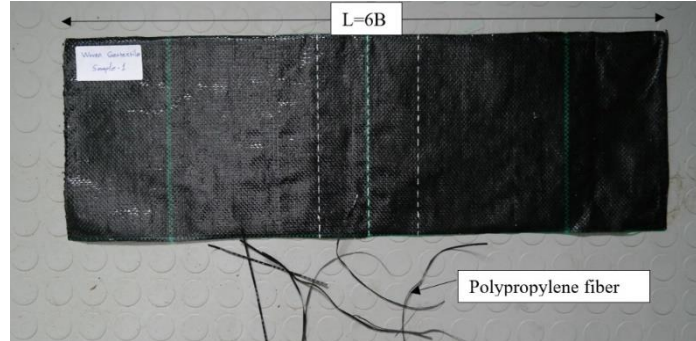
A literature survey was researched, and trial tests were performed to specify the sizes of the footing used in the experimental study. The strip foundation model's width (B) was chosen as 100 mm (Kargar et al., 2016; Chen et al., 2019). A coarse sandpaper was mounted on the base of the strip footing to ensure full friction conditions (see Figure 3).



**Figure 3.** Model Strip Footing

### Reinforcement Layer

The widths of geotextile sheets used as reinforcements were equal to the internal width of the test tank (200 mm) prepared for the experiments (see Figure 4). The tensile strength of the geotextile was determined according to ASTM 4595-17 (2017) (see Table 1).



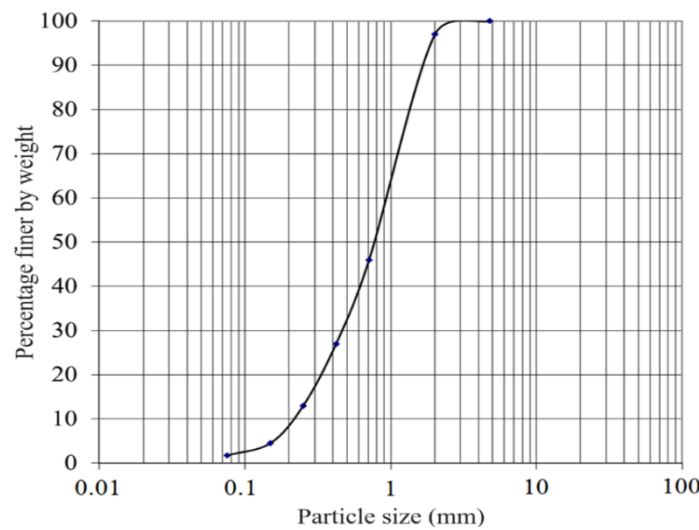
**Figure 4.** A General View of Woven Geotextile

**Table 1.** Specification of Geosynthetic Reinforcement

Property	Unit	Value
Material Property	-	Polypropylene
Type	-	Woven
Ultimate Tensile Strength	kN/m	20
Tensile Strength at %2 strain	kN/m	4.14
Tensile Strength at %5 strain	kN/m	7.83
Mass per Unit Area	g/m <sup>2</sup>	100

### Sand

The soil was sand obtained from the southern coast of the Black Sea. The particle size distribution of the sand was detected regarding ASTM D-6913 (2017) (see Figure 5). The particle size range of the sand was selected too small compared to the dimensions of the footing so as to avoid scale effect. Toyosawa et al. (2013) investigated the particle size effect on the bearing capacity of circular model footing with centrifugal tests. It was found if the ratio of footing diameter to mean particle size ( $D_{50}$ ) is more than 50 for a circular surface footing, the effect of particle size on bearing capacity is neglectable. Therefore, the ratio of the width of the footing model to the mean particle size of the sand was selected as 125 ( $B/D_{50}=100$ ) in this study.



**Figure 5.** Particle Size Distribution Curve

The sand specification is illustrated in Table 2. The dry unit weights were detected for loose and dense cases separately. Similarly, the internal friction angles for  $D_r=0.30$  and  $0.70$  were obtained by the shear box test.

**Table 2.** The Sand Specification

Property	Unit	Value
Grain Specific Gravity, $G_s$ (ASTM D-854, 2006)	-	2.74
Maximum Dry Density, $\rho_{dmax}$ (ASTM D4254-16, 2016)	Mg/m <sup>3</sup>	1.82
Minimum Dry Density, $\rho_{dmin}$ (ASTM D4253-16, 2016)	Mg/m <sup>3</sup>	1.39
Effective Diameter, $D_{10}$	mm	0.21
$D_{30}$	mm	0.56
$D_{60}$	mm	0.90
Coefficient of Uniformity, $C_u$	-	2.14
Coefficient of Curvature, $C_c$	-	0.83
Internal Friction Angle, $\phi$ ( $D_r=0.70$ ) (ASTM D3080M-11, 2011)	Degrees	45.00
Internal Friction Angle, $\phi$ ( $D_r=0.30$ ) (ASTM D3080M-11, 2011)	Degrees	38.00

### Loading and Data Equipments

A hydraulic jack (100 kN) was integrated into the reaction beam of the testing tank and was used to apply vertical loading. A load cell was incorporated at the end of the hydraulic jack. The magnitude of the loading was measured precisely with the load cell with a capacity of 20 kN. LVDT, which can measure displacements up to 50 mm, was used to determine the displacement of the strip footing. The data measured by the load cell and the LVDTs were transferred to the computer using the data logger.

### Test Procedure

The soil required for a 50 mm layer was poured into the test tank at a close distance (30-40 mm) to avoid compaction in the case of the loose sand ( $D_r = 0.3$ ,  $\rho_d = 1.49$  Mg/m<sup>3</sup>). However, the sand for a layer was compacted with a small compaction device for dense sand ( $D_r = 0.7$ ,  $\rho_d = 1.66$  Mg/m<sup>3</sup>). The compaction device is specially designed for the study and produced by using a hammer drill. The surface of the sand was made horizontal with a water balance, and thus the sand was homogeneously placed. The height of the sand layer was controlled by the horizontal lines indicating the layer thickness on the internal surfaces of the tank. In addition, the geotextile reinforcement was placed in the desired location in this process (see Figure 6). The dry density of the deposited sand (or its relative density) in the tank was calculated by weighing the sand mass removed from the tank. Before the actual tests were performed, several sand depositions in the tank were made. Good agreement was found in these trials. The error in relative density was calculated to be less than 1% in these trials. The density of the sand was checked by locating six containers at three different depths on both the left and right sides of the centerline of the tank in order to ensure the uniformity of the layers. It was seen that the variation in density was almost negligible.

**Figure 6.** Placement of Sand and Geotextile

The LVDTs were mounted on both sides of the strip footing, and the load cell was integrated into the hydraulic jack (see Figure 7). The initial values of the LVDTs and load cell were reset to zero. The strip foundation model was loaded into the sand at a constant velocity. Variation of bearing capacity with load velocity was investigated by Vesic et al. (1965) for 101.6 mm diameter rigid rough model footing placed on the surface of a dense sand. The minimum bearing capacity was measured with the loading velocity of 0.1 mm/s. Therefore, this loading velocity was applied during the experiments. While the foundation was loaded into the soil, the perpendicularity of the foundation was tracked using water balance. A constant loading rate was carried out until the specific settlement ( $s = B/4$ ) was achieved.

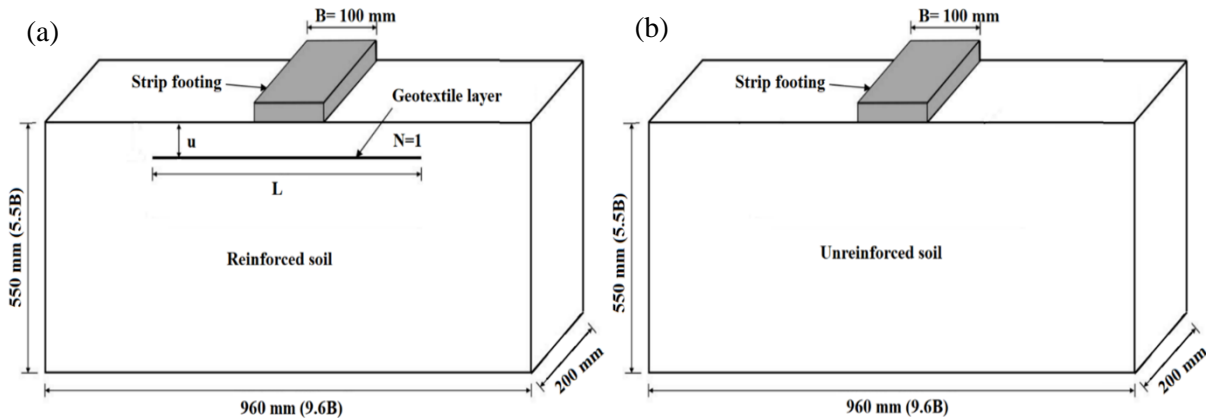




**Figure 7.** The Starting of Vertical Loading

### Test Program

Design variables of horizontal soil with reinforcement and soil without reinforcement are shown in Figure 8. Some parameters were investigated from the point of the BC: the depth of the first reinforcement layer ( $u$ ), the number of reinforcement layers ( $N$ ), and the length of the geosynthetic layer ( $L$ ). In this study,  $N$ ,  $L$ , and  $u$  were considered as  $N = 1$ ,  $L/B = 6$ , and  $u/B = 0.4$ , respectively (Guido et al., 1986; Omar et al., 1993; Shin et al., 1993; Das and Omar, 1994; Yetimoglu et al., 1994; Vinod et al., 2009; Moghaddas et al., 2010; Cicek et al., 2015). Furthermore, BC increase in both soil cases was investigated for different relative densities ( $D_r = 0.3$  and  $0.7$ ).



**Figure 8.** Design Variables for Soil **a.** Reinforced Soil **b.** Unreinforced Soil

For determining the bearing capacity increase due to improving geotextile reinforcement, the experiments illustrated in Table 3 were performed on the strip foundation. A total number of 12 experiments were conducted. The tests are repeated 3 times, and the average of the measurements is defined as the bearing capacity. The results denoted a close match between the results of the trial experiments with a maximum deviation of approximately 3%.

**Table 3.** Test Program

Test No	Footing	$D_r$	Soil
T <sub>1,2,3</sub>	Model Strip Foundation	0.3	Unreinforced
T <sub>4,5,6</sub>	Model Strip Foundation	0.3	Reinforced
T <sub>7,8,9</sub>	Model Strip Foundation	0.7	Unreinforced
T <sub>10,11,12</sub>	Model Strip Foundation	0.7	Reinforced

### Numerical Analysis

Numerical analysis was conducted to check against the test results. The simulations were conducted by using the PLAXIS 2D. The sizes of the testing tank and the material properties of the sand and geotextile were considered in the PLAXIS 2D software. The Mohr-Coulomb (MC) material model was preferred to reflect the sand and the plain strain case. The MC model is a perfect linear elastic plastic model used to simulate the response of brittle materials. However, this model is used for the simulation of soils due to lesser model parameters measured by simple tests and its simplicity. The MC model requires five parameters such as Poisson's ratio ( $\nu$ ), cohesion ( $c$ ), friction angle ( $\phi$ ),



modulus of elasticity (E), and dilatancy angle ( $\psi$ ). The Poisson's ratios of the loose and dense sand were considered as 0.35 and 0.30, respectively, based on the suggestion for loose and dense density sand from Dutta and Saride (2015). The internal friction angles and elasticity modulus values of the sand were determined with triaxial tests for both loose and dense cases by applying small confining pressures (10, 20 and 40 kPa). A minimal cohesion value was selected because of the numerical stability problem. The parameters of the footing, soil, and reinforcement are presented in Table 4.

**Table 4.** The Parameters for FE Modelling

Soil Parameters	Unit	Value
Drainage	-	Undrained
Dry Density, $\rho_d$ ( $D_r=0.30$ )	Mg/m <sup>3</sup>	1.49
Saturated Density ( $D_r=0.30$ )	Mg/m <sup>3</sup>	1.62
Dry Density, $\rho_d$ ( $D_r=0.70$ )	Mg/m <sup>3</sup>	1.66
Saturated Density ( $D_r=0.70$ )	Mg/m <sup>3</sup>	1.78
Internal Friction Angle, $\phi$ ( $D_r=0.30$ )	Degrees	38.00
Internal Friction Angle, $\phi$ ( $D_r=0.70$ )	Degrees	45.00
Poisson's Ratio, $\nu$ ( $D_r=0.30$ )	-	0.25
Poisson's Ratio, $\nu$ ( $D_r=0.70$ )	-	0.30
Dilatancy Angle, $\psi$ ( $D_r=0.30$ )	Degrees	8.00
Dilatancy Angle, $\psi$ ( $D_r=0.70$ )	Degrees	15.00
Elasticity Modulus, E ( $D_r=0.30$ )	kN/m <sup>2</sup>	1225
Elasticity Modulus, E ( $D_r=0.70$ )	kN/m <sup>2</sup>	9500
Cohesion, c	kN/m <sup>2</sup>	1.00
Permeability, ( $k_x=k_y$ )	m/day	10.00
Footing Parameters	Unit	Value
Model	-	Strip
Material	-	Steel
Material Model	-	Linear Elastic
Elasticity Modulus, E	kN/m <sup>2</sup>	200 x10 <sup>6</sup>
Poisson's Ratio, $\nu$	-	0.30
EA	kN/m	64e4
EI	kNm <sup>2</sup> /m	85
Reinforcement Parameters	Unit	Value
Material	-	Geotextile
Ultimate Tensile Strength	kN/m	20.00
EI	kN/m	300

The program of simulations and tests, prepared for specifying the load-settlement response of the soil reinforced with geotextile, is presented in Table 5. The testing procedure was confirmed with Plaxis 2D based on the finite element. Table 5 also presents the mesh details and sizes of FEM.

**Table 5.** Program for Numerical Analysis

Simulation No	Foundation	$D_r$	Soil	Footing width (m)	Number of Elements	Model Dim. (H-L) (m)	Study
A <sub>1</sub>	Model Strip	0.3	Unreinforced	0.1	2960	0.60 -0.96	Verification study
A <sub>2</sub>	Model Strip	0.3	Reinforced	0.1	2960	0.60-0.96	
A <sub>3</sub>	Model Strip	0.7	Unreinforced	0.1	2960	0.60-0.96	
A <sub>4</sub>	Model Strip	0.7	Reinforced	0.1	2960	0.60m-0.96	
A <sub>5</sub>	Strip	0.3	Reinforced	0.5	2910	2.75-5.00	Parametric study
A <sub>6</sub>	Strip	0.3	Reinforced	1.0	2910	5.50-10.00	
A <sub>7</sub>	Strip	0.3	Reinforced	1.5	2910	8.25-15.00	
A <sub>8</sub>	Strip	0.3	Reinforced	2.0	2910	11.00-20.00	
A <sub>9</sub>	Strip	0.3	Reinforced	2.5	2910	13.75-25.00	
A <sub>10</sub>	Strip	0.3	Reinforced	3.0	2910	16.50-30.00	
A <sub>11</sub>	Strip	0.7	Reinforced	0.5	2910	2.75-5.00	
A <sub>12</sub>	Strip	0.7	Reinforced	1.0	2910	5.50-10.00	
A <sub>13</sub>	Strip	0.7	Reinforced	1.5	2910	8.25-15.00	
A <sub>14</sub>	Strip	0.7	Reinforced	2.0	2910	11.00-20.00	
A <sub>15</sub>	Strip	0.7	Reinforced	2.5	2910	13.75-25.00	
A <sub>16</sub>	Strip	0.7	Reinforced	3.0	2910	16.50-30.00	

## RESULTS AND DISCUSSION

The results of the tests and numerical simulations from the point of the BC increase are presented and examined in this section. A total of 12 experiments and 16 numerical analyses were performed using a model strip foundation. Thus, the Q-s curves of the strip footing were obtained. The BC increases because of the usage of geotextile is quantified from the point of the dimensionless BCR (bearing capacity ratio) factor. Figure 9 illustrates the Q-s curves determined for the strip foundation in the event of unreinforced and reinforced cases with loose conditions. The numerical results were compared with those obtained from experiments; thus, the results of the numerical simulations and the tests were found to be compatible in terms of reflecting the behaviour of the strip footing. The Q-s response was significantly linear in the experiments. The Q-s curves, which are taken from the tests and the numerical analysis in the case of the loose sand for the reinforced and unreinforced soil, agree, and the difference between them is approximately 12%. This difference is within acceptable limits in terms of geotechnical engineering. The material model satisfies the experimental conditions for the loose case. In addition, it has been seen that the geotextile was determined to affect the load-bearing capacity increment of 67% in the case of the loose sand.

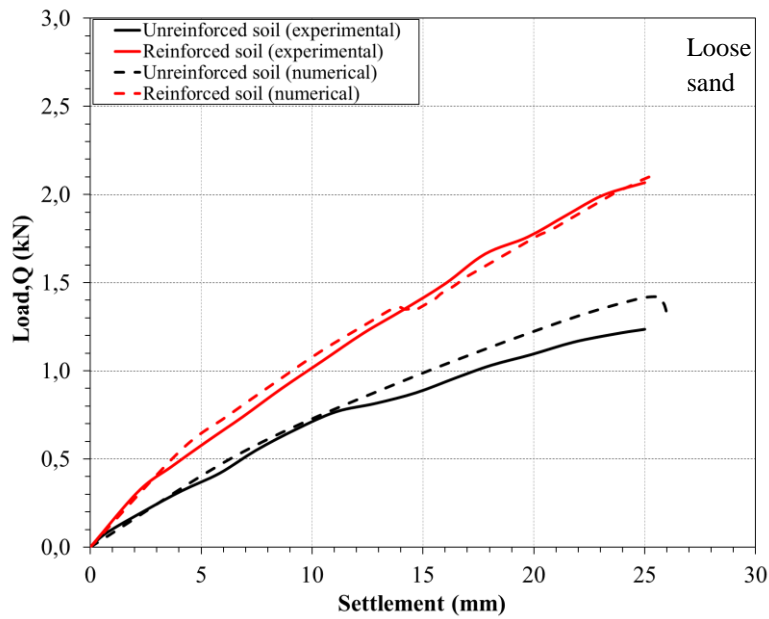


Figure 9. Q-s Curves Determined from Small-Scale Test and Numerical Simulation for  $D_r = 0.3$

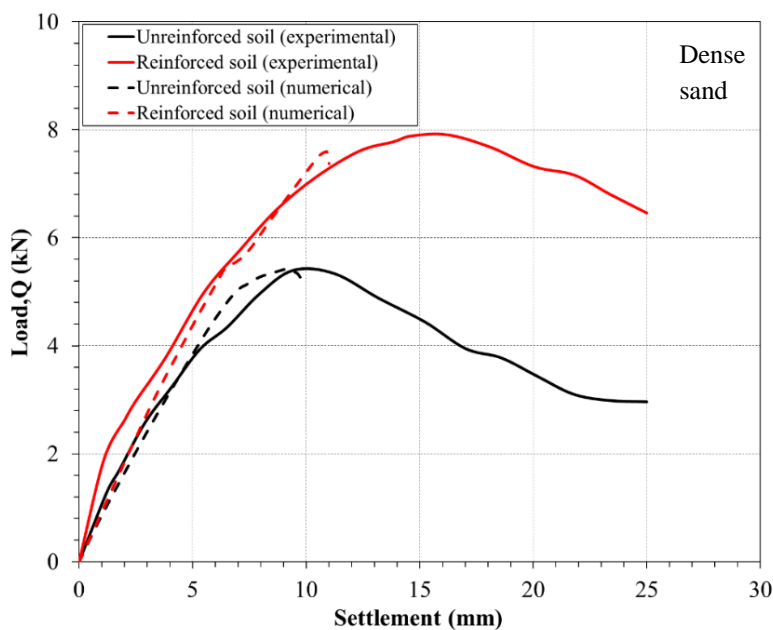
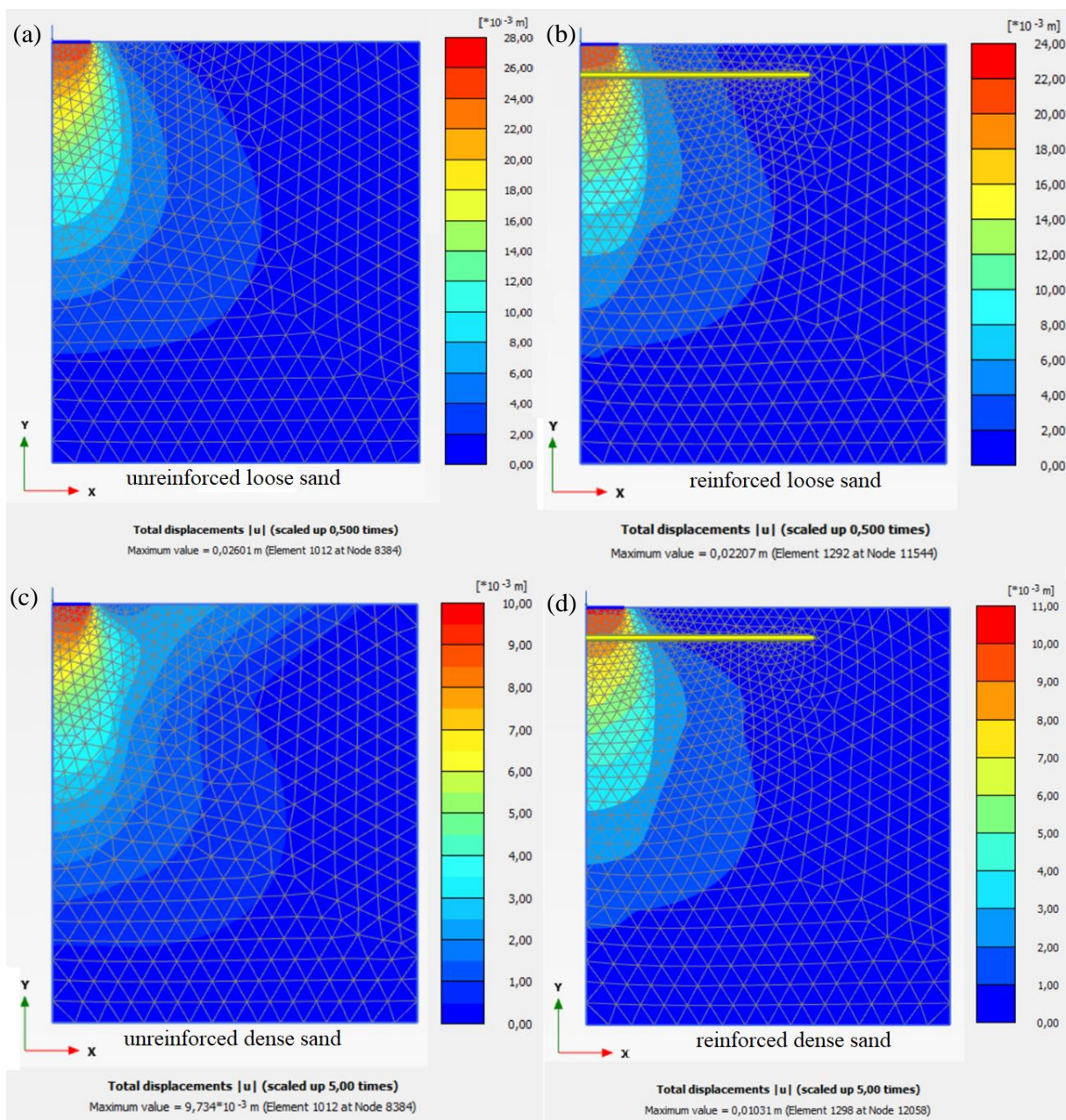


Figure 10. Q-s Curves Determined from Small-Scale Test and Numerical Model for  $D_r = 0.7$

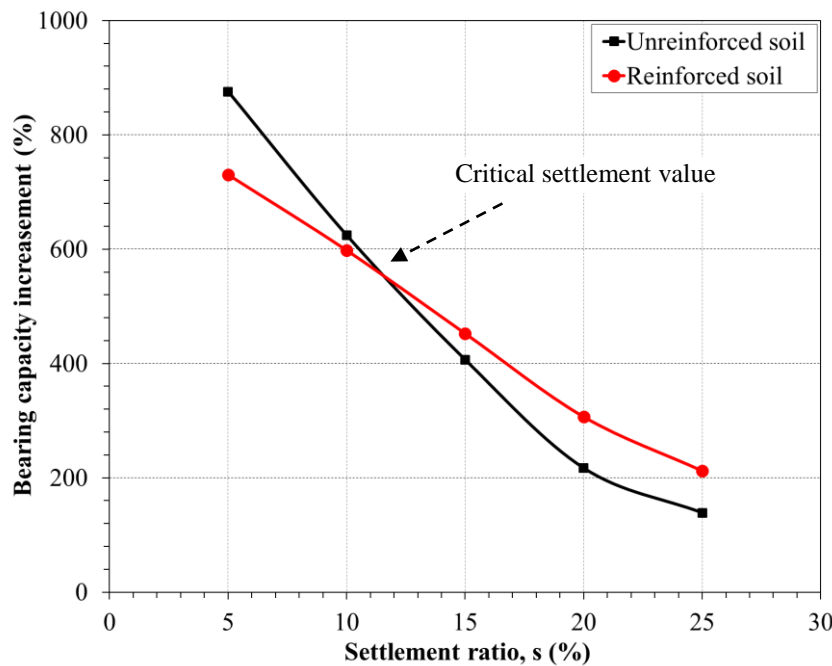
Figure 10 illustrates the Q-s curves determined for the footing in event of unreinforced and reinforced dense sand. From comparison of the numerical simulation results with the test results, it is seen that the results of the numerical modellings and the tests were compatible regarding the Q-s behaviours of the model foundation. The Q-s response was significantly non-linear. The Q-s curves, which are obtained in the tests and obtained from the analysis in the case of the dense sand for the reinforced and unreinforced soil, agree, and the difference between them is approximately 5%. This difference is within acceptable limits in terms of geotechnical engineering. It can be said that the material model satisfies the experimental conditions for the dense case until failure. This study was focused on ultimate loads; thus, post-failure behaviour was not discussed at all. In addition, it has been seen that geotextile in the case of dense sand was determined to have an effect on the BC increment of 48%.

Numerical analyses were conducted employing Plaxis 2D software for the footing on the reinforced and unreinforced soils having various relative densities. The vertical settlement determined by the numerical analysis is shown in Figure 11. The significant depth (SG) is usually defined as the depth at which the vertical stress is 10% of the base pressure. The SG is deeper in the case of reinforced sand compared to unreinforced sand, no matter the sand is dense or not.



**Figure 11.** Total Settlements Determined by the Numerical Analysis **a.** Unreinforced Loose Sand **b.** Reinforced Loose Sand **c.** Unreinforced Dense Sand **d.** Reinforced Dense Sand

As a result of the tests performed to determine the BC increment of the sand reinforced with geotextile, it was noticed that relative density is an important parameter from the point of the BC of the unreinforced and reinforced soil. Figure 12 illustrates the BC increase–settlement ratio curve depending on the relative density increase from 0.3 to 0.7 in the event of unreinforced and reinforced soil. It is seen that the BC increase reduces with the improvement in the settlement ratio value up to 25% in the unreinforced and reinforced cases. While the increment from  $D_r = 0.3$  to  $D_r = 0.7$  at low settlement values contributes more to the bearing capacity increment in unreinforced soils, the increment in the relative density at high settlement values contributes more to the BC increment in the reinforced soil. The critical settlement value is about 12%. Beyond the 12% value of the settlement ratio, the geotextile reinforcement can be considered to be mobilised. That is, it can be said that relative density is a significant parameter that affects the increase in BC in both reinforced and unreinforced soils. As the  $D_r$  of soil increases from 0.3 to 0.7, while the BC increment of the strip foundation has improved by 875–138% based on the settlement ratio in the unreinforced sand, the BC increment of the foundation has enhanced by 730–212% in the reinforced soil.

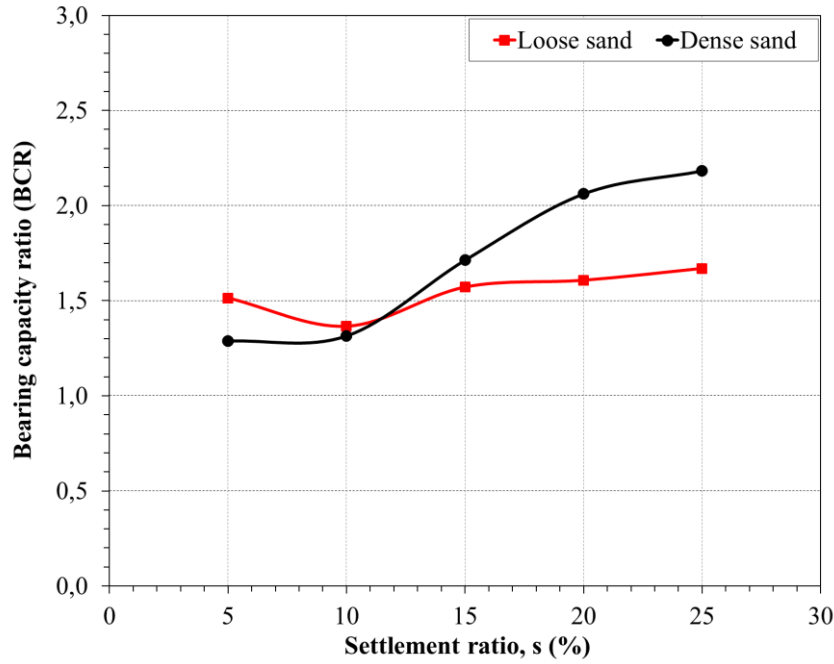


**Figure 12.** Bearing Capacity Increase Based on Settlement Ratio for Unreinforced Sand and Reinforced Sand

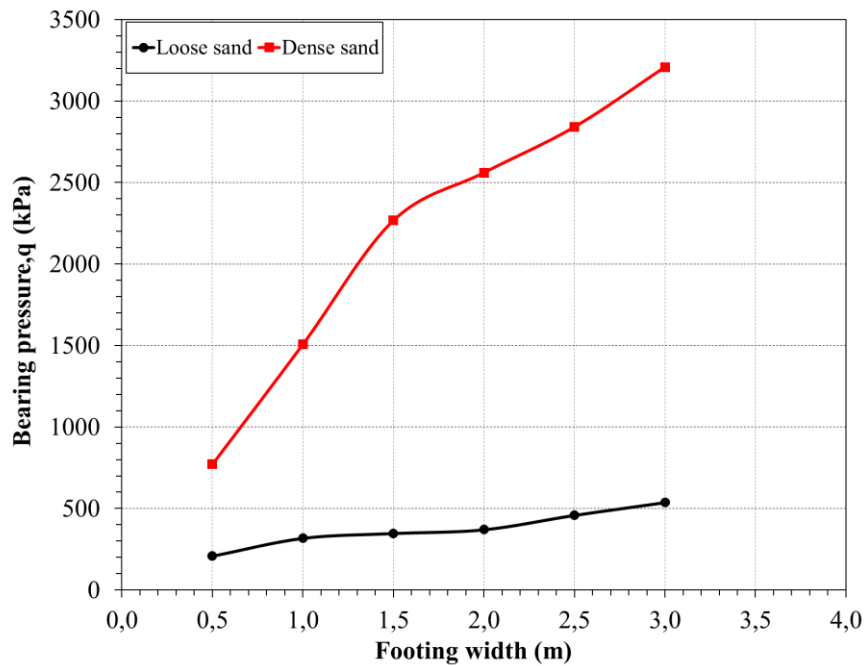
Figure 13 illustrates the variation of BCR depending on the settlement ratio for the reinforced soil. It was determined that this reinforcement in the loose sand improved the BCR of the soil by 1.36–1.67, depending on the settlement ratio. Moreover, the geotextile sheet in the dense sand improved the BCR of the sand by 1.28–2.18, depending on the settlement ratio. For the loose case, while the reinforcement layer contributes more to the increment of BCR at low settlement values, the effect of the geotextile sheet increases slightly as the settlement value increases (beyond 12%).

The parametric study was performed to examine the effect of footing’s width on the BC of the reinforced soils by utilising the agreement of the tests and the numerical model. A total of 12 numerical analyses were performed by increasing the strip footing’s width from 0.5 m to 3.0 m for the dense and loose reinforced soil. Thus, the bearing capacity–settlement curves of the strip footing with various widths were obtained. Figure 14 illustrates the bearing pressure–footing width curve based on the relative density in the event of the reinforced soil. It is seen that the footing’s width is a significant parameter for the BC. As the footing’s width increases from  $B = 0.5\text{m}$  to  $B = 3\text{m}$ , the BC of the strip footing enhances by 159% in the loose case. For the same increase in the footing’s width, the BC increment is 315% in the dense soil.





**Figure 13.** BCR Curves Determined by the Tests for Loose and Dense Cases



**Figure 14.** Bearing Pressure-Footing Width Curves Determined by Numerical Analysis

## CONCLUSION

The study is intended to detect the BC increment of the sand reinforced with geotextile. For this aim, a testing apparatus has been installed, and the tests have been conducted with the help of small-scale footing on the sand with various relative densities. Besides, this test setup was modelled with PLAXIS 2D software based on finite elements, and numerical analyses were performed. Comparison of the numerical model results with the test results is done. The main results obtained from the experiments and numerical analyses are the following:

- The variation between the results obtained from numerical modelling and tests was in the range of about 5-12%. In other words, the shallow footings can be simulated with enough precision by the 2D-FEM.



- The relative density is an important parameter in the BC increase of the unreinforced and reinforced cases.
- As the  $D_r$  increases from 0.3 to 0.7, while the BC increment of the strip footing has improved by 875-138% based on the settlement ratio in the unreinforced sand, the BC increment of the strip footing has advanced by 730-212% in the sand with geotextile.
- The geotextile sheet in the loose case increased the BCR of the soil by 1.36-1.67, depending on the settlement ratio. The geotextile sheet in the dense sand increased the BCR of the soil by 1.28-2.18, depending on the settlement.
- As the width of the footing increased from  $B=0.5\text{m}$  to  $B=3\text{m}$ , the load-bearing capacity of the strip footing increased by 159% in the loose case, whereas the BC increment of the footing was 315% in the dense soil. The contribution of geotextile reinforcement to the BC of the strip footings decreases with increase in the footing's width because the BC of unreinforced sand is linearly dependent on footing's width, at least theoretically.

## REFERENCES

- Abu-Farsakh, M., Chen, Q., M., Sharma, R., (2013). An experimental evaluation of the behavior of footings on geosynthetic-reinforced sand, *Soils Found*, 53(2), 335–348. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2013.01.001>
- Adams, M. T., Collin, J. G., (1997). Large model spread footing load tests on geosynthetic reinforced soil foundations, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 123(1), 66–72. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(1997\)123:1\(66\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(1997)123:1(66))
- Asakereh, A., Ghazavi, M., Tafreshi, S.N.M., (2013). Cyclic response of footing on geogrid-reinforced sand with void, *Soils Found*. 53(3), 363–374.
- ASTM D-4595, (2017). Standard test method for tensile properties of geotextiles by the wide-width strip method, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken.
- ASTM D-6913, (2017). Standard test methods for particle-size distribution (gradation) of soils using sieve analysis. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken.
- ASTM D-854, (2006). Standard test methods for specific gravity of soil solids by water pycnometer. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken.
- ASTM D4253-16, (2016). Standard test methods for minimum index density and unit weight of soils using a vibratory table. ASTM International, West Conshohocken.
- ASTM D4254-16, (2016). Standard test methods for maximum index density and unit weight of soils using a vibratory table. ASTM International, West Conshohocken.
- ASTM D3080M-11, (2011). Standard test method for direct shear test of soils under consolidated drained conditions. ASTM International, West Conshohocken.
- Ateş, B., Şadoğlu, E., (2014). Donatılı kohezyonsuz zeminlerde düşey gerilme dağılışı, Altıncı Ulusal Geosentetikler Konferansı, İSTANBUL, TÜRKİYE, ss.165-176.
- Ateş, B., Şadoğlu, E., (2020). Vertical stress distribution in reinforced sandy soil in plane strain conditions, *Teknik Dergi*, 31(3), pp.9967-9985. <https://doi.org/10.18400/tekderg.449897>
- Binquet, J., Lee, K. L., (1975). Bearing capacity analysis of reinforced earth slabs, *J. Geotech. Eng. Div.*, 101(12), 1257–1276.
- Chakraborty, M., Kumar, J., (2014). Bearing capacity of circular foundations reinforced with geogrid sheets, *Soils Found*, 54 (4), 820–832. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2014.06.013>
- Chen, J. F., Guo, X. P., Xue, J. F., Guo, P. H., (2019). Load behaviour of model strip footings on reinforced transparent soils, *Geosynth. Int.*, 26(3), 251–260. <https://doi.org/10.1680/jgein.19.00003>
- Chen, J., Guo, X., Sun, R., Rajesh, S., Jiang, S., Xue, J., (2021). Physical and numerical modelling of strip footing on geogrid reinforced transparent sand, *Geotextiles and Geomembranes*, 49(2), 399–412. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2020.10.011>.

- Cicek, E., Guler, E., Yetimoglu, T., (2015). Effect of reinforcement length for different geosynthetic reinforcements on strip footing on sand soil, *Soils Found*, 55(4), 661–677. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2015.06.001>.
- Das, B. M., Omar, M. T., (1994). The effects of foundation width on model tests for the bearing capacity of sand with geogrid reinforcement, *Geotech Geol Eng.*, 12(3), 133–141. <https://doi.org/10.1007/BF00429771>
- Dutte, T. T. and Saride, S. (2015). Effect of confining pressure, relative density and shear strain on the poisson's ratio of clean sand, 50th Indian Geotechnical Conference.
- Gao, Y. X., Zhu, H. H., Ni, Y. F., Wei, C., Shi, B., (2022). Experimental study on uplift behavior of shallow anchor plates in geogrid-reinforced soil. *Geotextiles and Geomembranes*. 50(5), 994–1003. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2022.06.006>.
- Ghazavi, M., Lavasan, A. A., (2008). Interference effect of shallow foundations constructed on sand reinforced with geosynthetics. *Geotextiles and Geomembranes*. 26(5), 404–415. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2008.02.003>
- Guido, V. A., Chang, D. K., and Sweeney, M. A., (1986). Comparison of geogrid and geotextile reinforced slabs, *Can. Geotech. J.*, 23(4), 435–440. <https://doi.org/10.1139/t86-073>
- Hussein M. G., Meguid. M. A., (2019). Improved understanding of geogrid response to pullout loading: insights from three-dimensional finite-element analysis. *Canadian Geotechnical Journal*. 57(2), 277-293. <https://doi.org/10.1139/cgj-2018-0384>.
- Kargar, M., Mir Mohammad Hosseini, S., M., (2016). Influence of reinforcement stiffness and strength on load-settlement response of geocell-reinforced sand bases, *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, <https://doi.org/10.1080/19648189.2016.1214181>.
- Kirkpatrick, W. M., Uzuner, B. A., (1975). Measurement errors in model foundations tests. In: Istanbul Conference on Soil Mechanics, Istanbul, pp. 98–106.
- Kirkpatrick, W. M., Yanikian, H. A., (1975). Side friction in plane strain tests. In: Proceedings of the Fourth South East Conference On Soil Engineering, Kuala Lumpur, Malaysia, pp. 76–84.
- Lai, J., Yang, B. H., (2017). Laboratory testing and numerical simulation of a strip footing on geosynthetically reinforced loose sand. *Journal of Testing and Evaluation*. 45(1), 51–60. <https://doi.org/10.1520/JTE20160444>.
- Lavasan, A. A., Ghazavi, M., (2012). Bearing of closely spaced square and circular footing on reinforced sand. *Soils Found*. 52 (1), 160–167.
- Kahraman, M.Ş., Yeşiltepe, Ö., Türedi, Y. ve Örnek, M. (2022). Mikrogrid donatılı zeminde ring temel taşıma kapasitesinin deneysel olarak incelenmesi. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 25 (4) , 516-527. <https://doi.org/10.17780/ksujes.1105191>
- Michalowski, R.L. and Shi, L. (2003). Deformation patterns of reinforced foundation sand at failure. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol. 129, pp. 439-449.
- Michalowski, R. L., (2004). Limit loads on reinforced foundation soils, *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 130 (4), 381–390.
- Moghaddas Tafreshi, S. N., Dawson, A. R., (2010). Comparison of bearing capacity of a strip footing on sand with geocell and with planar forms of geotextile reinforcement. *Geotext Geomembr* 28(1):72–84. <https://doi.org/1016/j.geotexmem.2009.09.003>
- Moroglu, B., Uzuner, B., A., Sadoglu, E., (2005). Behaviour of the model surface strip footing on reinforced sand, *Indian Journal of Engineering and Material Science*, 12 (5), 419–426.
- Omar, M., T., Das, B., M., Puri, V., K., Yen, S., C., (1993). Ultimate bearing capacity of shallow foundations on sand with geogrid reinforcement, *Canadian Geotechnical Journal*, 30(3), 545–549. <https://doi.org/10.1139/t93-046>
- Patra, C., R., Das, B., M., Atalar, C., (2005). Bearing capacity of embedded strip foundation on geogrid-reinforced sand, *Geotextiles and Geomembranes*. 23(5), 454–462. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2005.02.001>
- Patra, C. R., Das, B. M., Bhoi, M., Shin, E. C., (2006). Eccentrically loaded strip foundation on Geogrid-reinforced sand. *Geotext. Geomembr*. 24 (4), 254–259.

- Saha Roy, S., Deb, K., (2017). Bearing capacity of rectangular footings on multilayer geosynthetic-reinforced granular fill over soft soil. *International Journal of Geomechanics*. 17(9), 04017069. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GM.1943-5622.0000959](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0000959).
- Shin, E. C., Das, B., M., Puri, V. K., Yen, S. C., Cook, E. E., (1993). Bearing capacity of strip foundation on geogrid reinforced clay. *Geotech Test J ASTM* 16(4):534–541. <https://doi.org/10.1520/GTJ10293J>
- Şadoğlu, E., Uzuner, B. A., (2010). Behaviours of the Model Eccentrically Loaded Strip Footings on Unreinforced and Reinforced Sand, 9th International Congress on Advances in Civil Engineering, Trabzon, Turkey.
- Takemura, J., Okamura, M., Suemasa, N. and Kimura, T. (1992). Bearing capacities and deformations of sand reinforced with geogrids. The International Symposium on Earth Reinforcement Practice, November 11-13, Vol. 2, pp. 695-700 Fukuoka, Japan.
- Toyosawa, Y., Itoh, K., Kikkawa, N., Yang, J. J., Liu, F., (2013). Influence of model footing diameter and embedded depth on particle size effect in centrifugal bearing capacity tests. *Soils and Foundations*. 53(2), 349-356. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2012.11.027>.
- Useche-Infante, D., Martinez, G. A., Arrúa, P., Eberhardt, M., (2019). Experimental study of behaviour of circular footing on geogrid-reinforced sand. *Geomechanics and Geoengineering*. 17(1), 45–63. <https://doi.org/10.1080/17486025.2019.1683621>.
- Venkateswarlu H., Hegde, A., (2020). Effect of infill materials on vibration isolation efficacy of geocell-reinforced soil beds. *Canadian Geotechnical Journal*. 57(9) 1304-1319. <https://doi.org/10.1139/cgj-2019-0135>.
- Vinod, P., Bhaskar, A. B., Sreehari, S., (2009). Behavior of a square model footing on loose sand reinforced with braided coir rope, *Geotextiles and Geomembranes*, 27(6), 464–474. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2009.08.001>
- Wang, J. Q., Zhang, L. L., Xue, J. F., Tang, Y., (2018). Load-settlement response of shallow square footings on geogrid-reinforced sand under cyclic loading. *Geotextiles and Geomembranes*. 46(5), 586–596. <https://doi.org/10.1016/j.geotexmem.2018.04.009>.
- Wayne, M. H., Han, J., Akins, K., (1998). The design of geosynthetic reinforced foundations. In: Proceedings of ASCE's 1998 Annual Convention & Exposition, ASCE Geotechnical Special Publication, 76, pp. 1–18.
- Xu, Y., Williams, D. J., Serati, M., Scheuermann, A., Vangsness, T., (2018). Effects of scalping on direct shear strength of crusher run and crusher run/geogrid interface. *Journal of Materials in Civil Engineering*. 30(9). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002411](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002411).
- Xu, Y., Yan, G., Williams, D. J., Serati, M., Scheuermann, A., Vangsness, T., (2019). Experimental and numerical studies of a strip footing on geosynthetic-reinforced sand. *International Journal of Physical Modelling in Geotechnics*. 20(5), 267–280. <https://doi.org/10.1680/jphmg.18.00021>.
- Yetimoglu, T., Wu, J. T. H., Saglamer, A., (1994). Bearing capacity of rectangular footings on geogrid-reinforced sand, *J. Geotech. Engrg*, 120(12), 2083–2099. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1994\)120:12\(2083\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1994)120:12(2083))



# Kahramanmaraş Sutcu Imam University

## Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 23.09.2023  
Kabul Tarihi : 13.05.2024

Received Date : 23.09.2023  
Accepted Date : 13.05.2024

### ELEKTRİKLİ ARAÇ ŞARJ İSTASYONLARININ ENERJİ DAĞITIM HATLARINA OPTİMUM ŞEKİLDE KONUMLANDIRILMASI

#### OPTIMAL ALLOCATION OF ELECTRIC VEHICLE CHARGING STATIONS ON ENERGY DISTRIBUTION NETWORKS

Murat ÇIKAN<sup>1\*</sup> (ORCID: 0000-0001-6723-5769)  
Nisa NACAR ÇIKAN<sup>2</sup> (ORCID: 0000-0002-9641-4616)

<sup>1</sup> Çukurova Üniversitesi, Adana Organize Sanayi Bölgesi Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Adana, Türkiye

<sup>2</sup> Çukurova Üniversitesi, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü, Adana, Türkiye

\*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Murat ÇIKAN, [mcikan@cu.edu.tr](mailto:mcikan@cu.edu.tr)

#### ÖZET

Elektrikli araçların (EA) güç sistemlerine büyük ölçekli entegrasyonu elektrik şebekesinin güç kalitesinin düşmesine, hatlardaki aktif güç kayıplarının artmasına ve dağıtım hattının güvenilirlik indeksi değerlerinin azalmasına neden olur. Bu tarz problemler elektrikli araç şarj istasyonlarının (EAŞİ) şebekeye optimal şekilde konumlandırılması ile minimize edilebilir. Bu çalışmada, sürüş eğitimi-temelli optimizasyon (DTBO) algoritması kullanılarak 200 baralı test sisteminde optimal yük akışı ve EAŞİ'lerin optimum noktalara konumlandırılması eş zamanlı olarak gerçekleştirilmiştir. Çalışmada, üç farklı senaryo ve her bir senaryoya ait üç farklı durum göz önüne alınmıştır. Birinci senaryoda EAŞİ'lerin hatta bulunmadığı durumda optimal güç akışının gerçekleştirilmesi, ikinci senaryoda EAŞİ'lerin rastgele baralara konumlandırılarak, üreticilerin aktif/reaktif güç çıkışlarının optimize edilmesi ve üçüncü senaryoda ise EAŞİ'lerin DTBO algoritması ile optimum noktalara yerleştirilerek ve üreticilerin çıkış güçlerinin birlikte optimize edilmesi olarak özetlenebilir. Her senaryoda üç farklı durum (serbest çalışma, deterministik ve meta-sezgisel metot yaklaşımları) göz önüne alınarak sistemdeki aktif güç kayıpları minimize edilmiştir. Elde edilen sonuçlar, DTBO algoritmasının kullanılmasıyla EAŞİ'lerin optimal noktalara konumlandırılması sonucunda aktif güç kayıplarının %32 oranında azaldığı göstermektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Elektrikli araç şarj istasyonu, konumlandırma, optimizasyon, meta-sezgisel algoritma

#### ABSTRACT

The large-scale integration of Electric Vehicles (EVs) into the power systems causes a decrease in the power quality of the electrical grid, an increase in active power losses in the lines, and a reduction in the reliability index values of the distribution network. Such problems can be minimized by the optimal positioning of electric vehicle charging stations (EVCSs) on the grid. This study uses a driving training-based optimization (DTBO) algorithm to simultaneously determine the optimal load flow and the optimal positioning of the EASIs in a 200-bus test system. In the study, three different scenarios and three different cases for each scenario have been considered. The study can be summarized as follows: In the first scenario, the power flow is optimized without the presence of EVCSs on the grid. In the second scenario, EVCSs are randomly placed on buses and generators' active/reactive power outputs are optimized. In the third scenario, simultaneously EVCSs at optimal locations are allocated using the DTBO algorithm and the generator output powers are optimized. The active power losses in the system have been minimized in each scenario by considering three different cases (unrestricted operation, deterministic, and meta-heuristic method approaches). The obtained results demonstrate that using the DTBO algorithm for the optimal placement of EVCSs has resulted in a 32% reduction in active power losses.

**Keywords:** Electrical vehicle charging station, allocation, optimization, metaheuristic algorithms



## GİRİŞ

Dünya genelinde satış rakamları hızla büyüyen elektrikli araçlar (EA), otomotiv sektöründe dikkate değer bir trend yakalamıştır. Son on yılda gerçekleşen bu hızlı yükselişin arkasında, EA'ların,  $CO_2$  emisyonunun azaltılmasına yönelik olumlu katkısı ve içten yanmalı motorlara kıyasla işletme maliyetlerinin düşmesi gibi faktörler yer almaktadır (Parker vd., 2021; Zhou vd., 2021). Yapılan araştırmalara göre, 2030 yılına gelindiğinde, EA kullanımının artışı ile birlikte  $CO_2$  emisyonu %28 oranında azalacaktır (Adnan vd., 2018). Ancak, EA'lara geçiş sürecinde çözüm bulunması gereken en önemli problemlerden bir tanesi elektrikli araç şarj istasyonlarının (EAŞİ) kurulumu için gerekli olan elektriksel alt yapının yetersizliğidir. Günümüzde EA sahibi olma imkânının kolaylaşmasıyla birlikte, EA'lara olan talep miktarında artış oluşmakta ve bu artış şebeke yükünü ciddi oranda arttırmaktadır. Şubat 2023'te yayımlanan Dünya Bankası verilerine göre, Türkiye'nin 2022 yılına ait toplam EA sayısı 5915 ve EA'ların yıllık toplam enerji tüketimi 15764 bin kWh olarak belirtilmiştir. Öngörülere göre, 2030 yılında toplam EA sayısının 1466954'e yükselmesi beklenmekte ve bu yükselmeye birlikte EA'ların enerji ihtiyacının 3909433 bin kWh olacağı öngörülmektedir. Bu veriler, EA'ların hızla yaygınlaşacağını ve enerji talebinin önemli ölçüde artacağını göstermektedir. Bu artışın, enerji dağıtım şebekesi operatörleri (EDŞO) tarafından önemli ölçüde dikkate alınması gerekmektedir.

Günümüzde, EAŞİ'lerin boyutlarının ve konumlarının belirlenmesi için düzenleyici kuruluşlar tarafından net kurallar henüz oluşturulmamıştır. EAŞİ'ler birden fazla şarj istasyonu ve şarj soketi barındırarak aynı anda birden fazla EA'nın şarj edilmesine imkân verir. Bu durum, şebekede kontrolsüz ve anlık yük artışlarına yol açmaktadır (Nurmuhammed & Karadağ, 2021). Elektrikli araç sektöründeki otobüs ve kamyon gibi diğer araç çeşitlerinin de hızla artmasıyla birlikte, enerji ihtiyacı önemli ölçüde artacaktır. Plansız yerleştirilen şarj istasyonları, pik saatlerde trafo yük dengesizliğini bozabilir, gerilim profilini olumsuz etkileyebilir ve aktif güç kayıplarına neden olabilir. Ayrıca EA kullanıcıları, araçlarını kısa sürede şarj etme ihtiyacı duymaktadır. EA sayısının artmasıyla birlikte hızlı şarj istasyonlarının artması ise dağıtım sistemini önemli ölçüde olumsuz etkileyebilir. Bu olumsuz etkiler, doğru bir EAŞİ planlamasıyla büyük ölçüde azaltılabilir (Tuan, 2017).

EAŞİ'lerin konumlandırılması üzerine kapsamlı bir literatür çalışması (Ahmad vd., 2022) tarafından yapılmıştır. Yapılan çalışmaların çoğunda maliyet hesaplamaları göz önünde bulundurulmuştur. (Islam vd., 2015)'de EAŞİ'lerin konumlandırılmasını etkileyen faktörler 33 baralı bir test sistemi üzerinde incelenmiştir. (Ge vd., 2011)'de, şebeke bölümlenmesi temel alınarak EAŞİ'lerin konumlandırılması ve boyutlandırılması yöntemi tartışılmıştır. Trafik yoğunluğu ve şarj istasyonu kapasite sınırlamaları temel olarak dikkate alınan faktörlerdir ve optimize mekanizması olarak genetik algoritma (GA) kullanılmıştır. (Reddy & Selvajyothi, 2020)'de 19 ve 25 baralı dengesiz test sistemlerinde PSO algoritması kullanılarak ve güç kayıplarının azaltılması amaç fonksiyonu olarak seçilerek optimal EAŞİ konumlandırılması belirlenmiştir. (Kathiravan & Rajnarayanan, 2023)'te, 33 baralı test sisteminde aritmetik optimizasyon algoritması (AOA) kullanılarak ve hat kayıplarının minimize edilmesi amaç fonksiyonu seçilerek EAŞİ'lerin konumları belirlenmiştir. (Mozafar vd., 2017)'da, 33 baralı test sisteminde hibrit genetik algoritma-parçacık sürü optimizasyonu (GA-PSO) kullanılarak, EA ve yenilenebilir enerji kaynaklarının (YEK) optimal şekilde konumlandırılması yapılmıştır. Çalışmada, EA pil maliyetlerini düşürmek, şarj ve talep maliyetlerini düşürmek ve gerilim dalgalanmalarını düşürmek amaç fonksiyonu olarak seçilmiştir. (Pal vd., 2021)'de 33 baralı test sisteminde şarj talebinin yoğun olduğu bölgeler dikkate alınarak yavaş ve hızlı şarj senaryoları dikkate alınarak EAŞİ'lerin konumları belirlenmiştir. Gerilim sapsmasının minimize edilmesi, amaç fonksiyonu olarak ele alınmıştır. Problem çözümünde diferansiyel evrim (DE) kullanılmıştır ve elde edilen sonuçları doğrulamak için Harris Hawks Optimizasyonu (HHO) kullanılmıştır.

Literatür taraması sonucunda, yapılan çalışmaların çoğunun 16, 25 ve 33 baralı gibi küçük boyutlu test sistemleri kullandığı görülmüştür (Yuvaraj vd., 2024). Bara sayısının artması arama yüzeyini (çözüm uzayını) genişleterek çözüm süresini artırdığından, işlemlerin kolaylaştırılması için küçük baralı test sistemleri tercih edilmiştir. Bu çalışmada, 200 baralı ağ yapıya sahip bir test sistemine EA'lerin optimal noktalara konumlandırılması hedeflenmiştir. Çalışmada, üç farklı senaryo ve her bir senaryo için üç farklı durum göz önünde bulundurulmuştur. Literatürde yapılan çalışmaların çoğunda optimal konumların belirlenmesinde meta-sezgisel algoritmalarından faydalanılmıştır. Bu çalışmada öncelikle herhangi bir metot uygulanmadan, serbest çalışma durumu gözetilerek sistemin aktif ve reaktif güç kayıpları incelendi. Daha sonra sırasıyla deterministik metot ve meta-sezgisel algoritmalar kullanılarak sistemin güç kayıpları karşılaştırıldı. Birinci senaryoda, optimum yük akış problemi serbest çalışma, Lagrange katsayı yöntemine dayanan deterministik bir yaklaşım ve güncel bir meta-sezgisel bir algoritma olan Sürüş Eğitimi-Temelli Optimizasyon (Driving Training-Based Optimization, DTBO) optimizasyon algoritması yaklaşımı ile

çözülmüştür. Bu senaryodaki amaç, üreteçlerin aktif ya da reaktif üretim güçlerini kontrol ederek dağıtım hattındaki aktif güç kayıplarını minimize etmenin, önerilen yöntemler ile gerçekleştirilebileceğini göstermektir. İkinci senaryoda, her biri 2 MW olarak kabul edilen 17 adet EAŞİ (toplam 34 MW) güç dağıtım hattı baralarına rastgele dağıtılarak optimum güç akışı sağlanmıştır. Üçüncü senaryoda ise 34 MW'lık EAŞİ'lerin konumlandırılması DTBO arama algoritması ile gerçekleştirilmiştir. Bu senaryoda, EAŞİ'lerin optimal konumlarının bulunması ve sistemdeki üreteçlerin çıkış güçlerinin hesaplanması eş zamanlı olarak optimize edilmiştir.

Çalışmanın geri kalan bölümleri şu şekilde özetlenebilir. Bölüm 2'de, matematiksel modeller ve modellere bağlı fiziksel kısıtlamalar sunulmuştur. Bölüm 3'de, DTBO algoritması hakkında bilgi ve çalışma prensibi anlatılmıştır. Bölüm 4'de, çalışmaya ait senaryolar ve elde edilen sonuçlar tartışılarak sunulmuştur. Son bölümde ise sonuçlar özetlenmiştir.

## MATEMATİKSEL MODELLER ve FİZİKSEL KISITLAR

Çalışmada kullanılan analiz metotları, modele bağlı fiziksel kısıtlamalar ve kullanılan amaç fonksiyonunun detayları bu bölümde verilmiştir.

### *Newton-Raphson Metodu ile Yük Akış Algoritması*

Güç sistemlerinde (dağıtım hattının) yük akışının hesaplanması için literatürde birçok yöntem mevcuttur. Algoritmaların birbirlerine göre üstünlükleri olduğu gibi, kimi zaman da zayıflıkları daha belirgin olabilir. Newton-Raphson (N-R) algoritması gerek yakınsama hızı gerekse de yakınsama hassasiyetinden dolayı oldukça popüler bir yük akış algoritmasıdır (Glover vd., 2016). N-R algoritmasına ait denklemler Eş. (1) ile Eş. (8) arasında açıklanmıştır.  $y=f(x)$  tarzındaki bir eşitliği güç sistemlerine uyarlısak:

$$x = \begin{bmatrix} \delta \\ V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta_2 \\ \vdots \\ \delta_N \\ V_2 \\ \vdots \\ V_N \end{bmatrix}, y = \begin{bmatrix} P \\ Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_2 \\ \vdots \\ P_N \\ Q_2 \\ \vdots \\ Q_N \end{bmatrix} \text{ ve } f(x) = \begin{bmatrix} P(x) \\ Q(x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_2(x) \\ \vdots \\ P_N(x) \\ Q_2(x) \\ \vdots \\ Q_N(x) \end{bmatrix} \quad (1)$$

$x$  bilinmeyen baralara ait gerilim (V p.u cinsinden) ve gerilim açısını ( $\delta$  radyan cinsinden) değerlerini göstermektedir.  $P$  ve  $Q$  değerleri, ise salınım barası hariç tüm baraların aktif ve reaktif güç değerlerini p.u cinsinden göstermektedir. Salınım barasına ait değişkenler, ( $[V_1 \text{ ve } \delta_1] = [1 \text{ ve } 0]$ ) çözüm sonucunda sabit olarak kalır.  $i \in 2, 3, \dots, N$  bara numarasını göstermektedir.

$$P_i(x) = |V_i| \cdot \sum_{j=1}^N |Y_{ij}| \cdot |V_j| \cdot \cos(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij}) \quad (2)$$

$$Q_i(x) = |V_i| \cdot \sum_{j=1}^N |Y_{ij}| \cdot |V_j| \cdot \sin(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij})$$

Bu yöntem, iki veya fazla değişkene sahip fonksiyonların Taylor serisine açılmasıyla elde edilir. Yüksek dereceli Taylor değerleri ihmal edilmiştir. Bu ihmal, çözümün hassasiyetini önemli ölçüde etkilemez. Eş. (3)'te, 'N' bara sayısına sahip bir güç sistemi için aktif ve reaktif güç değerlerinin ayrı ayrı nasıl ifade edildiği gösterilmiştir.

$$\text{Jacobian} = \begin{bmatrix} \begin{matrix} \frac{\partial P_2}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial P_2}{\partial \delta_N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial P_N}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial P_N}{\partial \delta_N} \end{matrix} & \begin{matrix} \frac{\partial P_2}{\partial V_2} & \dots & \frac{\partial P_2}{\partial V_N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial P_N}{\partial V_2} & \dots & \frac{\partial P_N}{\partial V_N} \end{matrix} \\ \begin{matrix} \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial Q_2}{\partial \delta_N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial Q_N}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial Q_N}{\partial \delta_N} \end{matrix} & \begin{matrix} \frac{\partial Q_2}{\partial V_2} & \dots & \frac{\partial Q_2}{\partial V_N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial Q_N}{\partial V_2} & \dots & \frac{\partial Q_N}{\partial V_N} \end{matrix} \end{bmatrix} \quad (3)$$

Aktif güç değeri için fark (hata) denklemlerinin bara gerilimine ait faz açısı ve mutlak değerlerine bağlı kısmi türev değerleri Eş. (4) ve Eş. (5)'te verilmiştir. Böylece jakoben matrisine ait  $j_1$  ve  $j_2$  değerleri aşağıdaki eşitlikler yardımı ile ifade edilir. Diyagonal olan ve olmayan elemanlara ait  $j_1$  jakoben matrisi aşağıdaki gibidir.

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} = -|V_i| \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N |Y_{ij}| \cdot |V_j| \cdot \sin(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij}) \quad (4)$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_j} = |V_i| \cdot |Y_{ij}| \cdot |V_j| \cdot \sin(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij})$$

Diyagonal olan ve diyagonal olmayan elemanlara ait  $j_2$  jakoben matrisi aşağıdaki gibidir.

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} = |V_i| \cdot |Y_{ii}| \cdot \cos(\theta_{ii}) + \sum_{j=1}^N |Y_{ij}| \cdot |V_j| \cdot \cos(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij}) \quad (5)$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial |V_j|} = |V_i| \cdot |Y_{ij}| \cdot \cos(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij})$$

Reaktif güç değeri için fark (hata) denklemlerinin bara gerilimine ait faz açısı ve mutlak değerlerine bağlı kısmi türev değerleri Eş. (6) ve Eş. (7)'de sunulmuştur. Bu sayede jakoben matrisinin  $j_3$  ve  $j_4$  değerleri, aşağıdaki eşitliklerle ifade edilir. Diyagonal ve diyagonal olmayan elemanlara ait  $j_3$  jakoben matrisi ise aşağıdaki gibidir.

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_i} = |V_i| \cdot \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n |Y_{ij}| \cdot |V_j| \cdot \cos(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij}) \quad (6)$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_j} = -|V_i| \cdot |Y_{ij}| \cdot |V_j| \cdot \cos(\delta_i - \delta_j - \theta_{ij})$$

Diyagonal olan ve diyagonal olmayan elemanlara ait  $j_4$  jakoben matrisi aşağıdaki gibidir.

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \delta_i} = -|V_i| \cdot |Y_{ii}| \cdot \sin(\theta_{ii}) + \sum_{j=1}^N |Y_{ij}| \cdot |V_j| \cdot \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j) \quad (7)$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial |V_j|} = |V_i| \cdot |Y_{ij}| \cdot \sin(\theta_{ij} - \delta_i + \delta_j)$$

$i$  ve  $j \in 2,3, \dots, N$  dir. Eş. (8) salınım barası hariç geri kalan diğer baraların açılı ve gerilim değerini göstermektedir.

$$x(k) = \begin{bmatrix} \delta(k) \\ V(k) \end{bmatrix} \quad (8)$$

$x(k)$  için başlangıç değeri seçilir ve her iterasyon sonucunda  $x(k)$  değeri güncellenir. İstenilen hassasiyete ulaşıldığında ise döngü sonlandırılır.

### Gerilim Kararlılık İndeksi

Gerilim kararlılık indeksi (VSI), bir güç dağıtım sisteminin gerilim düzeyinin dalgalanmalara ve dış etkilere karşı ne kadar kararlı olduğunu değerlendiren bir ölçüdür. Bu indeks, elektrik sistemlerinin gerilim, empedans ve güç düzeyindeki değişikliklere nasıl tepki verdiğini ve sistemdeki değişimlerin sınırlarını belirlemeye yardımcı olur. Sınır değerlere yakın çalışan sistemlerin gerilim kararlılığının daha hassas bir şekilde incelenmesi gerekmektedir. Literatürde birçok gerilim kararlılık indeksi bulunmaktadır. Ancak bu formüllerin birçoğu çeşitli varsayımlara veya kabullere dayanmaktadır. Bu çalışmada, hattın yüklenmesini ve çoklu hat parametrelerini dikkate alan güncel bir indeks (Doğanşahin & Cikan, 2023) kullanılmıştır. Kullanılan formül Eş. (9)'da gösterilmiştir.

$$VSI = \frac{4|V_S|^2 |C| |D| |S_R| \cos(\varphi_R + \delta_S) \cdot \sin(\delta_S)}{|S_S|^2 \cdot \cos^2(\varphi_S + \delta_R)} \leq 1 \quad (9)$$

Burada 'S ve R' alt indisleri, sırasıyla hat başı ve hat sonu değişkenlerini ifade etmektedir.  $S_S$  ve  $S_R$ , hat başı ve hat sonuna ait görünür gücü, V bağlı bulunduğu bara hat gerilimini,  $\delta_S$  ve  $\delta_R$ , gerilimlerin faz açılarını ve  $\varphi_S$  ve  $\varphi_R$  ise görünür gücün güç açılarını göstermektedir. C ve D değişkenleri ise, Eş. (10) ve Eş. (11)'de verilmiştir.

$$C = Y \times \left[ 1 + \left( Y \times \frac{Z}{4} \right) \right] \quad (10)$$

$$D = 1 + \left( Y \times \frac{Z}{2} \right) \quad (11)$$

Z ve Y sırasıyla, hattın hat empedans ve shönt admintas değerlerini göstermektedir.

### Kısıtlar

Güç sistemlerinin stabil ve güvenli bir şekilde çalışabilmesi için aşağıda gösterilen kısıt değerlerinin göz önünde bulundurulması gerekmektedir (Cikan & Kekezoglu, 2022) (Cikan & Cikan, 2023).

- Bara gerilim değerlerinin tanımlanmış sınırlar içerisinde çalışması gerekir.

$$V_{Bara,min}^i \leq V_{Bara}^i \leq V_{Bara,maksi}^i \quad (12)$$

- Eş. (13)'te görüldüğü üzere, yük baraları için gerilime ait alt ve üst limit değerleri, nominal bara gerilim değerinin  $\pm 10\%$  dur.

$$0.9 \cdot V_{Bara}^i \leq V_{Bara}^i \leq 1.1 \cdot V_{Bara}^i \quad (13)$$

- Aynı şekilde fider baralarına ait gerilim salınım seviyesi ise Eş. (14)'de nominal bara gerilim değerinin  $\pm 5\%$  olarak tanımlanmıştır.

$$0.95 \cdot V_{Besleme}^i \leq V_{Besleme}^i \leq 1.05 \cdot V_{Besleme}^i \quad (14)$$



- Eş. (15)'de, baralara bağlı branşmanlar arasındaki akım değeri, kablunun maksimum akım taşıma kapasitesini aşmamalıdır.

$$I_{Bara}^i \leq I_{Bara,maksi}^i \quad (15)$$

- Fiderler tarafından sisteme verilen toplam güç, hatta bağlı olan toplam yük gücü ile hattaki kayıp değerlerinin toplamına eşit ya da büyük olmalıdır.

$$\sum_{i=1}^{N_G} P_{G,i} \geq \sum_{i=1}^{N_{Yük}} P_{LD,i}^{abc} + \sum_{i=1}^{N_{Dal}} P_{Kayıp,i}^{abc} \quad (16)$$

- Üreteç Gücü: Aktif ve reaktif güç değerleri tanımlanan limitler arasında kalmalıdır.

$$\begin{aligned} P_{gen,i}^{min} < P_{gen,i} < P_{gen,i}^{maksi} \\ Q_{gen,i}^{min} < Q_{gen,i} < Q_{gen,i}^{maksi} \end{aligned} \quad (17)$$

- İletilen güç değerinin tanımlanan sınırlar içerisinde kalması gerekmektedir.

$$S_{l,i} < S_{l,i}^{maksi} \quad (18)$$

### Amaç Fonksiyonu

Enerjinin bir noktadan diğerine güvenilir ve stabil şekilde taşınması sırasında, iletim ve dağıtım sistemlerinin belirli fiziksel ve mekaniksel sınırlamalara uyması beklenir. Güç sistemlerinde enerjinin iletilmesi esnasında, hattın direnci, manyetik etkiler ve diğer nedenlerden dolayı hat kayıpları meydana gelir. Hat kayıplarının hesaplanması için Eş. (19)'da ki formül kullanılmıştır (Cikan & Kekezoglu, 2022).

$$P_{kayıp} = \sum_{i=1}^{N_{dal}} r^{(i)} \cdot \left( \frac{P_i^2 + Q_i^2}{V_i^2} \right) \quad (19)$$

Sistemdeki toplam aktif güç kaybı, Kron formülü kullanılarak bulunmuştur. Bu formülün ayrıntıları Bölüm 2.4 ve 2.5'te yer alan formüller ref. (Saadat, 2010)'da sunulmuştur.

$$P_{Kayıp}^{min} = \sum_{i=1}^{N_{gen}} \sum_{j=1}^{N_{gen}} P_i B_{ij} P_j + \sum_{i=1}^{N_{gen}} B_{0i} P_i + B_{00} \quad (20)$$

Burada,  $B_{ij}$  indisi kayıp katsayısı ya da  $B$ -katsayısı olarak isimlendirilir.  $B$  katsayısının elde edilmesi ile ilgili ayrıntılı bilgi ref.(Saadat, 2010)'de gösterilmiştir. Eş. (20)'de kapalı formda verilen denklemin açık formdaki hali Eş. (21)'de sunulmuştur.

$$P_{Loss} = [P_{g1} \ P_{g2} \ \dots \ P_{Ngen}] \begin{bmatrix} B_{1,1} & B_{1,2} & \dots & B_{1,Ngen} \\ B_{2,1} & B_{2,2} & \dots & B_{2,Ngen} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ B_{Ngen,1} & B_{Ngen,2} & \dots & B_{Ngen,Ngen} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{g1} \\ P_{g2} \\ \vdots \\ P_{gNgen} \end{bmatrix} + [P_{g1} \ P_{g2} \ \dots \ P_{Ngen}] \cdot \begin{bmatrix} B_{01} \\ B_{02} \\ \vdots \\ B_{0Ngen} \end{bmatrix} + B_{00} \quad (21)$$

### Lagrange Katsayı Yöntemi ( $\mathcal{L}$ ) ile Üreteçlerin Optimal Güç Değerinin Hesaplanması

Enerjinin ekonomik bir şekilde dağıtılması ve üretim maliyetlerinin düşürülmesi için çeşitli deterministik yöntemler geliştirilmiştir. Eş. (22) üreteçlerin ürettikleri güce bağlı toplam maliyet değerini hesaplamamıza yardımcı olur.

$$C_t = \sum_{i=1}^{N_{gen}} C_i = \sum_{i=1}^{N_{gen}} \alpha_i + \beta_i \cdot P_i + \gamma_i \cdot P_i^2 \quad (22)$$

$\alpha_i$ ,  $\beta_i$  ve  $\gamma_i$  değerleri güç üretimine bağlı katsayılardır ve her üreteç olarak spesifik olarak tanımlanır.  $P_i$  indisi üreticinin ürettiği güç değerini göstermektedir. Eş. (23), üreteçlerin üreteceği güç değerinin, hat kayıpları ( $P_{Loss}$ ) ve talep yük ( $P_D$ ) değerlerinin toplamına eşit olması gerektiğini gösterir.

$$\sum_{i=1}^{N_{gen}} P_i = P_D + P_{Kayıp} \quad (23)$$

Üreteçlerin üreteceği aktif güç değeri Eş. (24) ile tanımlanmıştır.

$$P_{gen,i}^{min} < P_{gen,i} < P_{gen,i}^{maks} \quad (24)$$

Eş. (22) ile Eş. (24) arasındaki denklemleri Lagrange katsayı yöntemi ile ifade edersek Eş.(25) elde edilir.

$$\mathcal{L} = C_t + \lambda \left( P_D + P_{Loss} - \sum_{i=1}^{N_{gen}} P_i \right) + \sum_{i=1}^{N_{gen}} \mu_i^{maks} \cdot (P_i - P_i^{maks}) + \sum_{i=1}^{N_{gen}} \mu_i^{min} \cdot (P_i - P_i^{min}) \quad (25)$$

Eş. (25)'de geçen  $\mu_i^{min}$  ve  $\mu_i^{maks}$  değerlerinin seçimi Eş. (26)' te gösterilmiştir.

$$\text{Eğer, } \begin{cases} \mu_i^{maks} = 0 & P_i < P_i^{maks} \\ \mu_i^{min} = 0 & P_i - P_i^{min} \end{cases} \quad (26)$$

$\mu_i^{maks}$  ve  $\mu_i^{min}$  değerleri sadece sınır değerlerinin aşılması durumunda aktif hale gelir. Limitlerde bir çalışma yapılıyorsa, bu terimlerin bulunduğu denklem grubu sifıra eşit olacaktır. Kron kayıp formülü ve çeşitli matematiksel manipülasyonlar kullanılarak Eş. (27) ve Eş. (28) elde edilir. Bu sayede ekonomik açıdan üretilen en uygun güç miktarı deterministik bir yaklaşımla belirlenmiş olur.

$$\left( \frac{Y_i}{\lambda} + B_{ii} \right) \cdot P_i + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{N_{gen}} B_{ij} P_j = \frac{1}{2} \left( 1 - B_{0i} - \frac{\beta_i}{\lambda} \right) \quad (27)$$

kapalı formda verilmiş olan Eş.(27)'nin, açık formdaki hali Eş. (28)'de verilmiştir.

$$\begin{bmatrix} \frac{Y_1}{\lambda} + B_{1,1} & B_{1,2} & \cdots & B_{1,N_{gen}} \\ B_{2,1} & \frac{Y_2}{\lambda} + B_{2,2} & \cdots & B_{2,N_{gen}} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ B_{N_{gen},1} & B_{N_{gen},2} & \cdots & \frac{Y_{N_{gen}}}{\lambda} + B_{N_{gen},N_{gen}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} P_{g1} \\ P_{g2} \\ \vdots \\ P_{gN_{gen}} \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \cdot \begin{bmatrix} 1 - B_{01} \cdot \frac{\beta_1}{\lambda} \\ 1 - B_{02} \cdot \frac{\beta_2}{\lambda} \\ \vdots \\ 1 - B_{0N_{gen}} \cdot \frac{\beta_{N_{gen}}}{\lambda} \end{bmatrix} \quad (28)$$

Eş. (28), iteratif ( $\lambda^{(1)}$ ) yöntemlerle çözülür.  $k$ . iterasyona bağlı güç eşitliği Eş. (29)'da verilmiştir.

$$P_i^k = \frac{\lambda^{(k)}(1 - B_{oi}) - \beta_i - 2\lambda^{(k)} \cdot \sum_{j \neq i}^{N_{gen}} B_{ij} P_j^{(k)}}{2(Y_i + \lambda^{(k)} \beta_{ii})} \quad (29)$$

Eş. (29) denklemini gradiyent metodu ile çözümlenirse Eş. (30) elde edilir.

$$\sum_{i=1}^{N_{gen}} \left( \frac{\partial P_i}{\partial \lambda} \right)^{(k)} = \sum_{i=1}^{N_{gen}} \left( \frac{Y_i + B_{ii} \cdot \beta_i}{2(Y_i + \lambda^{(k)} B_{ii})^2} \right) \quad (30)$$

## SÜRÜŞ EĞİTİMİ-TEMELLİ OPTİMİZASYON ALGORİTMASI (DTBO)

Sürüş Eğitimi-Temelli Optimizasyon (Driving Training-Based Optimization, DTBO) algoritması, 2022 yılında yayınlanan, insanların sürüş eğitimi sırasındaki davranışlarını taklit ederek geliştirilmiş güncel bir stokastik arama algoritmasıdır (Dehghani vd., 2022). DTBO algoritması matematiksel olarak üç aşamada modellenmektedir:

1. Sürüş eğitmeni tarafından verilen eğitimin matematiksel ifadesi,
2. Öğrencilerin direksiyon hocalarının becerilerini taklit etmesine dayanan matematiksel modelleme
3. Son aşama olarak ise teorik bilginin pratiğe uygulanmasının modellenmesi olarak özetlenebilir.

Sürücü kursu öğrencilerinden ve eğitmenlerden oluşan topluluk, DTBO algoritmasının popülasyonunun temelini oluşturur. Bu popülasyondaki her birey, bir aday çözüm olarak kabul edilir ve sürüş becerilerini temsil eder. Eş.(31)'de problemle ilgili aday çözümlerin elde edilmesi için, popülasyon üyelerini içeren bir matris oluşturulur.

$$X = \begin{bmatrix} X_1 \\ \vdots \\ X_i \\ \vdots \\ X_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{11} & \cdots & X_{1j} & \cdots & X_{1m} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ X_{i1} & \cdots & X_{ij} & \cdots & X_{im} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ X_{N1} & \cdots & X_{Nj} & \cdots & X_{Nm} \end{bmatrix} \quad (31)$$

Burada  $X$  vektörü DTBO algoritmasının popülasyonunun dağılımını göstermektedir.  $X_i$  notasyonu ise  $i$ . çözüme ait değeri ifade eder.  $i=1,2,\dots,N$  ve  $j=1,2,\dots,m$  olarak sınır değerleri ifade eder.  $N$  değeri popülasyondaki üye sayısını ve  $m$  değeri problemin boyutunu (değişken sayısını) gösterir. Matris içerisinde konumlanmış olan üyelerin başlangıçtaki konumu, Eş.(32)'deki formül kullanılarak rastgele bir şekilde başlatılır. Kullanılan eşitlik aynı zamanda popülasyon üyelerinin, arama-uzayı dışında çözüm üretmesinin de önüne geçer.

$$x_{i,j} = Alt_{S_{nir}}^j + \text{rand.} \cdot (\text{Üst}_{S_{nir}}^j - Alt_{S_{nir}}^j) \quad (32)$$

$\text{Üst}_{S_{nir}}^j$  ve  $\text{Alt}_{S_{nir}}^j$  arama uzayının üst ve alt sınır değerlerini göstermektedir.  $\text{rand}(\cdot)$  komutu  $[0,1]$  arasında üretilecek rastgele sayıları temsil etmektedir. Popülasyon içerisindeki her aday, problem çözümü için bir sonuç üretir. Üretilen değerler, amaç fonksiyonunun bir değişkeni olarak atanır ve uygun çözüm için bir adaylık teşkil eder. Eş. (33)'teki vektör, amaç fonksiyonunun değerlerini modellemektedir.

$$\text{Obj} = \begin{bmatrix} F_1 \\ \vdots \\ F_i \\ \vdots \\ F_N \end{bmatrix}_{N \times 1} = \begin{bmatrix} F(X_1) \\ \vdots \\ F(X_i) \\ \vdots \\ F(X_N) \end{bmatrix}_{N \times 1} \quad (33)$$

$\text{Obj}$  değişkeni, amaç fonksiyon vektörünü ve  $F_i$  ise  $i$ . çözüme ait üretilmiş amaç fonksiyon değerini ifade eder. Doğadan esinlenerek geliştirilen birçok arama algoritmasının mekaniksel tasarımı birbirlerine çok benzemektedir. Genel olarak algoritmalar keşfet ve sömür ilkesine dayanmaktadır. Meta-sezgisel algoritmalar arasındaki temel fark, aday çözümlerin güncellenmesi sürecinde kullanılan stratejidir. DTBO algoritmasında aday çözümler, üç farklı aşamada güncellenir: (1) öğrenci sürücünün sürüş eğitmeni tarafından eğitilmesi, (2) öğrenci sürücünün eğitmen becerilerine göre şekillendirilmesi ve (3) öğrenci sürücünün pratik yapması.

**Aşama 1:** Sürüş eğitmeni tarafından eğitim (1.keşif fazı).

DTBO güncellemesinin ilk aşaması, sürücü adayı tarafından direksiyon hocasının seçilmesi ve ardından seçilen hoca tarafından sürücü adayına eğitimin verilmesine dayanır. DTBO popülasyonu arasından seçilen en iyi üyeler sürüş hocası, geri kalanlar ise sürücü adayı olarak değerlendirilir. Direksiyon hocasının seçilmesi ve becerilerinin öğrenilmesi, popülasyon üyelerinin arama uzayında farklı alanlara hareket etmesine yol açacaktır. Bu da algoritmanın global arama ve optimum alandaki keşif gücünü artıracaktır.

$$DI = \begin{bmatrix} DI_1 \\ \vdots \\ DI_i \\ \vdots \\ DI_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} DI_{11} & \cdots & DI_{1j} & \cdots & DI_{1m} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ DI_{i1} & \cdots & DI_{ij} & \cdots & DI_{im} \\ \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ DI_{N_{DI,1}} & \cdots & DI_{N_{DI,j}} & \cdots & DI_{N_{DI,m}} \end{bmatrix}_{N_{DI} \times m} \quad (34)$$

Bu nedenle, DTBO güncellemesinin ilk aşaması, algoritmanın keşif yeteneğini göstermektedir. Her iterasyon sonunda, üretilen amaç fonksiyonunun değerlerinin karşılaştırılmasına bağlı olarak, DTBO'nun  $N$  üyesi, Eş. (34)'te gösterildiği gibi sürücü eğitmeni olarak seçilir.  $DI$ , direksiyon hocalarını gösteren matris değeri,  $DI_i$   $i$ .inci direksiyon hocasını,  $DI_{i,j}$  ise  $j$ .boyutu temsil eder.  $N_{DI} = \left\lfloor \frac{1}{10} \cdot N \cdot \left(1 - \frac{t}{T}\right) \right\rfloor$  sürüş eğitmenlerinin sayısıdır. Burada  $t$  mevcut iterasyon değerini ve  $T$  ise maksimum iterasyon sayısı göstermektedir. DTBO algoritmasının 1. aşamaya ait matematiksel modeli Eş. (35)-(36)'da gösterilmiştir. Eş. (35) yardımıyla her üyenin konumunu güncellenir. Güncelleme sonucunda amaç fonksiyonu daha iyi sonuçlar üretiyorsa bu değer Eş. (36) yardımıyla kontrol edilip yeni değer saklanır. Eğer iyileşme söz konusu değil ise eski değer kullanılmaya devam eder.

$$x_{ij}^{p1} = \begin{cases} x_{i,j} + \text{rand}(DI_{Ki,j} - I.x_{i,j}) & F_{Ki,j} < F_i \\ x_{i,j} + \text{rand}(x_{i,j} - DI_{Ki,j}) & \text{Diğer durum} \end{cases} \quad (35)$$

$$X_i = \begin{cases} X_i^{p1} & F_i^{p1} < F_i \\ X_i & \text{Diğer durum} \end{cases} \quad (36)$$

$X_i^{p1}$  DTBO arama algoritmasının çözüm olarak sunulan  $i$ . adayın konum bilgisini verir.  $F_i^{p1}$  amaç fonksiyon değeri,  $I\{1, 2\}$  kümesinden rastgele seçilen bir sayı,  $r [0, 1]$  aralığında rastgele bir sayı,  $DI_{Ki}$   $i$ . öğrenciye direksiyon eğitimi veren ve rastgele seçilen eğitmeni temsil eder.

**Aşama 2:** Sürücü adayının direksiyon hocasının becerilerini taklit etmesi (modellemesi) (2.keşif fazı).

DTBO algoritmasının ikinci aşaması, sürücü adayının, direksiyon hocasının yeteneklerini taklit etme ilkesine dayanır, kısaca öğrenci hocasının hareketlerini ve becerilerini modelleye çalışır. Bu süreç DTBO'daki popülasyon üyelerini arama uzayında farklı konumlara taşır ve böylece DTBO algoritmasının keşif gücü artar. Bu ifade matematiksel olarak Eş. (37) kullanılarak simüle edilmiştir. Her bir sürücü adayının, eğitmenle doğrusal kombinasyonuna dayalı olarak yeni bir konum oluşturulur. Güncelleme sonucunda amaç fonksiyonu daha iyi sonuçlar üretiyorsa bu değer Eş. (38) yardımıyla kontrol edilip yeni değer saklanır.

$$x_{ij}^{p2} = P.x_{i,j} + (1 - P)DI_{Ki,j} \quad (37)$$

$$X_i = \begin{cases} X_i^{p2} & F_i^{p2} < F_i \\ X_i & \text{Diğer durum} \end{cases} \quad (38)$$

$X_i^{p2}$  DTBO'nun ikinci aşamasına dayalı olarak  $i$ . aday çözüm için hesaplanan yeni durum,  $x_{ij}^{p2}$   $j$ .boyut,  $F_i^{p2}$  amaç fonksiyon değeri ve  $P$  aşağıdaki şekilde verilen desenleme indeksidir.



$$P = \frac{1}{100} + 0.9 \cdot \left(1 - \frac{t}{T}\right) \quad (39)$$

### Aşama 3: Öğrendiklerini Pratiğe Dökme (sömürü fazı)

DTBO algoritmasının üçüncü ve son aşaması, sürücü adayının sürüş becerisini geliştirmek ve iyileştirmek için yapmış olduğu pratik uygulamalara dayanmaktadır. Her sürücü adayı bu aşamada kabiliyetlerini en üst seviyeye çıkarmaya çalışır. Matematiksel olarak her üyenin mevcut konumu etrafında yerel bir aramaya dayalı olarak daha iyi bir konum keşfetmesine olanak sağlayacak şekilde güncelleme yapması gerekir. Bu durum DTBO arama algoritmasının lokal aramadan yararlanma gücünü göstermektedir. Eş. (40)'a göre her bir popülasyon üyesinin yakınında rastgele bir konum oluşturulur. Daha sonra, Eş. (41)'e göre, bu konum amaç fonksiyonunun değerini iyileştirirse önceki konumun yerini alır ve hafızada saklanır.

$$x_{i,j}^{p3} = x_{i,j} + (1 - 2r) \cdot R \cdot \left(1 - \frac{t}{T}\right) \cdot x_{i,j} \quad (40)$$

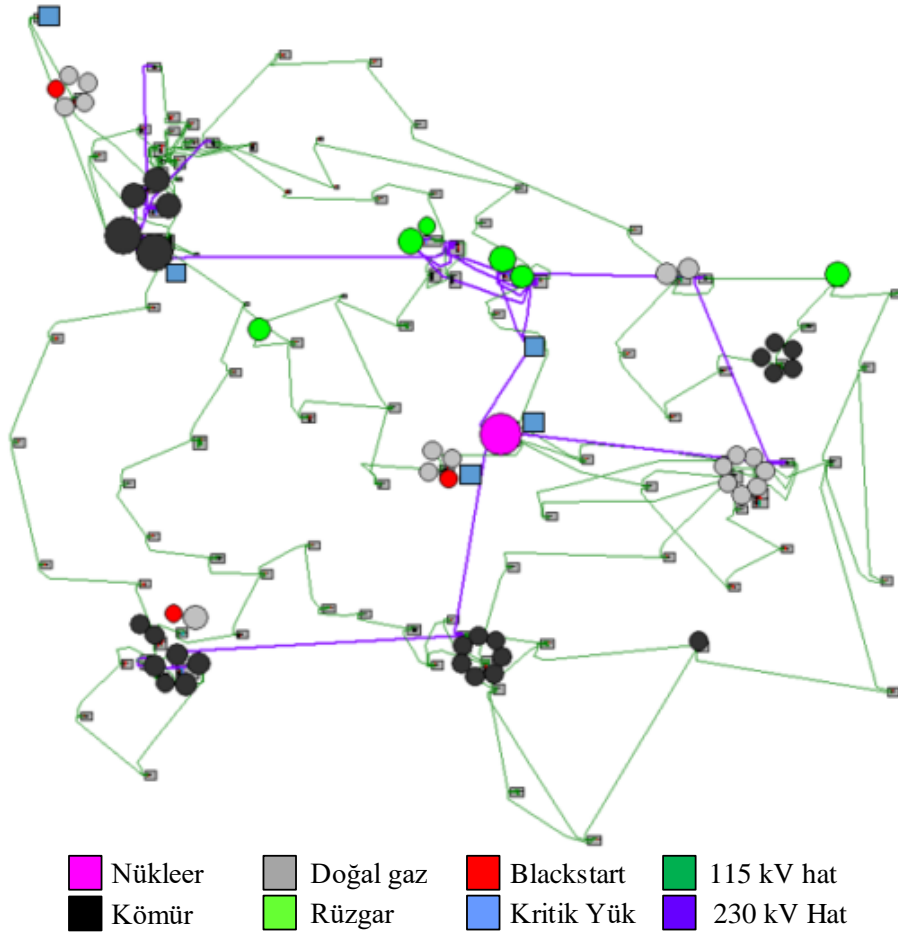
$$X_i = \begin{cases} X_i^{p3} & F_i^{p3} < F_i \\ X_i & \text{Diğer durum} \end{cases} \quad (41)$$

$X_i^{p3}$  DTBO'nun üçüncü aşamasına dayalı olarak  $i$ . aday çözüm için hesaplanan yeni durum,  $x_{i,j}^{p3}$   $j$ 'inci boyut,  $F_i^{p3}$  amaç fonksiyonu değeri,  $r$  [0, 1] aralığında rastgele olarak seçilmiş reel sayıyı göstermektedir.  $R$  değeri 0,05 olarak seçilmiş sabit bir değerdir.  $t$ , o andaki iterasyon değerini ve  $T$  maksimum iterasyon sayısını gösterir. Popülasyon üyeleri her bir aşama sonrasında konumlarını günceller. Güncellenmiş popülasyona sahip algoritma, bir sonraki DTBO iterasyonuna girer. Güncelleme işlemi tüm aşama adımlarına göre, Eş. (34)- Eş. (41) arasındaki fonksiyonları sürdürerek maksimum iterasyon sayısına ulaşıncaya kadar işlemleri tekrarlar. DTBO algoritması verilen problem üzerinde uygulandıktan sonra, yürütme sırasında kaydedilen en iyi aday çözüm, problemin optimal çözümü olarak hafıza tutulur.

### ÇALIŞMAYA AİT SONUÇLAR ve TARTIŞMA

Şekil 1'de 200-Baralı test sistemi görülmektedir. Sistem, 49 tane fider (38 tanesi aktif durumda ve 11 adet ise kullanım dışı), 200 bara, 245 adet bransman, 4 kapasitör tank, 66 transformatör ve baralara bağlı farklı boyutlarda 108 adet sabit PQ yük modelinden oluşmaktadır. Hat ve baralara ait detaylı bilgiler ref.(Birchfield vd., 2017)'den elde edilebilir. Sistemde kurulu aktif ve reaktif yüklerin toplam güçleri sırasıyla 1475,7 MW ve 420,55 MVAR'dır. Sistemde bulunan fider (üreteç) kurulu aktif güç değeri 3379,6 MW ve reaktif güç değeri ise [-420,3 ile 1436,1] MVAR arasında değişmektedir. Güç iletim hattı 13,8 kV, 115 kV ve 230 kV'luk farklı gerilim seviyelerinde çalışmaktadır. Hattın başlangıç koşullarına göre gerçekleştirilen yük akış algoritması neticesinde minimum ve maksimum gerilim değerleri 148.barada 1,010 p.u ve 100.barada 1,055 p.u olduğu görülmüştür. Hattaki güç kaybı 12,6069 MW + j176,2450 MVAR olarak hesaplanmıştır. Çalışmada kullanılan tüm analizler Matlab ortamında Matpower (Zimmerman vd., 2011) programı kullanılarak gerçekleştirilmiştir.

Çalışma, üç farklı senaryo göz önüne alınarak gerçekleştirilmiştir. Birinci senaryoda, hatta herhangi bir şarj istasyonu bağlı değil iken üreteçlerin çalışması ve optimum yük akışı: (1)-Kısıt durumu yok iken (serbest çalışma durumu), (2)-Deterministik yöntem ve (3)-DTBO arama algoritması yardımı ile üreteçlerin çıkış güçlerinin kontrol edilmesi sağlanmıştır 3-farklı yaklaşım sayesinde, hattaki aktif güç kayıplarının ve gerilim profil değerlerinin değişimi incelenmiştir. İkinci senaryoda, şarj istasyonlarının konumlandırılması rastgele baralara atama yapılarak gerçekleştirilmiştir. Birinci senaryodaki 3-durum gözetilerek senaryo-II'deki yeni koşullara göre çalışma tekrarlanmıştır. Üçüncü senaryoda, elektrikli araç şarj istasyonlarının konumlandırılması DTBO algoritması yardımıyla optimum noktalar tespit edilerek gerçekleştirilmiştir. Bu sayede EAŞİ'lerin optimum noktalara konumlandırılması ve üreteçlerin çıkış güçlerinin optimum değerlerde çalıştırılması amaçlanmıştır.



Şekil 1. 200-Baralı Test Sistemi (ACTIVSg200)

### Senaryo I

Dağıtım hattına bağlı üreteçlerin optimum çalışma noktalarının belirlenmesi için birkaç kriter mevcuttur. Bunlardan bir tanesi üreteçlerin üretim değerleri göz önüne alınarak, üretim maliyetinin minimize edilmesidir. Diğer bir yöntem ise üretim değerleri optimize edilerek hat kayıplarının düşürülmesidir. Bu çalışmada hattı besleyen fiderlerin benzer maliyet karakteristiği gösterdiği (MW üretim maliyet değerinin aynı olduğu) kabulü yapılarak, aktif güç kaybının düşürülmesi amaç fonksiyonu olarak belirlenmiştir.

### Şebekede Elektrikli Şarj İstasyonu Mevcut Değilken

Senaryo I'de, dağıtım hattında EAŞİ'lerin bulunmadığı ve bu nedenle herhangi bir yük talebinin olmadığı varsayılmıştır. Böylece sistem, dağıtım hattında bulunan puant yük değerleri dikkate alınarak (1) üreteçlerin serbest çalışma durumu, (2) deterministik ve (3) stokastik (DTBO arama algoritması) yaklaşımları kullanılarak üreteçlerin çıkış güçleri optimize edildiği durumlar göz önüne alınarak gerçekleştirilmiştir.

**Tablo 1.** 200-Baralı Test Sisteminin Serbest Çalışma, Deterministik ve Meta-Sezgisel Yöntemlerle Gerçekleştirilen Optimum Çalışma Noktalarına ait Üreteç Değerleri

Fider No	Serbest Çalışma Durumu için		Deterministik Yöntem ile Çözüldüğünde		Stokastik Arama Algoritması Yardımı ile Çözüldüğünde	
	P <sup>Güçü çıkış</sup> (MW)	Q <sup>Güçü çıkış</sup> (MVAR)	P <sup>Güçü çıkış</sup> (MW)	Q <sup>Güçü çıkış</sup> (MVAR)	P <sup>Güçü çıkış</sup> (MW)	Q <sup>Güçü çıkış</sup> (MVAR)
49	1,3600	0,8892	4,5300	0,7854	1,3600	0,8449
50	1,3600	1,1863	4,5300	0,9354	1,3600	1,1280
51	1,3600	0,7734	4,5300	0,7999	1,3600	0,7350
52	1,3600	1,2619	4,5300	0,9309	1,3600	1,1999
53	2,7200	0,7999	9,0700	1,2939	2,7200	0,7591
65	86,5000	0,9104	86,5000	-2,8744	86,5000	0,5371
67	1,4100	-0,9024	4,7000	-0,5514	2,9745	-1,6459
68	8,3800	-0,5141	24,7703	-1,3610	9,7546	-0,8046
69	8,3800	-1,4247	24,8995	-3,2830	15,1480	-2,4643

70	8,3800	-0,7325	24,7703	-1,7066	9,7285	-1,1356
71	8,3800	-1,5785	24,9460	-3,3757	18,9648	-2,8537
72	8,3800	-1,7302	24,9459	-3,3771	18,9289	-3,1423
73	8,3800	-1,0384	24,7703	-1,9867	9,6889	-1,6002
76	1,2000	1,4065	4,0000	0,6251	4,0000	1,2220
77	0,7200	0,5014	2,4000	0,3572	2,3199	0,4566
78	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
79	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
90	0,9600	0,1319	3,2000	-0,3599	3,2000	0,1412
91	1,5000	0,5996	5,0000	-0,5499	5,0000	0,3454
92	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
94	5,4000	-2,5270	18,0000	-2,1999	17,9971	-3,2142
104	67,6000	3,0415	67,6000	-3,2155	67,6000	2,3075
105	154,8000	8,2115	154,8000	-2,1706	154,8000	7,1253
114	1,4000	1,2467	1,4000	0,2056	1,4000	1,0738
115	133,5000	12,4049	133,5000	19,1793	133,5000	11,2070
125	39,0200	7,2353	39,0200	6,3366	39,0200	6,6548
126	39,0200	12,5334	39,0200	15,9484	47,3497	11,6470
127	39,0200	25,9630	39,0200	22,6800	70,3893	23,5560
135	133,9200	21,4284	133,9200	24,6266	133,9200	19,6490
136	133,9200	25,0163	133,9200	23,6818	133,9200	22,8470
147	92,4000	8,7849	92,4000	9,6280	92,4000	8,1998
151	1,6200	0,0253	5,4000	-0,6085	5,3999	-0,4866
152	23,1700	0,2820	27,8655	-7,4798	53,1864	-0,74089
153	23,1700	0,0284	27,6824	-2,6200	24,0787	-1,4930
154	23,1700	0,1596	27,8655	-7,7632	53,1652	-2,2226
155	23,1700	0,1489	27,8655	-7,7856	53,1241	-2,3749
161	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
164	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
165	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
166	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
167	2,8200	-1,6523	9,4000	-1,0400	9,4000	-2,5511
168	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
169	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
170	2,8200	-0,9002	9,4000	-1,0400	9,4000	-1,3734
182	5,2500	2,1561	17,5000	1,4617	17,5000	1,2081
183	7,9800	5,7361	26,6000	2,2880	26,6000	3,0282
189* (Slack)	384,3969	-24,0390	170,7500	-46,6698	145,9925	-21,2440
196	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
197	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
<b>Toplam</b>	<b>1488,2969</b>	<b>105,8233</b>	<b>1485, 021</b>	<b>29,745</b>	<b>1484,51103</b>	<b>76,52474</b>

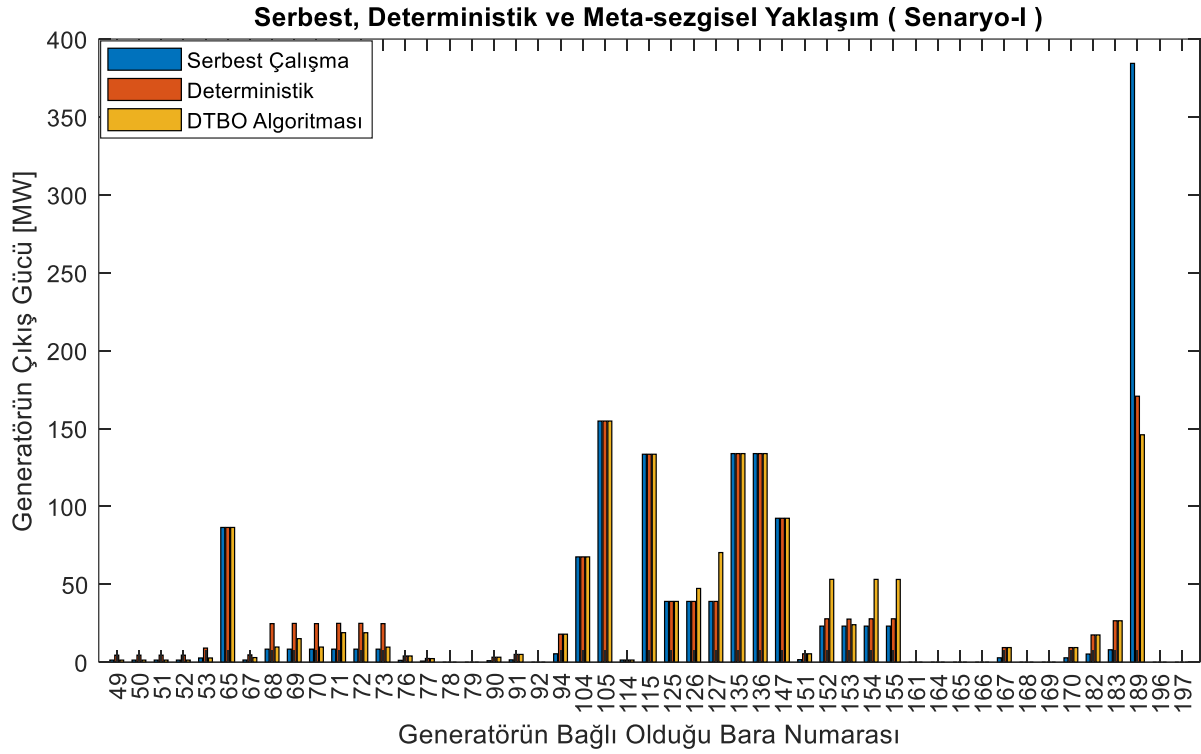
Bu sayede 3-farklı yaklaşım ile elde edilen değerlerin karşılaştırılması ve şebekeye olan etkilerinin incelenmesi amaçlanmıştır. Bölüm 2.5 ve Bölüm 3'te sunulan formüller yardımıyla deterministik ve stokastik olarak üreteçlerin optimum çalışma noktası elde edilmiştir. Tablo 1'de, 200 baralı dağıtım hattının yük akış algoritması sonrasında üreteçlerin sisteme enjekte ettikleri aktif/reaktif güç değerleri gösterilmiştir. Serbest çalışma, deterministik ve meta-sezgisel yöntemlerle gerçekleştirilen yük akış algoritması sonucunda hat kayıpları ve gerilim kararlılık indeks değerleri Tablo 2'de gösterilmiştir.

**Tablo 2.** 3-Farklı Yaklaşım Sonucunda Elde Edilen Hat Kayıpları Gerilim Kararlılık İndeks Sonuçları

	Serbest Çalışma	Deterministik	Stokastik Arama Algoritması
	Durumu için	Yöntem ile Çözüldüğünde	Yardımları ile Çözüldüğünde
Kayıp Değeri	<b>12,6069 MW</b> 176,2450 MVar	<b>9,3310 MW</b> 140,8168 MVar	<b>8,821032 MW</b> 148,24949 MVar
Mini/Maksi Bara Gerilim	1,010 p.u @ bara148 1,055 p.u @ bara 100	1,059 p.u @ bara 148 1,100 p.u @ bara 100	1,01097 p.u @ bus 148 1,05646 p.u @ bus 100
Gerilim Kararlılık İndeksi (VSI)	Maksimum VSI değeri 142.barada <b>0,9697</b> olarak hesaplandı	Maksimum VSI değeri 153.barada <b>0,9840</b> olarak hesaplandı	Maksimum VSI değeri 94.barada <b>0,5341</b> olarak hesaplandı

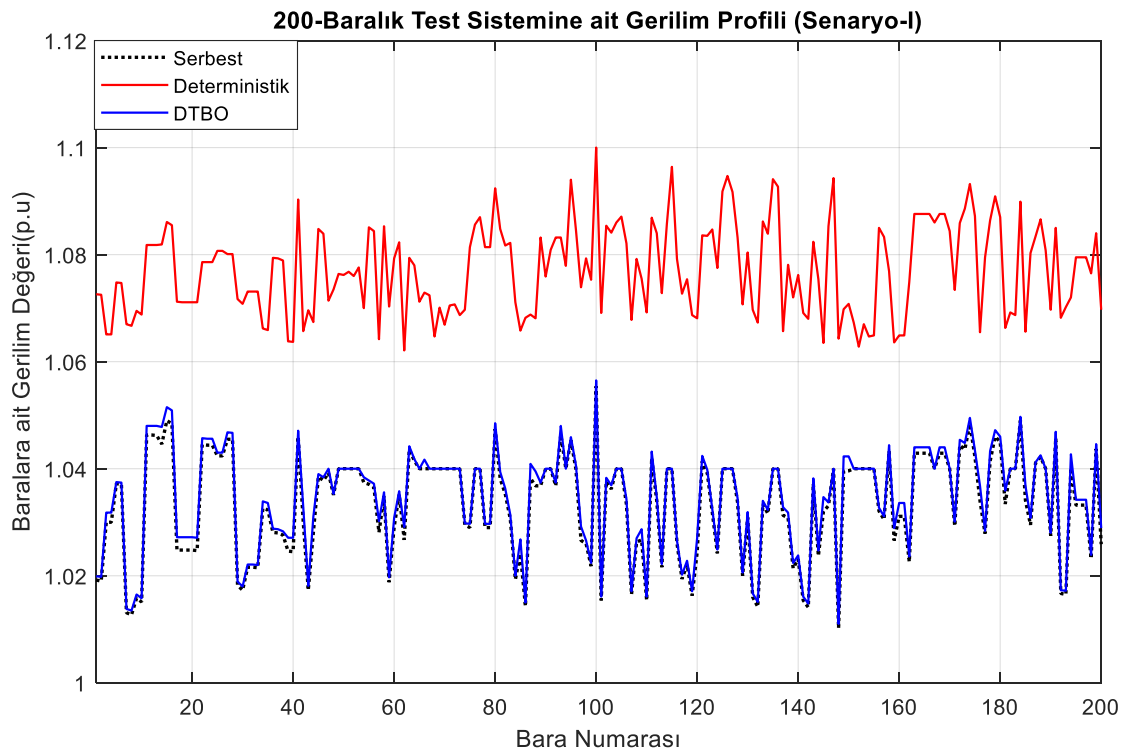
Tablo 2' den görüldüğü üzere, güç sistemindeki üreteçler, herhangi bir kısıt durumu yokken serbest şekilde çalışması durumunda hatlarda 12,607 MW'lık bir kayıp meydana gelmektedir. Üreteçler, Lagrange katsayı yaklaşımı yardımıyla optimize edildiğinde ise hat kayıpları 9,3310 MW değerine düşmektedir. DTBO algoritması ile üreteçlerin çalışması optimize edildiğinde ise bu değer 8,8210 MW değerine düşmektedir. 38 adet üreticinin aktif ve reaktif güçleri DTBO algoritması ile optimize edilerek elde edilen 76 değişkenin değeri Tablo 1'de (sondan-2-sütün) gösterilmiştir. Geleneksel ve stokastik yaklaşımlar neticesinde elde edilen üreteçlere ait güç değerleri tanımlanan limit aralığında kalmıştır. Üreteçlerin çıkış güçleri iki yöntem ile de optimize edildiği takdirde hatlardaki kayıp miktarı %25,98 ve %30,03 azalmıştır. Tablo 1' de gösterilen üreteçlerin çıkış güçlerinin karşılaştırılması Şekil 2'de sunulmuştur. 189

numaralı (salınım-barası) baraya bağlı üreticinin optimizasyon öncesi ve sonrası çıkış güçleri karşılaştırıldığında, üreticinin başlangıç durumuna göre  $\approx 37,98\%$  kapasite ile çalışmasının optimum sonuçlar üreteceği görülmüştür.



**Şekil 2.** Serbest Çalışma, Deterministik ve Meta-sezgisel Algoritma Yardımıyla Üreteçlerin Çıkış Güçlerinin Yük Akış Sonuçları (Senaryo-I)

Güç dağıtım sistemindeki baralara ait gerilim değerleri Şekil 3’te gösterilmiştir.



**Şekil 3.** 3-Farklı Yaklaşım ile Gerçekleştirilen Yük Akışı Sonrasında Baralara ait Gerilim Değerleri



Dağıtım hatlarında, bara gerilim değerinin [0,9 ile 1,1] p.u arasında salınım yapmasına müsaade edilir (Nacar Cikan & Cikan, 2024). Şekil 3'ten görüldüğü üzere optimizasyon sonucunda her baranın gerilim değeri müsaade edilen sınır değerler içerisinde bulunmaktadır. DTBO algoritması kullanılarak elde edilen ortalama gerilim değeri, 1,0345 p.u değerindedir. Lagrange optimizasyonu yaklaşımı ile üreteçlerin üretim değerleri ve hatta ait parametre sonuçları Tablo 3'de sunulmuştur.

**Tablo 3.** Deterministik Yöntem ile Gerçekleştirilen Optimizasyon Sonrasına ait Hat Değerleri

Hatta İlişkin Değerler		Hat Kapasitesi	P (MW)	Q (MVar)
Bara	200	Toplam Gen. Kapasitesi	3379,6	-420,3 to 1436,1
Üreteç	49	On-line Kapasite	2997,5	-377,9 to 1241,7
Aktif Üreteç Sayısı	38	Üreteç (Aktif)	1485,0	29,7
Bağlı Yük Sayısı	108	Yük Miktarı	1475,7	420,5
Sabit Yük Sayısı	108	Sabit Yük Değeri	1475,7	420,5
Dağıtık Yük Sayısı	0	Dağıtık Yük Değeri	-0,0	-0,0
Şönt Kapasitör Sayısı	4	Şönt (enjekte)	-0,0	225,6
Branşman Sayısı	245	Kayıplar ( $I^2 \cdot Z$ )	<b>9,33</b>	<b>140,82</b>
Transformatör Sayısı	66	Branşman Şarj (enjekte)	-----	306,0

Lagrange yaklaşımı kullanılarak yapılan optimizasyon sonucunda dağıtım hattına ait en düşük ve en yüksek gerilim değerleri ve aktif/reaktif güç kayıpları Tablo 4'te gösterilmiştir.

**Tablo 4.** Hattın Gerilimine ait Değerler

	Minimum		Maksimum	
	Değer	Bara No	Değer	Bara No
Gerilim Değeri	1,059 p.u	148	1,100 p.u	100
Gerilim Açısı	-5,230 derece	148	6,260 derece	65
Aktif Güç Kaybı	---		0,250 MW	199-25
Reaktif Güç Kaybı	---		12,300 MVar	105-102

Meta-sezgisel arama algoritması (DTBO) yardımıyla 76 parametrenin aynı anda optimizasyonu sonucunda elde edilen değerler kullanıldığında hattın ürettiği parametreler Tablo 5'te gösterilmiştir.

**Tablo 5.** Meta-Sezgisel Yöntem ile Gerçekleştirilen Optimizasyon Sonrasına ait Hat Değerleri

Hatta İlişkin Değerler		Hat Kapasitesi	P (MW)	Q (MVar)
Bara	200	Toplam Gen. Kapasitesi	3379,6	-420,3 ile 1436,1
Üreteç	49	On-line Kapasite	2997,5	-377,9 ile 1241,7
Aktif Üreteç Sayısı	38	Üreteç (Aktif)	1484,5	76,5
Bağlı Yük Sayısı	108	Yük Miktarı	1475,7	420,5
Sabit Yük Sayısı	108	Sabit Yük Değeri	1475,7	420,5
Dağıtık Yük Sayısı	0	Dağıtık Yük Değeri	-0,0	-0,0
Şönt Kapasitör Sayısı	4	Şönt (enjekte)	-0,0	209,6
Branşman Sayısı	245	Kayıplar ( $I^2 \cdot Z$ )	<b>8,82</b>	<b>148,25</b>
Transformatör Sayısı	66	Branşman Şarj (enjekte)	-----	282,6

Enerji dağıtım hatlarında fiderlere bağlı bara gerilim değerlerinin  $\pm 5\%$  salınım yapmasına izin verilir. Belirtilen kısıtlar dikkate alındığında besleme gerilim değerlerinin, [0,95 ile 1,05] arasında dalgalanmasına müsaade edilir. DTBO algoritması yardımıyla hattın optimize edilmesi durumunda üreteçlerin gerilim değerleri 1,05 p.u değerini aşmamaktadır. Hattaki en düşük ve yüksek gerilim değerleri ve aktif/reaktif güç kayıpları Tablo 6'da gösterilmiştir.

**Tablo 6.** DTBO Algoritması Sonuçlarına Göre Elde Edilen Gerilim Değerleri

	Minimum		Maksimum	
	Değer	Bara No	Değer	Bara No
Gerilim Değeri	1,011 p.u	148	1,056 p.u	100
Gerilim Açısı	-5,120 derece	175	5,290 derece	65
Aktif Güç Kaybı	---		0,240 MW	81-55
Reaktif Güç Kaybı	---		13,190 MVar	105-102



170	2,8200	-0,8066	9,4000	-1,0400	9,4000	-1,3192
182	5,2500	2,2398	17,5000	1,5084	17,5000	1,2670
183	7,9800	5,9543	26,6000	2,4023	26,6000	3,1817
189* (Slack)	419,1000	-22,7510	170,7500	-46,6699	158,99788	-21,1990
196	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
197	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
<b>Toplam</b>	<b>1522,99594</b>	<b>114,07377</b>	<b>1519,29529</b>	<b>33,44465</b>	<b>1518,7019</b>	<b>79,88043</b>

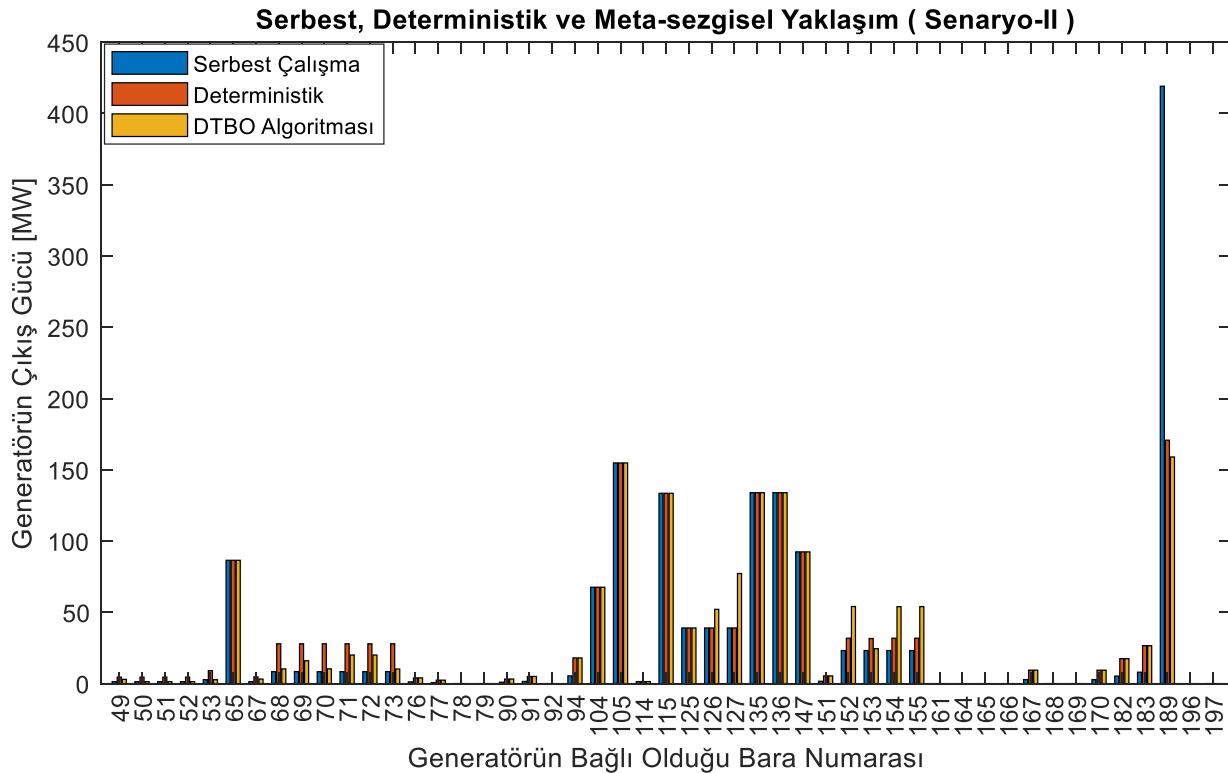
Serbest çalışma, deterministik ve meta-sezgisel yöntemlerle gerçekleştirilen yük akış algoritması sonucunda hat kayıpları ve gerilim kararlılık indeks değerleri Tablo 8’de gösterilmiştir.

**Tablo 8.** 3-Farklı Yaklaşım Sonucunda Elde Edilen Hat Kayıpları Gerilim Kararlılık İndeks Sonuçları

	Serbest Çalışma Durumu için	Deterministik Yöntem ile Çözüldüğünde	Stokastik Arama Algoritması Yardımı ile Çözüldüğünde
Kayıp Değeri	<b>13,305945 MW</b> <b>184,201796 MVA</b>	<b>9,6053 MW</b> <b>144,81635 MVA</b>	<b>9,0119 MW</b> <b>151,450 MVA</b>
Mini/Maksi Bara Gerilim	1,010 p.u @ bara 148 1,055 p.u @ bara 100	1,058 p.u @ bara 148 1,100 p.u @ bara 100	1,0109 p.u @ bara 148 1,0563 p.u @ bara 100
Gerilim Kararlılık İndeksi (VSI)	Maksimum VSI değeri 169.barada <b>0,9971</b> olarak hesaplandı	Maksimum VSI değeri 119.barada <b>0,4437</b> olarak hesaplandı	Maksimum VSI değeri 23.barada <b>0,8189</b> olarak hesaplandı

Senaryo I deki duruma benzer şekilde 38 adet üreticinin aktif ve reaktif güçleri DTBO algoritması ile optimize edilmiş ve elde edilen 76 değişkenin değeri Tablo 7’de (son-2-sütun) gösterilmiştir. Geleneksel ve stokastik yaklaşımlar neticesinde elde edilen değişken değerleri tanımlanan limit aralıklarında kalmıştır.

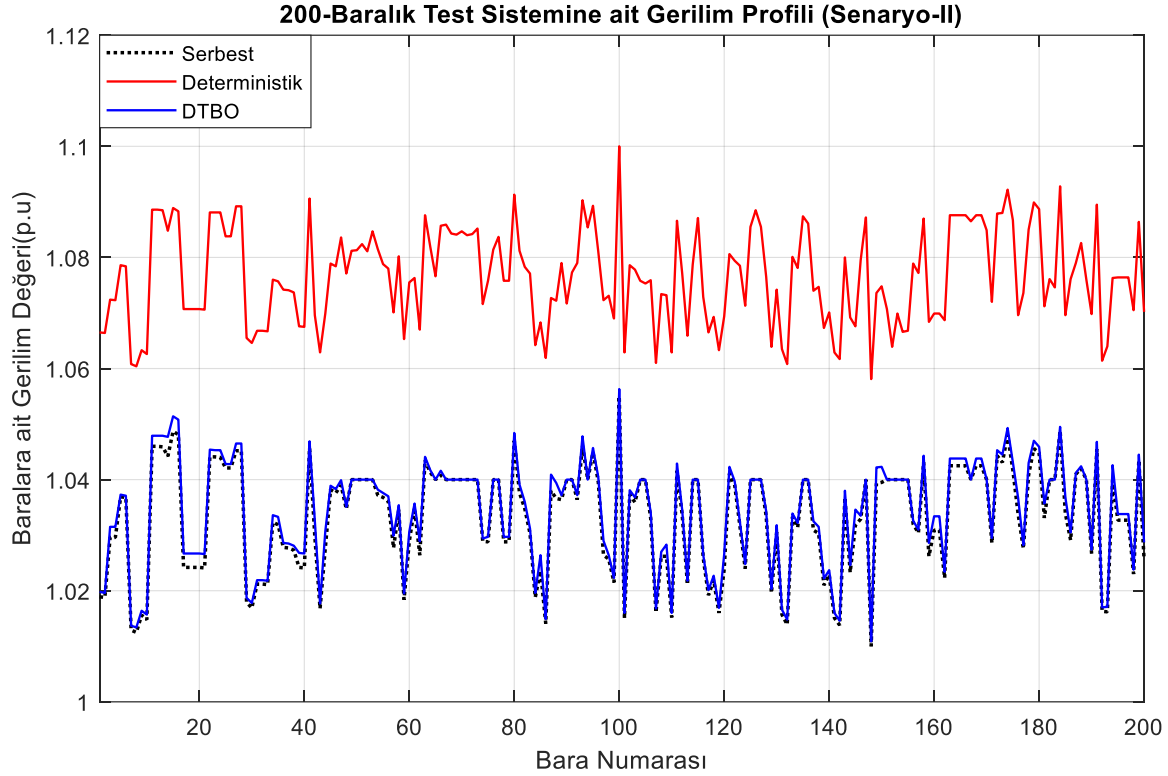
Tablo 8’den görüldüğü üzere, güç sistemine ilave edilen 34 MW’lık yük sonucunda hatlarda meydana gelen güç kaybı (serbest çalışma durumuna göre) **12,607 MW**’tan **13,305945 MW** değerine yükselmiştir. Benzer şekilde deterministik yaklaşım ile hattın optimize edilmesi durumunda aktif güç kaybı **9,3310 MW**’dan **9,6053 MW** değerine yükselmiştir. DTBO algoritması yardımı ile üreticilerin çıkış güçleri optimize edildiğinde ise bu değer **8,8210 MW**’tan **9,0119 MW** değerine yükselmiştir.



**Şekil 4.** Serbest Çalışma, Deterministik ve Meta-sezgisel Algoritma Yardımıyla Üreteçlerin Çıkış Güçlerinin Yük

## Akış Sonuçları (Senaryo-II)

Üç yaklaşım karşılaştırıldığında aktif güç kayıplarındaki en az yükselme meta-sezgisel algoritma tarafından gerçekleştirildiği görülmüştür. Üreteçlerin çıkış güçleri optimize edildiği takdirde hatlardaki kayıp miktarı sırasıyla %27,812 ve %32,27 azalmaktadır. Tablo 7’de gösterilen üreteçlerin çıkış güçlerinin karşılaştırılması Şekil 4’te sunulmuştur. 189 numaralı salınım barasına bağlı üreticinin optimizasyon öncesi ve sonrası çıkış güçleri karşılaştırıldığında, üreticinin başlangıç durumuna göre  $\approx$ %37,94 kapasite ile çalışmasının daha optimum sonuçlar meydana getirdiği söylenebilir.



Şekil 5. 3-Farklı Yaklaşım ile Gerçekleştirilen Yük Akışı Sonrasında Baralara ait Gerilim Değerleri

Güç dağıtım sistemindeki baralara ait gerilim değerleri Şekil 5’te gösterilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere optimizasyon sonucunda her baranın gerilim değeri müsaade edilen sınır değerler içerisinde bulunmaktadır ve ortalama değeri ise 1,0343 p.u değerindedir. Lagrange yaklaşımı kullanılarak üreteçlerin üretiminin optimizasyonu sonucunda hatta ait parametre değerleri Tablo 9’da sunulmuştur.

**Tablo 9.** Deterministik Yöntem ile Gerçekleştirilen Optimizasyon Sonrasına ait Hat Değerleri

Hatta İlişkin Değerler	Hat Kapasitesi	P (MW)	Q (MVar)	
Bara	200	Toplam Gen, Kapasitesi	3379,6	-420,3 ile 1436,1
Üreteç	49	On-line Kapasite	2997,5	-377,9 ile 1241,7
Aktif Üreteç Sayısı	38	Üreteç (Aktif)	1519,3	33,4
Bağlı Yük Sayısı	118	Yük Miktarı	1509,7	420,5
Sabit Yük Sayısı	118	Sabit Yük Değeri	1509,7	420,5
Dağıtık Yük Sayısı	0	Dağıtık Yük Değeri	-0,0 of -0,0	-0,0
Şönt Kapasitör Sayısı	4	Şönt (enjekte)	-0,0	225,9
Branşman Sayısı	245	Kayıplar ( $I^2 \cdot Z$ )	<b>9,61</b>	<b>144,82</b>
Transformatör Sayısı	66	Branşman Şarj (enjekte)	-	306,0

Lagrange yaklaşımı kullanılarak yapılan optimizasyon sonucunda dağıtım hattına ait en düşük ve en yüksek gerilim değerleri ve aktif/reaktif güç kayıpları Tablo 10’da gösterilmiştir.



**Tablo 10.** Lagrange Yöntemine Dayalı Optimizasyon Sonrası Hat Gerilimlerine ait Değerler

	Minimum		Maksimum	
	Değer	Bara No	Değer	Bara No
Gerilim Değeri	1,058 p.u	148	1,100 p.u	100
Gerilim Açısı	-5,470 derece	148	5,940 derece	65
Aktif Güç Kaybı	---		0,240 MW	63-184
Reaktif Güç Kaybı	---		12,320 MVA <sub>r</sub>	105-102

DTBO algoritması kullanarak üreticilerin aktif/reaktif güç çıkışlarının optimizasyonu sonucunda elde edilen değerler Tablo 11'de gösterilmiştir.

**Tablo 11.** Meta-Sezgisel Yöntem ile Gerçekleştirilen Optimizasyon Sonrasına Ait Hat Değerleri

Hatta İlişkin Değerler	Hat Kapasitesi	P (MW)	Q (MVA <sub>r</sub> )
Bara	200	Toplam Gen, Kapasitesi	3379,6 -420,3 ile 1436,1
Üreteç	49	On-line Kapasite	2997,5 -377,9 ile 1241,7
Aktif Üreteç Sayısı	38	Üreteç (Aktif)	1518,7 79,90
Bağlı Yük Sayısı	118	Yük Miktarı	1509,7 420,50
Sabit Yük Sayısı	118	Sabit Yük Değeri	1509,7 420,50
Dağıtık Yük Sayısı	0	Dağıtık Yük Değeri	-0,0 of -0,0 -0,00
Şönt Kapasitör Sayısı	4	Şönt (enjekte)	-0,0 209,60
Branşman Sayısı	245	Kayıplar (I <sup>2</sup> *Z)	<b>9,01</b> <b>151,45</b>
Transformatör Sayısı	66	Branşman Şarj (enjekte)	- 282,50

Hattaki en düşük/en yüksek gerilim değerleri ve aktif/reaktif güç kayıpları Tablo 12'de gösterilmiştir.

**Tablo 12.** DTBO Algoritması Sonuçlarına Göre Elde Edilen Gerilim Değerleri

	Minimum		Maksimum	
	Değer	Bara No	Değer	Bara No
Gerilim Değeri	1,011 p.u	148	1,056 p.u	100
Gerilim Açısı	-5,400 derece	175	5,020 derece	105
Aktif Güç Kaybı	---		0,250 MW	81-55
Reaktif Güç Kaybı	---		13,190 MVA <sub>r</sub>	105-102

Tablo 7 ve Tablo 12 arasındaki veriler dikkate alındığında meta-sezgisel arama algoritmasının hem serbest çalışma hem de deterministik yaklaşım metodundan daha iyi sonuçlar ürettiği görülmektedir. Hattaki aktif güç kaybının minimum olması ve güç dağıtım sistemine ait gerilim değerlerinin  $\pm 5\%$  sınırlar içerisinde salınım yapması arama algoritmasının gücünü ortaya koymaktadır.

### Senaryo III

Senaryo-III'te DTBO arama algoritması yardımıyla 17 EAŞI'nin konumlandırılması gerçekleştirilmiştir. Toplam 93 parametre değişkeninin optimizasyonu yapılmıştır. 76 değişken, 38 üreticinin aktif ve reaktif güç değerini optimize ederken, geri kalan 17 değişken ise EAŞI'lerin konum değerini optimize etmektedir. Optimizasyon sonucu elde edilen EAŞI'lerin konum ve güç değerleri, serbest çalışma ve Lagrange yaklaşımı ile güç akışının gerçekleştirilmesinde de kullanılmıştır. Senaryo III'de optimum baralara bağlanmış EAŞI'lerin şebekeden toplamda 34 MW güç çektiği düşünülmüştür. Sistem önceki senaryolarda olduğu gibi, amaç fonksiyonunu aktif güç kaybının minimize edilmesi olarak belirlenmiştir. Bu amaçla, 3 farklı metot kullanılarak optimal yük akışı gerçekleştirilmiştir.

### Şarj İstasyonunun Optimal Noktalara Konumlandırıldığı Durum

200 baralı dağıtım hattının puant yük değerleri altında, 17 adet EAŞI'nin konumlandırma çalışması DTBO algoritması yardımıyla gerçekleştirildi. Elde edilen EAŞI bara numaraları sırasıyla 1, 5, 25, 26, 46, 52, 55, 65\*, 73, 105, 125, 147, 194 olarak hesaplandı. Yapılan optimizasyon çalışması neticesinde 65\* numaralı baraya nominal EAŞI kurulu gücünün 5 katı büyüklüğünde şarj istasyonunun kurulmasının uygun olduğu hesaplanmıştır. Maksimum talep güç (yüklenme) verileri altında yapılan çalışma neticesinde generatörlerin aktif/reaktif güç çıkışlarının optimizasyonu sonucunda elde edilen güç akış değerleri Tablo 13'de sunulmuştur.

**Tablo 13.** Şarj İstasyonlarının Optimum Noktalara Konumlandırıldığı Durum

Fider No	Serbest Çalışma Durumu		Deterministik Yöntem		Meta-sezgisel Algoritma Yardımı ile Çözüldüğünde	
	P <sup>Güçü</sup> <sub>çıkış</sub> (MW)	Q <sup>Güçü</sup> <sub>çıkış</sub> (MVAR)	P <sup>Güçü</sup> <sub>çıkış</sub> (MW)	Q <sup>Güçü</sup> <sub>çıkış</sub> (MVAR)	P <sup>Güçü</sup> <sub>çıkış</sub> (MW)	Q <sup>Güçü</sup> <sub>çıkış</sub> (MVAR)
49	1,3600	0,9474	4,5300	0,6862	1,5073	0,8491
50	1,3600	1,2630	4,5300	0,8112	2,3407	1,0959
51	1,3600	0,8240	4,5300	0,7007	2,4179	0,7085
52	1,3600	1,4559	4,5300	0,7510	4,4952	1,1574
53	2,7200	0,8537	9,0700	1,1680	2,7937	0,7673
65	86,5000	1,4099	86,5000	-3,8932	86,5000	0,9816
67	1,4100	-0,8486	4,7000	-0,5333	1,4119	-1,4067
68	8,3800	-0,4847	27,9200	-0,4109	14,381	-0,7781
69	8,3800	-1,3427	27,9200	-2,7464	8,7017	-2,2054
70	8,3800	-0,6935	27,9200	-0,8452	8,3809	-1,0984
71	8,3800	-1,4831	27,9200	-3,2720	12,1000	-2,6054
72	8,3800	-1,6258	27,9200	-3,2829	18,9720	-3,1085
73	8,3800	-0,9113	27,9200	-1,3288	24,5930	-1,9061
76	1,2000	1,4167	4,0000	0,6257	2,2912	1,2902
77	0,7200	0,5050	2,4000	0,3575	0,7571	0,4733
78	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
79	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
90	0,9600	0,1395	3,2000	-0,3601	3,1103	0,1393
91	1,5000	0,6341	5,0000	-0,5510	4,9681	0,3542
92	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
94	5,4000	-2,4702	18,0000	-2,2000	17,8670	-3,1722
104	67,6000	3,3002	67,6000	-3,2567	67,6000	2,4112
105	154,8000	8,4573	154,8000	-2,5713	154,8000	7,1419
114	1,4000	1,2959	1,4000	0,2070	1,4000	1,0924
115	133,5000	12,7453	133,5000	19,1440	133,5000	11,3350
125	39,0200	7,3274	39,0200	6,2036	39,5490	6,6781
126	39,0200	12,6600	39,0200	15,9590	53,7180	11,7250
127	39,0200	26,2269	39,0200	22,6960	73,3480	23,5740
135	133,9200	21,6686	133,9200	24,4830	133,9200	19,7310
136	133,9200	25,3091	133,9200	23,5380	133,9200	22,9460
147	92,4000	8,7324	92,4000	9,0463	92,4000	8,0892
151	1,6200	0,0568	5,4000	-0,6212	1,87430	-0,4192
152	23,1700	0,4209	31,7800	-7,2508	54,7740	-0,5948
153	23,1700	0,1350	31,5660	-2,2841	24,5450	-1,4402
154	23,1700	0,3507	31,7800	-7,6142	47,5880	-2,2700
155	23,1700	0,3459	31,7800	-7,6432	63,6830	-1,9817
161	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
164	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
165	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
166	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
167	2,8200	-1,4161	9,4000	-1,0400	9,2398	-2,3834
168	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
169	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
170	2,8200	-0,7765	9,4000	-1,0400	9,3485	-1,2880
182	5,2500	2,2039	17,5000	1,4714	17,1000	1,2335
183	7,9800	5,8607	26,6000	2,3159	26,5780	3,1061
189* (Slack)	418,8724	-22,9090	170,7500	-46,6700	162,0800	-21,5210
196	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
197	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
<b>Toplam</b>	<b>1522,7724</b>	<b>111,58431</b>	<b>1519,0665</b>	<b>30,759304</b>	<b>1518,55922</b>	<b>78,70087</b>

Serbest çalışma, deterministik ve meta-sezgisel yöntemlerle gerçekleştirilen yük akış algoritması sonucunda hat kayıpları ve gerilim kararlılık indeks değerleri Tablo 14’de gösterilmiştir.

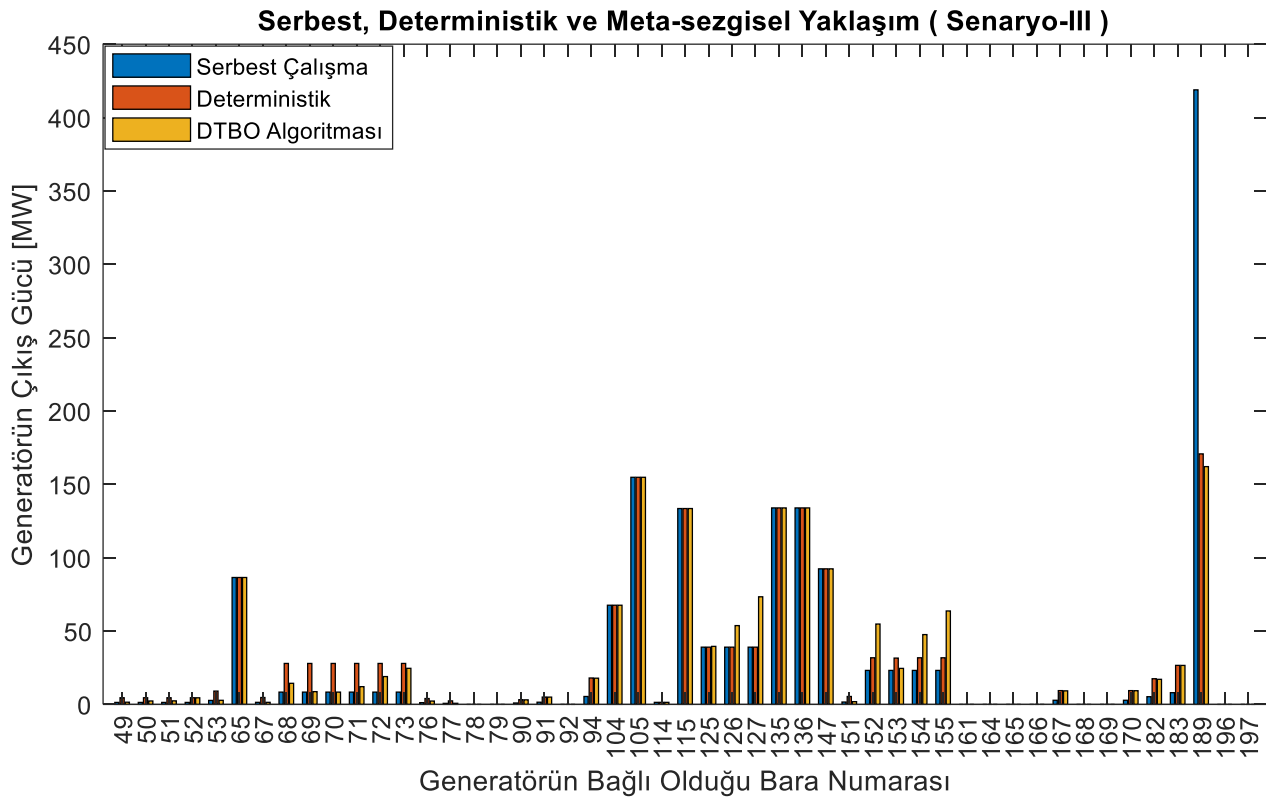
**Tablo 14.** 3-Farklı Yaklaşım Sonucunda Elde Edilen Hat Kayıpları Gerilim Kararlılık İndeks Sonuçları

	Serbest Çalışma Durumu için	Deterministik Yöntem ile Çözüldüğünde	Stokastik Arama Algoritması Yardımı ile Çözüldüğünde
Kayıp Değeri	<b>13,0824 MW</b> <b>181,7587 MVAR</b>	<b>9,376542 MW</b> <b>142,440627 MVAR</b>	<b>8,869225 MW</b> <b>150,29859 MVAR</b>
Mini/Maksi Bara Gerilim	1,0101 p.u @ Bara 148 1,0549 p.u @ Bara 100	1,0586 p.u @ bus 148 1,1000 p.u @ bus 100	1,011 p.u @ bus 148 1,056 p.u @ bus 100
Gerilim Kararlılık İndeksi	Maksimum VSI değeri 44.barada <b>0,8076</b> hesaplandı	Maksimum VSI değeri 119.barada <b>0,9712</b> hesaplandı	Maksimum VSI değeri 37.barada <b>0,5823</b> hesaplandı

DTBO algoritması ile optimize edilmiş ve elde edilen değişkenlerin değeri Tablo 13' de (son-2-sütün) gösterilmiştir. Geleneksel ve stokastik yaklaşımlar neticesinde elde edilen değerler tanımlanan limit aralıklarında kalmıştır. Toplam 34 MW'lık yükün dağıtım hattına, optimizasyon öncesi (senaryo 2) ve sonrası (senaryo 3) konumlandırılması sonucunda elde edilen değerlerin karşılaştırılması aşağıdaki gibidir.

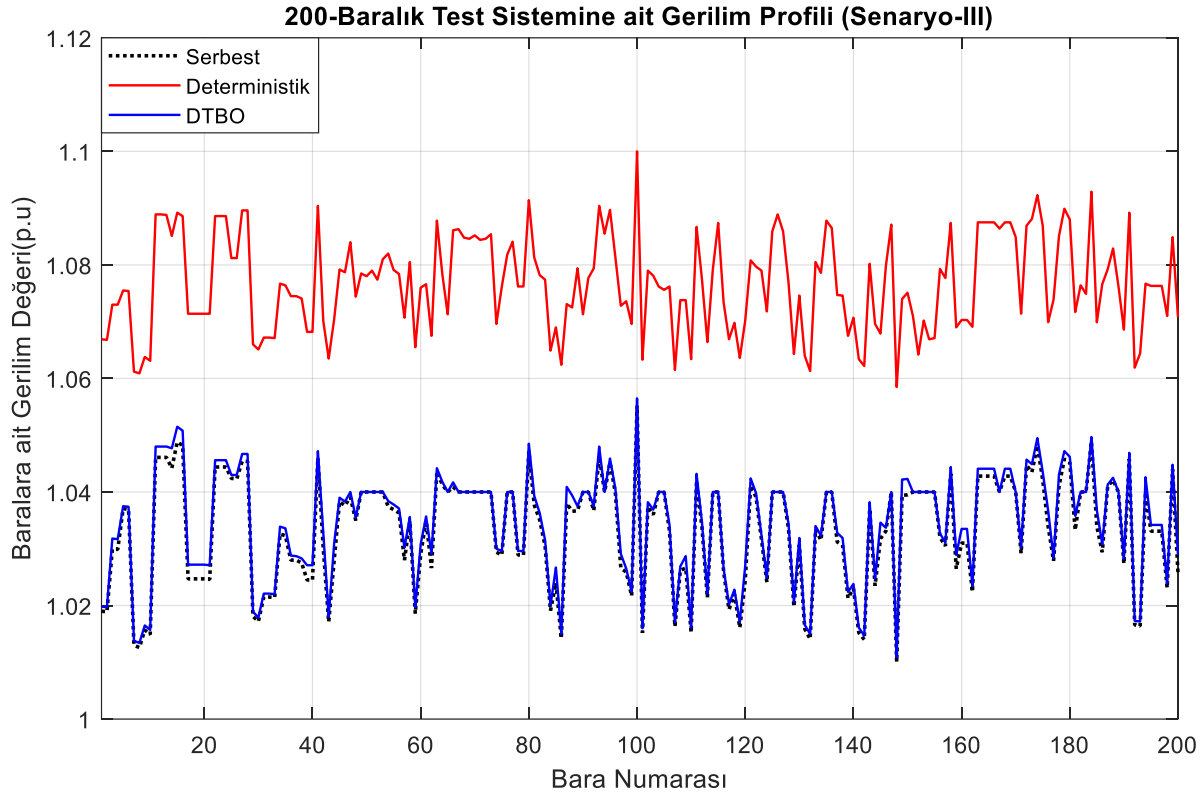
- Hatlarda meydana gelen güç kaybı (serbest çalışma durumunda), **13,306 MW'tan 13,083 MW** değerine,
- Deterministik yaklaşım ile optimizasyon neticesinde aktif güç kaybı **9,605 MW'dan 9,376 MW** değerine,
- DTBO algoritması ile generatörlerin çalışması ve EAŞİ'lerin konumlandırılması optimize edildiğinde ise bu değer **9,0119 MW'tan 8,869 MW** değerine düşmüştür.

3 durum karşılaştırıldığında en düşük aktif güç kaybının meta-sezgisel algoritma tarafından bulunan değerler ile elde edildiği söylenebilir. Optimal konumlandırma değerlerine göre generatörlerin çıkış güçleri optimize edildiğinde, hatlardaki kayıp miktarı sırasıyla %28,334 ve %32,21 azalmaktadır. Tablo 13'de gösterilen generatörlerin çıkış güçlerinin karşılaştırılması Şekil 6'da sunulmuştur. 189 numaralı baraya bağlı üreteçlerin optimizasyon öncesi ve sonrası çıkış güçleri karşılaştırıldığında üreticinin başlangıç durumuna göre  $\approx$ %38,69 kapasite ile çalışmasının daha optimum sonuçlar meydana getirdiği görülmüştür.



**Şekil 6.** Serbest Çalışma, Deterministik ve Meta-sezgisel Algoritma Yardımıyla Üreteçlerin Çıkış Güçlerinin Yük Akış Sonuçları (Senaryo-III)

Güç dağıtım sistemindeki baralara ait gerilim değerleri Şekil 7'de gösterilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere optimizasyon sonucunda her baranın gerilim değeri müsaade edilen sınır değerler içerisinde bulunmaktadır ve ortalama değeri ise 1.0345 p.u değerindedir.



**Şekil 7.** 3-Farklı Yaklaşım ile Gerçekleştirilen Yük Akışı Sonrasında Baralara ait Gerilim Değerleri

Lagrange yaklaşımı kullanılarak üreticilerin güç üretim optimizasyonu sonucunda hatta ait parametre değerleri Tablo 15’de sunulmuştur.

**Tablo 15.** Deterministik Yöntem ile Gerçekleştirilen Optimizasyon Sonrasına ait Hat Değerleri

Hatta İlişkin Değerler		Hat Kapasitesi	P (MW)	Q (MVar)
Bara	200	Toplam Gen. Kapasitesi	3379,6	-420,3 ile 1436,1
Üreteç	49	On-line Kapasite	2997,5	-377,9 ile 1241,7
Aktif Üreteç Sayısı	38	Üreteç (Aktif)	1519,1	30,8
Bağlı Yük Sayısı	119	Yük Miktarı	1509,7	420,5
Sabit Yük Sayısı	119	Sabit Yük Değeri	1509,7	420,5
Dağıtık Yük Sayısı	0	Dağıtık Yük Değeri	0,0	-0,0
Şönt Kapasitör Sayısı	4	Şönt (enjekte)	-0,0	226,0
Branşman Sayısı	245	Kayıplar ( $I^2 \cdot Z$ )	9,38	142,44
Transformatör Sayısı	66	Branşman Şarj (enjekte)	-	306,2

Hattaki en düşük/en yüksek gerilim değerleri ve aktif/reaktif güç kayıpları Tablo 16’da gösterilmiştir.

**Tablo 16.** Gerilim Değerine ait Değerler

	Minimum		Maksimum	
	Değer	Bara No	Değer	Bara No
Gerilim Değeri	1,059 p.u.	148	1,100 p.u.	100
Gerilim Açısı	-5,360 derece	148	5,39 derece	65
Aktif Güç Kaybı	---		0,25 MW	63-184
Reaktif Güç Kaybı	---		11,99 MVar	105-102

Meta-sezgisel arama algoritması (DTBO) yardımıyla 93 parametrenin aynı anda optimizasyonu sonucu elde edilen değerler kullanıldığında hattın ürettiği parametreler Tablo 17’de gösterilmiştir.

**Tablo 17.** Meta-sezgisel Yöntem ile Gerçekleştirilen Optimizasyon Sonrasına ait Hat Değerleri

Hatta İlişkin Değerler	Hat Kapasitesi	P (MW)	Q (MVar)
Bara	200	Toplam Gen. Kapasitesi	3379,6
Üreteç	49	On-line Kapasite	-420,3 ile 1436,1
Aktif Üreteç Sayısı	38	Üreteç (Aktif)	2997,5
Bağlı Yük Sayısı	119	Yük Miktarı	1518,6
Sabit Yük Sayısı	119	Sabit Yük Değeri	78,70
Dağıtık Yük Sayısı	0	Dağıtık Yük Değeri	1509,7
Şönt Kapasitör Sayısı	4	Şönt (enjekte)	420,50
Branşman Sayısı	245	Kayıplar ( $I^2 \cdot Z$ )	0,0
Transformatör Sayısı	66	Branşman Şarj (enjekte)	-0,00
			8,87
			150,30
			-
			282,60

DTBO algoritması yardımıyla hattın optimize edilmesi durumundaki hattaki en düşük/en yüksek gerilim değerleri ve aktif/reaktif güç kayıpları Tablo 18’de gösterilmiştir.

**Tablo 18.**DTBO Algoritması Sonuçlarına Göre Elde Edilen Gerilim Değerleri

	Minimum		Maksimum	
	Değer	Bara No	Değer	Bara No
Gerilim Değeri	1,011 pu	148	1,056 pu	100
Gerilim Açısı	-5,470 derece	175	4,930 derece	105
Aktif Güç Kaybı	-	-	0,250 MW	81-55
Reaktif Güç Kaybı	-	-	12,850 MVar	105-102

Tablo 13 ve Tablo 18 arasındaki veriler dikkate alınır meta-sezgisel algoritmanın ürettiği sonuçların, deterministik çözüm metodundan daha iyi çıktılar sunduğu söylenebilir. Fakat stokastik aramaya dayalı optimizasyon metodlarının çözüme ulaşma süresi, geleneksel yaklaşımlara göre daha uzundur. Bunun yanı sıra meta-sezgisel algoritmalar, aynı problem setinde, benzer koşullarda aynı değeri üretememesi de zayıf yönleri arasındadır.

## SONUÇ

Bu çalışmanın amacı, elektrikli araç şarj istasyonlarının 200 baralı dağıtım hattına optimum şekilde konumlandırılmasıdır. Çalışma, 3 farklı senaryo ve her bir senaryo altında 3 farklı yaklaşım göz önüne alınarak gerçekleştirilmiştir. İlk senaryoda optimum yük akış problemi, serbest çalışma, Lagrange katsayı yöntemine dayanan deterministik yaklaşım ve güncel meta-sezgisel bir algoritma olan DTBO optimizasyon algoritması yaklaşımı ile çözülmüştür. Buradaki amaç, üreteçlerin aktif/reaktif üretim güçlerinin kontrol edilerek, dağıtım hattındaki aktif güç kayıplarının minimizasyonunun önerilen yöntemler ile gerçekleştirilmesidir. İkinci senaryoda, her biri 2 MW olan 17 adet EAŞİ'nin (toplam 34 MW) güç dağıtım hattına rastgele dağıtılarak optimum güç akışının yapılması sağlanmıştır. Üçüncü senaryoda ise 34 MW'lık EAŞİ'lerin konumlandırılması DTBO arama algoritması ile gerçekleştirilmiştir. Optimizasyon çalışması sonucunda EAŞİ'lerin baralara optimal konumlandırılması yapılmış ve optimum güç akışı I. ve II. senaryoya benzer şekilde gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre EAŞİ'lerin rastgele baralara konumlandırılmasının ekonomik açıdan ve elektriksel olarak bazı olumsuzluklara neden olduğu görülmüştür. Hattaki aktif güç kaybının artması ekonomik açıdan hem üreticiye hem de dolaylı olarak da tüketiciye fazladan maliyet getirmektedir. Elektriksel açıdan ise dağıtım hatlarında fiziki şartların aşılmasına (aşırı akım ve güç talebi) ya da hattaki gerilim profilinde belirlenen sınırlar dışında düşmelere/yükselmelere neden olmaktadır. DTBO algoritması yardımıyla optimal şekilde EAŞİ'lerin konumlandırılması sonucunda hattaki kayıpların %32 seviyesinde düştüğü görülmüştür. Bu da algoritmanın EAŞİ konumlandırma probleminin çözümünde etkin olduğunu ve üstünlüğünü göstermektedir.

## TEŞEKKÜR

Bu çalışma Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından 124E002 sayılı 1001-Projesi olarak desteklenmiştir. Değerli destekleri için TÜBİTAK'a teşekkür ederiz.



## KAYNAKLAR

- Adnan, N., Md Nordin, S., bin Bahruddin, M. A., & Ali, M. (2018). How trust can drive forward the user acceptance to the technology? In-vehicle technology for autonomous vehicle. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 118, 819–836. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.tra.2018.10.019>
- Ahmad, F., Iqbal, A., Ashraf, I., Marzband, M., & Khan, I. (2022). Optimal location of electric vehicle charging station and its impact on distribution network: A review. *Energy Reports*, 8, 2314–2333. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.01.180>
- Birchfield, A. B., Xu, T., Gegner, K. M., Shetye, K. S., & Overbye, T. J. (2017). Grid Structural Characteristics as Validation Criteria for Synthetic Networks. *IEEE Transactions on Power Systems*, 32(4), 3258–3265. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2016.2616385>
- Cıkan, M., & Cıkan, N. N. (2023). Optimum allocation of multiple type and number of DG units based on IEEE 123-bus unbalanced multi-phase power distribution system. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 144. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2022.108564>
- Cıkan, M., & Kekezoglu, B. (2022). Comparison of metaheuristic optimization techniques including Equilibrium optimizer algorithm in power distribution network reconfiguration. *Alexandria Engineering Journal*, 61(2), 991–1031. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.aej.2021.06.079>
- Dehghani, M., Trojovská, E., & Trojovský, P. (2022). A new human-based metaheuristic algorithm for solving optimization problems on the base of simulation of driving training process. *Scientific Reports*, 12(1), 9924. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-14225-7>
- Ge, S., Feng, L., & Liu, H. (2011). The planning of electric vehicle charging station based on Grid partition method. 2011 International Conference on Electrical and Control Engineering, 2726–2730. <https://doi.org/10.1109/ICCEENG.2011.6057636>
- Glover, J. D., Sarma, M. S., & Overbye, T. J. (2016). *Power\_system\_analysis\_and\_design\_5th*. Cengage Learning.
- Islam, M., Shareef, H., & Mohamed, A. (2015). A Review of Techniques for Optimal Placement and Sizing of Electric Vehicle Charging Stations. *Przegląd Elektrotechniczny*, 91, 122–126. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:113450868>
- Doğanşahin, K., & Cıkan, M. (2023). A new line stability index for voltage stability analysis based on line loading. *Journal*, 1(1), 23–30.
- Kathiravan, K., & Rajnarayanan, P. N. (2023). Application of AOA algorithm for optimal placement of electric vehicle charging station to minimize line losses. *Electric Power Systems Research*, 214, 108868. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.epsr.2022.108868>
- Mozafar, M. R., Moradi, M. H., & Amini, M. H. (2017). A simultaneous approach for optimal allocation of renewable energy sources and electric vehicle charging stations in smart grids based on improved GA-PSO algorithm. *Sustainable Cities and Society*, 32, 627–637. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scs.2017.05.007>
- Nacar Cıkan, N., & Cıkan, M. (2024). Reconfiguration of 123-bus unbalanced power distribution network analysis by considering minimization of current & voltage unbalanced indexes and power loss. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 157, 109796. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2024.109796>
- Nurmuhammed, M., & Karadağ, T. (2021). Elektrikli Araç Şarj İstasyonlarının Konumlandırılması ve Enerji Şebekesi Üzerine Etkisi Konulu Derleme Çalışması. In *Gazi University Journal of Science Part A: Engineering and Innovation* (Vol. 8, Issue 2, pp. 218–233). Gazi University.
- Pal, A., Bhattacharya, A., & Chakraborty, A. K. (2021). Allocation of electric vehicle charging station considering uncertainties. *Sustainable Energy, Grids and Networks*, 25, 100422. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.segan.2020.100422>
- Parker, N., Breetz, H. L., Salon, D., Conway, M. W., Williams, J., & Patterson, M. (2021). Who saves money buying electric vehicles? Heterogeneity in total cost of ownership. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 96, 102893. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.trd.2021.102893>

Reddy, M. S. K., & Selvajothi, K. (2020). Optimal placement of electric vehicle charging station for unbalanced radial distribution systems. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 0(0), 1–15. <https://doi.org/10.1080/15567036.2020.1731017>

Saadat, H. (2010). *Power System Analysis* (3rd ed.). PSA Pub.

Tuan, L. A. (2017). Impacts of fast charging of electric buses on electrical distribution systems. *CIREN - Open Access Proceedings Journal*, 2017(1), 2350-2353(3). <https://digital-library.theiet.org/content/journals/10.1049/oap-cired.2017.0802>

Yuvaraj, T., Devabalaji, K. R., Kumar, J. A., Thanikanti, S. B., & Nwulu, N. I. (2024). A Comprehensive Review and Analysis of the Allocation of Electric Vehicle Charging Stations in Distribution Networks. *IEEE Access*, 12, 5404–5461. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3349274>

Zhou, M., Long, P., Kong, N., Zhao, L., Jia, F., & Campy, K. S. (2021). Characterizing the motivational mechanism behind taxi driver's adoption of electric vehicles for living: Insights from China. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 144, 134–152. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.tra.2021.01.001>

Zimmerman, R. D., Murillo-Sánchez, C. E., & Thomas, R. J. (2011). MATPOWER: Steady-State Operations, Planning, and Analysis Tools for Power Systems Research and Education. *IEEE Transactions on Power Systems*, 26(1), 12–19. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2010.2051168>



# Kahramanmaraş Sütçü İmam University Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 03.10.2023  
Kabul Tarihi : 21.03.2024

Received Date : 03.10.2023  
Accepted Date : 21.03.2024

## MARMARA DENİZİ'NDE GÖRÜLEN MÜSİLAJIN ORTADAN KALDIRILMASINA YÖNELİK POLİTİKALARIN SİSTEM DİNAMİĞİ İLE İNCELENMESİ

### EXAMINING THE POLICIES FOR ELIMINATION OF MUCILAGE IN THE SEA OF MARMARA VIA SYSTEM DYNAMICS

*Duygun Fatih DEMİREL*<sup>1\*</sup> (ORCID: 0000-0001-8284-428X)  
*Eylül Damla GÖNÜL-SEZER*<sup>2</sup> (ORCID: 0000-0002-9237-0468)

<sup>1</sup> İstanbul Kültür Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye  
<sup>2</sup> Yeditepe Üniversitesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, İstanbul, Türkiye

\*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Duygun Fatih DEMİREL, d.demirel@iku.edu.tr

#### ÖZET

Jeopolitik, ekonomik ve ekolojik açıdan önemli bir yeri olan Marmara Denizi'nde yaşanan kirlilikteki artış son yıllarda farklı çevrelerin dikkatini çekmekle birlikte özellikle 2020-2021 yıllarında yaşanan müsilaj problemi sorunun ciddiyetini ortaya koymuştur. Literatürde iklim değişikliği, topografik yapı, artan nüfus, sanayileşme, tarım aktiviteleri, atıksu arıtma sistemlerinde kullanılan teknolojinin yetersizliği, vb. etmenlerin müsilaj oluşumunu tetiklediği öne sürülmektedir. Müsilaj sorununun çözümüne yönelik çeşitli stratejiler öne sunulmakla birlikte bu stratejilerin ne gibi sonuçlar doğuracağına ilişkin sayısal bir çalışma bulunmamaktadır. Bu amaçla bu makalede Marmara Denizi'nde görülen müsilaj olgusunu modellemek ve sorunu çözmeye yönelik politikaların etkilerini incelemek üzere sistem dinamiği yaklaşımına dayalı bir benzetim modeli sunulmaktadır. Önerilen model müsilaja neden olan temel mekanizmalar ile müsilajın ekonomik etkilerini temsil etmekte olup müsilaj problemini ortadan kaldırmaya yönelik çeşitli stratejilerin etkinlik seviyelerini farklı senaryolarla ortaya koymaktadır. Elde edilen bulgulara göre ileri biyolojik arıtma seviyelerinin artırılması, tarım ve hayvancılık aktiviteleri için alınacak önlemler ve bölge nüfus artışına karşı alınacak önlemlerin bir arada uygulanmasının Marmara Denizindeki müsilaj riskini sınırlandıracağı sonucuna varılmaktadır.

**Anahtar Kelimeler:** Müsilaj, sistem dinamiği, Marmara Denizi, deniz kirliliği

#### ABSTRACT

The increasing pollution in the Marmara Sea, which is critical in terms of geopolitical, economic, and ecological aspects, attracts the attention of different circles, whereas the mucilage phenomenon of 2020-2021 has revealed the seriousness of the issue. In literature, it is claimed that factors like climate change, topographic structure, increasing population, industrialization, agricultural activities, and insufficient wastewater treatment technologies trigger the mucilage formation. Various strategies are suggested to solve the problem; yet, there is no quantitative study on the consequences of the proposed strategies. Therefore, in this study, a simulation model based on the system dynamics approach is presented to model the mucilage phenomenon in the Marmara Sea and to examine the effects of policies aiming to solve the problem. The proposed model represents the mechanisms mucilage formation and its economic effects; and displays the effectiveness of various strategies to eliminate the problem. According to the findings, it is concluded that combination of the policies of increasing advanced biological treatment levels, measures to be taken for agricultural and farming activities, and the measures to be taken against population growth in the region will limit the risk of mucilage in the Marmara Sea.

ToCite: DEMİREL, D.F., & GÖNÜL-SEZER, E.D., (2024). MARMARA DENİZİ'NDE GÖRÜLEN MÜSİLAJIN ORTADAN KALDIRILMASINA YÖNELİK POLİTİKALARIN SİSTEM DİNAMİĞİ İLE İNCELENMESİ. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 27(2), 364-385.

**Keywords:** Mucilage, system dynamics, the Marmara Sea, marine pollution

## GİRİŞ

Akdeniz ve Karadeniz arasında bir geçiş yolu niteliğinde olan Marmara Denizi Türkiye ve Avrasya için ekolojik, ekonomik ve jeopolitik açıdan oldukça önemli bir yere sahip bir iç denizdir. 2021 Adrese Dayalı Nüfus Kayıt Sistemi'ne göre Marmara Denizi'ne kıyısı olan illerde (İstanbul, Kocaeli, Yalova, Bursa, Balıkesir, Çanakkale ve Tekirdağ) 24,2 milyonun üzerinde kişi ikamet etmekte, bu da tüm Türkiye nüfusunun yaklaşık %28,62'sine denk gelmektedir (TÜİK, 2022a). Marmara Denizi'ne komşu iller özellikle İstanbul, Kocaeli ve Bursa başta olmak üzere sanayi, ticaret, finans, hizmet, lojistik ve turizm sektörleri açısından Türkiye'de öncü konumdadır.

Sanayileşmenin ve kıyı boyunca kentleşmenin yoğun olduğu ve nüfusun her geçen gün hızla arttığı bölgede endüstriyel ve tarımsal aktiviteler sonucu ortaya çıkan atıksu ile evsel ve kentsel atıksuların deşarjına bağlı kirlenmeler Marmara Denizi ve havzasındaki diğer su kaynakları üzerinde ciddi boyutlarda olumsuz etkilere sahip olduğu bilinmektedir (Doğan, 2013). Marmara Denizi'ne deşarj edilen atıksuların önemli bir kısmı arıtmadan geçiriliyor olsa da tüm arıtma tesislerinde ileri seviye biyolojik atıksu arıtma yöntemlerinin uygulanmıyor oluşu ve tarım kaynaklı su kirlenmelerine yönelik hiçbir arıtmanın yapılmıyor oluşu Marmara Denizi kimyasal yapısının negatif yönde değişimine yol açmaktadır (Taşdemir, 2002). Marmara Denizi Havzası'nın kirlenmesine ve müsilaaj vakalarına sebep olan temel etkenler İstanbul Boğazı yoluyla Karadeniz'den gelen üst tabaka suyundaki mevcut kirlilik, sanayi kaynaklı atıksular, evsel ve kentsel atıksular ile özellikle Susurluk Nehri ile taşınan tarımsal aktiviteler sonucu ortaya çıkan azot ve fosfor yükü, doğal bitki örtüsü kaynaklı oluşan azot ve fosfor yükleri, balıkçılık faaliyetleri ve deniz taşımacılığı sırasında ortaya çıkan kirlilik olarak sıralanabilir (Öztürk vd., 2021).

Marmara Denizi'nde uzun yıllardır giderek artan kirliliğin deniz ekosistemini olumsuz etkilediği ve bölgede bulunan canlı sağlığını tehdit ettiği tüm çevrelerce bilinmekle birlikte özellikle 2020-2021 yıllarında neredeyse tüm deniz yüzeyini kaplayan ve derinliği yer yer 100 metreye kadar inen yoğun müsilaaj patlaması kamuoyunda büyük yankı uyandırmıştır. Uzmanların tehlikenin boyutuna dikkat çekmesiyle mevcut müsilaaj problemini ortadan kaldırmaya ve gelecekte müsilaajın Marmara Denizi için yeniden tehdit unsuru olmasını önleme amaçlı birçok politika önerilmiş, müsilaaja sebep olan temel mekanizmaların açıklanmasına çalışılmıştır. Bu politikalar arasında müsilaajın deniz yüzeyinden toplanması, ileri atıksu arıtma sistemlerine geçişin hızlandırılması, tarım aktivitelerinden kaynaklı besin maddelerinin denize deşarjının kontrol edilmesi gibi öneriler yer almaktadır (Apak, 2021; Aydın, 2021; Bedük vd., 2021; Yücel vd., 2021; Yümün ve Kam, 2021). Her ne kadar yüzeyde gözlemlenen müsilaaj tabakası 2022 yılı itibarı ile ortadan kalkmış olsa da bazı bilim insanları Marmara Denizi yüzey suyunun altındaki katmanlarda halen müsilaajın yoğun olarak mevcut olduğunu, bu durumun da kısa ya da yakın gelecekte tekrar yoğun ölçekli bir çevre problemine yol açma potansiyelinin yüksek olduğunu belirtmektedirler. Bu sebeple müsilaaja neden olan mekanizmaların incelenerek müsilaaj oluşumunu engelleyici, mevcut problemi ortadan kaldıracı ve tekrar bir tehdit olarak ortaya çıkmasını önleyici politikaların geliştirilmesi elzemdir. Hali hazırda birçok kamu ve sivil toplum kuruluşu ile bilim çevreleri tarafından bu tarz politikalar ve çözüm önerileri sunulmuş olmakla birlikte önerilen yöntemlerin kısa ve uzun vadeli ekolojik, sosyal ve ekonomik etkilerinin sayısal bir teknikle değerlendirildiği bir çalışma literatürde mevcut değildir.

## Çalışmanın Amacı ve Kapsamı

Bu çalışmada bahsi geçen nedenlerle Marmara Denizi'nde meydana gelen müsilaaj problemini ortadan kaldırmaya ve bu problemin gelecekte Marmara Denizi için yeniden tehdit unsuru olmasını önlemeye yönelik stratejilerin kısa ve uzun vadeli etkilerini incelemeye yönelik sistem dinamiği yaklaşımına dayalı bir benzetim modeli önerilmektedir. Bu bağlamda önerilen model ile müsilaaj oluşumuna neden olan temel yapıyı oluşturan değişkenler belirlenerek aralarındaki karmaşık ve çok yönlü nedensellikler, ilişkiler ve geri dönüşüm mekanizmaları matematiksel olarak tanımlanmakta ve müsilaajı ortadan kaldırma ya da önleme amaçlı çeşitli stratejilerin bu mekanizmaya kısa ve uzun vadeli etkilerinin neler olacağı incelenmektedir. Çalışma kapsamında bahsi geçen nedensellik ilişkileri önce bir nedensel döngü modeli ile arkasından bu modelden yola çıkılarak elde edilen stok-akış modeli ile temsil edilmektedir. Müsilaaj probleminin çözümüne yönelik politikaların müsilaaj oluşumu üzerindeki olası etkileri de çeşitli senaryolarla incelenmektedir. Sistem dinamiği yaklaşımının benzer çevre problemlerine sebep olan etmenler arasındaki karmaşık döngüsel ilişkilerin ve problemlerin çözümüne yönelik yöntemlerin etkinlik seviyelerinin incelenmesinde sıkça kullanıldığı bilinmekle birlikte müsilaaj probleminin analiz edilmesi ve engellenmesine yönelik politikaların olası

çıktılarının incelenmesine yönelik kullanımına literatürde rastlanılmamaktadır. Ancak sistem dinamiğine dayalı benzetim modelleri tam olarak bu tarz karmaşık ve dinamik problemlerdeki çok boyutlu, doğrusal olmayan ve çok yönlü nedensellik ilişkilerini temsil edebilecek araçlar niteliğindedir.

Bahsi geçen problem ve önerilen çözüm yöntemi de göz önüne alındığında bu çalışma literatüre aşağıda sıralanan katkıları sunmaktadır:

- Müsilaj problemine neden olan karmaşık ve dinamik mekanizmaların matematiksel olarak modellenmesi,
- Mevcut müsilaj problemini yok etmeye ve müsilajın ilerleyen zamanlarda tekrar tehdit edici bir unsur olmasını engellemeye yönelik politikaların etkinlik seviyelerinin analiz edilmesinde karar vericilere yardımcı olabilecek nitelikte bir benzetim modelinin geliştirilmesi,
- Sistem dinamiği yaklaşımının müsilaj probleminin modellenmesinde ilk defa kullanıldığı çalışma olması.

İlerleyen bölümlerde sırası ile Marmara Denizi'ndeki müsilaj sorunu ile müsilaj konusunda literatürdeki mevcut çalışmalar incelenmekte, sistem dinamiği yaklaşımına dayalı önerilen kavramsal model ve stok-akış modeli sunulmaktadır. Model sonuçları mevcut durum için incelenmekte; müsilaj problemini yok etme ve müsilajın gelecekte yeniden ortaya çıkmasını önleme amaçlı çeşitli stratejilerin olası sonuçları farklı senaryolarla analiz edilmektedir. Son olarak elde edilen bulgular irdelenmekte ve çalışma sonuç kısmı ile sonlandırılmaktadır.

## MARMARA DENİZİ'NDEKİ MÜSİLAJ SORUNU

Türkiye ve bölge için ekolojik ve sosyoekonomik önemi açık olan Marmara Denizi, İstanbul ve Çanakkale Boğazları ve Ege Denizi'nin kuzey kısımları Kasım 2020'de görülmeye başlayan ve yoğunluğu ile kapladığı alan 2021 İlkbahar aylarında büyük ölçüde artan müsilaj sorunu ile karşı karşıya kalmıştır. Uzun zamandır Marmara Denizi'nin havza alanında görülen yoğun kentsel yapılaşma, aşırı nüfus artışı, hızlı sanayileşme, tarımsal ve evsel atıkların ciddi miktarda artması, Karadeniz'den İstanbul Boğazı yolu ile taşınan kirlilik gibi nedenlerle tehlikeli boyutlarda kirlendiği çeşitli bilimsel çalışmalarda gösterilmiştir (Balci ve Balkis, 2017; Polat ve Tuğrul, 1995). Marmara Denizi'nde zaman zaman çeşitli fitoplankton ve organizmaların sayısında saldırgan boyutta artışlar gözlemlense de (Calizza vd., 2015; Balkis vd., 2013; Isinibilir vd., 2011) Marmara Denizi'nde kayıtlara geçen ilk büyük boyutlu müsilaj olgusu 2007 tarihlidir (Aktan, Dede ve Çiftci, 2008). 2007 yılında başlayan ve 2008 yılında da devam eden müsilaj problemi Çanakkale ve İstanbul Boğazları ve Marmara Denizi kıyılarında oldukça etkili olduğu (Keleş, Yılmaz ve Zengin, 2020; Toklu-Ahçılı, Polat ve Balkis-Ozdelice, 2020; Isinibilir-Okyar, Ustun ve Orun, 2015) özellikle pelajik balıkçılık üzerindeki alarm boyutuna varan olumsuz etkisinin kamuoyu gündemini de sıkça meşgul ettiği görülmüştür (Demirel vd., 2023; Tüfekçi vd., 2010). Yoğun yapısı nedeniyle balıkçılık ve su ürünleri avcılığını engelleyen bu müsilaj olgusunun aynı zamanda Marmara Denizi'nde tür çeşitliliği açısından onarılması güç zararlar verdiği belirtilmiş, Marmara Denizi havzasında tanık olunan yoğun sanayileşme, kentleşme ve nüfus artışı görülmesine karşın aynı seviyede deniz ve su kaynaklarının kirlenmesini engelleyici önlemlerin alınmaması nedeniyle Marmara Denizi'nin oluşan atık yüklerini kaldıramayacak hale geldiği ifade edilmiştir (Artüz, 2008). Ayrıca. 2007-2008 yılında Marmara Denizi'nde yaşanan müsilaj patlamasında ani sıcaklık değişimleri, rüzgâr hızı ve yağış miktarlarındaki dalgalanmaların da etkili olduğunu bildirilmektedir (Yentur vd., 2013).

Marmara Denizi, Çanakkale Boğazı, Kuzey Ege ve İstanbul Boğazı'nda Kasım 2020'den itibaren tekrar görülmeye başlayan müsilaj, 2021 İlkbahar aylarında giderek yoğunlaşmış, konunun tüm Türkiye kamuoyu gündemine yansısıyla müsilajın deniz içerisinde hangi derinliğe yayıldığı ve içeriğinin ne olduğuna dair bilimsel araştırmalarla birlikte müsilaj sorununa neden olan etmenleri ortadan kaldırmaya ve mevcut müsilaj olgusunu bertaraf etmeye dönük çalışmalar başlatılmıştır. Çeşitli bilim insanları 2022 itibarıyla müsilajın deniz yüzeyinde olmasa da yüzey seviyesi altında halen mevcudiyetini koruduğunu dile getirmektedir.

Öztürk vd. (2021) tarafından hazırlanan Marmara Denizi'nde müsilaj sorunu ve çözümüne yönelik görüş ve önerilerin sıralandığı kapsamlı raporda müsilajın oluşumuna neden olan mekanizmal etkenlerin önemli kaynakları olarak evsel atıklar kaynaklı kirlilik, sanayi atıkların oluşturduğu kirlilik, tarımsal atıklardan kaynaklı kirlilik, deniz ulaşım araçlarının sebep olduğu atıklar ve diğer denizler ile su yollarından taşınan kirlilik yükleri gösterilmektedir. Yine aynı raporda müsilaj oluşumunun deniz canlılığının ve balıkçılığın olumsuz etkilenmesi, bölgedeki turizmin darbe alması, deniz araçlarının ve taşımacılığının zarar görmesi gibi ciddi olası sonuçlarından bahsedilmektedir. 2020 verilerine göre Marmara Denizi'ne deşarj edilen günlük yaklaşık 6,9 milyon m<sup>3</sup> suyun %53,22'si sadece ön arıtmaya tabi tutulmakta, %42,12'si ileri arıtmadan geçirilmekte, %4,66'si ise biyolojik arıtmadan geçirilmektedir (Öztürk vd.,



2021). Denize deşarj edilen atık suyun yanı sıra deniz suyu sıcaklığını etkileyen iklimsel faktörlerin de müsilaaj oluşumunda yeri olduğu bilinmektedir (Özalp, 2021).

Savun-Hekimoğlu ve Gazioğlu (2021) şu ana kadar Marmara Denizi'nde gözlemlenen en ciddi müsilaaj sorunuyla karşı karşıya olunduğunu ve müsilaajın artan su sıcaklıkları ile kirlilik, yeterli arıtma faaliyetlerinin yapılmaması, aşırı su ürünleri avcılığı gibi insan kaynaklı faktörlerle ortaya çıkarak deniz yaşamı, turizm ve ekonomiyi tehdit eder hale geldiğini bildirmektedir. Aynı çalışmada ayrıca müsilaaj probleminin dinamiğini bir nedensel döngü diyagramı ile modellemiş, modellerinde de fitoplanktonların artışına sebep olan etmenleri, oksijen konsantrasyonunu etkileyen indikatörler ve müsilaaja bağlı olarak balıkçılık ve turizm sektörleri incelenmiştir. Ancak bu model şu an için sadece açıklama amaçlı kavramsal bir model düzeyinde olup herhangi bir sayısal ilişki matematiksel denkleme dökülmemiştir. Benzer bir kavramsal model Gönül-Sezer ve Demirel (2022) tarafından da önerilmiş, ancak model sayısal analizlerin yapıldığı bir stok-akış modeline çevrilmemiştir.

Marmara Denizi'nde görülen son müsilaaj olayının çözümüne ve tekrar oluşumunun engellenmesine dair de çeşitli öneriler ortaya konulmuştur (Hanedar vd., 2023). Bazı belediyelerin deniz yüzeyinden çeşitli yöntemlerle görülen müsilaajı toplamasının etkin bir çözüm olmadığı, hatta deniz yüzeyinin ışık geçirgenliğinin artmasına paralel olarak fotosentez imkanının da artacağı için müsilaaj oluşumunun daha da tetiklenebileceğinin iddia edildiği çalışmalar da mevcuttur (Aydın, 2021). Mevcut sorunu kısa vadeli olarak ortadan kaldırmaya yönelik çeşitli yararlı bakterilerle müsilaajın bertaraf edilmesi, balıkçılık faaliyetlerinin durdurulması, reaktif oksijen dozajlama gibi önerilerin yanı sıra hiçbir önlem alınmadan geçmiş yıllarda olduğu gibi müsilaajın kendiliğinden kaybolmasının beklenmesi gibi önlemler sıralanmıştır. Ancak bu çözüm önerileri sadece mevcut problemi kısa süreli sonlandırmada etkili olabilir. Uzun vadede müsilaajın tekrar bir tehdit olmasını engellemek adına özellikle fosfor ve azot difüzyonunu kontrol altına alacak atıksu yönetim sistemlerinin etkin derecede kullanılması, mevcut atıksu tesislerinde gerekli iyileştirmelerin yapılması, ileri biyolojik arıtma teknikleri ile Marmara Denizi'ne verilen atıksu miktarının azaltılması, müsilaaj atığının farklı kullanımlarının araştırılması, aktif uydu sistemleri kullanılarak doğrudan gözlem yapılması, Marmara Denizi Havzası'nda yer alan sanayi ve evsel atıksuyun mutlaka ileri arıtmaya tabi tutulması gibi birçok çözüm önerisi sunulmuştur (Apak, 2021; Aydın, 2021; Bedük vd., 2021; Yücel vd., 2021; Yümün ve Kam, 2021).

## LİTERATÜRDEKİ MEVCUT ÇALIŞMALAR

Danovaro, Fonda ve Pusceddu (2009) müsilaajı deniz suyunun ısınması ve su katmanlarındaki tabakalaşma gibi etkenlerle küçük boyutlu topaklar; kilometrelerce alana yayılabilen ve deniz yüzeyini örten tabakalar, üst su katmanını işgal eden ipliksi ve ağsı oluşumlar ve zaman içerisinde çökerek ve deniz tabanını ve deniz canlıların üzerini örtebilen kalın tabakalar şeklinde tanımlamaktadır (Öztürk, 2021). Müsilaaj olgusu ile ilgili literatürde birçok bilimsel çalışma bulunmaktadır. Çalışmalar genel olarak müsilaaja neden olan kimyasal mekanizmalar (Iciglenceki vd., 2021; Liénart vd., 2016; Danovaro, Fonda ve Pusceddu, 2009; Oral, 2023; Tepić, Gašparović ve Ahel, 2009; Jannelli, Fazio ve Ambrosi, 2003), müsilaajı oluşturan organizmaların çeşitleri (Fuksi vd., 2018; Mrokowska ve Krztoń-Maziopa, 2024; Sartoni vd., 2008; Giani vd., 2003) müsilaajın görüldüğü bölgelerdeki topografik özellikler, müsilaajın deniz akıntıları ile ilişkisi, iklim değişimine bağlı deniz tuz seviyesi ve deniz suyu sıcaklık değişimlerinin müsilaaja etkileri (Danovaro, Fonda ve Pusceddu, 2009; Deserti vd., 2005; Kömüşçü vd., 2022) gibi konular üzerine yoğunlaşmaktadır. Müsilaajın deniz ekosistemine etkileri (Daban vd., 2023; Karlson vd., 2021) ve bertaraf edilme yöntemleri de diğer çalışma konuları arasındadır. Müsilaaj patlamasına konu olan yerler ise genel olarak Adriyatik Denizi'nin kuzeyi ve Tiran Denizi'dir.

Marmara Denizi'ni konu alan müsilaaj çalışmaları ise temel olarak, müsilaaj probleminde yol açan faktörlere (Akmaz, 2022; Ayaz, 2022; Kayhan ve Yön Ertuğ, 2022; Kam ve Yümün, 2021, Önce ve Yılmaz, 2024) müsilaajın alg patlamaları ve fitoplankton seviyelerindeki değişimler ile ilişkisi (Erdoğan, 2022; Eren, 2021; Polat vd., 2022; Tüfekçi vd., 2010), müsilaajın çeşitli coğrafi bilgi sistemleri ve uydu teknolojileri kullanılarak takibi (Colkesen vd., 2023; Eronat, 2022; Küçük vd., 2022; Kavzoğlu vd., 2021, Sefercik vd., 2023) ve deniz suyunun kimyasal yapısının müsilaaj patlaması esnasındaki durumuna (Öztürk ve Ediger, 2023, Yücel vd., 2021) odaklanmaktadır. Müsilaaj probleminin çözümüne yönelik önerilerin sıralandığı çalışmalar ise önerilen yöntemlerin etkilerinin test edilmesi hususunu göz ardı etmekte olup genel olarak konu ile ilgili uzmanların görüşlerine dayanmaktadır. Tüm bunlara ek olarak müsilaajı konu edinen çalışmalarda müsilaaja neden olan etmenler, insan kaynaklı sebepler, iklimsel faktörler ve müsilaaj görülen bölgelerin deniz akıntı yapıları incelense de tüm faktörleri dinamik bir sistem çerçevesinde bir arada inceleyen bir çalışma bulunmamaktadır.

## ÖNERİLEN SİSTEM DİNAMİĞİ MODELİ

Sistem Dinamiği (SD) klasik kesikli olay benzetimi yaklaşımından farklı olarak zamanın sürekliliğinin esas alındığı ve olaylar arası nedensellik ilişkilerinin döngüsel olarak tanımlandığı bir benzetim yöntemidir. Matematiksel altyapısı ise diferansiyel denklemler üzerinden kurgulanmaktadır. Literatürde SD yaklaşımına çeşitli problemlerin çözümüne yönelik strateji ve politika geliştirmek amacıyla sıkça başvurulduğu görülmektedir. Olaylar veya değişkenler arası dinamik ilişkilerin karşılıklı ya da dolaylı etkileşimlerle ifade edildiği bu yöntem tipik bir veri analizi ile ortaya konulamayacak zamana bağlı karmaşık ilişkileri ortaya çıkarmaya yaramaktadır. Böylece hem mevcut problemin oluşumunun açıklanması hem de problemlerin çözümüne yönelik planlanan strateji ve politikaların kısa ve uzun vadeli sonuçlarının incelenmesi mümkün kılınmaktadır.

Sistem Dinamiği, modelleme ve analizlerin karmaşık sistem davranışlarını ve etkileşimlerini de içerecek şekilde yapıldığı bir metottur (Sternan, 2000). Bu yaklaşımla model değişkenlerinin zaman içerisindeki davranışlarını incelemek mümkündür. Zamana bağlı bu değişim aslında matematiksel ifadeler sayesinde gözlemlenebilmektedir ve sistem dinamiğinde tüm matematiksel ifadeler temelde diferansiyel denklemler üzerine kurulur. Sistemin uzun yahut kısa vadede değişkenleri sayesinde yaşayacağı değişimler geri besleme döngüleri ve diğer dinamik etkileşimler sayesinde öngörülebilir olmaktadır (Maani ve Cavana, 2007). SD, çevre, sağlık, ekonomik ve sosyal problemlerin modellenmesi amacıyla kullanılmaktadır. Bütüncül bakış açısı sayesinde tek yönlü ilişki tanımları yerine tüm değişkenlerin birbirleriyle ilişkileri tanımlanır ve böylece bir değişken için uygulanacak politikanın veya yaşanacak bir değişimin, diğer değişkenleri ve aralarındaki nasıl değiştireceğini gözleme fırsatı sunmaktadır. Senaryo analizleri ve olası politikaların harmanlanması sonucunda gelecekteki durum hakkında bilgi edinilmesi temel amaçtır. Literatürde atıksu yönetimi (Dianati vd., 2019; Hallas vd., 2020; Demirel vd., 2022), katı atık bertarafı (Dianati vd., 2021), geri dönüşüm uygulamalarının etkilerinin analiz edilmesi (Liu vd., 2020; Xiao vd., 2020), sürdürülebilir çevre planlaması (Zhang vd., 2022; Luo vd., 2023), çevre kirliliğine yönelik engelleyici politikaların sonuçlarının incelenmesi (Yi vd., 2023), çevreci enerji sistemlerine yönelik uygulamaların etkinliklerinin araştırılması (Liu vd., 2019) gibi birçok çevre modellemesi konularında SD yaklaşımına başvurulduğu görülmektedir.

SD yaklaşımı, ekonomik, teknik, sosyo-ekonomik, sosyolojik ve biyolojik tüm sistemler için uygulanması oldukça esnek bir modelleme sunması ve kısa/uzun vadede sistemin farklı bakış açıları ile izlenebilmesini sağladığı için bu çalışma kapsamında uygulanacak yöntem olarak seçilmiştir. SD modelinin oluşturulmasında Stella 9.2.1 yazılımı kullanılmıştır. Çözüm yöntemini içeren akış şeması Şekil 1'de gösterilmektedir.



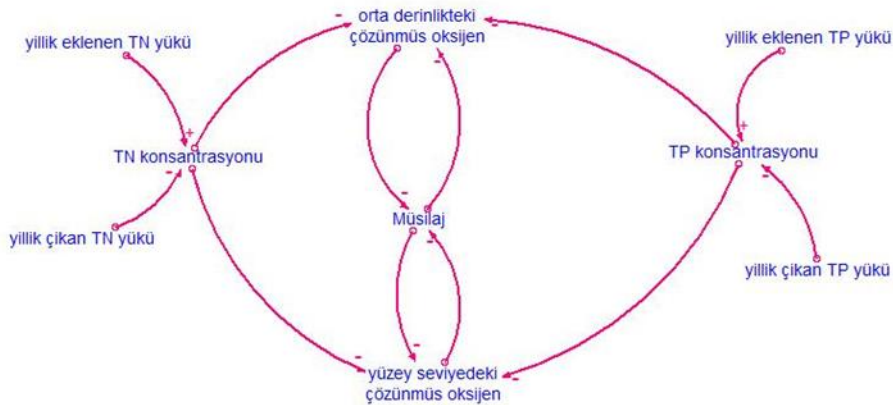
Şekil 1. Çalışma Kapsamında Önerilen Yöntemin Akışı

### Kavramsal Modelin Kurulması

Daha önceki bölümlerde de bahsedildiği gibi Marmara Bölgesi yoğun sanayileşmenin görüldüğü bir bölgedir. Bu durum da yeni iş olanaklarının ortaya çıkmasına yol açmakta, dolayısıyla da bölge nüfusunun giderek artmasına sebep olmaktadır. Nüfus artış nedeniyle yeni ihtiyaçlar doğmakta ve yine bu ihtiyaçların karşılanması amacıyla yeni kuruluşlar açılmakta ya da var olan kuruluşlar büyümektedir. Sanayileşme ve nüfus artışı da atıksu üretiminin artmasına yol açmaktadır. Bölgede yer alan atıksu arıtma tesisleri genel olarak ince ve kaba ayırıştırma işlemleri gerçekleştirilmekte, bu ayırıştırma işlemlerini takiben atıksular derin deniz deşarjı yöntemiyle Marmara Denizi'ne bırakılmaktadır (Burak, Bilge ve Ülker, 2022). Literatürde yer alan birçok araştırma, bahsi geçen "derin deşarj" atıksu bertaraf yöntemi ile Marmara Denizi ekosisteminin taşıyabileceği besin yükünden fazlasının deniz tabanına bırakıldığını ortaya koymuştur (Savun-Hekimoğlu ve Gazioğlu, 2021; Taş, Kuş ve Yılmaz, 2020; Çardak, Altuğ ve Türetken, 2015; Okuş vd., 2002). Bu çalışmalar neticesinde müsilaj oluşumuna neden olan en ciddi etkenin başında atık suların ileri seviyede arıtılmaması neticesinde yoğun besin içeriğine sahip olmaları gösterilebilir. Fazla miktarda besin taşıyan deniz suyundaki plankton seviyelerinde gözlenen ciddi artışlar da deniz bitki örtüsünü negatif doğrultuda etkilemektedir.

Deniz bitki örtüsüne ilişkin yaşanacak olumsuz durumlar iki ana sonucu doğurmaktadır: (i) deniz bitki örtüsündeki azalmaya bağlı olarak deniz canlılarının uygun yumurtlama alanlarını kaybetmesi ya da yumurtaların elverişsiz şartlar altında yeni bir canlıyı oluşturacak kadar olgunlaşmaması; (ii) bitki örtüsü miktarının azalmasına bağlı deniz suyundaki oksijen seviyesinin düşmesi ve bunun sonucu olarak deniz canlılarının yaşamının tehlikeye girmesi. Burada deniz canlılarının ölüm hızında oluşabilecek bir artış deniz suyunda tortulaşma hızını da ivmelendirecek; bu durumun neticesinde de deniz suyundaki oksijen seviyesi düşme eğilimi kazanacak ve müsilaj oluşumuna uygun koşullar meydana gelecektir.

Yukarıda verilen problem tanımına bağlı olarak bir kavramsal model oluşturulmuştur. Şekil 2'de görünen bu kavramsal modele göre, atık su miktarı üzerindeki toplam azot (TN) ve toplam fosfor (TP), yıllık eklenen TN yükü ve yıllık eklenen TP yükü olarak gösterilmektedir. Bunun yanı sıra yıllık çıkan TN yükü ve yıllık çıkan TP yükleri, Marmara Denizi'nin bir içdeniz olması dolayısıyla bağlantılı olduğu Akdeniz ve Karadeniz'e dağılan yükleri temsil etmektedir. Sene boyunca yaşanan TN ve TP yükü değişimleri sonucunda oluşan Marmara Denizi'ndeki TN ve TP konsantrasyonu bu değişkenlere bağlı olarak karakterize edilmiştir. Artan TN ve TP konsantrasyonu, yüzey ve orta derinlikteki çözünmüş oksijen seviyesini düşürmektedir. Oksijen seviyesinin azalması sonucunda müsilaj oluşumuna uygun bir ortam sağlamaktadır. Müsilaj oluşması durumunda ise denizin orta derinlik ve yüzeyindeki oksijen miktarı daha da düşecektir. Bir başka deyişle, müsilaj ve denizdeki çözünmüş oksijen seviyesi birbirini tetikleyerek belirlenen yöndeki değişimi körükleyen bir ilişki içine girecektir. Sistem dinamiği benzetim modelinde Marmara Denizi TN ve TP seviyeleri 'TN konsantrasyonu' ve 'TP konsantrasyonu' adı verilen stok değişkenleri ile temsil edilmektedir.



Şekil 2. Müsilaj Sorunu Kavramsal Modeli

### Stok-Akış Diyagramının Oluşturulması

SD benzetim modelinin kurulumu için temel yapı taşları ayrık olay benzetiminde kullanılanlardan farklıdır. Ayrık olay benzetimi süreçlerin sırası üzerine kurulu ve temelini kuyruk teorisinden alan bir yöntemdir. Daha çok operasyonel seviyede problemler için uygundur. SD ise sistemik düşüncenin bir uygulama alanıdır ve problem tanımı


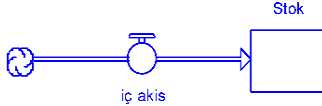




içerisinde yer alan unsurların arasındaki nedenselliğin üzerine kurulur. Dolayısıyla Tablo 1’de verilen temel yapı taşlarına eklenecek verilerin istatistiksel ön koşullara uyma zorunluluğu bulunmamaktadır.

Stok-Akış diyagramlarının oluşturulmasında öncelikle değişkenlerin hangi elemana karşılık geldiği belirlenmelidir. Ardından stok-akış diyagramının çizilmesi gerekmektedir. Bu kapsamda gerekli tüm göstergeler eklenerek model oluşturulur. Matematiksel denklemler stok, akış ve dönüştürücüler yardımıyla tanımlanır. Temel bir stok-akış diyagramı ile elde edilen matematiksel ilişki Denklem (1) ile açıklanabilir (Forrester, 1961):

$$Stok(t) = stok(t - 1) + \int_{t-1}^t [İçAkış - DışAkış]dt \quad (1)$$

Burada  $(t-1)$ , başlangıç zamanıdır ve  $t-(t-1)$ , veri toplama için geçen zaman aralığıdır. Bu, bir stok değişkeninin mevcut değerinin, önceki veya başlangıç değeri ve bu zaman aralığında karşılık gelen stok değişkeninin akışlarındaki net değişim ile ilişkili olduğu anlamına gelir.

**Tablo 1.** SD Yönteminin Yapı Taşları ve Anlamları

SD Yönteminin Yapı Taşları	Anlamı
	Stoklar birikimi simgeler. Bu birikim para, insan, iş gücü, enerji vb. birimlerde olabilir. Sistemin mevcut durumunu korur ve gösterirler.
	Akışlar, giriş ve çıkışlar olarak yorumlanabilir. Girişler, stok değişkenine belirli bir süre içinde, dış akışla stok değişkeninden bazı "malzemeleri" azaltır (tahliye eden) ya da içe akışla stok değişkenine yeni "malzeme" ekler (biriktirir). Akışlar tek yönlü yani sadece dışa ve sadece içe akış olarak gösterilebilir. Bunun yanı sıra çift yönlü akış, tek akış değişken üzerinde gösterilebilmektedir. Uygun matematiksel ilişki kurulduğunda iki yönü de tek akış değişkeni üzerinden ifade etmek mümkündür.
	
	
	Dönüştürücüler küçük dairelerle temsil edilir. Bunlar, stok ve akışlar arasındaki matematiksel ilişkileri ifade etmekte yardımcıdır.
	Konnektörler düz oklarla belirtilir. Oktaki nokta, aktarılan bilgilerin kaynağını belirtir. "+", ilişki içindeki değişkenlerden birindeki değişimin diğerinde de aynı yönlü etki yarattığını, "-“ ise değişkenlerden birindeki değişimin diğerinde zıt yönde etki yarattığını anlatır.

Literatüre göre organik kirleticiler, atıksular ile taşınmakta olan toplam azot (TN) ve toplam fosfor (TP) şeklinde tanımlanmaktadır (Ak ve Top, 2022). Şekil 3’te görüldüğü üzere, sistem dinamiği benzetim modelinde Marmara Denizi TN ve TP yükü ‘TN konsantrasyonu’ ve ‘TP konsantrasyonu’ adı verilen stok değişkenleri ile temsil edilmektedir.

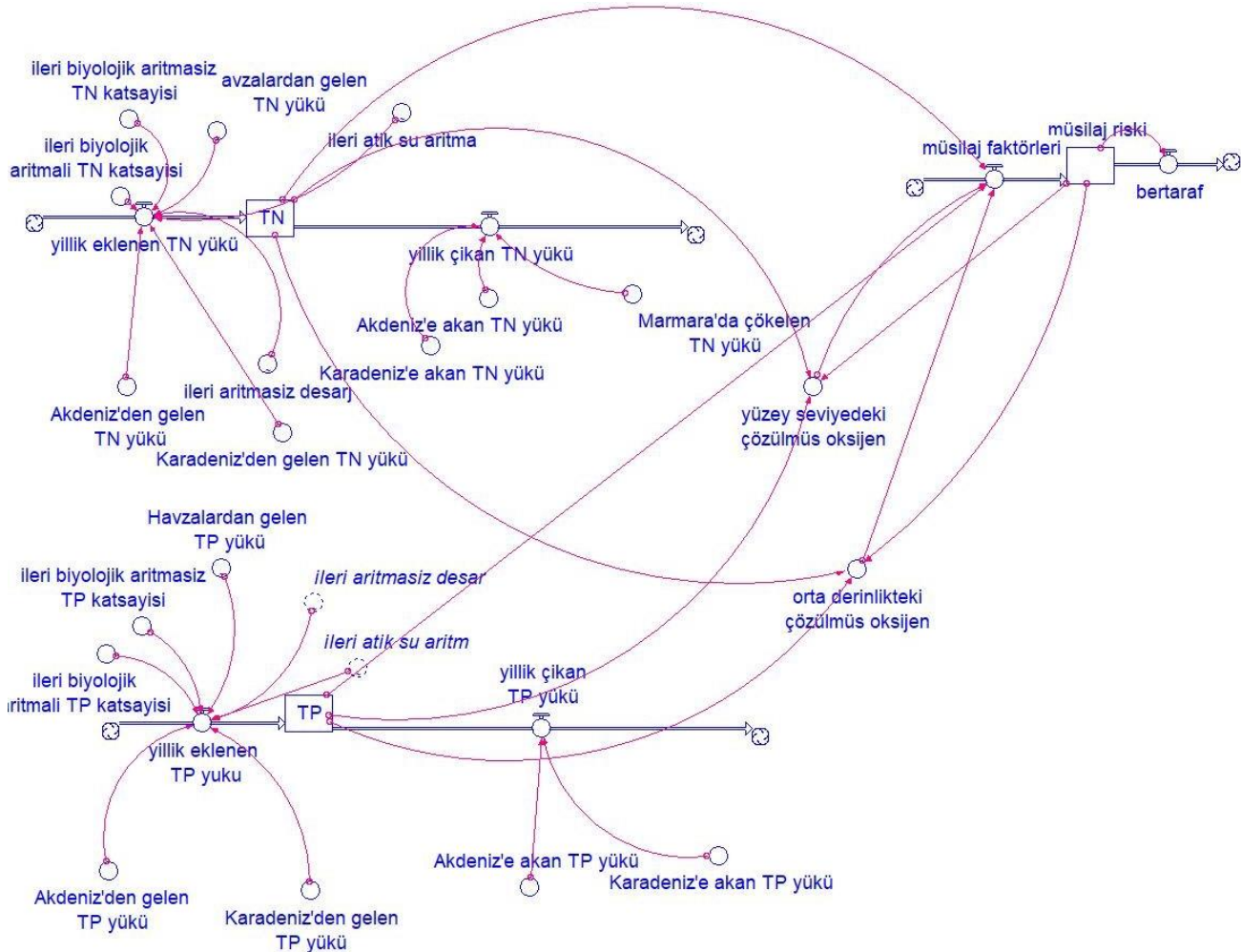
Marmara Denizi azot dinamiğinin gözlemlenebilmesi için oluşturulan ‘TN konsantrasyonu’ adlı değişken ‘yıllık eklenen TN yükü’ iç akış ve ‘yıllık çıkan TN yükü’ dış akış değişkenlerine bağlı olarak değişim göstermektedir. Yıl içerisinde eklenen TN yüküne etki eden faktörler sadece ‘ileri biyolojik atık su’ ve ‘ileri arıtmasız deşarj’ ile sınırlı değildir. Bu iki temel faktörün yanı sıra hayvancılık, bitkisel üretim ve arazi örtüsünden kaynaklanan azot oluşumu ‘havzalardan gelen TN yükü’ isimli değişken ile temsil edilmektedir. Bunların yanı sıra, Marmara Denizi’nin bir iç deniz olması dolayısıyla Akdeniz ve Karadeniz ile bağlantısı bulunmaktadır. Bu bağlantı nedeniyle Marmara Denizi’ne ‘Akdeniz’den taşınan TN yükü’, ‘Karadeniz’den taşınan TN yükü’ de hesaba katılmaktadır. ‘Yıllık çıkan TN yükü’ ise denizdeki akıntı nedeniyle ‘Karadeniz’e akan TN yükü’ ve ‘Akdeniz’e akan TN yükü’ yanı sıra azotun Marmara Deniz’inin dibine çökmesi sonucu oluşan ve ‘Marmara’ya çökelen TN yükü’ olarak ifade edilen bir değişken de ‘yıllık çıkan TN yükü’ ile ilişkilendirilmiştir.

TP dinamiği, temelde TN dinamik modeline benzer değişkenlerin fosfor için değerleri kullanılarak elde edilmiştir. Yine hayvancılık, bitkisel üretim ve arazi örtüsü kaynaklı fosfor oluşumu ‘havzalardan gelen TP yükü’ değişkeni altında hesaplanmaktadır ve ‘Akdeniz’den gelen TP yükü’ ile ‘Karadeniz’den gelen TP yükü’ ve atıksu bertarafı



sonucu ortaya çıkan TP yükü düşünülerek 'yıllık eklenen TP yükü' iç akış değişkeni elde edilmiştir. 'Yıllık çıkan TP yükü' dış akışında ise sadece 'Akdeniz'e akan TP yükü' ve 'Karadeniz'e akan TP yükü' kullanılarak yıllık çıkan TP yükü hesaplanmıştır. Buradaki fark fosforun azot gibi dibe çökmeyişinden kaynaklanmaktadır.

TN ve TP konsantrasyonu hem yüzey seviyedeki hem de orta derinlikteki çözülmüş oksijen seviyesini etkilemektedir. Denizde biriken organik kirleticilerin yarattığı oksijenden yoksun ortam müsilajın oluşumuna neden olan faktörlerdir. Bu nedenle tüm ilgili değişkenler, müsilaj faktörleri adı verilen akış değişkenini etkilemekte ve kurulan modele göre üç seviyede müsilaj oluşumu incelenmektedir. Bu seviyeler sırasıyla 0, 1 ve 2'dir. Müsilaj riski 0 değerini aldığı anda bu göz ardı edilebilecek kadar düşük bir olasılıkla müsilaj oluşabileceğini temsil ederken, müsilaj riskinin 1 değerini alması kontrollerin artırılmasına, müsilaj riskinin 2 değerini alması müsilaj sorunu ile karşı karşıya kalınma olasılığının çok yüksek olduğuna işaret etmektedir. Herhangi bir önlem alınmadığı koşulun canlandırıldığı Şekil 2'de yer alan bertaraf akış değişkeni ise bir önceki dönemde müsilaj riskinin değerini çıkararak müsilaj riski değerini geçmiş zamanın etkisini arındırarak inceleme şansı vermektedir. Modeldeki geri besleme sistemi de Marmara Denizi'ndeki TP ve TN konsantrasyonunun orta derinlik ve yüzeydeki çözülmüş oksijene etki ederken. Aynı şekilde yüzey ve orta derinlikteki oksijen seviyesi de denizdeki TN ve TP konsantrasyonuna ve dolayısıyla müsilaj oluşumuna etki göstermektedir. Model farklı senaryolar için denenmeden evvel temel tutarlılık ve geçerlilik testleri olan birim tutarlılığı, matematik model ile kavramsal modelin örtüşmesi ve ekstrem durumlar için test edilmiştir. Ardından mevcut durumun model üzerinde gösterilme ve irdelenme aşamasına geçilmiştir.



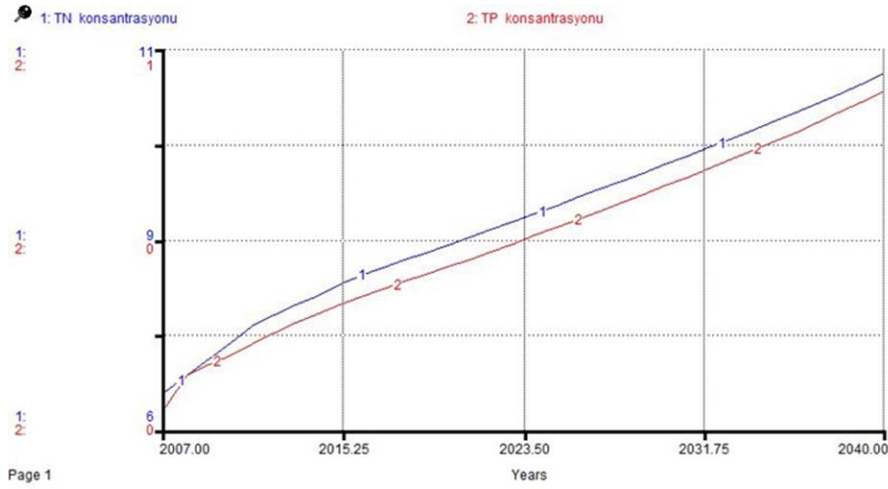
Şekil 3. Müsilaj Sorunu Stok-Akış Diyagramı

Sistem dinamiği yaklaşımına dayalı benzetim modelinde yer alan değişkenlere ilişkin matematiksel ilişkilerin ortaya konması ve değişkenlere ait verilerin elde edilmesinde TÜİK 2022 Adrese Dayalı Nüfus Kayıt Sistemi (TÜİK, 2022a), TÜİK Bölgesel Hesaplar: Gayri Safi Yurtiçi Hasıla (TÜİK, 2022b), Marmara Denizi Bütünleşik Stratejik Planı (T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2021), Marmara Denizi ile ilişkili Atıksu Altyapı Durumu ve Deniz Deşarjları Raporu (Marmara Belediyeler Birliği, 2021a), Marmara Denizi Eylem Planı Bilim ve Teknik Kurulu

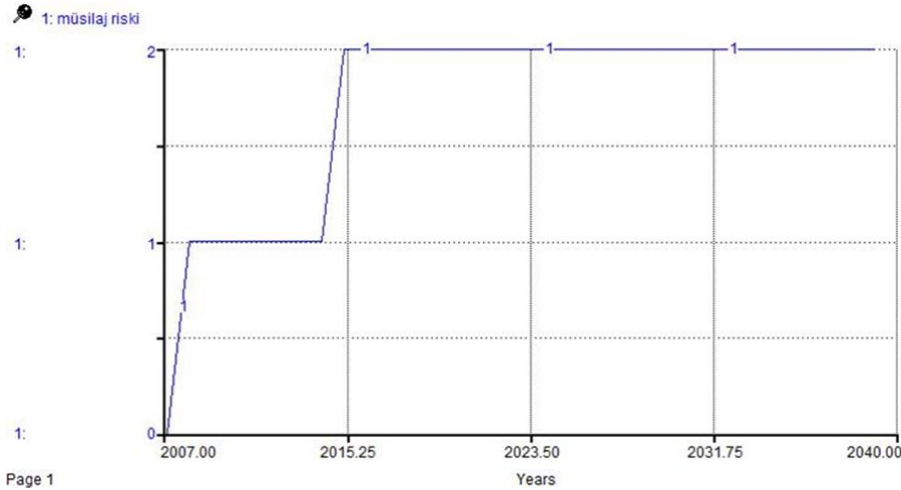


İhtiyaçlar ve Çözüm Önerileri Raporu (Marmara Belediyeler Birliği, 2021b), ve TÜBA'nın müsilaj ile ilgili raporlarından (Öztürk vd., 2021; TÜBA, 2021) yararlanılmıştır. Modelde yer alan değişkenlere ilişkin verilerin temin edildikleri kaynaklar Ek A'da verilmiştir.

2007-2021 yılları arasındaki gerçek verilerden yola çıkılarak, TN ve TP konsantrasyonuna etki eden faktörlerin aynı trend ile artması sonucunda Marmara Denizi'nde görülecek TN ve TP konsantrasyonu 2040 yılına kadar benzetim modeli tarafından hesaplanmıştır. Şekil 4 bahsi geçen bu baz senaryoya göre bu değişkenlerin 2007-2040 yılları arasında davranışlarını grafiksel olarak göstermektedir. Buna göre 2007 yılında 6,5 mg/litre civarındaki TN konsantrasyonunun 2040'a kadar herhangi bir önlem alınmaması ve bölge büyüme hızına bağlı besin değeri yüksek atıksu miktarının artışı sonucunda 10,68 mg/litre civarına ulaşması beklenmektedir. Marmara Denizi'ndeki TP konsantrasyon değişimi ise 2007 yılı için 0,14 mg/litreden simülasyon zamanı sonu olan 2040 yılında 0,72 mg/litre seviyesine taşınması beklenmelidir. Bu TN ve TP konsantrasyonunun müsilaj riskine yaratacağı etki ise Şekil 5'te görülmektedir. Aslında karşı karşıya kalınmasa da benzetim modeline göre 2015 sonrası yıllar, müsilaj riskinin çok yüksek olduğu görülmektedir. Herhangi bir önlem alınmadan aynı atık üretimi trendi takip edildiğinde ortaya çıkan sonuç, müsilaj riski ile aslında her sene karşı karşıya olunduğudur.



Şekil 4. Baz Senaryoya Göre Marmara Denizi TN TP Konsantrasyonu



Şekil 5. Müsilaj Riski için 2007-2040 Yılları Arası Baz Senaryo Sonucu

### Yapısal Geçerlilik

Modelin iç tutarlılığının ve problem tanımında yer verilen değişkenlerin problemin temsili için yeterliliğinin irdelendiği süreç yapısal geçerlilik (Stermann, 2010). Bu benzetim modelinde yapısal geçerliliğin sınanması için modelde yer verilen değişkenlerin birim tutarlılıkları kullanılan benzetim modeli üzerinde otomatik olarak kontrol edilmiştir. Bu benzetim modelinin temsili STELLA 9.1.12'de yapılmıştır. Ayrıca birim tutarlılığının otomatik kontrolünde bir sorun çıkmaması için kullanılmış kukla değişken

bulunup bulunmadığı da kontrol edilmiştir. Ardından, problem tanımı esnasında ve literatür taraması boyunca incelenen makaleler tekrar gözden geçirilmiş ve modelde temsiline atlanması kritik olabilecek yeni bir değişkene rastlanmamıştır.

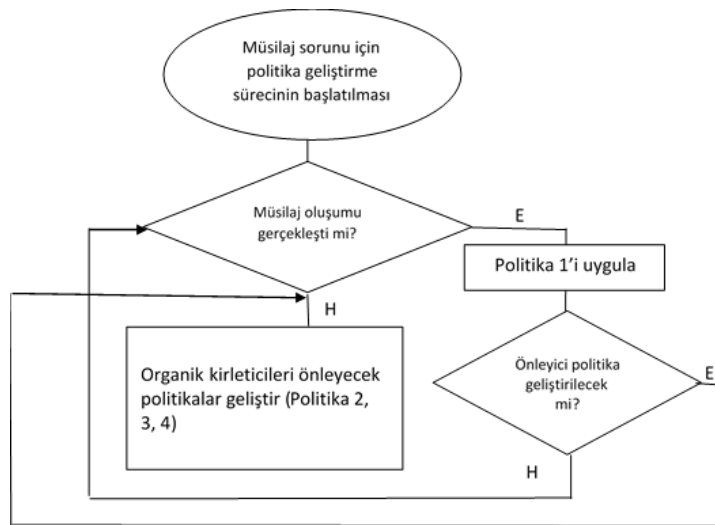
### Davranışsal Geçerlilik

Çalışma kapsamında davranışsal geçerliliğin sınanması için model sonuçları ile gerçek sonuçlar karşılaştırılmış, davranış reproduksiyonu adı verilen yöntemle model geçerliliği analiz edilmiştir. Yani SD modeli içerisinde yer alan en temel iki değişken TN ve TP değerleri 2007-2021 yılları arası için baz senaryo model sonuçları gerçek sonuçları ile kıyaslanarak davranışsal geçerlilik test edilmiştir. Karşılaştırmanın istatistiksel analizi için Ortalama Mutlak Yüzdesel Hata (OMYH) sonuçları Tablo 2’de özetlenmiştir.

**Tablo 2.** TN ve TP için Ortalama Mutlak Yüzdesel Hatalar

Yıl	Mutlak Yüzdesel Hata	
	TN (%)	TP(%)
2007	0,0002	0,005
2008	0,02	0,04
2009	0,00	0,32
2010	0,03	0,07
2011	0,07	0,73
2012	0,07	0,61
2013	0,09	0,57
2014	0,05	0,44
2015	0,08	0,70
2016	0,09	0,55
2017	0,09	0,66
2018	0,09	0,60
2019	0,07	0,53
2020	0,07	0,65
2021	0,14	0,56
Ortalama	0,06	0,50

Tablo 2’de elde edilen ortalama mutlak yüzdesel hata değerlerine bakıldığında hataların yüzde 5’ten küçük olmasından dolayı değerlendirmeye alınan tüm değişkenler açısından davranışın reproduksiyonunun sağlandığı söylenebilir. Tablo 2’de verilen yüzdesel farkların anlamlı olup olmadıkları bağımlı örneklem t-testi ile de test edilmiştir. Gerçek TN verileri ile benzetim sonuçlarının kıyaslandığı testte  $p$ -değeri 0,493; gerçek TP verileri ile benzetim sonuçlarının kıyaslandığı testte ise  $p$ -değeri 0,416 olup test sonuçlarına göre model davranışın reproduksiyonunu istatistiksel olarak da sağlamaktadır. Bir sonraki aşamada müsilaj sorunu için model farklı politikalar yaratılarak incelenmiş ve birtakım çıkarımlar yapılmıştır.



**Şekil 6.** Önleyici Politikaların Uygulanmasına İlişkin Akış Şeması

## POLİTİKALARIN İNCELENMESİ

Bu çalışma kapsamında müsilaj probleminin çözümü için incelenecek politikalar, müsilajın görüldüğü esnada alınan önlem ve müsilajın oluşmasını önlemek amaçlı olarak ikiye ayrılmıştır. Görüldüğü esnada alınacak önlem başlığı altında yüzeydeki müsilajın toplanması (Politika 1) incelenmiştir. Önlem amaçlı politikalar başlığı altında ise ileri biyolojik arıtma oranlarının artırılması (Politika 2), havzalardan gelen TN ve TP yükünü yaratan tarım ve hayvancılık aktiviteleri için alınacak önlemler (Politika 3) ve bölge nüfus artışına karşı yapılacak önlemlerdir (Politika 4). Bu politikaların uygulanması süreci Şekil 6'da verilen akışta gösterilmiştir. Önlem amaçlı politikaların hem ayrı ayrı hem de birlikte uygulandığındaki etkileri bu makale kapsamında incelenmiştir.

### **Politika 1: Yüzeydeki Müsilajın Toplanması**

Müsilaj oluşumu gerçekleştiikten sonra ilgili birimlerce deniz yüzeyini kaplayan müsilajın toplanmasının orta derinlikteki oksijen seviyesine direkt etkisi bulunmamaktadır. Bu eylemin yüzey seviyedeki tortulaşmayı azaltmak açısından gerçekleştirildiği değerlendirilebilir. Bu politika modele yüzey seviyedeki oksijende bir artış ile empoze edilmiştir. Başka bir deyişle, model parametrik bir değişime maruz kalmıştır. Bu politikanın benzetim modeline empoze edilmesinin ardından ortaya çıkan sonuçlara bakıldığında, yüzeydeki müsilajın toplanmasının müsilaj oluşum riski üzerinde etkisi olmadığı görülmektedir. Ancak oluşan müsilajın toplanması tortulaşmayı düşüreceği için Marmara Denizi TN ve TP konsantrasyonunu az seviyede düşüreceği tespit edilmiştir. Sonuçlar ayrıca bağımlı örneklem *t*-testi ile de karşılaştırılmış olup *p*-değeri TN kıyaslamasında 0,121; TP kıyaslamasında ise 0,135 olarak hesaplanmıştır. Yani, yüzeydeki müsilajın toplanmasının TN ve TP konsantrasyonunun azaltılmasında anlamlı derecede olumlu bir katkı sağlamadığı görülmektedir.

### **Politika 2: İleri Biyolojik Arıtmanın Arttırılması**

İleri biyolojik arıtmanın arttırılması ve buna bağlı olarak ileri arıtmasız deşarjın azalmasının sağlandığı politikanın 2022 yılında geliştirilip ile uygulamaya konmuş olduğu ve arıtma tesislerinin yapım aşamasının da göz önünde bulundurulduğu kurgulanmış ve benzetim modeline empoze edilmiştir. Bu değişimin uygulanması modelde zaten halihazırda var olan ileri atık su arıtma değişkeninin zamana bağlı parametre değişimi ile meydana getirilmiştir. Burada toplam atık suyunun ileri arıtma tesis kapasitelerinin artması sayesinde 2025 yılı itibarıyla 2040 yılına kadar aşamalı olarak tüm atık sularının ileri biyolojik arıtma tesislerine yönlendirilmesi üzerine kurgulanmıştır. Yani yıllar içerisinde ileri biyolojik arıtma yüzdesi 42'den yüzde yüze yükselirken, ileri arıtmasız deşarj 2040 yılına dek devreye giren ileri arıtma katkısı kadar azaltılarak 2040'ta sifıra ulaşmıştır. Baz senaryodan elde edilen sonuçlar Politika 2 sonuçları ile karşılaştırıldığında TN konsantrasyonunun 2040 için 10,68 mg/litreden ancak 10,37 mg/litreye düştüğü, TP konsantrasyonunun ise 0,72 mg/litreden 0,67 mg/litre mertebesine gerilediği görülmüştür. Sonuçlar ayrıca bağımlı örneklem *t*-testi ile de test edilmiş olup *p*-değeri TN kıyaslamasında 0,118, TP kıyaslamasında ise 0,129 olarak hesaplanmıştır. Yani, ileri biyolojik arıtma seviyesinin artırılmasının TN ve TP konsantrasyonunun azaltılmasında beklenen seviyede olumlu bir katkı sağlamadığı görülmektedir.

### **Politika 3: Tarım ve Hayvancılık Aktiviteleri için Alınacak Önlemler**

Tarım ve hayvancılık faaliyetleri sonucu, bu faaliyetlerin yapıldığı alanlardan akarsu yatakları yoluyla denize taşınmakta olan TN ve TP yüklerinin azaltılmasına yönelik faaliyetlerin etkisi çalışmadaki üçüncü politika kapsamında incelenmiştir. Bu politika 2022 yılından sonra yürürlüğe konacağı kurgulanan bir dizi önlemin 2040 yılına dek bahsi geçen faaliyetler nedeniyle denize taşınan TN ve TP yüklerini %20 oranında azaltacağı öngörülerek kurgulanmıştır. Baz senaryodan farklı olarak, bu politika modele parametrik bir değişim olarak empoze edilmiş ve 'ramp' fonksiyonunun belirlenen kurgu için yıllık eklenen TN ve TP yükü değişkenleri üzerinden ilgili değişim yapılmıştır. Model sonuçlarından elde edilen bulgulara göre Politika 3'ün, Marmara Denizi TN ve TP konsantrasyonunda kısmi azalma yönünde bir etkisi olduğu gözlenmektedir. Alınacak önlemler sonucunda Marmara Deniz'inde TN ve TP konsantrasyonunun düşeceği gözlemlenmiş olması olumlu bir sonuç olsa da karşılaşılabilecek müsilaj riskini tamamen ortadan kaldıramadığı tespit edilmiştir. Sonuçlar ayrıca bağımlı örneklem *t*-testi ile de test edilmiş olup *p*-değeri TN kıyaslamasında 0,095; TP kıyaslamasında ise 0,096 olarak hesaplanmış, mevcut durum ile Politika 3'ün uygulanması durumu arasında istatistiksel olarak anlamlı bir fark bulunmamıştır. Diğer bir deyişle, Politika 3 kapsamında tarım ve hayvancılık aktiviteleri için alınması önerilen önlemler belli bir ölçüde iyileşmeye yol açsa da tek başına yetersiz kalmaktadır.

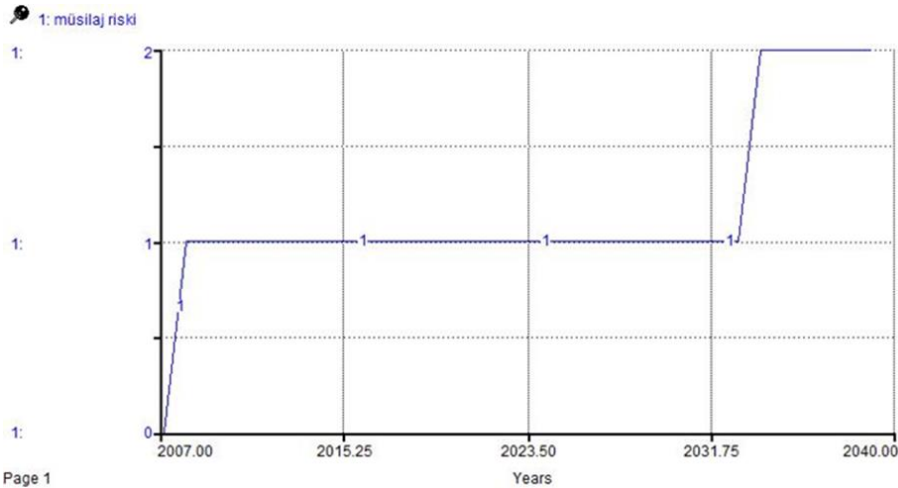
### **Politika 4: Bölge Nüfus Artışına Karşı Alınacak Önlemler**

Politika 2 ve 3 ile yapılan değişimlere rağmen sonuçlara bakıldığında müsilaj riskinin hala yüksek seviyede seyrettiği görülmektedir. Bu durumda kök nedenlerden biri sayılabilecek bölge nüfusunun planlanması yeni bir politika olarak

söz konusu olabilir. 2010'lu yılların başında yürürlüğe girip ardından zaman içerisinde bölge büyüme hızını düşüren bir faktörün konulmasının nasıl bir sonuç yaratacağı bu politikada tartışılmıştır. Modelde nüfusla ilişkili olan atık su yüküne uygulanan değişim sonucu nüfusun büyüme hızı yerine atık su üretim hızına etki edilecek ve böylece Marmara Denizi TN ve TP konsantrasyonu ve bu konsantrasyonlara bağlı müsilaj oluşum riski incelenmiştir. Bu değişim hem ileri artımsız hem de ileri artımalı atık su üzerinde direkt olarak yıllara bağlı artış hızının azaltılması ile tanımlanmıştır. İnceleme sonuçları Tablo 3'te verilmektedir.

**Tablo 3.** Baz Senaryo ve Politika 4'ün Karşılaştırması

Yıl	TN konsantrasyonu (mg/l)		TP konsantrasyonu (mg/l)	
	Baz Senaryo	Politika 4	Baz Senaryo	Politika 4
2007	6,50	6,50	0,14	0,14
2012	7,50	6,51	0,28	0,14
2017	8,13	6,55	0,36	0,14
2022	8,63	6,75	0,43	0,17
2027	9,16	7,16	0,50	0,22
2032	9,71	7,71	0,58	0,30
2037	10,29	8,31	0,67	0,38
2040	10,68	8,68	0,72	0,43

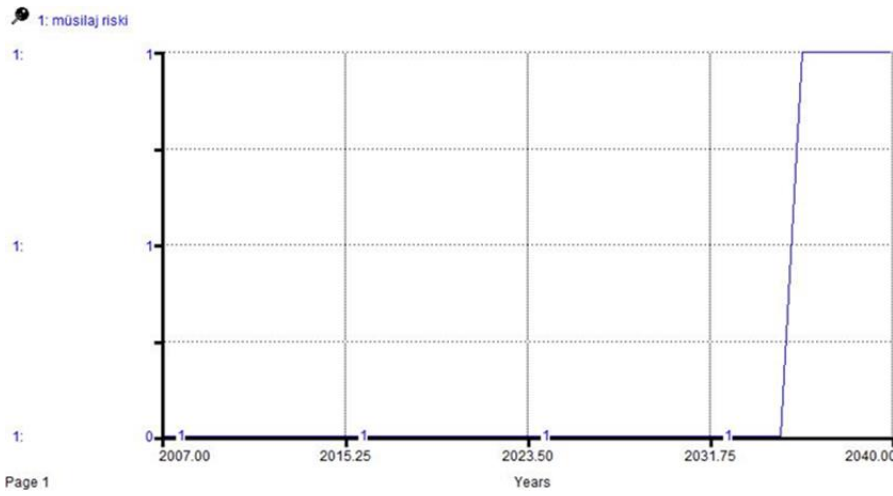


**Şekil 7.** Bölgedeki Nüfus Artışına Karşın Yapıldığı Varsayılan Önlemlerin Müsilaj Riskine Etkisi

Nüfusun kontrollü artışının 2010'lu yılların benimsenmiş ve uygulamaya konulmuş olduğu bu politikada yukarıda incelenen diğer politikalardan çok daha yüksek bir performans elde edildiği görülmektedir. Ayrıca, baz senaryoya göre oluşacak TN ve TP yükleri Politika 4'ün uygulanması sonucunda elde edilecek yüklerle bağımlı örneklem *t*-testleri kullanılarak karşılaştırılmış; *p*-değeri TN kıyaslamasında 0,000, TP kıyaslamasında ise 0,001 olarak hesaplanmıştır. Yani Politika 4'ün uygulanması sonucunda istatistiksel olarak anlamlı bir iyileşme elde edilmektedir. Bu iyileşmenin müsilaj riski açısından değerlendirilmesi Şekil 6'da temsil edilmektedir. Şekil 7'de görüldüğü üzere, 2010'lu yılların başında bölge nüfusunun kontrollü artışı sağlanmış olması durumunda, müsilaj riskinin yüksek seviyeye geleceği yıl 2030'ların sonuna sarkması söz konusu olacaktır. Burada atlanmaması gereken nokta, politika 4 uygulamasında diğer politikaların göz ardı edildiğidir. Şayet politika 2 ve politika 3 nüfus artışını engelleyici politikalarla eşgüdümlü olarak karar vericiler tarafından uygulamaya geçirilirse müsilaj görünme riskinin yüksek seviyeye geçişi ötelenebilir ve/veya kontrol edilebilir olacaktır.

Yukarıda sıralanan tüm politikaların bir arada uygulandığı bir yöntemin izlenmesi durumu incelediğinde ise, müsilaj riskinin zamana bağlı değişimi Şekil 8'de gösterilmektedir. Şekil 8'de görüldüğü üzere, ileri atık su artıma politikaları ve nüfus artışındaki değişim bir kombinasyon olarak düşünülüp bu yönde bir politika kurulması durumunda, müsilaj riski 2031 yılı sonrasında orta seviyeye yükselmekte ancak kritik seviyeye benzetim modeli süresince çıkmamaktadır. Bu sebeple politikaların ayrı ayrı uygulanmasından ziyade bir arada ele alınmasının Marmara Denizi'ndeki müsilaj riskini azaltacağı söylenebilir. Ayrıca tüm politikaların bir arada uygulanması ile benzetim ufku boyunca TN

konsantrasyonunda ortalama %14,85, TP konsantrasyonunda ise ortalama %65,23 oranında iyileşme gözlenmektedir. Bu iyileşmelerin istatistiksel olarak anlamlı olup olmadıkları bağımlı örneklem *t*-testleri kullanılarak analiz edilmiş, baz senaryo ile bu karma senaryodan elde edilen TN ve TP yüklerinin kıyaslanmasında *p*-değerleri 0,000 bulunmuştur. Bu sonuç tüm politikaların bir arada uygulanmasının müsilaj riskine etki eden TN ve TP konsantrasyonlarında anlamlı bir azalmaya yol açtığını ortaya koymaktadır. Ancak Politika 4'ün uygulanabilirlik açısından zorluğu düşünüldüğünde karar vericilerin müsilaj riskini azaltmaya yönelik başka bir çözüm yolu geliştirmesinin gerekli olduğu sonucuna varılabilir. Bu sebeple Politika 4'ün yer almadığı; Politika 1, Politika 2 ve Politika 3'ü bir arada uygulandığı yeni bir strateji modele empoze edilmiş ve bu karma politikanın benzetim ufku boyunca TN konsantrasyonunda ortalama %4,00, TP konsantrasyonunda ise ortalama %43,19 oranında iyileşmeye yol açtığı görülmüştür. Politika 1-2-3'ün bir arada uygulanmasından elde edilen TN ve TP yükleri baz senaryo ile bağımlı örneklem *t*-testleri kullanılarak kıyaslandığında, her iki yük için yapılan testte de *p*-değeri 0,000 bulunmuştur. Yani yüzeydeki müsilajın toplanması, ileri biyolojik arıtma oranlarının artırılması ve tarım ve hayvancılık faaliyetleri nedeniyle havzalardan denize boşalan sudaki TN ve TP yüklerinin azaltılması eylemleri bir arada uygulanması gelecek yıllarda müsilaj riskinin anlamlı seviyede azalmasına ve kontrol edilmesinin mümkün kılınmasına olanak sağlamaktadır.



Şekil 8. Tüm Politikaların Bir Arada Uygulanmasının Müsilaj Riskine Etkisi

## SONUÇ

Bu çalışmada 2020-2021 yıllarında Marmara Denizi'nde gözlemlenen yoğun müsilaj patlamasına neden olan karmaşık ve doğrusal olmayan ilişkiler ile geri dönüşüm mekanizmalarının incelenmesi amacıyla sistem dinamiği yaklaşımına dayalı bir benzetim modeli önerilmektedir. Bilindiği kadarıyla müsilaj konusunu sistem dinamiği yaklaşımı ile inceleyen bir çalışma literatürde mevcut değildir.

Önerilen modelin mevcut durum için çalıştırılmasıyla, 2040 yılına kadar Marmara Denizi'ndeki müsilaj riskinin ciddiyeti açıkça ortaya konulmuştur. Marmara Denizi'nin ekolojik önemini yanı sıra bölge ve Türkiye ekonomisi için adeta kritik bir konumda olması benzetim modelinden elde edilen ciddi müsilaj riskinin ne denli tehlikeli boyutta olduğunu gözler önüne sermektedir. Baz senaryoya göre çalıştırılan benzetim modeli TN ve TP konsantrasyonlarının benzetimin ilk yılı olan 2007 de dahil olmak üzere kabul edilebilir seviyenin üzerinde olduğunu ve sürekli arttığını göstermektedir. Müsilaj risk seviyesi de 2015 yılından itibaren benzetimin son yılı olan 2040'a kadar alarm verici seviyededir.

Mevcut durumun devam etmesi halinde ortaya çıkacak ciddi çevresel ve sosyoekonomik problemlerin önüne geçmek için çeşitli kurumların önlemler alması kaçınılmazdır. Sorunun çözümü için bilim insanlarınca önerilen, ancak kısa ve uzun vadeli etkilerinin tam olarak ne olduğu konusunda ciddi bir bilimsel çalışmanın olmadığı politikalardan yüzeydeki müsilajın toplanması (Politika 1), ileri biyolojik arıtma seviyelerinin artırılması (Politika 2), tarım ve hayvancılık aktiviteleri için alınacak önlemler (Politika 3) ve bölge nüfus artışına karşı alınacak önlemler (Politika 4) önerilen model üzerinde denenmiş ve Politika 4 dışında bu politikaların TN ve TP konsantrasyonlarını tek başına anlamlı seviyede azaltmaktan uzak oldukları tespit edilmiştir. Ancak Politika 4'ün uygulanmasının güç olduğu açıktır. Bu durumda bahsi geçen politikaların bir arada kullanılmasının Marmara Denizi'ndeki müsilaj riskini düşürebileceği kanısına varılabilir. Bu sebeple tüm politikaların bir arada uygulandığı bir senaryo da denenmiş ve bu



senaryo neticesinde Marmara Denizi'ndeki müsilaj riskinin sınırlandırıldığı görülmüştür. Ayrıca yine Politika 4'ün uygulanmasındaki güçlükler düşünülerek Politika 1-2-3'ten oluşan karma bir politika da modele empoze edilmiş, bu karma politikanın da müsilaj riskini sınırlamada istatistiksel olarak etkili olacağı ortaya konmuştur. Her ne kadar böyle bir sonuç elde edilmişse de politikalarda sıralanan bu önlemlerin her biri kendi içinde yüksek maliyetlere ve hatta bölgede sosyo-ekonomik değişimlere neden olabilecek niteliktedir. Bu durumda politikaların bir arada uygulanmasının güçlüğü de ortaya konulmaktadır. Bu açıdan bakıldığında karar vericilerin müsilajı bertaraf edici ya da gelecek yıllarda Marmara Denizi'ni tekrar tehdit edici bir unsur olarak karşımıza çıkmasını önleyici politikaları uygularken dikkatli olmaları gerektiği sonucu ortaya konulmaktadır.

Çalışma kapsamında elde edilen sayısal bulgular neticesinde karar verici organlar tarafından Marmara Denizi Havzası'ndaki nüfus yoğunluğunu azaltmak adına başka bölgelere yapılacak ekonomik ve sosyal yatırımların teşvik edilmesi, atıksu arıtma aktivitelerinin tamamının ileri teknolojinin kullanıldığı yöntemlerle değiştirilmesi ve tarım ve hayvancılık faaliyetlerinden kaynaklı su deşarjlarının da kontrol edilmesine yönelik düzenlemelerin yapılmasının önemi ortaya konmaktadır. Bu doğrultuda resmi kurumlar tarafından kamuyu bilinçlendirme kampanyaları düzenlenmesi, nüfus, sanayi ve diğer iş kollarının başka bölgelere homojen bir şekilde yeniden dağıtılması için teşvik programları oluşturulması, çevre kanunu ve denetim yönetmeliklerinde ilgili yasal düzenlemelerin yapılarak atıksu deşarj içeriklerinin sıkı bir şekilde kontrol edilmesi elzemdir. Ayrıca denetim ve gözlem faaliyetlerinin şeffaflaştırılarak halkın ve sivil toplum kuruluşlarının da sürece dahil edilmesinin müsilaj riskinin önlenmesine yönelik adımların atılması ve takip edilerek uygulanabilmesinde etkili olacağı düşünülmektedir.

Bu çalışmada klorofil-a değerlerindeki değişimlerin ve sıcaklık anomalilerine ilişkin verilerin tüm Marmara Denizi'ni yansıtacak ortak bir matematiksel ifade ile gösterilememesi nedeni ile bu değişkenler önerilen SD modeline entegre edilmemiştir. Her ne kadar bu iki değişkenin müsilaj formasyonu üzerinde önemli bir etkisi olduğu literatürde belirtilmişse de çalışma kapsamında önerilen model mevcut haliyle de davranışın reproduksiyonunu sağlamak konusunda yeterlidir. Ayrıca önerilen modelin müsilaj oluşumuna etki eden temel değişkenleri bütüncül bir yaklaşımla genelleştirmesi söz konusudur. Bu durum model değişkenlerinin zamana göre davranışlarını etkileyen alt faktörlere model içerisinde doğrudan yer verilmemesine neden olmuştur. Ancak bahsi geçen alt faktörlerin modelde yer alması gerek veri temininin ve değişkenler arasındaki nedensellik ilişkilerinin matematiksel olarak ifade edilmesinde yaratacağı güçlükler, gerekse modelin karmaşıklığı üzerinde yol açacağı negatif etkiler nedeniyle neredeyse imkansızdır. Benzer şekilde literatürde yer alan çevre modellemelerinde de ilgili problemler genelleştirilerek irdelenmekte, detaylı nedensellikler göz ardı edilmektedir.

Gelecek çalışmalarda endüstrileşme ve nüfus dinamiklerinin detaylandırılarak incelenmesinin yanı sıra müsilaj riskinin bölge üzerinde oluşturabileceği sosyoekonomik değişimler ile kısa ve uzun vadeli sonuçlarının analiz edilmesi konularına yer verilebilir. Bu hususta, sistem dinamiğine dayalı benzetim yöntemleri kullanılabileceği gibi zaman serisi analizleri, çeşitli ekonometrik modeller, nedensellik testlerine dayalı yaklaşımlar vb. diğer tekniklere başvurulabilir. Ayrıca, denize deşarj edilen sulardaki TN-TP yüklerini azaltmaya yönelik inovatif atıksu arıtma teknolojilerine yatırım yapılması, havzalardan denize dökülen sulardaki besin içeriklerinin kontrol edecek yeni sistemlerin geliştirilmesine yönelik Ar-Ge faaliyetleri de gelecek çalışma konuları arasındadır.

## TEŞEKKÜR

Bu çalışma BAP2201 kodlu proje kapsamında İstanbul Kültür Üniversitesi Teknoloji ve Proje Destek Birimi tarafından desteklenmiştir.

## KAYNAKLAR

- Ak, M., & Top, İ. (2022). İkincil arıtılmış kentsel atıksulardaki azot ve fosforun toprak-akifer arıtma sistemi kullanılarak giderilmesinde toprak tiplerinin etkisi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 28(6), 929-936. <https://doi.org/10.5505/pajes.2021.99491>
- Akmaz, H. (2022, Mart) Küresel İklim Değişikliğinin Müsilaja Etkisi. In BCCS2022- (Bio) Climate Change Symposium 2022, Erzurum, Türkiye.
- Aktan, Y., Dede, A., & Çiftci, P. S. (2008). Mucilage event associated with diatoms and dinoflagellates in Sea of Marmara, Turkey. *Harmful Algae News*, 36, 1-27.

Apak, R. (2021). Deniz Müsilajının Oluşumu, Önlenmesi ve Olası Değerlendirilmesi. In İ. Öztürk & M. Şeker (Eds.), Marmara Denizi'nin Ekolojisi: Deniz Salyası Oluşumu, Etkileşimleri ve Çözüm Önerileri. Ankara: Türkiye Bilimler Akademisi.

Artüz, M. L. Marmara Denizi genelinde gözlemlenen karışık alg patlaması sonucunda oluşan musilaj agregat konusunda rapor. (2008). [https://docplayer.biz.tr/2054734-Marmara-denizi-genelinde-gozlemlenen-karisik-alg-patlamasi-sonucunda-olusan-musilaj-agregat-konusunda-rapor.html#download\\_tab\\_content](https://docplayer.biz.tr/2054734-Marmara-denizi-genelinde-gozlemlenen-karisik-alg-patlamasi-sonucunda-olusan-musilaj-agregat-konusunda-rapor.html#download_tab_content). Son erişim tarihi 16.07.2023.

Ayaz, Ç. E. (2022). Müsilaj sorununun idari boyutu: İstanbul Büyükşehir Belediyesi ile İstanbul Su ve Kanalizasyon İdaresi özelinde bir inceleme. *Çankırı Karatekin Üniversitesi İİBF Dergisi*, 12(1), 176-204. <https://doi.org/10.18074/ckuiibfd.989631>

Aydın, M. E. (2021). Marmara Denizinde Müsilaj Oluşumu, Muhtemel Sebepleri ve Öneriler. In İ. Öztürk & M. Şeker (Eds.), Marmara Denizi'nin Ekolojisi: Deniz Salyası Oluşumu, Etkileşimleri ve Çözüm Önerileri. Ankara: Türkiye Bilimler Akademisi.

Balci, M., & Balkis, N. (2017). Assessment of phytoplankton and environmental variables for water quality and trophic state classification in the Gemlik Gulf, Marmara Sea (Turkey). *Marine Pollution Bulletin*, 115, 172-189. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.12.007>

Balkis, N., Sivri, N., Fraim, N. L., Balci, M., Durmuş, T., & Sukatar, A. (2013). Excessive growth of *Cladophora laetevirens* (Dillwyn) Kutzing and enteric bacteria in mats in the Southwestern Istanbul coast, Sea of Marmara. *IUFS Journal of Biology*, 72(2), 43-50.

Bedük, F., Aydın, S., Aydın, M. E., & Bahadır, M. (2021). Müsilaj Benzeri Çevre Felaketlerini Önlemede Pasif Biofilm Örnekleyiciler Kullanarak Kirlilik Yükünün Azaltılması. In İ. Öztürk & M. Şeker (Eds.), Marmara Denizi'nin Ekolojisi: Deniz Salyası Oluşumu, Etkileşimleri ve Çözüm Önerileri. Ankara: Türkiye Bilimler Akademisi.

Burak, S., Bilge, A. H., & Ülker, D. (2022). Assessment and simulation of water transfer for the megacity Istanbul. *Physical Geography*, 43(6), 784-808. <https://doi.org/10.1080/02723646.2021.1904698>

Calizza, E., Aktan, Y., Costantini, M. L., & Rossi L. (2015). Stable isotope variations in benthic primary producers along the Bosphorus (Turkey): A preliminary study. *Marine Pollution Bulletin*, 97, 535-538. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2015.05.016>

Colkesen, I., Kavzoglu, T., Sefercik, U. G., & Ozturk, M. Y. (2023) Automated mucilage extraction index (AMED): a novel spectral water index for identifying marine mucilage formations from Sentinel-2 imagery, *International Journal of Remote Sensing*, 44(1), 105-141. <https://doi.org/10.1080/01431161.2022.2158049>

Çardak, M., Altuğ, G., & Türetken, P. S. (2015). Variations of Culturable and Metabolically Active Bacteria in a Stratified Water Column: The Example of Istanbul and Çanakkale Straits, Turkey. *International Journal of Environmental Research*, 9(4), 1333-1340. <https://doi.org/10.22059/IJER.2015.1025>

Daban, İ. B., Şen, Y., Ayaz, A., Altınağaç, U., Öztekin, A., Özekinci, U., İşmen, A., Çakır, F., Yüksek, A., Demirkıran, T., Ayaz, O., Uğur, G. E., & Selçuk, B. B. (2023). Postmucilage biodiversity of shallow water fish assemblages: A case study in the Marmara Sea, Turkey. *Turkish Journal of Zoology*: 47(4), 191-201. <https://doi.org/10.55730/1300-0179.3132>

Danovaro, R., Fonda Umani, S., & Pusceddu, A. (2009). Climate Change and the Potential Spreading of Marine Mucilage and Microbial Pathogens in the Mediterranean Sea. *PLoS ONE*, 4(9), e7006. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0007006>

Demirel, D. F., Gönül-Sezer, E. D., & Pehlivan, S. A. (2022). Analyzing the wastewater treatment facility location/network design problem via system dynamics: Antalya, Turkey case. *Journal of Environmental Management*, 320, 115814. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.115814>

Demirel N., Yildiz T., Ulman A., Zengin M., Akoglu E., Saygu I., Ertor Akyazi P., Gül G., Bedikoğlu D., & Yılmaz I. N. (2023). Status of the Sea of Marmara ecosystem and its fishery resources: Mucilage episodes and recommendations for sustainable fisheries. In M. Albay (Ed.), Mucilage Problem in the Sea of Marmara. İstanbul: İstanbul University.

- Deserti, M., Cacciamani, C., Chiggiato, J., Rinaldi, A., & Ferrari, C. R. (2005). Relationships between northern Adriatic Sea mucilage events and climate variability. *Science of the Total Environment*, 353, 82-88. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2005.09.009>
- Dianati, K., Schäfer, L., Milner, J., Gómez-Sanabria, A., Gitau, H., Hale, J., Langmaack, H., Kiesewetter, G., Muindi, K., Mberu, B., Zimmermann, N., Michie, S., Wilkinson, P., & Davies, M. (2021). A system dynamics-based scenario analysis of residential solid waste management in Kisumu, Kenya. *Science of The Total Environment*, 777, 146200. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146200>
- Dianati, K., Zimmermann, N., Milner, J., Muindi, K., Ezech, A., Chege, M., Mberu, B., Kyobutungi, C., Fletcher, H., Wilkinson, P., & Davies, M. (2019). Household air pollution in Nairobi's slums: A long-term policy evaluation using participatory system dynamics. *Science of The Total Environment*, 660, 1108-1134. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.430>
- Doğan, K. (2013). Marmara Denizi Kirliliğinin Balıkçılığa Etkisi, Marmara Denizi Balıkçılığının Ekonomiye Yansımaları. In A. C. Kahraman (ed.), *Derdimiz, Değerimiz, Denizimiz Marmara*, İstanbul: T.C. Marmara Belediyeler Birliği Yayını 79.
- Erdüğan, H. (2022). Müsilajın Çanakkale Boğazı Makro Alglerine Etkisi. *Çanakkale Onsekiz Mart University Journal of Marine Sciences and Fisheries*, 5, 33-37. <https://doi.org/10.46384/jmsf.1121163>
- Eren, Z. (2021). Zararlı Alg Patlaması ve Marmara Denizindeki Müsilaj Problemi İlişkisi. *JENAS Journal of Environmental and Natural Studies*, 3(2), 203-213. <https://doi.org/10.53472/jenas.985310>
- Eronat, A. H. (2022). Denizlerde Müsilaj Olayının Tespitine Yönelik Optik Tanımlayıcı Motifin Belirlenmesi. *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 24(72), 953-958. <https://doi.org/10.21205/deufmd.2022247223>
- Forrester, J. (1961). *Industrial Dynamics*. Cambridge Massachusetts: MIT Press.
- Fuksi, T., Tomašových, A., Gallmetzer, I., Haselmair, A., & Zuschin, M. (2018). 20th century increase in body size of a hypoxia-tolerant bivalve documented by sediment cores from the northern Adriatic Sea (Gulf of Trieste). *Marine Pollution Bulletin*, 135, 361-375. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.07.004>
- Giani, M., Berto, D., Zangrando, V., Castelli, S., Sist, P., & Urbani, R. (2003). Chemical characterization of different typologies of mucilaginous aggregates in the Northern Adriatic Sea. *Science of the Total Environment*, 353, 232-246. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2005.09.027>
- Gönül-Sezer E. D., & Demirel, D. F. (2022). Examining the Effects of Mucilage in the Marmara Sea on Fisheries, Tourism, and Maritime Transportation via the System Dynamics Approach. In A. Vaseashta, G. Duca, S. Travin (Eds.), *Handbook of Research on Water Sciences and Society*. Hershey PA, USA: IGI Global.
- Hallas, J. F., Mackowiak, C. L., & Wilkie, A. C. (2020). Mitigating rural WWTP impacts: System dynamics modeling of downstream nutrient outputs. *Science of The Total Environment*, 744, 140809. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140809>
- Hanedar, A., Gunes, Y., Avsar, E., Tanik, A., Musaoglu, N., Pasaoglu, M. E., Gorgun, E., Ece, P., Ayaz, H., Akgun, B. E., Yazgi, H. S., Ecer, M., Birpınar, M. E. (2023). Improving the Environmental Auditing System in Türkiye: Lessons-Learned From Mucilage Event in The Sea of Marmara. *Environmental Engineering and Management Journal*. 22(3), 485-495. <https://doi.org/10.30638/eemj.2023.038>
- Iciglenceki, I., Paliaga, P., Budisa, A., Cankovic, M., Dautovic, J., Djakovac, T., Dutour-Sikiric, M., Kraus, R., Kuzat, N., Lucic, D., Pfannkuchen, D. M., Njire, J., Pasaric, Z., & Supic, N. (2021). Dissolved organic carbon accumulation during a bloom of invasive gelatinous zooplankton Mnemiopsis leidyi in the northern Adriatic Sea; case of the anomalous summer in 2017. *Journal of Marine Systems*, 222, 103599. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2021.103599>
- Inisibilir, M., Svetlichny, L., Hubareva, E., Yilmaz, I. N., Ustun, F., Belmonte, G., & Toklu-Alicli, B. (2011). Adaptability and vulnerability of zooplankton species in the adjacent regions of the Black and Marmara Seas. *Journal of Marine Systems*, 84, 18-27. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2010.08.002>
- Inisibilir-Okyar, M., Ustun, F., & Orun, D. A. (2015). Changes in abundance and community structure of the zooplankton population during the 2008 mucilage event in the northeastern Marmara Sea. *Turkish Journal of Zoology*, 39, 28-38. <https://doi.org/10.3906/zoo-1308-11>

- Jannelli, A., Fazio, R., & Ambrosi, D. (2003). A 3D mathematical model for the prediction of mucilage dynamics. *Computers & Fluids*, 32, 47-57. [https://doi.org/10.1016/S0045-7930\(01\)00100-1](https://doi.org/10.1016/S0045-7930(01)00100-1).
- Kam, E., & Yümün, Z. Ü. (2021) Marmara Denizi'nde Müsilaj Sorunu ve Çözüm Yöntemleri. Marmara Denizi'nin Ekolojisi (pp. 163-183) Ankara: Tüba Basın Yayın, 2021
- Karlson, B., Andersen, P., Arneborg, L., Cembella, A., Eikrem, W., John, U., West, J. J., Klemm, K., Kobos, J., Lehtinen, S., Lundholm, N., Mazur-Marzec, H., Naustvoll, L., Poelman, M., Provoost, P., De Rijcke, M., & Suikkanen, S. (2021). Harmful algal blooms and their effects in coastal seas of Northern Europe". *Harmful Algae*, 102, 101989. <https://doi.org/10.1016/j.hal.2021.101989>
- Kavzoğlu, T., Çölkesen, İ., Sefercik, U. G., & Öztürk, M. Y. (2021). Marmara Denizi'ndeki Müsilaj Oluşumlarının Çok Zamanlı Optik ve Termal Uydu Görüntülerinden Makine Öğrenme Algoritması İle Tespiti ve Analizi. *Harita Dergisi*, 166, 1-9.
- Kayhan, F. E., & Yön Ertuğ, N. D. (2022). Müsilaj Sorunu ve Karakterizasyonu. *Voice of Nature*, 5(9), 4-16.
- Keleş, G., Yılmaz, S., & Zengin, M. (2020). Possible economic effects of musilage on Sea of Marmara fisheries. *International Journal of Agriculture Forestry and Life Sciences*, 4(2), 173-177.
- Kömüşçü, A. Ü., Aksoy, M., & Dogan, O. H. (2022). An Analysis of Meteorological Conditions in Relation to Occurrence of the Mucilage Outbreaks in Sea of Marmara, March-June 2021. *International Journal of Environment and Geoinformatics*, 9(3), 126-145. <https://doi.org/10.30897/ijegeo.1037842>
- Küçük, S., Abacı, B., Dede, M., Yüksel, S. E., & Yılmaz, M. (2022, Mayıs). Analysis and Detection of Mucilage Bloom from Multispectral Satellite Images. In 2022 30th Signal Processing and Communications Applications Conference (SIU), Safranbolu, Türkiye.
- Liéart, C., Susperregui, N., Rouaud, V., Cavalheiro, J., David, V., Del Amo, Y., Duran, R., Lauga, B., Monperrus, M., Pigot, T., Bichon, B., Charlier, K., & Savoye, N. (2016). Dynamics of particulate organic matter in a coastal system characterized by the occurrence of marine mucilage – A stable isotope study. *Journal of Sea*, 116, 12-22. <https://doi.org/10.1016/j.seares.2016.08.001>
- Liu, J., Liu, Y., & Wang, X. (2020). An environmental assessment model of construction and demolition waste based on system dynamics: a case study in Guangzhou. *Environmental Science and Pollution Research*, 27, 37237–37259. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-07107-5>
- Liu, P., Lin, B., Wu, X., & Zhou, H. (2019). Bridging energy performance gaps of green office buildings via more targeted operations management: A system dynamics approach. *Journal of Environmental Management*, 238, 64-71. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.02.111>
- Luo, X., Liu, C., & Zhao, H. (2023). Driving factors and emission reduction scenarios analysis of CO2 emissions in Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area and surrounding cities based on LMDI and system dynamics. *Science of The Total Environment*, 870, 161966. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.161966>
- Maani, K. E., & Cavana, R. Y. (2007). *Systems Thinking, System Dynamics: Understanding Change and Complexity*. Auckland, NZ: Prentice Hall.
- Marmara Belediyeler Birliği. Marmara Denizi Eylem Planı Bilim ve Teknik Kurulu İhtiyaçlar ve Çözüm Önerileri Raporu. (2021b). <https://marmara.gov.tr/wp-content/uploads/2022/06/MBB-Marmara-Denizi-Bilim-ve-Teknik-Kurulu-I%CC%87htiyac%CC%A7lar-ve-C%CC%A7o%CC%88zu%CC%88m-O%CC%88nerileri-Raporu.pdf>. Son erişim tarihi: 10.06.2022.
- Marmara Belediyeler Birliği. Marmara Denizi ile ilişkili Atıksu Altyapı Durumu ve Deniz Deşarjları. (2021a) <https://marmara.gov.tr/wp-content/uploads/2022/06/MBB-Marmara-Denizi-Atıksu-Altyapi-Durumu-ve-Deniz-Des%CC%A7arjlari-Raporu.pdf>. Son erişim tarihi 10.06.2022.
- Mrokowska, M. M., & Krztoń-Maziopa, A. (2024). Settling of microplastics in mucus-rich water column: The role of biologically modified rheology of seawater. *Science of The Total Environment*, 912, 168767. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168767>
- Okuş, E., Aslan-Yılmaz, A., Yüksek, A., Taş, S., & Tüfekçi, V. (2002). Nutrient distribution in the Bosphorus and surrounding areas. *Water science and technology*, 46(8), 59-66. <https://doi.org/10.2166/wst.2002.0145>



- Oral, H. V. (2023). Environmental Statistical Analysis on the Impacts of Marine Mucilage on some Seawater Quality Parameters. *International Journal of Environment and Geoinformatics*, 10(1), 153-160. <https://doi.org/10.30897/ijegeo.1187859>
- Önce, M., & Yılmaz, S. (2024). Tekirdağ ile İstanbul Arası Marmara Denizi'nde Müsilaj Tehlikesinin Araştırılması. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 53, 25-31. <https://doi.org/10.5281/zenodo.10493728>
- Özalp, H. B. (2021). First massive mucilage event observed in deep waters of Çanakkale Strait (Dardanelles), Turkey. *Journal of Black Sea/Mediterranean Environment*, 27(1), 49-66.
- Öztürk, İ., Yanalak, M., Arslan, Ö., Koyuncu, İ., Dülekürge, E., Erşahin, M. E., & Türken, T. Marmara Denizi'nde Deniz Salyası Sorunu İle İlgili Görüş Ve Öneriler. (2021). [https://haberler.itu.edu.tr/docs/default-source/default-document-library/deniz-salyas%C4%B1-\(musilaj\)-itu\\_rapor.pdf?sfvrsn=54235df0\\_2](https://haberler.itu.edu.tr/docs/default-source/default-document-library/deniz-salyas%C4%B1-(musilaj)-itu_rapor.pdf?sfvrsn=54235df0_2).
- Öztürk, İ. D., & Ediger, D. (2023). Effects of mucilage on the optical properties of water column in the Sea of Marmara. *Journal of the Black Sea/Mediterranean Environment*, 29(1), 73-86.
- Öztürk, M. 2021. Deniz salyası Marmara Denizi'ni tehdit ediyor. <https://www.indyturk.com/node/359086/t%C3%BCrki%C3%87yeden-sesler/deniz-salyas%C4%B1-marmara-denizini-tehdit-ediyor>. Son erişim tarihi 17 Mart 2022.
- Polat, A. B., Balık Sanlı, F., & Akçay, O. (2022). The relationship between mucilage covered areas and chlorophyll-a concentration: The sea of Marmara case. *Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences*, 40(3), 673-684. <https://doi.org/10.14744/sigma.2022.00079>
- Polat, S. C., & Tuğrul, S. (1995). Nutrient and organic carbon exchanges between the Black and Marmara Seas through the Bosphorus Strait. *Continental Shelf Research*, 9-15(8), 1115-1132. [https://doi.org/10.1016/0278-4343\(94\)00064-T](https://doi.org/10.1016/0278-4343(94)00064-T)
- Sartoni, G., Urbani, R., Sist, P., Berto, D., Nuccio, C., & Giani M. (2008). Benthic mucilaginous aggregates in the Mediterranean Sea: Origin, chemical composition and polysaccharide characterization. *Marine Chemistry*, 111, 184-198. <https://doi.org/10.1016/j.marchem.2008.05.005>
- Savun-Hekimoğlu, B., & Gazioğlu, C. (2021). Mucilage Problem in the Semi-Enclosed Seas: Recent Outbreak in the Sea of Marmara. *International Journal of Environment and Geoinformatics*, 8(4), 402-413. <https://doi.org/10.30897/ijegeo.955739>
- Sefercik, U. G., Colkesen, I., Kavzoglu, T., Ozdogan, N., & Ozturk M. Y. (2023). Assessing the Physical and Chemical Characteristics of Marine Mucilage Utilizing In-Situ and Remote Sensing Data (Sentinel-1, -2, -3). *Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Geoinformation Science*. <https://doi.org/10.1007/s41064-023-00254-y>
- Sterman, J. (2010). Business dynamics. Irwin/McGraw-Hill c2000.
- T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı. Marmara Denizi Bütünleşik Stratejik Planı 2021-2024. (2021). <https://webdosya.csb.gov.tr/db/cygm/icerikler/marmara-den-z--butunles-k-stratej-k-plani-20211124094432.pdf>. Son erişim tarihi 01.04.2022.
- Taş, S., Kus, D., & Yılmaz, I. N. (2020). Temporal variations in phytoplankton composition in the northeastern Sea of Marmara: potentially toxic species and mucilage event. *Mediterranean Marine Science*, 21(3), 668-683. <https://doi.org/10.12681/mms.22562>
- Taşdemir, Y. (2002). Marmara Denizi: Kirleticiler ve Çevre Açısından Alınabilecek Tedbirler. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 7(1), 39-45. <https://doi:10.17482/uujfe.37301>
- Tepić, N., Gašparović, B., & Ahel, M. (2009). Multivariate statistical analysis of the distribution patterns of carbohydrates and surface-active substances in the northern Adriatic Sea. *Marine Chemistry*, 114, 37-46. <https://doi.org/10.1016/j.marchem.2009.03.005>
- Toklu-Alıçlı, B., Polat, S., & Balkis-Ozdelice, N. (2020). Temporal variations in the abundance of picoplanktonic Synechococcus (Cyanobacteria) during a mucilage event in the Gulfs of Bandırma and Erdek. *Estuarine, Coastal and Shelf Sciences*, 233. 106513. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2019.106513>
- TÜBA. Müsilaj- Deniz Salyası Değerlendirme Raporu. (2021). <http://tuba.gov.tr/tr/haberler/akademi-den-haberler/tuba-musilaj-deniz-salyasidegerlen-dirme-raporu>. Son erişim tarihi: 10.06.2022.



Tüfekçi, V., Balkıs, N., Beken, Ç. P., Ediger, D., & Mantıkçı, M. (2010). Phytoplankton Composition and Environmental Conditions of the Mucilage Event in the Sea of Marmara. *Turkish Journal of Biology*, 34(2), 199-210. <https://doi.org/10.3906/biy-0812-1>

TÜİK. Adrese Dayalı Nüfus Kayıt Sistemi Sonuçları, 2021. (2022a). <https://biruni.tuik.gov.tr/medas/?kn=95&locale=tr>. Son erişim tarihi 01.04.2022.

TÜİK. Bölgesel Hesaplar: Gayri Safi Yurtiçi Hasıla, Değer (2009 Bazlı). (2022b) <https://biruni.tuik.gov.tr/medas/?kn=116&locale=tr>. Son erişim tarihi 01.04.2022.

Xiao, S., Dong, H., Geng, Y., Tian, X., Liu, C., & Li, H. (2020). Policy impacts on Municipal Solid Waste management in Shanghai: A system dynamics model analysis. *Journal of Cleaner Production*, 262, 121366. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121366>

Yentur, R. G., Buyukates, Y., Ozen, O., & Altin, A. (2013). The environmental and socio-economical effects of a biologic problem: Mucilage. *Marine Science and Technology Bulletin*, 2(2), 13-15.

Yılmaz, A. (2002). Türkiye Denizlerinin Biyojeokimyası: Dağılımlar ve Dönüşümler. *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences*, 26, 219-235.

Yi, Y., Wu, J., Zuliani, F., Lavagnolo, M. C., & Manzardo, A. (2023). Integration of life cycle assessment and system dynamics modeling for environmental scenario analysis: A systematic review. *Science of The Total Environment*, 903, 166545. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.166545>

Yücel, M., Özkan, K., Fach, B., Örek, H., Mantıkçı, M., Tezcan, D., Akçay, İ., Özhan, K., Arkın, S., Tuğrul, S., & Salihoğlu, B. (2021). Marmara Denizi'nin Geçirdiği Biyojeokimyasal Değişimler Bağlamında 2021 Müsilaj Patlaması, Güncel Baskılar ve Çözüm Önerileri. In İ. Öztürk & M. Şeker (Eds.), *Marmara Denizi'nin Ekolojisi: Deniz Salyası Oluşumu, Etkileşimleri ve Çözüm Önerileri*. Ankara: Türkiye Bilimler Akademisi.

Yümün, Z. Ü, & Kam, E. (2021). Marmara Denizi'nde Müsilaj Sorunu ve Çözüm Yöntemleri. In İ. Öztürk & M. Şeker (Eds.), *Marmara Denizi'nin Ekolojisi: Deniz Salyası Oluşumu, Etkileşimleri ve Çözüm Önerileri*. Ankara: Türkiye Bilimler Akademisi.

Zhang, L., Du, Q., Zhou, D., & Zhou, P. (2022). How does the photovoltaic industry contribute to China's carbon neutrality goal? Analysis of a system dynamics simulation. *Science of The Total Environment*, 808, 151868. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151868>

**EK-A**

Model değişkenlerine ilişkin verilerin temin edildikleri kaynaklar Tablo 4'te özetlenmektedir:

**Tablo 4.** Değişkenlere İlişkin Veri Kaynakları

Değişken	Değişken Türü	Birimi	Veri Kaynağı
ileri biyolojik aritmasız TN katsayısı	Dönüştürücü	mg/L	T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2021
ileri biyolojik aritmalı TN katsayısı	Dönüştürücü	mg/L	T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2021
havzalardan gelen TN yükü	Dönüştürücü	kg/yıl	Marmara Belediyeler Birliği, 2021a, 2021b; Yılmaz, 2002
Akdeniz'den gelen TN yükü	Dönüştürücü	kg/yıl	Öztürk vd., 2021
Karadeniz'den gelen TN yükü	Dönüştürücü	kg/yıl	Öztürk vd., 2021
ileri aritmasız desarj	Dönüştürücü	m <sup>3</sup> /yıl	(T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2021)
ileri atıksız arıtma	Dönüştürücü	m <sup>3</sup> /yıl	T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2021
Karadeniz'e akan TN yükü	Dönüştürücü	kg/yıl	Öztürk vd., 2021
Akdeniz'e akan TN yükü	Dönüştürücü	kg/yıl	Öztürk vd., 2021
Marmara'da çökelen TN yükü	Dönüştürücü	kg/yıl	Öztürk vd., 2021
ileri biyolojik aritmasız TP katsayısı	Dönüştürücü	mg/L	T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2021
ileri biyolojik aritmalı TP katsayısı	Dönüştürücü	mg/L	T.C. Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2021
havzalardan gelen TP yükü	Dönüştürücü	kg/yıl	Marmara Belediyeler Birliği, 2021a, 2021b; Yılmaz, 2002
Akdeniz'den gelen TP yükü	Dönüştürücü	kg/yıl	Öztürk vd., 2021
Karadeniz'den gelen TP yükü	Dönüştürücü	kg/yıl	Öztürk vd., 2021
Karadeniz'e akan TP yükü	Dönüştürücü	kg/yıl	Öztürk vd., 2021
Akdeniz'e akan TP yükü	Dönüştürücü	kg/yıl	Öztürk vd., 2021
yüzey seviyedeki çözülmüş oksijen	Dönüştürücü	mg/L	Artüz, 2008
orta derinlikteki çözülmüş oksijen	Dönüştürücü	mg/L	Artüz, 2008
TN konsantrasyonu	Stok	mg/L	Öztürk, 2021
TP konsantrasyonu	Stok	mg/L	Öztürk, 2021
Müsilaj riski	Stok	-	-

**EK-B**

Stella 9.2.1 yazılımında oluşturulan SD modeli denklemleri aşağıdaki gibidir:

$$\text{müsilaj\_riski}(t) = \text{müsilaj\_riski}(t - dt) + (\text{müsilaj\_faktörleri} - \text{bertaraf}) * dt$$

$$\text{INIT müsilaj\_riski} = 0$$

INFLOWS:

$$\text{müsilaj\_faktörleri} = \text{IF TN\_konsantrasyonu} < 0.034 \text{ AND TP\_konsantrasyonu} < 0.03 \text{ AND yüzey\_seviyedeki\_çözülmüş\_oksijen} > 6 \text{ AND orta\_derinlikteki\_çözülmüş\_oksijen} > 2$$

$$\text{OR TN\_konsantrasyonu} < 0.034 \text{ AND TP\_konsantrasyonu} < 0.03 \text{ AND yüzey\_seviyedeki\_çözülmüş\_oksijen} > 6 \text{ AND orta\_derinlikteki\_çözülmüş\_oksijen} > 2$$

$$\text{OR } 0.034 < \text{TN\_konsantrasyonu} < 3.4 \text{ AND TP\_konsantrasyonu} < 0.03 \text{ AND yüzey\_seviyedeki\_çözülmüş\_oksijen} > 6 \text{ AND orta\_derinlikteki\_çözülmüş\_oksijen} > 2$$

$$\text{OR TN\_konsantrasyonu} < 0.034 \text{ AND } 0.03 < \text{TP\_konsantrasyonu} < 0.3 \text{ AND yüzey\_seviyedeki\_çözülmüş\_oksijen} > 6 \text{ AND orta\_derinlikteki\_çözülmüş\_oksijen} > 2$$

$$\text{OR TN\_konsantrasyonu} < 0.034 \text{ AND TP\_konsantrasyonu} < 0.03 \text{ AND } 3 < \text{yüzey\_seviyedeki\_çözülmüş\_oksijen} < 6 \text{ AND orta\_derinlikteki\_çözülmüş\_oksijen} > 2$$

$$\text{OR TN\_konsantrasyonu} < 0.034 \text{ AND TP\_konsantrasyonu} < 0.03 \text{ AND yüzey\_seviyedeki\_çözülmüş\_oksijen} > 6 \text{ AND } 0.5 < \text{orta\_derinlikteki\_çözülmüş\_oksijen} < 2$$

$$\text{OR } 0.034 < \text{TN\_konsantrasyonu} < 3.4 \text{ AND TP\_konsantrasyonu} < 0.03 \text{ AND yüzey\_seviyedeki\_çözülmüş\_oksijen} > 6 \text{ AND orta\_derinlikteki\_çözülmüş\_oksijen} > 2$$

$$\text{OR TN\_konsantrasyonu} < 0.034 \text{ AND } 0.03 < \text{TP\_konsantrasyonu} < 0.3 \text{ AND yüzey\_seviyedeki\_çözülmüş\_oksijen} > 6 \text{ AND orta\_derinlikteki\_çözülmüş\_oksijen} > 2$$

$$\text{OR TN\_konsantrasyonu} < 0.034 \text{ AND TP\_konsantrasyonu} < 0.03 \text{ AND } 3 < \text{yüzey\_seviyedeki\_çözülmüş\_oksijen} < 6 \text{ AND orta\_derinlikteki\_çözülmüş\_oksijen} > 2$$

$$\text{OR TN\_konsantrasyonu} < 0.034 \text{ AND TP\_konsantrasyonu} < 0.03 \text{ AND yüzey\_seviyedeki\_çözülmüş\_oksijen} > 6 \text{ AND } 0.5 < \text{orta\_derinlikteki\_çözülmüş\_oksijen} < 2$$

$$\text{OR } 0.034 < \text{TN\_konsantrasyonu} < 3.4 \text{ AND } 0.03 < \text{TP\_konsantrasyonu} < 0.3 \text{ AND yüzey\_seviyedeki\_çözülmüş\_oksijen} > 6 \text{ AND orta\_derinlikteki\_çözülmüş\_oksijen} > 2$$

$$\text{OR } 0.034 < \text{TN\_konsantrasyonu} < 3.4 \text{ AND TP\_konsantrasyonu} < 0.03 \text{ AND } 3 < \text{yüzey\_seviyedeki\_çözülmüş\_oksijen} < 6 \text{ AND orta\_derinlikteki\_çözülmüş\_oksijen} > 2$$

$$\text{OR } 0.034 < \text{TN\_konsantrasyonu} < 3.4 \text{ AND TP\_konsantrasyonu} < 0.03 \text{ AND yüzey\_seviyedeki\_çözülmüş\_oksijen} > 6 \text{ AND } 0.5 < \text{orta\_derinlikteki\_çözülmüş\_oksijen} < 2$$

```
OR TN__konsantrasyonu<0.034 AND 0.03<TP__konsantrasyonu<0.3 AND 3<yüzey_seviyedeki_çözölmüs_oksijen<6 AND
orta_derinlikteki_çözölmüs_oksijen>2
OR TN__konsantrasyonu<0.034 AND 0.03<TP__konsantrasyonu<0.3 AND yüzey_seviyedeki_çözölmüs_oksijen>6 AND
0.5<orta_derinlikteki_çözölmüs_oksijen<2
OR TN__konsantrasyonu<0.034 AND TP__konsantrasyonu<0.03 AND 3<yüzey_seviyedeki_çözölmüs_oksijen<6 AND
0.5<orta_derinlikteki_çözölmüs_oksijen<2
THEN 0
ELSE IF (TN__konsantrasyonu>3.4 AND TP__konsantrasyonu>0.3 AND yüzey_seviyedeki_çözölmüs_oksijen<3 AND
orta_derinlikteki_çözölmüs_oksijen<0.5) OR (TN__konsantrasyonu>3.4 AND TP__konsantrasyonu>0.3 AND
yüzey_seviyedeki_çözölmüs_oksijen<3 AND orta_derinlikteki_çözölmüs_oksijen<0.5) OR (0.034<TN__konsantrasyonu<3.4 AND
TP__konsantrasyonu>0.3 AND yüzey_seviyedeki_çözölmüs_oksijen<3 AND orta_derinlikteki_çözölmüs_oksijen<0.5) OR
(TN__konsantrasyonu>3.4 AND 0.03<TP__konsantrasyonu<0.3 AND yüzey_seviyedeki_çözölmüs_oksijen<3 AND
orta_derinlikteki_çözölmüs_oksijen<0.5) OR (TN__konsantrasyonu>3.4 AND TP__konsantrasyonu>0.3 AND
3<yüzey_seviyedeki_çözölmüs_oksijen<6 AND orta_derinlikteki_çözölmüs_oksijen<0.5) OR (TN__konsantrasyonu>3.4 AND
TP__konsantrasyonu>0.3 AND yüzey_seviyedeki_çözölmüs_oksijen<3 AND 0.5<orta_derinlikteki_çözölmüs_oksijen<2) THEN 2 ELSE 1
OUTFLOWS:
bertaraf = HISTORY(müsilaj_riski,TIME)
TN__konsantrasyonu(t) = TN__konsantrasyonu(t - dt) + (yillik_eklenen_TN_yükü - yillik_çikan_TN_yükü) * dt
INIT TN__konsantrasyonu = 6.499820943
INFLOWS:
yillik_eklenen_TN_yükü =
((ileri_biyolojik_aritmalı_TN_katsayisi/1000000*ileri_atik_su_aritma*1000+ileri_biyolojik_aritmasız_TN_katsayisi/1000000*ileri_aritması
z_desarj*1000+havzalardan_gelen_TN_yükü+Akdeniz'den_gelen_TN_yükü+Karadeniz'den_gelen_TN_yükü)*1000000/(3378*10^12))
OUTFLOWS:
yillik_çikan_TN_yükü =
(Akdeniz'e_akan_TN_yükü+Karadeniz'e_akan_TN_yükü+Marmara'da_çökelen_TN_yükü)*1000000/(3378*10^12)
TP__konsantrasyonu(t) = TP__konsantrasyonu(t - dt) + (yillik_eklenen_TP_yuku - yillik_çikan_TP_yükü) * dt
INIT TP__konsantrasyonu = 0.140690778
INFLOWS:
yillik_eklenen_TP_yuku =
((ileri_biyolojik_aritmalı_TP_katsayisi/1000000*ileri_atik_su_aritma*1000+ileri_biyolojik_aritmasız_TP_katsayisi/1000000*ileri_aritması
z_desarj*1000+Havzalardan_gelen_TP_yükü+Akdeniz'den_gelen_TP_yükü+Karadeniz'den_gelen_TP_yükü)*1000000/(3378*10^12))
OUTFLOWS:
yillik_çikan_TP_yükü = (Akdeniz'e_akan_TP_yükü+Karadeniz'e_akan_TP_yükü)*1000000/(3378*10^12)
Akdeniz'den_gelen_TN_yükü = 7100000
Akdeniz'den_gelen_TP_yükü = 1900000
Akdeniz'e_akan_TN_yükü = 18400000
Akdeniz'e_akan_TP_yükü = 9600000
ileri_biyolojik_aritmalı_TN_katsayisi = 15
ileri_biyolojik_aritmalı_TP_katsayisi = 2
ileri_biyolojik_aritmasız_TN_katsayisi = 71.87751973
ileri_biyolojik_aritmasız_TP_katsayisi = 12.24226539
Karadeniz'den_gelen_TN_yükü = 18250000
Karadeniz'den_gelen_TP_yükü = 4015000
Karadeniz'e_akan_TN_yükü = 44500000
Karadeniz'e_akan_TP_yükü = 8212500
Marmara'da_çökelen_TN_yükü = 19500000
orta_derinlikteki_çözölmüs_oksijen = IF 0.133476776946542+0.00223293966967472*TN__konsantrasyonu-
0.101588310852624*TP__konsantrasyonu >=0 AND müsilaj_riski>=0 THEN
(0.133476776946542+0.00223293966967472*TN__konsantrasyonu-0.101588310852624*TP__konsantrasyonu) ELSE 0.00001
yüzey_seviyedeki_çözölmüs_oksijen = IF 2.76287935411283+0.112177093290657*TN__konsantrasyonu-
1.91515542622579*TP__konsantrasyonu >= 0 AND müsilaj_riski>=0 THEN
2.76287935411283+0.112177093290657*TN__konsantrasyonu-1.91515542622579*TP__konsantrasyonu ELSE 0.00001
havzalardan_gelen_TN_yükü = GRAPH(TIME)
(2007, 7.1e+008), (2008, 7.4e+008), (2009, 6.6e+008), (2010, 7.5e+008), (2011, 4.7e+008), (2012, 4.6e+008), (2013, 4.2e+008), (2014,
4.6e+008), (2015, 3.7e+008), (2016, 3.5e+008), (2017, 3.3e+008), (2018, 3e+008), (2019, 3.1e+008), (2020, 3e+008), (2021, 3.3e+008),
(2022, 3.3e+008), (2023, 3.2e+008), (2024, 3.2e+008), (2025, 3.2e+008), (2026, 3.2e+008), (2027, 3.2e+008), (2028, 3.1e+008), (2029,
3.1e+008), (2030, 3.1e+008), (2031, 3.1e+008), (2032, 3.1e+008), (2033, 3e+008), (2034, 3e+008), (2035, 3e+008), (2036, 3e+008), (2037,
3e+008), (2038, 2.9e+008), (2039, 2.9e+008), (2040, 2.9e+008)
Havzalardan_gelen_TP_yükü = GRAPH(TIME)
(2007, 1.9e+008), (2008, 7.2e+007), (2009, 6e+007), (2010, 6.8e+007), (2011, 7e+007), (2012, 6.5e+007), (2013, 5.7e+007), (2014,
5.7e+007), (2015, 5e+007), (2016, 4.9e+007), (2017, 4.6e+007), (2018, 4.2e+007), (2019, 4.3e+007), (2020, 4.2e+007), (2021, 4.8e+007),
(2022, 4.7e+007), (2023, 4.7e+007), (2024, 4.7e+007), (2025, 4.7e+007), (2026, 4.6e+007), (2027, 4.6e+007), (2028, 4.6e+007), (2029,
4.6e+007), (2030, 4.5e+007), (2031, 4.5e+007), (2032, 4.5e+007), (2033, 4.5e+007), (2034, 4.4e+007), (2035, 4.4e+007), (2036, 4.4e+007),
(2037, 4.4e+007), (2038, 4.4e+007), (2039, 4.3e+007), (2040, 4.3e+007)
ileri_aritmasız_desarj = GRAPH(TIME)
(2007, 7.5e+008), (2008, 7.6e+008), (2009, 7.7e+008), (2010, 7.9e+008), (2011, 8.2e+008), (2012, 8.3e+008), (2013, 8.5e+008), (2014,
8.7e+008), (2015, 8.9e+008), (2016, 9.1e+008), (2017, 9.4e+008), (2018, 9.6e+008), (2019, 9.9e+008), (2020, 1e+009), (2021, 1e+009),
(2022, 1.1e+009), (2023, 1.1e+009), (2024, 1.1e+009), (2025, 1.2e+009), (2026, 1.2e+009), (2027, 1.3e+009), (2028, 1.3e+009), (2029,
```

1.4e+009), (2030, 1.4e+009), (2031, 1.5e+009), (2032, 1.6e+009), (2033, 1.7e+009), (2034, 1.8e+009), (2035, 1.9e+009), (2036, 2e+009), (2037, 2.2e+009), (2038, 2.4e+009), (2039, 2.6e+009), (2040, 2.8e+009)  
ileri\_atik\_su\_aritma = GRAPH(TIME)  
(2007, 5.4e+008), (2008, 5.5e+008), (2009, 5.6e+008), (2010, 5.8e+008), (2011, 5.9e+008), (2012, 6.1e+008), (2013, 6.2e+008), (2014, 6.3e+008), (2015, 6.5e+008), (2016, 6.7e+008), (2017, 6.8e+008), (2018, 7e+008), (2019, 7.2e+008), (2020, 7.4e+008), (2021, 7.6e+008), (2022, 7.8e+008), (2023, 8e+008), (2024, 8.3e+008), (2025, 8.6e+008), (2026, 8.9e+008), (2027, 9.2e+008), (2028, 9.6e+008), (2029, 1e+009), (2030, 1e+009), (2031, 1.1e+009), (2032, 1.2e+009), (2033, 1.2e+009), (2034, 1.3e+009), (2035, 1.4e+009), (2036, 1.5e+009), (2037, 1.6e+009), (2038, 1.7e+009), (2039, 1.9e+009), (2040, 2.1e+009)



# Kahramanmaraş Sütçü İmam University

## Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 12.10.2023  
Kabul Tarihi : 11.11.2023

Received Date : 12.10.2023  
Accepted Date : 11.11.2023

### INVESTIGATION OF THE FRACTURE BEHAVIOR OF GEOPOLYMER CONCRETE REINFORCED WITH RECYCLED STEEL AND GLASS FIBERS

### GERİ DÖNÜŞTÜRÜLMÜŞ ÇELİK LİF VE CAM ELYAFI KULLANILARAK GÜÇLENDİRİLMİŞ GEOPOLİMER BETONLARIN KIRILMA DAVRANIŞININ İNCELENMESİ

Hakan BAYRAK<sup>1\*</sup> (ORCID: 0000-0001-9441-2214)  
Muhammed GÜMÜŞ<sup>1</sup> (ORCID: 0000-0002-7380-0098)

<sup>1</sup> Kafkas Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Kars, Türkiye

\*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Hakan BAYRAK, hbayrak@kafkas.edu.tr

#### ABSTRACT

The brittleness of the geopolymer composites is an issue for its widespread use worldwide. Therefore, several types of fibers have been added to the geopolymer mixture to provide a ductile manner. In this work, the recycled steel fibers were employed in a hybrid form with glass fibers to take advantage of the low carbon emission in the production process of recycled steel fibers. The total fiber content was taken as constant 0.6% by volume. Five dissimilar geopolymer batches were handled and two concrete prisms were cast for each batch. Those prisms were tested under three-point loading and the deformed shapes of the specimens' surface were captured by digital camera to generate the surface displacement field. The fracture characteristics of the notched prisms were criticized in terms of (i) load-CMOD response, (ii) crack progress ahead of the pre-notch, (iii) fracture energy, (iv) ultimate load-bearing capacity, and (v) unstable fracture toughness. Test results revealed that the residual strength, the ultimate load, and the fracture energy of fiber-reinforced geopolymers had a decreasing trend with the increasing recycled steel fiber ratio in the hybrid blend. The reasonable cause of that finding was the heterogeneous distribution of the recycled steel fibers.

**Keywords:** Geopolymer, recycled steel fiber, glass fiber, digital image correlation, notched prism

#### ÖZET

Geopolimer kompozitlerin gevrek davranışı, dünya çapında yaygın kullanımı için bir sorundur. Bu nedenle geopolimer karışımına süneklik sağlamak amacıyla çeşitli tiplerde lifler eklenmiştir. Bu çalışmada, geri dönüştürülmüş çelik liflerin üretim sürecindeki düşük karbon emisyonundan yararlanmak amacıyla, geri dönüştürülmüş çelik elyaflar cam elyaflarla birlikte hibrit formda kullanıldı. Toplam lif içeriği hacimce %0,6 sabit olarak alınmıştır. Beş farklı geopolimer karışımı hazırlanmış ve her karışım için iki beton prizma dökülmüştür. Bu prizmalar üç noktalı yükleme altında test edildi ve numunelerin yüzeyinin deforme şekli, yüzey yer değiştirme alanını oluşturmak için dijital kamera ile kaydedildi. Çentikli prizmaların kırılma özellikleri (i) yük-CMOD davranışı, (ii) çentik önündeki çatlak ilerlemesi, (iii) kırılma enerjisi, (iv) nihai yük taşıma kapasitesi ve (v) kararsız kırılma tokluğu açısından değerlendirildi. Test sonuçları, hibrit karışımdaki geri dönüştürülmüş çelik lif oranının artmasıyla birlikte lifli geopolimerlerin artık dayanımları, nihai yükü ve kırılma enerjisinin azalma eğiliminde olduğunu ortaya çıkardı. Bu durumun geri dönüştürülmüş çelik liflerin beton içerisindeki heterojen dağılımından kaynaklandığı düşünülmektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Geopolimer, atık çelik lif, cam lifi, dijital görüntü korelasyonu, çentikli prizma



## INTRODUCTION

Traditional concrete materials were regarded as indispensable construction materials due to their featured mechanical properties until a few decades ago. Ordinary Portland cement is used as a main traditional concrete material; however, the entire cement production process generates a large number of greenhouse gases and harmful emissions (Anvari & Toufigh, 2022), including carbon dioxide and sulfur dioxide (Farhan et al., 2018). Several studies have shown that one-ton cement production releases one-ton carbon dioxide, also total global carbon dioxide emissions released from cement production are approximately 5 – 7 % (Wang Z. et al., 2023; da Silva et al., 2022; Ren & Li, 2022; Wang Yijiang et al., 2020). Furthermore, cement production requires continuous electrical energy. Therefore, it causes very high levels of energy consumption (Zada Farhan et al., 2022). Due to the mentioned disadvantages, especially environmental ones, research has focused on the production of cement-free concrete materials by preserving the mechanical properties of concrete used in the construction sector (Laxmi & Patil, 2022). Eventually, studies indicate that geopolymer concrete manufacturing emits significantly less carbon dioxide than ordinary Portland cement concrete (Khan et al., 2022; Li et al., 2022). Additionally, the energy usage during the production of geopolymer concrete is significantly lower compared to ordinary Portland cement concrete with equivalent strength (Sherwani et al., 2022). In addition, it is revealed that the solidified state of the geopolymers displays superior mechanical and durability characteristics in comparison to those of ordinary cement-based concrete (Ding et al., 2016). Several investigations regarding geopolymer concretes focused on gathering fresh insights into the effect of mixture component ratios on the final material's strength, and physical and mechanical properties (Meskhi et al., 2023). For example, one study analyzed the impact of fly ash and waste glass powder (WGP) in specific ratios on geopolymer concrete (GPC) by varying the proportions of molarity and WGP percentage in GPC (Çelik et al., 2023). In addition, in some studies, waste or recycled materials were utilized to enhance the mechanical properties of geopolymers while considering environmental factors (Başaran et al., 2023; Özkılıç et al., 2023). Unfortunately, the brittleness of geopolymer concretes continues to be an issue due to their highly amorphous intrinsic structures. To address this problem, fibers were added to the mixtures in their fresh state (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). Recent research employs innovative ideas and technologies, including 3D printing of fiber-reinforced geopolymer concrete. Further studies must focus on the analysis of the properties of compositions acquired through various binder and activator types in order to advance this field (Meskhi et al., 2023).

Adding various types of fibers has become a widely utilized technique in engineering applications to overcome the disadvantages described earlier in geopolymer concrete (Wang T. et al., 2023). Generally, the fibrous materials utilized to enhance the performance of geopolymer concrete fall into two categories: industrial fibers and natural fibers (Vijaya Prasad et al., 2022). Industrial fibers can be classified into three main types: steel, synthetic, and inorganic. On the other hand, natural fibers are typically composed of animal, plant, and mineral fibers. Among all the fibers, steel fibers with varying geometric shapes were the most preferred type (Rashad, 2020). The primary rationales for selecting steel fibers are their cost effectiveness, high density, and high tensile strength (Pajak & Ponikiewski, 2013). In addition, studies have shown that the benefits of incorporating steel fibers can be summarized as follows (Aisheh et al., 2022; Vijaya Prasad et al., 2022): (i) improvement of ductility, toughness and flexural strength of geopolymer concrete (ii) improvement of impact and fatigue resistance of structural materials (iii) reducing the permeability, creep and shrinkage of polymer concrete (iv) increasing amount of absorbing energy. Despite these advantages, using industrial steel fibers in eco-friendly geopolymers would increase their carbon footprint. The production of just one ton of concrete and steel emits 0.9 and 1.9 tons of CO<sub>2</sub> into the atmosphere respectively (Isa et al., 2020). The result of another study shows the undesirable fact that industrial steel fibers account for 40% of the total carbon emissions of standard cement-based concrete containing 1.5% volume of fibers (Mastali et al., 2018). These problems have been partially addressed by utilizing recycled steel fiber in place of industrial steel fiber (Qin & Kaewunruen, 2022; Simalti & Singh, 2021). Due to this advantageous property of recycled steel fiber, recent research has focused on the incorporation of recycled steel fiber into geopolymer concrete. Several empirical researches have been carried out to uncover the impact of recycled steel fibers on the mechanical characteristics of geopolymer composites. One of the studies, conducted by (Yolcu et al., 2022), examined how the dose of binder affects the mechanical and durability properties of recycled steel fiber-reinforced geopolymers. According to findings, increasing the binder dosage enhances mechanical features such as compressive, flexural, and splitting tensile strength. In another study, researchers stated that recycled steel fibers may decrease the workability of fresh geopolymer mixtures. However, these fibers also have a favorable effect on the compressive and flexural strength of hardened geopolymer concrete (Eskandarinia et al., 2022).

In addition to the significant effect of recycled steel fiber, in certain studies, recycled steel fibers have been hybridized to capitalize on the synergistic impact of other fiber types. One study employed both industrial and recycled steel fibers to create a hybrid form. (Alsaif & Abdulrahman S. Albidah, 2022). The study demonstrated that the hybrid steel fibers address the reduction in strength of the geopolymer as a result of the waste tire rubber additives. Another conducted study (Zhong et al., 2019) examined the geopolymer concretes, which incorporate waste tire rubber and recycled steel fibers at different dosages. The results revealed that the addition of recycled steel fibers not only enhanced the flexural response after the peak load but also restored the reduced compressive strength caused by crumb rubber. In addition to the studies on hybridized geopolymer concrete, the research (Wang Yi et al., 2020) presents an experimental study examining the impact of hybrid polyvinyl alcohol and recycled tire steel fibers on the engineering properties of fly ash-slag-based strain-hardening geopolymer composites. The obtained results show that the strain-hardening geopolymer composite's resistance to drying shrinkage and compressive strength were improved significantly. Nonetheless, hybridizing polyvinyl alcohol fiber with recycled tire steel fiber caused a noteworthy reduction in flowability, setting time, and flexural strength of strain-hardening geopolymer composite. Eventually, studies have shown that recycled steel fibers can be combined with various fibers to improve the strength of geopolymer concrete. Additionally, fiber additives can improve the post-peak flexural response of quasi-brittle materials by bridging cohesive cracks. One highly effective additive for achieving this advantageous situation is glass fiber. The research (Kumar et al., 2022) indicates that the incorporation of glass fiber can prevent microcracks in geopolymer concrete. This study suggests that glass fiber may enhance the toughness of geopolymer concrete, resulting in a highly dense and crack-free geopolymer matrix with improved toughness. Another study (Rashedi et al., 2022) also demonstrated that the inclusion of glass fiber, an inorganic, non-metallic material, into geopolymer concrete offers great insulation, robust heat and corrosion resistance, and high mechanical strength. However, its drawbacks lie in brittleness and poor wear resistance. On the other hand, there is no existing study that explores the utilization of recycled steel fibers combined with glass fibers in geopolymer concrete, even though glass fibers offer favorable properties. Hence, it is evident that there is a need for a specific study in which the hybrid blend of glass and recycled steel fibers is investigated as the main parameters in terms of fracture characteristics of geopolymer composites.

In light of the literature review, the main distinctive feature of the present study is to blend the recycled steel and the glass fibers and to use this hybrid fiber form to improve the fracture characteristics of geopolymer concrete. The notched prism specimens were produced to evaluate the influence of blends obtained by hybridizing both fibers on the fracture behavior of geopolymer concrete. A total of ten prisms geopolymer concrete specimens with 100x100x400 mm were formed by pouring two specimens from each of 5 different mixes. All the specimens underwent testing using a deformation-controlled quasi-static three-point bending load. The cohesive crack's formation and propagation were documented using the two-dimensional digital image correlation technique. The test results were analyzed for (i) Load-CMOD responses, (ii) crack growth process, (iii) fracture energy, (iv) ultima load resisting capacity, and (v) unstable fracture toughness. Despite the limited number of samples, these findings can broaden our current understanding of the fracture behavior of a mixture of recycled steel and glass fiber-reinforced geopolymers.

## EXPERIMENTAL PROGRAM

### *Material Properties*

The geopolymer concrete samples produced in this study contain a total of 6 different ingredients: Slag, marble, sodium silicate, sodium hydroxide, recycled steel, and glass fiber. Ground granulated blast-furnace slag was utilized as the aluminosilicate source material in the blend. The manufacturer reported that the slag has a specific gravity of 2.9 g/cm<sup>3</sup> and a specific surface of 5445 cm<sup>2</sup>/g. Marble powder used in the geopolymer concrete was intentionally selected as the filling material to mitigate environmental concerns. The marble powder exhibited a particle size range of 0 to 400 microns. In addition to the marble powder, no other coarse or fine aggregate has been used in the blend. A combination of sodium silicate and sodium hydroxide solution was used to activate the aluminosilicate precursor. The concentration ratios of the solutions were employed as 36% for the sodium silicate and 48% for the sodium hydroxide. The density of the sodium silicate and sodium hydroxide solutions was approximately 1.38 g/cm<sup>3</sup>. Also, the molarity of the sodium hydroxide solution was 12 M. Another ingredient utilized in the concrete mixture was the recycled steel fibers having a peak frequency of about 10% in fiber length corresponding to the range of 24-28 mm. Another additive used in this study the glass fibers exhibit high resistance to both alkaline and acidic environments, rendering them suitable for use in highly alkaline geopolymer concrete without any adverse effects (Ganesh & Muthukannan, 2021). Several essential mechanical and physical properties of the glass fiber used in the compound

are as follows. Young's modulus and tensile strength of glass fiber are 72 GPa and 1700 MPa, respectively. A visual representation of the constituents used to manufacture the geopolymer composites is shown in Figure 1.

### Notched Beams

In this study, it is aimed to examine fracture mode 1 for the produced specimens. To achieve this goal, it is necessary to determine the crack mount opening displacement of the beam under the applied load. Before testing the beams, a notch is made at the center of each beam. The peak point of the notch is then used as a reference to determine the crack mount opening displacement with the aid of 2D digital image correlation. Therefore, ten notched prism specimens were produced utilizing five different mix ratios. The substances utilized in the production of the geopolymer composites are displayed in Table 1. As shown in the table, notch prisms were named according to the proportions of the fiber content used in volume for the sample design. The letters in the name of the sample indicate the type of fiber used, while the numbers following them indicate the percentage by volume of that fiber in the sample. As illustrated in the table, the blend in the top row has no fiber, whereas all other blends contain at least one fiber type. Also, the fiber content in the blends with fiber is 0.6% of the total volume. For example, the mixture's name G0.4S0.2-I/II indicates that the blend contains 0.4% glass fiber and 0.2% recycled steel fiber by volume. Also, I/II demonstrates that identical two samples were generated from every mix ratio. As shown in the table, the ratio of precursor to activator (the sum of sodium silicate and sodium hydroxide) is equal to 2. In addition, the ratio of sodium silicate to sodium hydroxide was 2.5. For each mixture, those ratios were kept constant. However, to ensure the volume stability of the mixture, the quantity of marble powder was adjusted to range from 785-801 kg/m<sup>3</sup>.

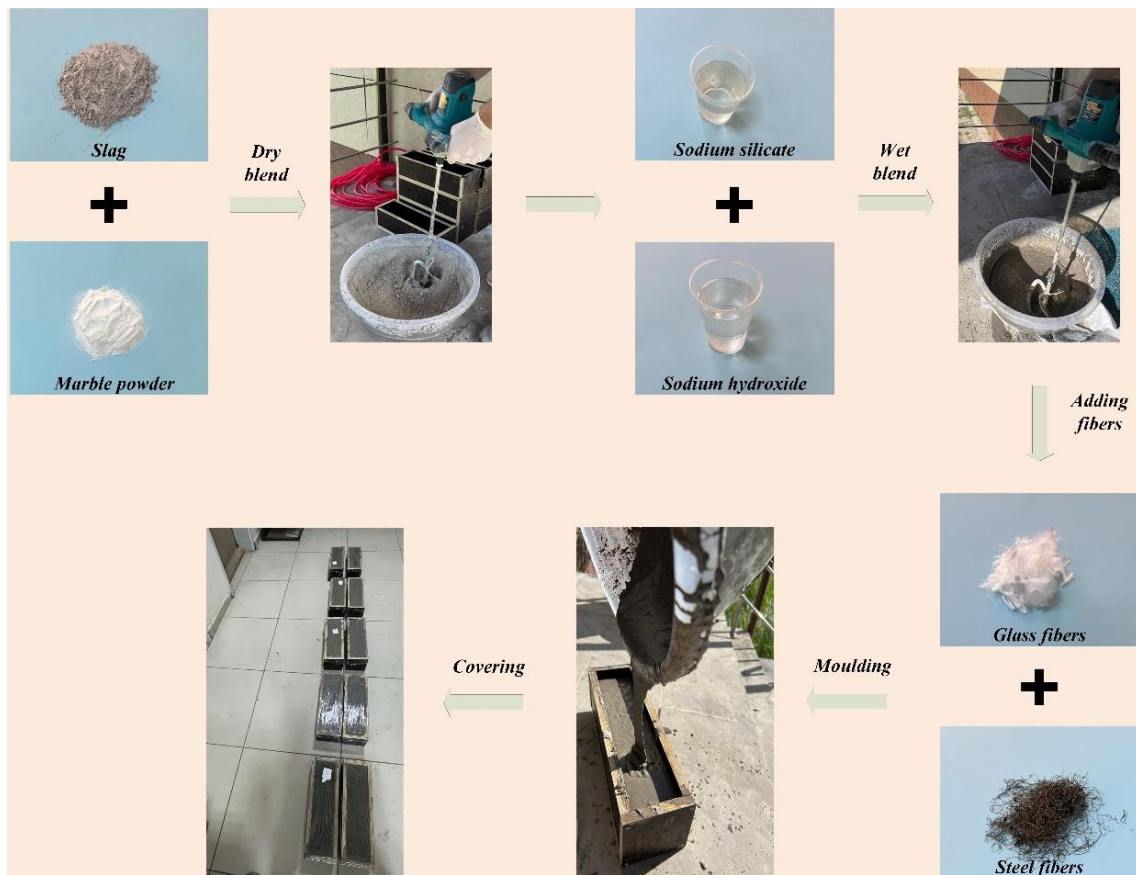


Figure 1. A Sketch of Concrete Production Process

Table 1. The Mixture Compositions for The Geopolymer Concrete (kg/m<sup>3</sup>)

Mix ID	Slag	Marble powder	Sodium silicate	Sodium hydroxide	Steel fiber	Glass fiber	Total mass (kg)
G0S0-I/II	1008	801	360	144	0	0	2313
G0.6S0-I/II	1008	785	360	144	0	15.5	2312.5
G0.4S0.2-I/II	1008	785	360	144	15.7	10.3	2323
G0.2S0.4-I/II	1008	785	360	144	31.3	5.2	2333.5
G0S0.6-I/II	1008	785	360	144	47	0	2344

To enhance the uniformity of the mixture, the slag and marble powder were initially dry-blended for one minute. Next, the solution of sodium silicate and sodium hydroxide was added to the dry mixture and continued blending for an additional four minutes. Then, recycled steel fibers were added to the fresh mixture to obtain steel fiber-reinforced concretes. Special care was taken to avoid fiber clumping when adding steel fibers. During the next minute of mixing, the fibers were slowly dispersed into the mixture. Next, the fresh mixtures were poured into the wooden molds which had a clear dimension of 100x100x400 mm<sup>3</sup>. To prevent evaporation, the open surfaces of the molds were covered with thin plastic films. Approximately 24 hours after casting, the specimens were taken out from their molds and submerged in a water tank for water curing until the day of testing. Before conducting the experiments, edge notches perpendicular to the longitudinal axis of the specimens were created by cutting them with a circular concrete saw. The depth of the notch remained constant, measuring 30 mm for every specimen, and all notches were drilled at the center of each specimen as shown in Figure 2. In the present study, the deformations on the sample surface were determined using 2D digital image correlation using the photos taken during the test. To achieve this goal, the specimens' surface was initially coated with white paint. Then, speckle patterns on the newly formed white background were created.

### ***Test Configuration***

The experimental setup utilized in this study is illustrated in Figure 2. As shown in the figure, the clear span length of the specimen was set to 300 mm, resulting in a span-to-depth ratio of 3. The notched beams were subjected to a bending load with controlled deformation. Throughout the experiment, the loading rate remained constant at 0.05 mm/minute for the plain specimens. For fiber-reinforced specimens, the loading rate was gradually increased until the specimen completely failed. At the stroke length of 0 to 1.5 mm, a loading rate of 0.3 mm per minute was applied. Then, the loading rate increased rapidly to 1.0 mm/minute and 2.0 mm/minute once the testing machine's stroke length surpassed 1.5 mm and 6.5 mm deflection, respectively. The load data was acquired from the load cell on the loading machine and recorded via computer software. The vertical and horizontal deformation maps of the sample surface were calculated from the series of deformed images. The experiment captured the distorted shapes of the specimen, which cannot be detected by the naked eye, within a 5-second interval. To capture those images, a Canon 6D Mark II digital camera and a Canon 50mm f/1.4 USM lens were utilized. Moreover, LED light sources were operated to enhance the contrast between the white background and the dots on it, as shown in Figure 2. In this study, the resolution of the image was approximately 14 pixels per millimeter. Some important DIC parameters used for the analysis of the images were the subset diameter, subset space, and strain radius, which were taken as 50, 20, and 5 pixels respectively. The images have been analyzed using an open-source algorithm (Blaber et al., 2015).



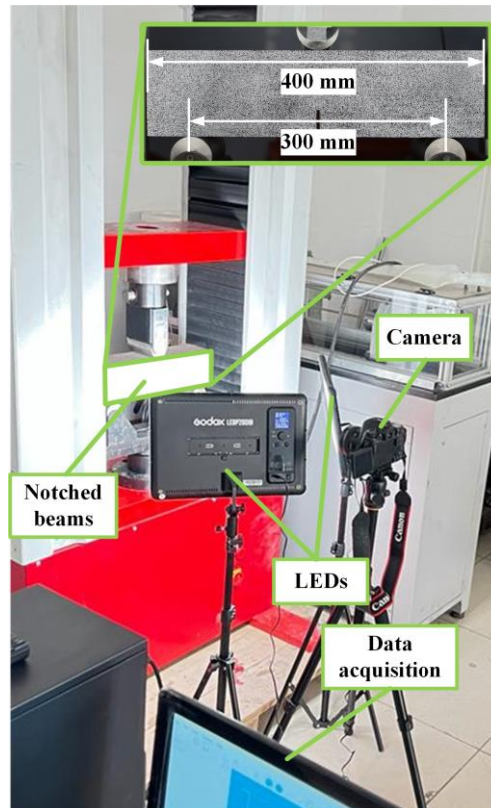


Figure 2. A Representative Review of The Bending Test Setup

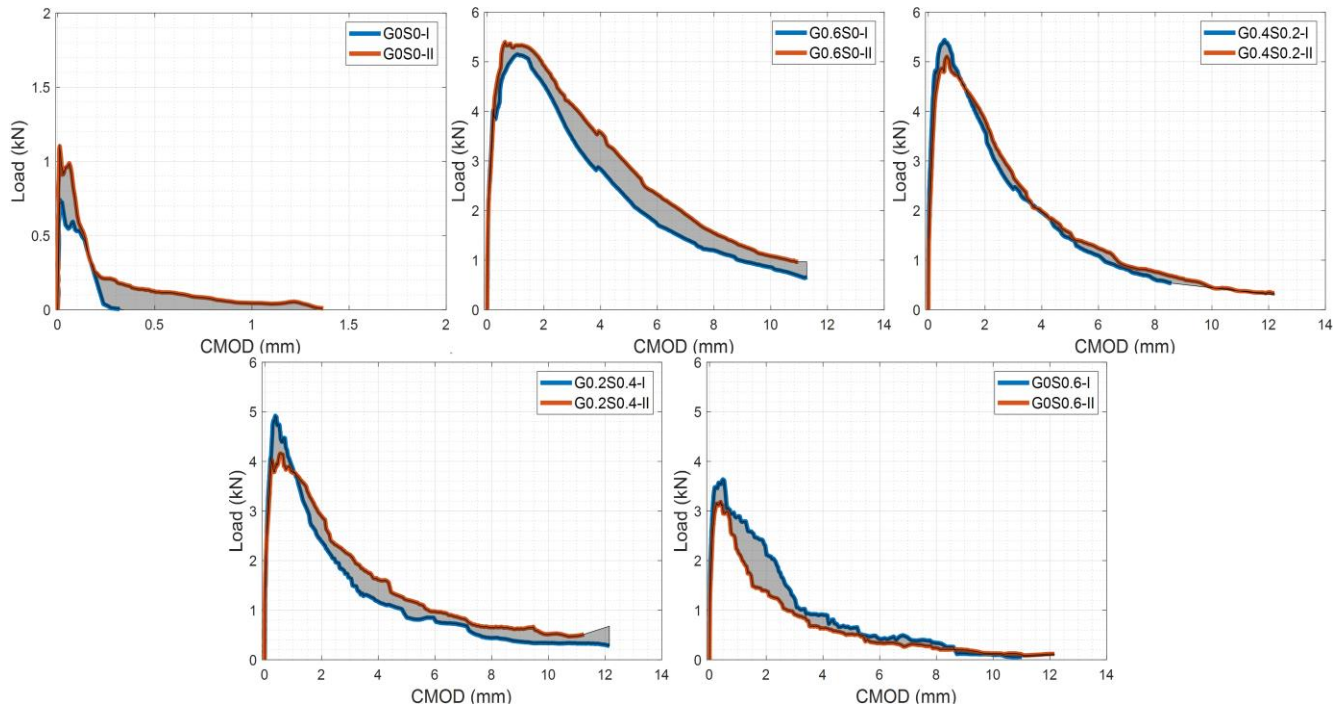
## RESULTS AND DISCUSSIONS

### *Load versus CMOD Curves*

When quasi-brittle materials such as concrete are considered, crack mouth opening displacement (CMOD) is required for defining the material behavior. Figure 3 cooperatively illustrates experimental load versus CMOD curves. In the figure, the possible distribution regions were colored grey. As seen from the figure, the response curves of identical specimens were rather similar to each other. The relatively long tail of the specimen G0S0-II compared to the companion specimen may be attributed to the saw-tooth crack path and thereby the shear stress at the crack surfaces. The bending tests of the fiber-reinforced concrete were terminated at about 8 mm vertical deflection value, which corresponds to approximately 11 mm CMODs as in Figure 3.

Effects of the fiber inclusion were evident in the figure. In comparison with fiber-reinforced specimens, plain specimens had a rather low CMOD capacity which was smaller than 1.5 mm. Besides, the load-bearing capacity of the plain specimens was remarkably lower than that of the fiber-reinforced geopolymers. Those findings were not surprising. The distributed fibers help to stress transfer between the cohesive crack formed at the post-peak zone, which provides the specimens with an enhanced peak load and the ductility level. The other convenient result achieved from Figure 3 is about the rate of stress decay after the peak load is reached. When the ratio of the recycled steel fibers raised from 0 to 0.6% at an interval of 0.2%, the residual strength at the 4 mm of CMOD was recorded as 3.2 kN, 2.0 kN, 1.4 kN, and 0.77 kN, respectively. Accordingly, it can be noted that the glass fibers were a much more influential parameter on the deceleration of strength decay also increasing the ductility of geopolymer specimens.





**Figure 3.** Load Versus Crack Mouth Opening Displacement Curves

### Crack Progress

The crack trajectory of the specimens may serve as an indicator of the overall performance of the notched specimens. As shown in Figure 4, the representative cracking process for the plain specimen (G0S0-I), glass fiber reinforced specimen (G0.6S0-I), and recycled fiber reinforced specimen (G0S0.6-I) was displayed for the varying loading from 20% of the peak load to the peak load at an interval of 20%. Besides, an additional image was also given for the 80% of the peak load at the post-peak region.

It can be observed from Figure 4 that the initial cracking point can be distinguishable. For the G0S0-I, the cracking point was located between 40% and 60% of the peak load, whereas, for the G0.6S0-I and G0S0.6-I specimens, the initial cracks were formed before 20% of the peak load. In terms of the load magnitudes, the cracking loads corresponded to 0.14 kN, 0.99 kN, and 0.76 kN, respectively for the G0S0-I, G0.6S0-I, and G0S0.6-I specimens. Hence, it can be stated that the fiber inclusion significantly improved the cracking load capacity (approximately 607% for the glass fiber and 443% for the recycled steel fiber). Those increments in the cracking load capacity could be attributed to the fiber bridging effect on the cohesive zone.

The other finding is on the multiple crack distributions on the specimens' surface. At first, it should be noted here that the initial cracks were not visible by the naked eye, but only observable through the image analysis. After a while, the major cracks were accompanied by multiple minor cracks in the vicinity of the initial notches. Minor cracks simultaneously developed until the peak loads for the plain specimen of G0S0-I. In the case of fiber-reinforced members, they progressed up to 60% of the peak loads for G0.6S0-I and 80% of the peak loads for G0S0.6-I, respectively. Compared to the plain specimens, therefore, it may be deduced that the distributed fibers compelled the major crack to be localized long before the peak load. Such an experimental result was in good agreement with the literature (Gümüş & Arslan, 2019).

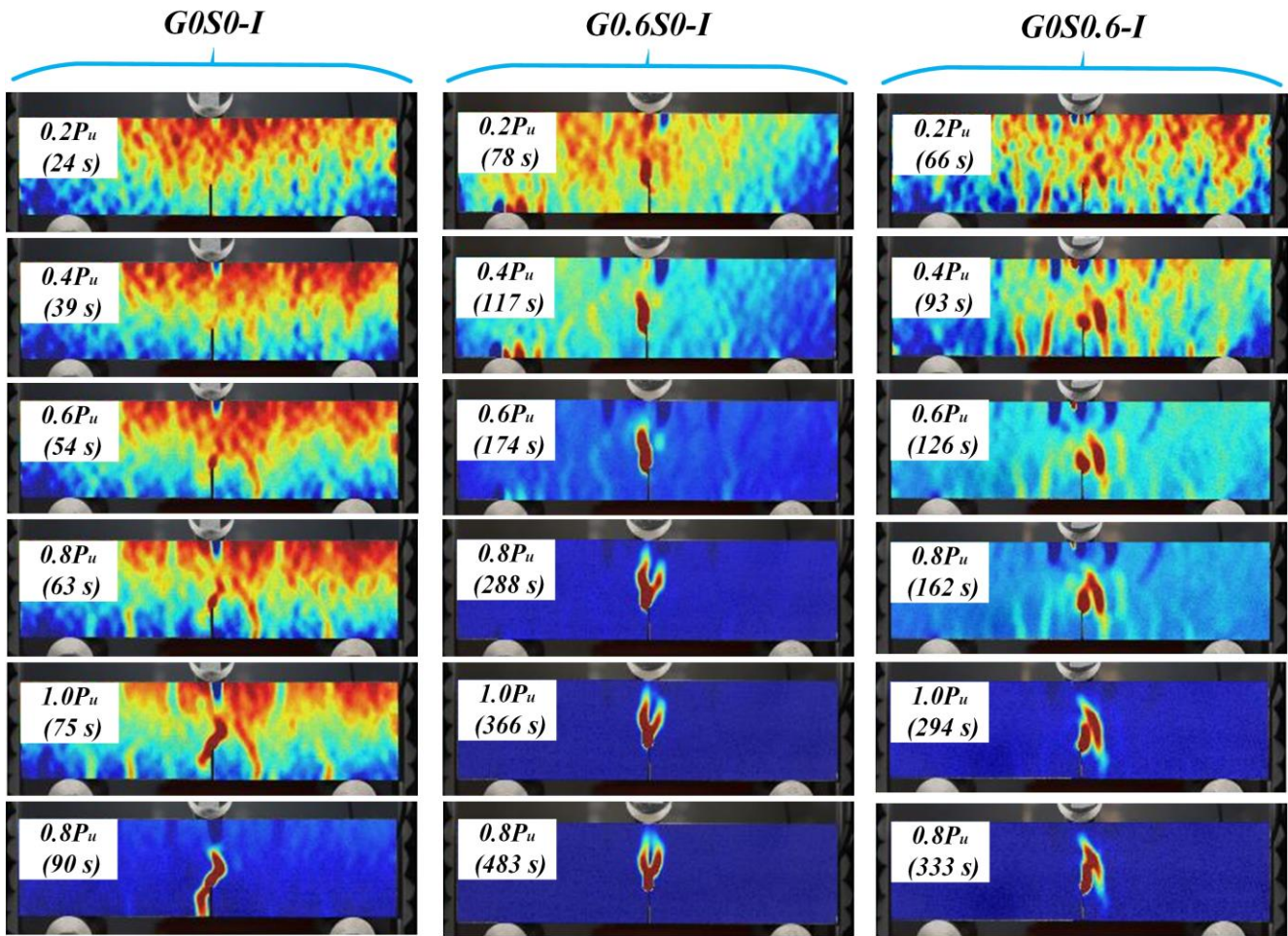


Figure 4. Crack Progress on The Surface of Some Selected Specimens

### Fracture Energy

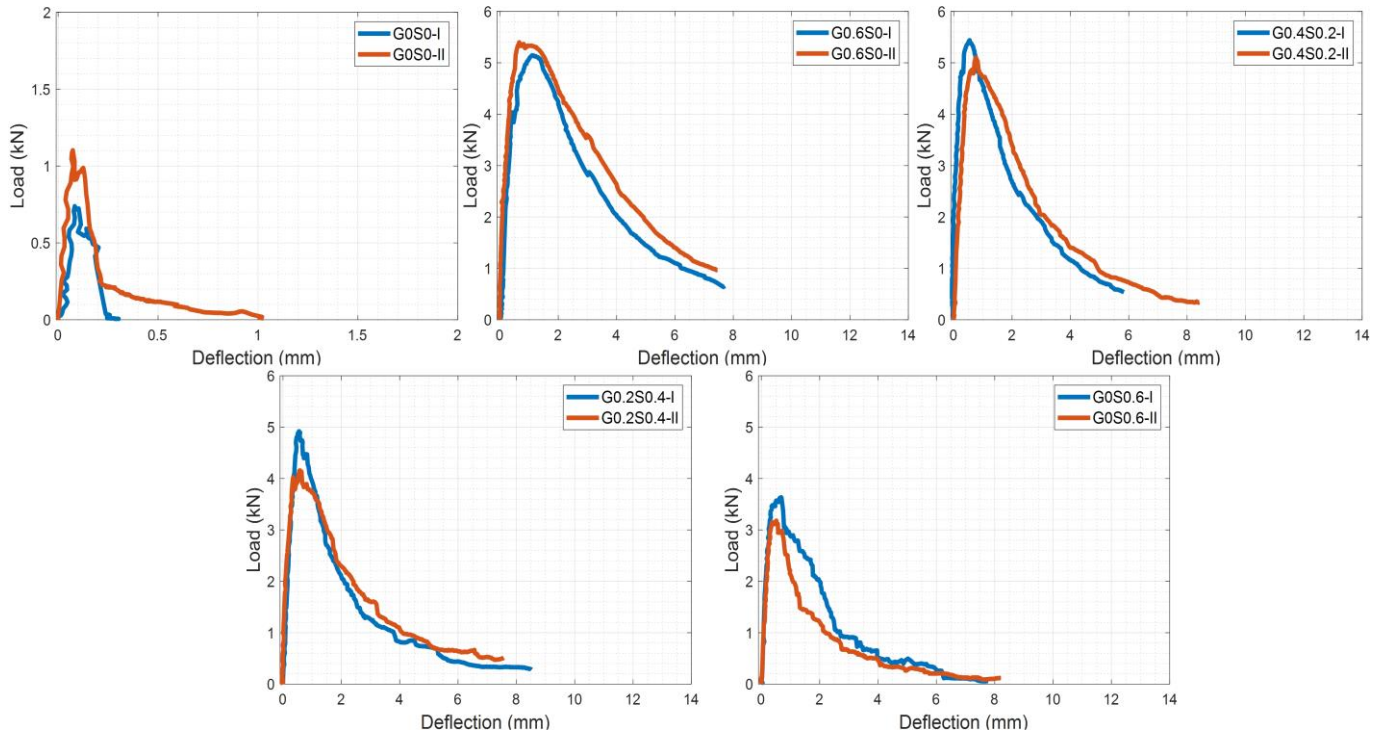
The fracture energy may be referred to as energy required for the failure of the specimens and is of significant fracture parameter for the fiber-reinforced concrete. Because the use of steel fibers mainly improves the post-peak residual strength of plain specimens, while a remarkable enhancement in the ultimate load capacity is obtained. That explanation could be noticeable in the experimental load-deflection curves in Figure 5. From the figure, the strength decay was significantly influenced by the existence of the fibers. The fracture energy used in this section was computed by the following equation (RILEM TCS, 1985).

$$G_F = \frac{W_0 + mg\delta_0}{b(h-a_0)} \quad (1)$$

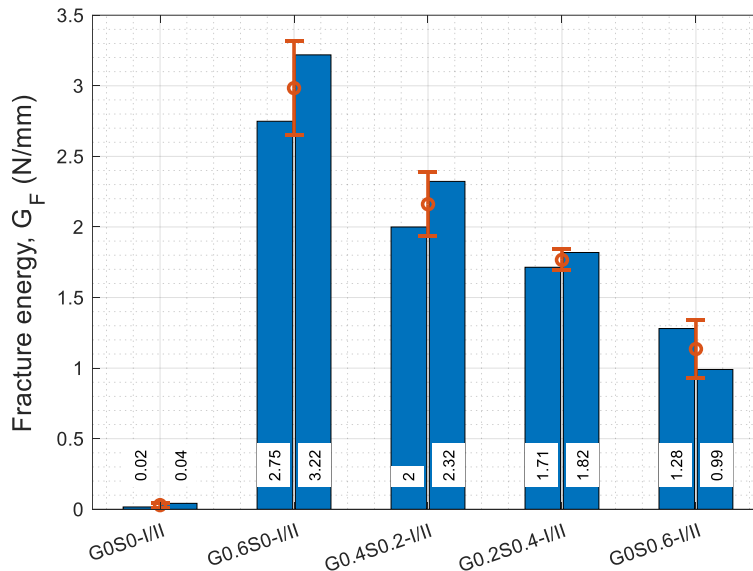
In Eq. 1, the notation of  $W_0$  symbolizes the area under the experimental load-deflection response in Figure 5.  $m$  and  $g$  are the mass between the support and the acceleration of gravity, while  $\delta_0$  represents the ultimate deflection in Figure 5.  $b$ ,  $h$ , and  $a_0$  point out the geometrical factors such as depth, width, and the notch length of the specimens.

Figure 6 designates the relation between the predicted fracture energies and the fiber content in the hybrid form. Accordingly, the use of the dispersed fibers increased the fracture energies of the plain specimen. The average fracture energy of 0.03 N/mm for the plain specimens reached 2.99 N/mm and 1.14 N/mm on average for G0.6S0 and G0S0.6 specimens, respectively. Then, it can be highlighted that the fraction of the recycled steel fibers in the hybrid form played a mitigating role in the fracture energy of the geopolymer concrete compared to the specimens in which glass fiber content was higher than the steel fiber. Such a result was much more evident when a comparison was made on the results of fiber-reinforced specimens. The mean fracture energy proportionally declined from 2.99 N/mm to 1.14 N/mm by increasing recycled steel fiber content from 0 to 0.6% by volume, which corresponded to a 61.9% drop in magnitudes. That unfavorable effect of recycled steel fibers may stem from the uneven distribution of the fibers. Standard deviations of the specimens given in Figure 6 support the irregular distribution of the fibers.

Besides, the other reason may be the bonding strength between the individual fibers and the surrounding matrix. The plastic remnant on the steel fibers could result in a weak bonding compared to that between the glass fibers and the matrix. Strength decay rate at the post-peak zone of fiber reinforced geopolymer also supports that statement. When the ratio of the recycled steel fiber in the hybrid form rose, not only peak strength but also residual strength at an arbitrary deflection level decreased as observed in Figure 5 due to the relatively low bonding strength of recycled fibers.



**Figure 5.** Experimental Load-Deflection Responses of The Notched Beams



**Figure 6.** Variation and Standard Deviation of Fracture Energies with The Fiber Content in Hybrid Form

### Ultimate Load Resisting Capacity

Figure 7 illustrates the distribution of the peak loads recorded during the experiments. In the figure, average magnitudes and the standard deviations are also presented. Compared to the peak loads of the fiber-reinforced specimens, plain specimens had significantly low load-resisting capacities. The use of the fibers caused a jump in the load capacity of the plain specimens by at least 2.7-fold in the case of the G0S0.6 mixture. This conclusion is caused by the bridging effect of the fibers. Mono fibers dispersed throughout the cohesive zone ahead of the initial notch



provide additional strength capacity by transferring the stresses between the crack faces. However, the magnitudes of the stresses conveyed between the crack faces rely on both fiber's properties and the bonding characteristics between the fibers and the corresponding matrix. That is why the ultimate load capacity of the fiber reinforced specimens was not identical as seen in Figure 7. Examining the volume fraction of recycled steel fibers, the peak load was first constant at 5.27 kN, when the steel fiber content changed from 0 to 0.2 vol%. Then, it gradually diminished as the steel fiber content was further increased. The specimens having the minimum peak loads were the G0S0.6-I/II such that the average load was 3.41 kN. Hence, a 35.3% reduction was acquired by replacing the glass fibers (G0.6S0) with recycled steel fibers (G0S0.6).

The other expressive conclusion is obtained by comparing Figure 6 and Figure 7 to evaluate which mechanism is most influenced by the fiber additives. At first glance, the overall shape of Figure 6 and Figure 7 seems to be similar. However, by comparing the increment ratio, it could be achieved that the fibers influenced the area under the load-deflection curves more than the peak load. For instance, when the glass fibers were used at 0.6 vol% ratio (G0.6S0), the average peak load and the fracture energy raised by 4.73-fold and 98.67-fold, respectively. Similarly, when the recycled steel fibers were used at 0.6 vol% ratio (G0S0.6), the peak load and the fracture energy increased by 2.71-fold and 37-fold, respectively. The other outcome is based on the effectiveness of the fiber type. As seen from the numbers given above, recycled steel fibers were less effective for both fracture energy and the peak resisting load capacity compared to glass fibers.

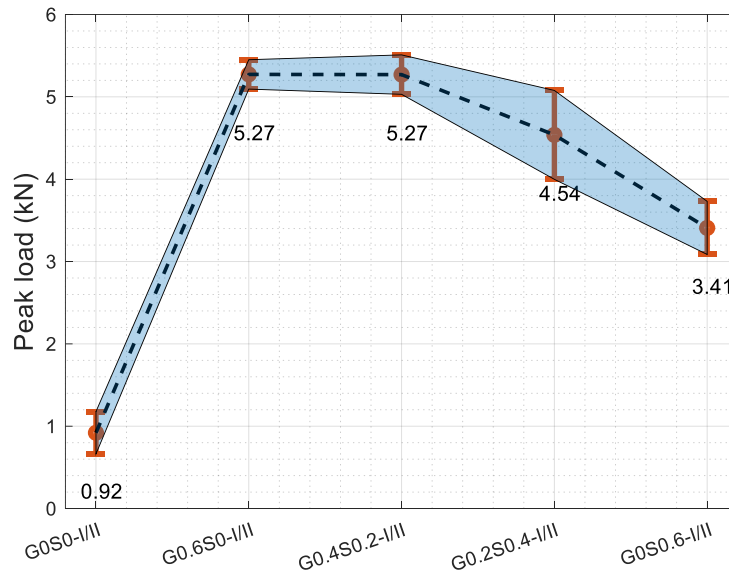


Figure 7. Peak Load Distribution of The Fiber-Reinforced Geopolymers

### Unstable Fracture Toughness

Fracture toughness points out the resisting ability of a specimen having an existing defect against rapid crack growth. When the peak load and the corresponding crack length are considered, the fracture toughness is termed unstable fracture toughness. Although the crack length may be able to be predicted by using the analytical method (Jenq & Shah, 1985), in the present study, experimental crack length was evaluated in the calculation of unstable fracture toughness.

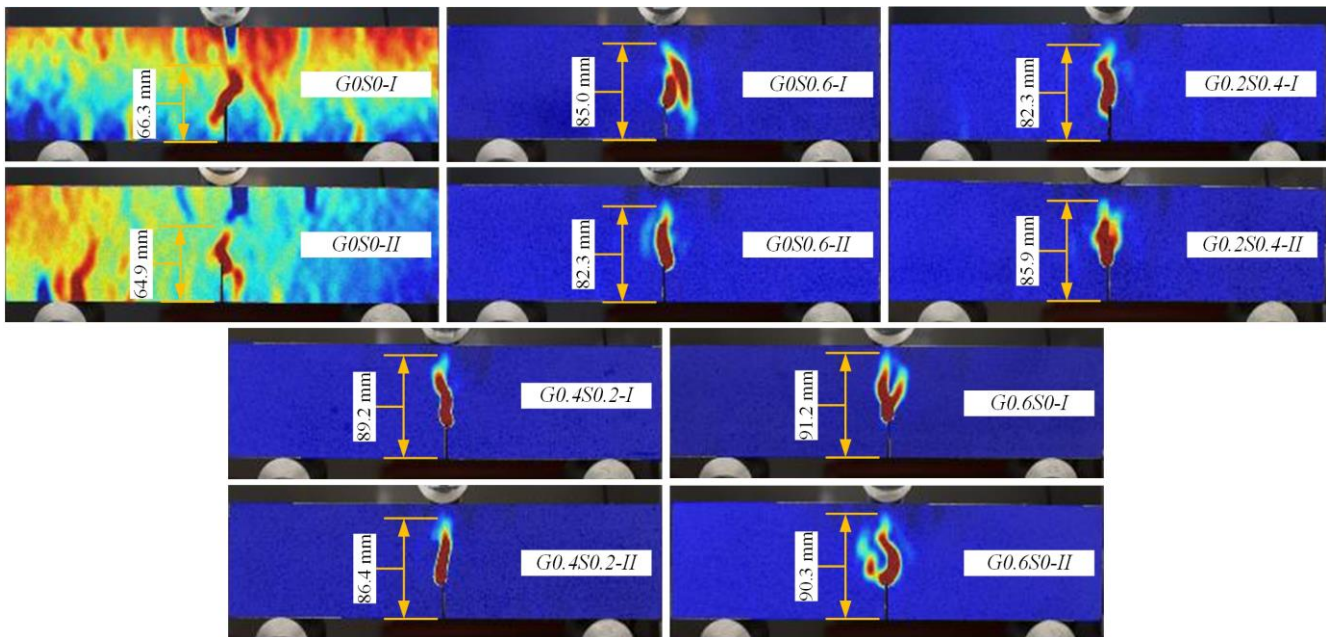
Figure 8 illustrates the cracking shapes as well as the crack lengths at the ultimate loading states. On average, the crack length of the plain specimens was 65.6 mm, which was the lowest one compared to that of the fiber-reinforced geopolymers. As the recycled steel fibers increased in the hybrid blend from 0 to 0.6%, the mean crack length continuously raised from 83.7 mm to 90.8 mm, which implied an increment of about 8.5%. The brittleness of the plain matrix is known to be higher in comparison with the fiber-reinforced concrete. Accordingly, the crack length of the plain specimens was expected to be higher than that of the fiber-reinforced specimens. However, the initial impression of the crack length may be misleading. A comprehensive insight including crack length and load level is required to decide on the brittleness level of the geopolymer concrete. Therefore, the fracture toughness values ( $K_{IC}^{un}$ ) of the geopolymers were counted up by using the following equation (Tada et al., 2000).

$$K_{Ic}^{un} = \frac{1.5PS\sqrt{\pi\alpha}}{bh^{1.5}} f(\alpha) \quad (2)$$

Where P and S indicate the ultimate load and the clear span between the supports.  $\alpha$  is the normalized crack length, namely  $\alpha = a/h$ . The geometric function  $f(\alpha)$  is dependent on the span-to-depth ratio and adopted from the study (Ferreira, 2007) for the span-to-depth ratio of 3.

$$f(\alpha) = 60.398928\alpha^5 - 86.787007\alpha^4 + 47.418483\alpha^3 - 8.234774\alpha^2 + 0.092058\alpha + 0.998367 \quad (3)$$

Figure 9 compares the fracture toughness of the geopolymers with different fiber ratios. From the figure, the fracture toughness of the plain geopolymers was  $12.8 \text{ MPamm}^{0.5}$ , which was the lowest value of the fracture toughness of the tested specimens. That finding suggested that the plain specimens had a remarkably brittle characteristic. As for the fiber-reinforced geopolymers, unstable fracture toughness slightly ascended between the G0.6S0 and G0.2S0.4 specimens. However, for the G0S0.6 specimens, unstable fracture toughness decreased abruptly by about 10%. A similar trend was also observed for the standard deviations in the unstable fracture toughness. The main reason for that reduction may be the uneven distribution of the recycled steel fibers at the highest dosages of 0.6 vol%. Compared to industrial steel fibers, recycled steel fibers have an irregular shape, which makes them prone to agglomerate in the mixture. This condition was also pointed out in the literature (Eskandarinia et al., 2022). On the other hand, broadly speaking, the overall average curve may be simplified as a bilinear relation which is composed of a toughness for plain and fiber-reinforced geopolymers. Hence the plateau of the bilinear relation might be defined as  $214.2 \text{ MPamm}^{0.5}$ . This means that the fracture resistance capability of the blend fiber-reinforced geopolymers was almost identical. The possible explanation for the occurrence of that plateau is the inverse relation between the peak load in Figure 7 and the crack length in Figure 8. As the amount of the recycled steel fiber in the hybrid form was raised, the measured peak load decreased, while the average crack length increased. Therefore, the unstable fracture toughness defined as in Equation (2) was slightly changed for the hybrid fibered specimens.



**Figure 8.** Experimental Crack Length at The Time Of The Peak Load



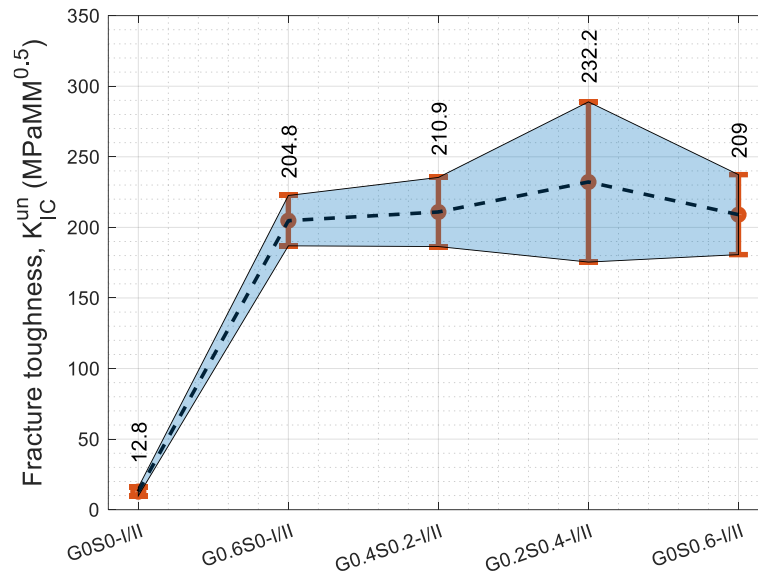


Figure 9. Unstable Fracture Toughness Versus Fiber Content Curve

## CONCLUSIONS

In this work, a total of 10 notched beams were tested under a three-point bending test configuration. The deformation loading was applied to the specimens to obtain the post-peak response of the specimens. 5 different mixtures were used such that they contain the plain and hybrid fiber blend at different ratios, meanwhile sum of the fiber dosages was set constant as 0.6 vol%. The measurement of the deformations and strains was taken from the surface of the images through the digital image correlation method. The objective of the experimental study was to examine the effect of the hybridization of glass and recycled steel fibers from the waste tires on the fracture response of the geopolymer concretes. The findings were discussed in terms of load-CMOD curves, crack progress, fracture energy, ultimate load, and unstable fracture toughness. It is worth noting that, unfortunately, the number of specimens used in this work was scarce due to some of the economic concerns and the facilities of the laboratory. Therefore, one should avoid a precise match between the results from this work and the literature. The prominent findings from the present study may be summered in bullet points as follows:

- As the recycled steel fibers were increased from 0 to 0.6% by volume, the measured residual strength at about 4 mm CMODs was gradually decreased from 3.2 kN to 0.77 kN, which corresponded to a drop of about 75.9%. Hence, it may be inferred that the recycled steel fibers were less effective in maintaining the residual strength compared to the glass fibers.
- Compared to the plain matrix, the increase in the initial cracking load was obtained as 607% and 443% for G0.6S0-I and G0S0.6-I specimens, respectively. Therefore, results have shown that glass fibers are a significantly more efficient additive than recycled steel fibers.
- When the volume of recycled steel fibers increased from 0% to 0.6%, the average fracture energy reduced from 2.99 N/mm to 1.14 N/mm due to both the uneven distribution of the steel fibers and the low bonding between steel fibers and concrete.
- The average ultimate load of the fiber-reinforced specimens (G0S0.6) was at least 2.7-fold that of the plain specimens. Also, the ultimate bending load was obtained as 5.27 kN for both the specimens of G0.6S0 and G0.4S0.2.
- The minimum mean crack length measured on the specimens' surface was 65.6 mm for the plain specimens. The mean crack length of the fiber specimen steadily ascended from 83.7 mm to 90.8 mm as the ratio of the recycled steel fibers was changed from 0 to 0.6% in the hybrid blend.
- Compared to the fiber-reinforced specimens, the plain specimens had the lowest fracture toughness value of 12.8 MPa $\cdot$ mm $^{0.5}$ . The low unstable fracture toughness of plain matrix proved their brittle cracking characteristics. On the other hand, the unstable fracture toughness of fiber-reinforced specimens increased at least 15-fold for the G0.6S0 specimen.

## REFERENCES

- 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>
- Alsaif, A.S., & Abdulrahman S. Albidah, A. (2022). Compressive and flexural characteristics of geopolymer rubberized concrete reinforced with recycled tires steel fibers. *Materials Today: Proceedings, International Conference on Advances in Construction Materials and Structures*, 65, (pp. 1230–1236). <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.04.182>
- Anvari, M., & Toufigh, V. (2022). Experimental and probabilistic investigation on the durability of geopolymer concrete confined with fiber reinforced polymer. *Construction and Building Materials*, 334, 127419. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127419>
- Başaran, B., Aksoylu, C., Özkılıç, Y.O., Karalar, M., & Hakamy, A., (2023). Shear behaviour of reinforced concrete beams utilizing waste marble powder. *Structures*, 54, 1090–1100. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.05.093>
- Blaber, J., Adair, B., & Antoniou, A. (2015). Ncorr: Open-Source 2D Digital Image Correlation Matlab Software. *Experimental Mechanics*, 55, 1105–1122. <https://doi.org/10.1007/s11340-015-0009-1>
- Çelik, A.İ., Tunç, U., Bahrami, A., Karalar, M., Othuman Mydin, M.A., Alomayri, T., & Özkılıç, Y.O., (2023). Use of waste glass powder toward more sustainable geopolymer concrete. *Journal of Materials Research and Technology*, 24, 8533–8546. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.05.094>
- da Silva, A.C.R., Almeida, B.M., Lucas, M.M., Cândido, V.S., da Cruz, K.S.P., Oliveira, M.S., de Azevedo, A.R.G., & Monteiro, S.N. (2022). Fatigue behavior of steel fiber reinforced geopolymer concrete. *Case Studies in Construction Materials*, 16, e00829. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00829>
- Davidovits, J. (1991). Geopolymers. *Journal of Thermal Analysis*, 37, 1633–1656. <https://doi.org/10.1007/BF01912193>
- 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, 6623. <https://doi.org/10.3390/ma15196623>
- Farhan, N.A., Sheikh, M.N., & Hadi, M.N.S. (2018). Experimental Investigation on the Effect of Corrosion on the Bond Between Reinforcing Steel Bars and Fibre Reinforced Geopolymer Concrete. *Structures*, 14, 251–261. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2018.03.013>
- Ferreira, L.E.T. (2007). Fracture analysis of a high-strength concrete and a high-strength steel-fiber-reinforced concrete. *Mechanics of Composite Materials*, 43, 479–486. <https://doi.org/10.1007/s11029-007-0045-8>
- Ganesh, A.C., & Muthukannan, M. (2021). Development of high performance sustainable optimized fiber reinforced geopolymer concrete and prediction of compressive strength. *Journal of Cleaner Production*, 282, 124543. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124543>
- Gümüş, M., & Arslan, A. (2019). Effect of fiber type and content on the flexural behavior of high strength concrete beams with low reinforcement ratios. *Structures*, 20, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2019.02.018>
- Isa, M.N., Pilakoutas, K., Guadagnini, M., & Angelakopoulos, H. (2020). Mechanical performance of affordable and eco-efficient ultra-high performance concrete (UHPC) containing recycled tyre steel fibres. *Construction and Building Materials*, 255, 119272. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119272>
- Jenq, Y., & Shah, S.P. (1985). Two Parameter Fracture Model for Concrete. *Journal of Engineering Mechanics*, 111, 1227–1241. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(1985\)111:10\(1227\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(1985)111:10(1227))
- Khan, K., Ahmad, W., Amin, M.N., & Nazar, S. (2022). A Scientometric-Analysis-Based Review of the Research Development on Geopolymers. *Polymers*, 14, 3676. <https://doi.org/10.3390/polym14173676>
- Kumar, Y.N., Dean Kumar, B., & Swami, B.L.P. (2022). Mechanical properties of geopolymer concrete reinforced with steel and glass fibers with various mineral admixtures. *Materials Today: Proceedings, International Conference*

- on Smart and Sustainable Developments in Materials, Manufacturing and Energy Engineering, 52, (pp. 632–641). <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.10.050>
- 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, International Conference on Advances in Construction Materials and Structures*, 65, (pp. 1086–1094). <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.04.157>
- Li, W., Shumuye, E.D., Shiyang, T., Wang, Z., & Zerfu, K. (2022). Eco-friendly fibre reinforced geopolymer concrete: A critical review on the microstructure and long-term durability properties. *Case Studies in Construction Materials*, 16, e00894. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e00894>
- Mastali, M., Dalvand, A., Sattarifard, A.R., & Illikainen, M. (2018). Development of eco-efficient and cost-effective reinforced self-consolidation concretes with hybrid industrial/recycled steel fibers. *Construction and Building Materials*, 166, 214–226. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.147>
- Mesghi, B., Beskopylny, A.N., Stel'makh, S.A., Shcherban', E.M., Mailyan, L.R., Shilov, A.A., El'shaeva, D., Shilova, K., Karalar, M., Aksoylu, C., & Özkılıç, Y.O., (2023). Analytical Review of Geopolymer Concrete: Retrospective and Current Issues. *Materials*, 16, 3792. <https://doi.org/10.3390/ma16103792>
- Özkılıç, Y.O., Çelik, A.İ., Tunç, U., Karalar, M., Deifalla, A., Alomayri, T., & Althoey, F., (2023). The use of crushed recycled glass for alkali activated fly ash based geopolymer concrete and prediction of its capacity. *Journal of Materials Research and Technology*, 24, 8267–8281. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.05.079>
- Pajaç, M., & Ponikiewski, T. (2013). Flexural behavior of self-compacting concrete reinforced with different types of steel fibers. *Construction and Building Materials*, 47, 397–408. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.05.072>
- Qin, X., & Kaewunruen, S. (2022). Environment-friendly recycled steel fibre reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, 327, 126967. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126967>
- Ranjbar, N., & Zhang, M. (2020). Fiber-reinforced geopolymer composites: A review. *Cement and 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>
- Rashedi, A., Marzouki, R., Raza, A., Ali, K., Olaiya, N.G., & Kalimuthu, M. (2022). Glass FRP-Reinforced Geopolymer Based Columns Comprising Hybrid Fibres: Testing and FEA Modelling. *Polymers*, 14, 324. <https://doi.org/10.3390/polym14020324>
- Ren, R., & Li, L. (2022). Impact of polyethylene fiber reinforcing index on the flexural toughness of geopolymer mortar. *Journal of Building Engineering*, 57, 104943. <https://doi.org/10.1016/j.job.2022.104943>
- 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.
- Sherwani, A.F.H., Younis, K.H., & Arndt, R.W. (2022). Fresh, Mechanical, and Durability Behavior of Fly Ash-Based Self Compacted Geopolymer Concrete: Effect of Slag Content and Various Curing Conditions. *Polymers*, 14, 3209. <https://doi.org/10.3390/polym14153209>
- Simalti, A., & Singh, A.P. (2021). Comparative study on performance of manufactured steel fiber and shredded tire recycled steel fiber reinforced self-consolidating concrete. *Construction and Building Materials*, 266, 121102. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121102>
- Tada, H., Paris, P.C., & Irwin, G.R. (2000). *The Stress Analysis of Cracks Handbook*. (3rd ed.). ASME Press. <https://doi.org/10.1115/1.801535>
- Vijaya Prasad, B., Anand, N., Kiran, T., Jayakumar, G., Sohliya, A., & Ebenezer, S. (2022). Influence of fibers on fresh properties and compressive strength of geo-polymer concrete. *Materials Today: Proceedings, International Conference on Innovation and Application in Science and Technology*, 57, (pp. 2355–2363). <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.01.426>
- Wang, T., Fan, X., Gao, C., Qu, C., Liu, J., & Yu, G. (2023). The Influence of Fiber on the Mechanical Properties of Geopolymer Concrete: A Review. *Polymers*, 15, 827. <https://doi.org/10.3390/polym15040827>

Wang, Yi., Chan, C.L., Leong, S.H., & Zhang, M. (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>

Wang, Yijiang., Zheng, T., Zheng, X., Liu, Y., Darkwa, J., & Zhou, G. (2020). Thermo-mechanical and moisture absorption properties of fly ash-based lightweight geopolymer concrete reinforced by polypropylene fibers. *Construction and Building Materials*, 251, 118960. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118960>

Wang, Z., Bai, E., Huang, H., Liu, C., & Wang, T. (2023). Dynamic mechanical properties of carbon fiber reinforced geopolymer concrete at different ages. *Ceramics International*, 49, 834–846. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2022.09.056>

Yolcu, A., Karakoç, M.B., Ekinçi, E., Özcan, A., & Sağır, M.A. (2022). Effect of binder dosage and the use of waste rubber fiber on the mechanical and durability performance of geopolymer concrete. *Journal Building Engineering*, 61, 105162. <https://doi.org/10.1016/j.jobee.2022.105162>

Zada Farhan, K., Azmi Megat Johari, M., & Demirboğa, R. (2022). Evaluation of properties of steel fiber reinforced GGBFS-based geopolymer composites in aggressive environments. *Construction and Building Materials*, 345, 128339. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.128339>

Zhong, H., Poon, E.W., Chen, K., & Zhang, M. (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 : 13.11.2023  
Kabul Tarihi : 19.02.2024

Received Date : 13.11.2023  
Accepted Date : 19.02.2024

### İNSAN KAYNAKLARINDA ETKİLİ İŞE ALIM SÜRECİ İÇİN TÜRKÇE BİR ONTOLOJİ GELİŞTİRİLMESİ

### DEVELOPING A TURKISH ONTOLOGY FOR EFFECTIVE RECRUITMENT PROCESS IN HUMAN RESOURCES

Selin BİTİRİM<sup>1</sup> (ORCID: 0000-0002-3575-5855)  
Duygu ÇELİK ERTUĞRUL<sup>2\*</sup> (ORCID: 0000-0003-1380-705X)

<sup>1</sup>Computer Engineering Department, Eastern Mediterranean University, 99628, Famagusta, North Cyprus, via Mersin 10, Turkey

\*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Duygu ÇELİK ERTUĞRUL, duygu.celik@emu.edu.tr

#### ÖZET

Geçmişten günümüze insanlar iş başvurusunda bulunurken özgeçmişlerini oluşturmakta ve değerlendirilmek üzere şirketlerin İnsan Kaynakları (İK) birimine göndermektedir. Özgeçmişler, bireylerin iş bulma hedefleri için genelde yapısız formatta yüklenen en önemli belgeleridir. Anlamsal Web teknolojisinin (Berners-Lee vd., 2001) temel bileşeni olan Ontolojiler (Guarino vd., 2009), makineler tarafından yorumlanabilir bilgiler içerir ve yapısız veri kaynaklarını daha yapısal hale sokmak için çözümler sağlar. Bu çalışmada, Türkiye'de yerleşik büyük şirketlerin insan kaynaklarının İş Önerme sistemlerine entegre olabilecek, Türkçe olarak oluşturulmuş Özgeçmiş Öneri Sistemi Ontolojisi (Resume Recommender System Ontology —RRSO) sunulmaktadır. Çalışmanın çıktısı olan RRSO, bu alanda yapılan nadir Türkçe ontolojilerden biri olup, özellikle büyük şirketlerin İK gibi yoğun iş süreçlerini barındıran birimlerinde önyargısız işe alımı destekleyen ve işe alımın karar destek aşamalarında çalıştırılan JRS'ler için temel bir yapı taşı olabilecektir.

**Anahtar Kelimeler:** Yapay zekâ, anlamsal web, ontoloji, insan kaynakları, özgeçmiş, karar destek sistemleri

#### ABSTRACT

From past to present, job candidates create their resumes when applying for a job and send them to the Human Resources (HR) department of companies for assessment. Resumes are individuals' most important documents for their employment goals, usually uploaded in unstructured format. Ontologies (Guarino et al., 2009), a core component of Semantic Web technology (Berners-Lee et al., 2001), contain machine-interpretable information and provide solutions for making unstructured data conversions more structured. In this study, Resume Recommender System Ontology (RRSO) created in Turkish, which can be integrated into the Job Recommender Systems of HRs of large companies located in Turkey, is presented. RRSO, which is the outcome of the study, is one of the rare Turkish ontologies in this field, and we believe that it can be a base block for JRSs that support unbiased recruitment and used in the decision support stages of recruitment, especially in units of large companies with intensive business processes such as HR.

**Keywords:** Artificial intelligence, semantic web, ontology, human resources, resume, decision support systems



## GİRİŞ

Farklı sektörlerde ait birçok şirket, milyonlarca iş ilanı oluştururken kendi İnsan Kaynakları (İK) aday havuzlarından seçim yapmakta ve açık pozisyonlara uygun personeli bulmakta zorluk yaşamaktadır. Ayrıca iş arayan adayların, doğru iş imkanına kanalize edilmesi de karışık ve sıralı süreçler yığınına kapsamaktadır. İş başvurusu yapan adaylar özgeçmişlerini farklı yapılar, farklı formatlarda, ve farklı dillerde hazırlamış olabilirler. Bu durum, açık iş pozisyonuna uygun personeli bulma ve atama sürecinde, İK departmanında iş gücü ve zaman kaybına neden olabilmektedir. Çünkü İK birimlerinin özgeçmiş havuzlarında heterojen, yapılandırılmamış, ve makineler tarafından yorumlanması güç olabilen, yapısız formda yığınla özgeçmiş verisi bulunmaktadır.

Ontoloji (Guarino vd., 2009) ve anlamsal teknolojiler (Berners-Lee vd., 2001); farklı kaynaklardan gelen verileri entegre etmek, uyumlu hale getirmek, ortak bir kavramsallaştırma üzerinden, yeni anlamlı verilerin çıkarımını sağlamak ve akıl yürütmeyi kolaylaştırmak için yararlı araçlardır. Ayrıca, İK süreçlerini Web ortamından kolayca yürütmek için günümüzde çeşitli İş Önerme Sistemleri (Job Recommender Systems- JRS) geliştirilmiş olup, bunlardan; CASPER (Mishra & Rathi, 2020; Siting vd., 2012), ResuMatcher (Guo vd., 2016), eRecruiter (Hong vd., 2013) gibi JRS çözümleri en iyi bilinenler arasındadır. Ancak, iş adaylarına, iş fırsatı sunma konusunda rehberlik eden, Türkçe dilinde İK süreçlerini destekleyen JRS çözümlerine az sayıda (ör. kariyer.net, secretcv, vb. firmalar) rastlanmaktadır. Bu nedenle, bu çalışmamızda, Türkçe özgeçmişlerden anlamsal veriler çıkarsayabilen, çıkarsanan verileri anlamsal formda betimleyebilen, ve bir Türkçe-tabanlı Öneri Sistemine entegre olabilecek olan bir Özgeçmiş Öneri Sistem Ontolojisi (Resume Recommender System Ontology- RRSO) geliştirilmesi hedeflenmiştir. Türk şirketlerindeki İK birimlerinin, işe alım süreçlerine ve özgeçmiş havuzlarına entegre edilebilmesiyle, özgeçmiş öneri sistemlerine temel olabilecek bir ontoloji oluşturulmuştur. Ontolojinin doğruluğu ve uygulanabilirliği hem bir ontoloji değerlendirme aracı hem de bir dizi test özgeçmişlerin ontolojiye eklenmesi ile test edilmiş ve sonuçlar olumlu yönde olmuştur.

RRSO, endüstriyel iş pozisyonlarını ve işe başvuran bireylerin mevcut eğitimlerini, geçmiş iş tecrübelerini, ve yeteneklerini modellemek için kullanılabilir. Daha açık belirtmek gerekirse, RRSO ontolojisinde, İK işe alım sürecinde kullanılan iş arayan bireylere ait “özgeçmişler” ve tanımlanan “açık iş pozisyonları” gibi temel verilerin kavramsal (ör. kişisel bilgiler, eğitim bilgileri, iş tecrübeleri bilgileri, yetkinlik bilgileri vb.) hiyerarşisinin oluşturulması ve kavramlara ait öğeleri içermektedir.

Bölüm 2’de literatürdeki benzer diğer çalışmalar irdelenip ve kıyaslanmaktadır. Bölüm 3’te bu çalışmada izlenen yöntem ve kullanılan materyaller anlatılmaktadır. Bu bölümün alt bölümlerinde, geliştirilen RRSO’nun, özgeçmiş ve iş pozisyonu veri kaynaklarında bulunan kavramlara ait temel öğelerin Türkçe dilinde toplanması için kullanılan Türkçe kaynaklar, oluşturulan alan ilgili kavramsal sınıflar ve hiyerarşisi, sınıflar arasında kurulan özellikler, ve sınıflara ait öğeler anlatılmaktadır. Bölüm 4’te RRSO’nun yapısı ve nihai ölçümlerine ilişkin detaylı bilgi; bölüm 5’te sonuçlar ve tartışmalar kısımları sunulmaktadır. Son bölüm, çalışmanın çıktılarını genel olarak irdelemekte ve çalışmanın gelecek kısımlarını anlatmaktadır.

## LİTERATÜR TARAMASI

Literatürde, İK süreçlerini farklı amaçlarda desteklemeye yönelik (ör. aday özgeçmiş-iş imkânı eşleşmesi, çalışan memnuniyeti, işten ayrılma isteğinin saptanması, vb.) çeşitli çalışmalar yapılmış olup bir dizi JRS çözümleri ve alan ontolojilerinin oluşturulması çalışmalarına yer verilmiştir. Daha önce de belirtildiği gibi, bu çalışmada, Türkçe özgeçmişlerden anlamlı içerik çıkarabilen ve Türkçe JRS çözümlerine entegre olabilen bir Özgeçmiş Öneri Sistem Ontolojisi (Resume Recommender System Ontology- RRSO) geliştirilmiştir. Geliştirilen RRSO, Türkçe dillinde yazılmış aday özgeçmişlerinden gerekli olan anlamsal içerikleri çıkarsayarak, mevcut açıkta olan iş ilanlarına eşleştirebilen ve kullanıcıya uygun iş ilanları önerileri üreten anlam tabanlı JRS çözümlerine entegre edilebilir. JRS geliştiricileri, RRSO ontolojisini geliştirecekleri kendi çözümlerine bir bilgi tabanı olarak entegre edebilir. Ayrıca, kendi çıkarım modülü üzerinde uygun semantik kurallar tanımlayabilir ve böylece özgün iş ilanı-uygun aday eşleşme modüllerini geliştirebilirler.

RRSO, JRS çözümlerinde sıklıkla tercih edilen ve en önemli Doğal Dil İşleme (NLP) yaklaşımlarından biri olan Adlandırılmış Varlık Tanıma (NER) adımı da kullanılabilir. Bu adımda, bir özgeçmiş üzerinde bulunabilen İK alanındaki en önemli özelliklerin/kavramların tespitinde katkı sağlayabilir. NER tekniği, bir metin içindeki kişi, organizasyon/kuruluş, ünvan, konum, beceri ve diğer varlık adlarını tespit edebilen önemli bir bilgi çıkarım adımdır. Kavram çıkarımı adımı ontolojiler, araştırmacılar tarafından NER süreçlerinde yaygın olarak kullanılmaktadır.

(Rimitha vd., 2019; Nguyen vd., 2013; Çelik vd., 2013; Tamburri vd., 2020). Bu çalışmada, geliştirilen RRSO ontolojisi JRS çözümlerinde araştırmacılar/geliştiriciler için meslek, beceri, organizasyon vb. kavramların bir özgeçmişin içerisi”nden çıkarsanmasında temel bir yapı taşı olacaktır. RRSO’yu kavramsal/ilişkisel bir taksonomi gibi kendi JRS sistemlerine entegre edebilmeleri için, OWL API (Horridge & Bechhofer, 2011) kütüphanesi kullanılarak “RRSO.owl” ontoloji dosyasını kolayca işleyebilirler.

Yapılan literatür taramalarımızda, 2010-2023 arasında yayınlanan diğer benzer çalışmalar taranmış ve konumuza en yakın olanlar aşağıda detaylı irdelenmiş ve Tablo 1 üzerinde kıyaslamaları yapılmıştır.

Rimitha vd., (2019), kullanıcıların profil bilgilerini kullanarak, bir dizi uygun iş önermesi yapan ontoloji tabanlı bir JRS çözümü tasarlamışlardır. Favori işler listesi ve yakın zamanda görüntülenen işler gibi kişisel iş tercihleri, kullanıcı özellikleri olarak toplanmıştır. Araştırmacılar JRS üzerinde iki ardışık algoritmayı değerlendirmişlerdir. İlk adımda, belirli bir kullanıcının yakın zamanda görüntülediği ve favorilerine eklediği iş ilanları kullanıcı profili verilerinde tutulmaktadır. Bir sonraki adımda, toplanan profil verileri, kullanıcıya uygun bir dizi iş bulmak için işlenmesi sağlanmıştır. Deneysel çalışmalarda, sistemin önerdiği iş sayısı normal aramaya göre daha az ve kullanıcının tercihlerine göre daha ilgili sonuçlar döndürüldüğü raporlanmıştır.

Nguyen vd., (2013) araştırmalarında, kullanıcı grubu olarak yeni mezun bireyleri hedef almışlardır. Araştırmacılar, işin taleplerine ve öğrencilerin kariyerlerini olumlu yönde geliştirme yeteneklerine göre, kullanıcılara en uygun iş pozisyonlarını öneren ontoloji tabanlı bir JRS önermişlerdir. Ontolojiler, endüstriyel iş pozisyonlarını ve öğrencilerin yeteneklerini modellemek için geliştirilmiştir. Araştırmacılar, iş tavsiyesi için iş modelleme ile öğrenci modelleme arasındaki eşleşmeyi sağlayan eşleştirme sürecinde bir dizi fonksiyon kullanmışlardır. Deneysel çalışmalar, önerilen JRS'nin önerileri ile işe alım uzmanının seçimleri arasında yüksek bir korelasyon olduğunu göstermektedir.

**Tablo 1.** Literatürdeki Benzer Çalışmalar ve Kıyaslamalar.

Çalışma (Yazar)	Yıl	Yaklaşım	Amacı	Benzerlikler/Farklılıklar
Gutiérrez et al.	2019	Model Tabanlı	Bilgiye dayalı iş öneri sistemi önerilmiştir. İş arayan bireylerin profil bilgileri (ör. yaş, cinsiyet), iş bilgileri içeren bir sistem tasarlanmıştır. Yetkinliğe dayalı analiz ile beceri geliştirmeye yönelik öneri sistemi düşünülmüştür.	Mevcut öneri sistemleri üzerinde (ör. Résumatcher, CASPER, Proactive vb.) kendi sıralama (Rank) algoritmalarını değerlendirmişlerdir. Yeni bir öneri sistemi veya ontolojisi geliştirmemişlerdir. Önerilen yaklaşım, gerçek iş pozisyonlarına henüz bağlanmamıştır.
Rácz et al.	2016	Olasılık Model Tabanlı	Yetkinlikler alanına dair bir ontoloji kullanılarak beceri eşleştirilmesi üzerine bir model önerilmiştir.	IT alanına dair yetkinlikler bilgisini işlemek için çoklu modele dayalı bir çerçeveye önermişlerdir. IT alanında spesifik bir iş ilanlarına başvuran adaylar arasında, beceri benzerliklerini ölçümlenmek için algoritma geliştirmeye odaklanılmıştır.
Rimitha et al.	2019	Ontoloji Bilgi Tabanlı	İngilizce dilinde ontolojiye dayalı özgeçmiş verilerine (ör. Kişi profil, iş tecrübeleri, eğitim durumu, sertifikalar ve yetkinlikler) bağlı olarak bir iş öneri sistemi geliştirilmiştir. Ontoloji, OWL dilinde olup, Protégé aracı kullanılarak, üzerinde; Sınıflar, OTP ve DTP gibi öznel ilişkileri, öğeler yaratılmıştır. Araçlar: Java, GitHub Jobs API, MySQL.	Önerilen sistemin analizi için uygun değildir. Her iki çalışmada da ontolojiye dayalı bilgi çıkarımı önerilmiştir.
Nguyen et al.	2013	Ontoloji Bilgi Tabanlı	Yeni mezun bireyleri hedef alan ontoloji tabanlı bir iş öneri sistemi geliştirilmiştir. İş talepleri ile öğrenci yetkinlikleri eşleştirilmiştir. Çalışmada, öneri adımında eşleştirme fonksiyonlarına odaklanılmış ve Euclidean Distance yaklaşımı uygulanmıştır.	Araştırmacılar, öğrencilerin mezun oldukları alanı hedef alarak iş önerileri yaparken, bizim çalışmada, bireylerin kişi profil, geçmiş iş tecrübeleri, eğitim durumu, sertifikalar, yetkinlik gibi bilgilerine önermeler yapılmaktadır. Her iki çalışmada da ontolojiye dayalı bilgi çıkarımı önerilmiştir.
Salazar et al.	2015	Ontoloji Bilgi Tabanlı	İş arayanlar ile işverenler arasındaki bilgiyi eşleştirmek için bir çoklu ajan sistemini içeren bir iş öneri sistemi geliştirilmiştir. Kullanılan araçlar: JAVA, OWL API, Protégé, JADE Framework, HR-XML standart, SPARQL. Vaka tabanlı Akıl Yürütme’ye (Case-based) dayalı yaklaşım kurgulanmıştır.	Araştırmacılar eşleştirme sürecinde Çoklu Ajan Sistemi (MAS) yaklaşımı uygularken, bizim çalışmada sadece İş Öneri Sistemlerine temel olabilecek bir ontoloji geliştirilmiştir. Henüz sistem geliştirilmemiştir. Fakat her iki çalışmada da ontolojiye dayalı bilgi çıkarımı düşünülmüştür.
Çelik et al.	2013	Ontoloji Bilgi Tabanlı	İş arayanlar ile işverenler arasındaki bilgiyi eşleştirmek için İngilizce dilinde Kural-tabanlı bir İş Öneri Sistemi önerilmiştir. Kullanılan araçlar: OWL, Protégé editör, OWL API, Java, SWRL, Jaro-Wrinkler benzerlik algoritması.	Araştırmacılar, İngilizce dilindeki özgeçmişleri işlerken bizim çalışmamızda Türkçe özgeçmişler kapsama alınmış ve Türkçe İK alanına uygun bir ontoloji geliştirilmiştir. Ayrıca, bizim RRSO ontolojisinde daha çok kavramsal yapıya yer verilmiştir (ör. Türkiye’deki kayıtlı tüm okullar). RRSO kullanılarak bir Türkçe özgeçmişini daha geniş bir kavramsal alanda betimlemek mümkündür (ör. geniş kapsamlı profil bilgileri, eğitim bilgileri, yetkinlik bilgileri, sertifika bilgilerine dair kavramlar RRSO’da çerçevelenmiştir). Her iki çalışmada da ontolojiye dayalı bilgi çıkarımı önerilmiştir.
Tamburri et al.	2020	Model Tabanlı	Veri madenciliği ve yapay zekâ kullanılarak bireylerin İngilizce özgeçmişlerinden iş pozisyon ve beceri bilgilerini çıkarmaya çalışmışlardır. Çalışmada, gerçek veri seti üzerinde çeşitli makine öğrenimi modelleri (BERT Cloud and BERT Local, Simple-NN) uygulanarak birçok test çalışmaları yürütülmüştür.	Araştırmacılar, kullandıkları modelleri hazır ontolojiler (ISCO, O*NET ve ESCO) üzerinde test etmişlerdir. İş ilanı ve beceri/yetkinliğe dayalı eşleştirmeye odaklanmıştır. Kendi ontolojilerini oluşturmuşlar ve sadece beceri/yetkinlik bilgilerini ele almışlardır.

Salazar vd., (2015), iş arayanların ve işverenlerin bilgileri arasındaki eşleşmeyi kolaylaştırmak için ontoloji bilgi tabanına sahip vaka bazlı bir Çoklu Ajan Sistemi (MAS) önermiştir. HR-XML standardı, ontolojiler yoluyla bilgi gösterimini standartlaştırmak ve özgeçmişleri haritalandırmak için kullanılmıştır. Önerilen sistem Prometheus metodolojisine göre tasarlanmış ve ardından sistemin bir prototipi geliştirilmiştir. Araştırmacılar, bir örnek olay çalışması yaparak sistemlerini doğrulamak için deneysel çalışmalar sunmuşlardır.

Çelik vd., (2013), iş arayanların çevrimiçi işe alım şirketlerinin web siteleri üzerinden yükledikleri serbest formatlı özgeçmişleri, ontoloji tabanlı JRS çözümü aracılığıyla otomatik olarak yapılandırılmış bir forma dönüştürebilen ve sistemin ilişkisel yapısında ilgili alanlara aktarabilen bir JRS motoru önerilmiştir.

Tamburri vd., (2020), işgücü piyasasındaki becerileri yerleştirmek ve özgeçmişlerden makine öğrenimi modellerini kullanarak boş iş pozisyonlarından becerileri çıkarmak için DataOps modelinin ve yapay zekanın kullanılmasını önermişlerdir. Gerçek veri seti kullanılmışlar (Hollanda ve Belçika'daki Flaman iş bulma kurumlarından alınan gerçek veriler) ve bu veriler üzerinden makine öğrenmesi ile sonuçlar elde edilmiş ve paylaşılmıştır. Temel amaçlar, çıkarılan beceri bilgilerini çeşitli ontolojilerin (ISCO, O\*NET, ESCO) içindeki iş ve meslek kavramları ile eşleştirilmiştir. DataOps, özgeçmişleri uygun iş fırsatlarıyla işlemek, beceri çıkarmak, eşleştirmek ve becerileri içeren ifadeleri bulup, Büyük Veri ve Makine Öğrenimi modellerini birleştirmek için kullanılmıştır. Model eğitimi için BERT Cloud, BERT Local ve Simple-NN ön eğitim modellerini kullanmışlardır.

Gutiérrez vd., (2019), beceri ve yeterliliklere dayalı olarak iş arayanlara kişiselleştirilmiş iş önerileri sunmayı amaçlayan "İşgücü Piyasası Gezini" adlı kullanıcı merkezli bir sistem önermişlerdir. Bu sistem, açık iş pozisyonlarını, bilgi ve becerileri araştırarak potansiyel yeterlilik boşluklarına çözüm üretmeyi hedeflemektedir. Sistemde, iş arayanların profil verilerini XML formatında toplamak için MyCareer API'si kullanılmıştır. Konum bilgisi için GeoServices kullanılmış ve önceki kullanıcı aramalarını depolamak için MySQL tercih edilmiştir. Karma yöntemlerin kullanıldığı deneysel çalışmalar olumlu sonuçlar göstermiştir. Değerlendirme sonuçları, prototipin iş arayanlara geçmişleri ve yaşlarına bakılmaksızın uygun açık pozisyonları keşfetme, anlama ve bulma konusunda başarılı olduğunu göstermiştir. Ancak, önerilen prototip henüz gerçek iş pozisyonlarıyla ilişkilendirilmemiştir.

Rác vd., (2016), belirli bir iş ilanı için gerekli beceri bilgilerinin, bireylerin profil bilgileri ile ne kadar uyumlu olduğu araştırılmıştır. Ontoloji kullanarak filtreleme ve eşleştirme yöntemleri uygulanarak farklı beceriler arasındaki benzerliklere odaklanan bir model geliştirmişlerdir. Modellerini değerlendirmek için maksimum entropiye dayalı olasılıksal eşleştirme analizi kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar, uygulanan algoritma ile, aynı iş ilanı için başvuran bireyler arasında tamamen farklı sıralamalar üretebildiğini göstermiştir. Bu nedenle, hangi algoritmanın maksimum doğru sıralamayı vereceğinin büyük ölçüde alana bağlı olduğu belirlenmiştir.

Benzer çalışmalarla ilgili literatürde yer alan bazı önemli IK süreçlerini destekleyen JRS çözümleri, kullandıkları ontolojileri ve metodolojileri Tablo 1'de kıyaslanmıştır.

## GEREÇ VE YÖNTEMLER

Bu çalışmada, iş öneri sistemlerindeki iş ilanı-aday bilgileri eşleşme süreçlerinde gerekli olan bilgilerin eksiksiz resmini sağlamayı hedefleyen bir Özgeçmiş Öneri Sistem Ontolojisi (RRSO) geliştirilmiştir. Bu ontoloji sayesinde, İş Öneri Sistem çözümlerinde bir özgeçmiş ve bir iş ilanı eşleştirilirken, kritik kavramların ve özniteliklerin (örneğin, kişi profil bilgileri, eğitim bilgileri, iş tecrübe bilgileri, sertifikalar, ödüller, yetkinlikler vb.) otomatik olarak çıkarılması ve anlamsal olarak eşleştirilebilmesi mümkün olabilmektedir.

RRSO, Stanford üniversitesinin Protégé 5.0 ontoloji geliştirme aracı (O'Connor vd., 2005) kullanılarak, W3C standardı olan Web Ontology Language (OWL) dili (Cardoso & Pinto, 2004) ile geliştirilmiştir. NeOn projesine bağlı Ontology Design Patterns (ODP) sitesinin altında diğer araştırmacıların erişim sağlaması için [http://ontologydesignpatterns.org/wiki/Main\\_Page/RRSO](http://ontologydesignpatterns.org/wiki/Main_Page/RRSO) adresinde halka açık paylaşılmıştır. RRSO'nun son versiyonunda 28 sınıf, 23 nesne tipinde özellik, 7 veri türünde özellik, 25314 mantıksal aksiyom, 24982 açıklama aksiyomu, 24924 sınıf öğeleri ve toplamda 75356 adet aksiyom tanımlarını içermektedir. Söz dizimsel ve yapısız şekilde gelen özgeçmişlerin modellenmesine yönelik bu yaklaşımla bir konsept kanıtı sağlamaktayız.

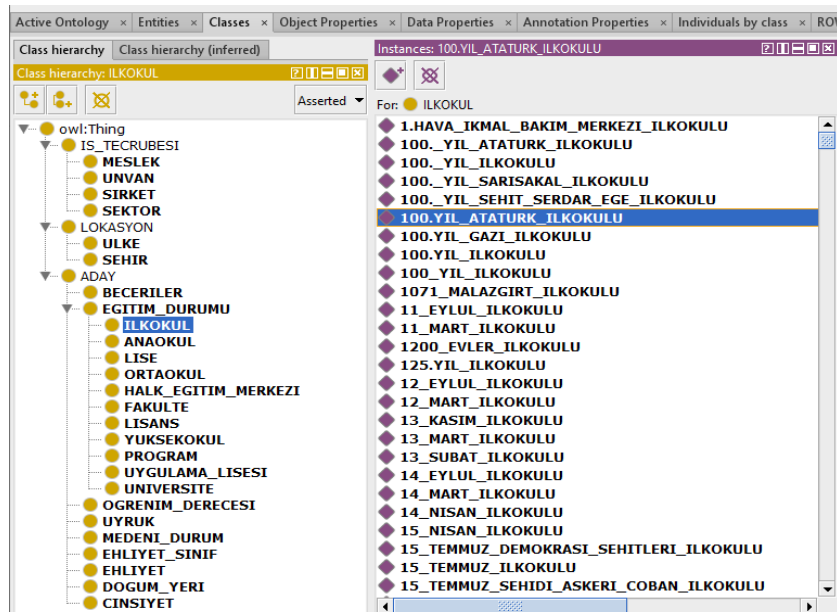
**Ontoloji Öğelerinin Temini ve RRSO Bilgi Tabanına Eklenmesi**

OWL ontoloji modelleme dili (Cardoso & Pinto, 2004) tarafından sağlanan "owl:OWLNamedIndividual" yapısı kullanılarak, bir ontolojideki her bir sınıfın altına o sınıfa ait öğelerin ilavesi gerçekleştirilebilir. Bunun için, OWL API (Horridge & Bechhofer, 2011) kullanılarak, Java dili ile bir sınıfa ait tüm öğeler (ör. Türkiye'deki ilk öğretim okullarının "İlkokul" sınıfının altına aktarılması) bir Excel dosyasından okunup, ontolojideki uygun kavramın altına otomatik aktarılmıştır. Bu çalışmada, aşağıda geliştirdiğimiz Java fonksiyonu sayesinde (bkz. Tablo 2), RRSO ontolojisinde yaratılan 28 sınıfa (kavramlara) ait 24924 adet öğenin otomatik gömülmesi sağlandı.

**Tablo 2.** Java Ortamından Bir Sınıf Kavramına Bir Öğesinin OWL/XML Formatında Eklenmesi.

No	Java Ortamından Bir Sınıfa Öğe Tanımlama İçin "classassertion" Sanal Kodu
1	try {
2	o = m.createOntology(Base_IRI); //RRSO'nun temel URL yapısını taşır
3	if (o instanceof OWLMutableOntology) {
4	OWLClass cls = f.getOWLClass(IRI.create(Base_IRI + "#" + className)); // sınıf eğer yoksa yaratılır
5	OWLNamedIndividual ind = f.getOWLNamedIndividual(IRI.create(Base_IRI + "#" + individual)); // öğe
6	OWLClassAssertionAxiom ax = f.getOWLClassAssertionAxiom(cls, ind); // sınıfa önceki satırda yaratılan öğe bir axiom bağlantısı yardımı ile atanır
7	AddAxiom addAx = new AddAxiom(o, ax); // yaratılan axiom RRSO'ya bağlanır
8	m.applyChange(addAx); // değişiklikler RRSO üzerinde kayıt edilir
10	OWLAnnotation indvLabelAnno = f.getOWLAnnotation(f.getRDFSLabel(), f.getOWLLiteral(label, "tr"));
11	OWLAxiom ax1 = f.getOWLAnnotationAssertionAxiom(ind.getIRI(), indvLabelAnno);
12	m.applyChange(new AddAxiom(o, ax1));
13	// kavram-öge bağlantısı içeren axiom OWL/XML formatında RRSO'ya kaydedilir
14	m.saveOntology(o, new OWLXMLOntologyFormat(), IRI.create(file));
15	}
16	m.removeOntology(o);

Örneğin, RRSO geliştirilirken, eğitim bilgilerini içeren OWL sınıfına, T.C. Millî Eğitim Bakanlığı resmi internet adresinde (MEB Okullar ve Diğer Kurumlar Arama Sitesi, 2023) Türkiye'de var olan çoğunluk anaokulu, ilkokul, ortaokul, lise (ör. İmam-Hatip, Mesleki ve Teknik Anadolu Lisesi, Uygulama Okulu, Halk Eğitim Merkezi vb.) okul isimleri elde edilerek, yukarıdaki Java fonksiyonu ile iteratif halde RRSO'ya aktarılması sağlanmıştır. Ayrıca, Türkiye'de bulunan tüm üniversiteler, fakülteler, yüksekokullar, programlar ve bölümler hem Wikipedia hem de YÖK veri tabanından (Wikipedia Üniversiteler Listesi, 2023; YÖK Üniversiteler Listesi, 2023; Memurlar Sitesi, 2023) toplanmış ve yine sınıf öğesi olarak Java fonksiyonları sayesinde RRSO'ya eklenmiştir.

**Şekil 1.** RRSO'da Bulunan Sınıflar ve İlkokul Kavramına Ait Tanımlanan Türkiye'deki İlk Öğretim Okulları Öğeleri.

İş tecrübeleri segmentinde, ünvanlar (Wikipedia Ünvanlar Listesi, 2023), meslekler (Wikipedia Meslekler Listesi, 2023), sektörler ve şirketler (MEB Sektörler Listesi, 2023; Wikipedia Şirketler Listesi, 2023) listeleri toplanmış,



Excel haline getirilmiş ve ardından yukarıdaki Java fonksiyonu kullanılarak RRSO'ya eklenmiştir. Buna ek olarak, kişilerin sahip oldukları “beceriler” öge olarak RRSO'ya kaydedilmiştir. Özet olarak, yukarıdaki Java fonksiyonu kullanılarak (Tablo 2), RRSO'nun mevcut sürümünde içerdiği 28 adet sınıfın içine 24924 adet sınıf ögesi Excel dosyalarından RRSO'ya "owl:OWLNamedIndividual" yapısında eklenmiştir.

### Yaratılan Sınıflar ve Hiyerarşi

Öğelerin eklenmesinden önce, RRSO ontolojisinin sınıf hiyerarşisini oluşturabilmek için, öncelikle alan ilgili ortak kavramlar belirlenmiştir (Eğitim segmenti kavramları → ilkökul, lise, üniversite, yüksek okul, fakülte, vb.). Ardından, daha spesifik kavramlar eklenerek hiyerarşi taslağı tamamlanmıştır. Şekil 1, RRSO'nun ana sınıfları ve alt sınıflarını, sınıflara ait girilen öğelerin bir kısmını göstermektedir. Ontolojideki sınıfların toplam sayısı 28 olup, bu sınıflar arasında 3 adet ana sınıf ve 25 adet “subclassOf” ilişkisine sahip alt sınıflar bulunmaktadır. Ana sınıflar (kavramlar) owl:Thing altında toparlanmış olup, her bir ana sınıfın altında o sınıfa ait alt sınıf (kavramlar) yaratılmıştır: ör. “IS\_TECRUBESI → Sektör”, “IS\_TECRUBESI → Meslek”, “EGITIM\_DURUMU → Ogrenim\_Durumu”, “EGITIM\_DURUMU → Program”, “ADAY → Cinsiyet” vb. pek çok alt kavram yaratılmıştır.

### Sınıflar Arasındaki İlişkisel Özellikler

RRSO üzerinde, kavram oluşturmanın yanı sıra “has\_Ad\_Soyad”, “has\_Cinsiyet”, “has\_Medeni\_Durum”, “has\_Ehliyet\_Sınıf”, “has\_Dogum\_Tarihi”, “has\_Uyruk”, “has\_Dogum\_Yeri”, “has\_Telefon” gibi birçok OWL Nesne Tipi özellik veya OWL Veri Tipi özellikler de oluşturulmuştur. Bu özellikler sınıflar arası ilişkileri temsil etmekte olup, OWL bireylerine işaret edecek şekilde ilişkilendirilmiştir.

**Tablo 3.** RRSO Üzerinde Yaratılan OTP (23 Adet) ve DTP (7 Adet) Türündeki Tüm İlişkisel Özellikler Sunulmaktadır. Ayrıca, Tanımlanan Bir İlişkinin Hangi Sınıflar Arasında Kurulduğu Parantez İçerisinde Verilmiştir.

Kişisel Bilgiler Özellikler	Eğitim Bilgisi Özellikler	İş Bilgisi Özellikler	Beceri Özellikler
has_Ad_Soyad (Aday, xsd:String)	has_Egitim_Durumu (Aday, Egitim_Durumu)	has_Sirket_Adi (Aday, xsd:String)	has_Beceri (Aday, Beceri)
has_Cinsiyet (Aday, Cinsiyet)	has_Ogrenim_Derecesi (Aday, Ogrenim_Derecesi)	has_Unvan (Aday, Unvan)	
has_Medeni_Durum (Aday, Medeni_Durum)	has_Anaokul (Aday, Anaokul)	has_Sektor (Aday, Sektor)	
has_Dogum_Tarihi (Aday, xsd:date)	has_Ilkokul (Aday, Ilkokul)	has_Meslek (Aday, Meslek)	
has_Dogum_Yeri (Aday, Lokasyon)	has_Ortaokul (Aday, Ortaokul)		
has_Uyruk (Aday, Uyruk)	has_Lise (Aday, Lise)		
has_Ehliyet (Aday, Ehliyet)	has_Uygulama_Lisesi (Aday, Uygulama_Lisesi)		
has_Ehliyet_Sınıf (Aday, Ehliyet_Sınıf)	has_Halk_Egitim_Merkezi (Aday, Halk_Egitim_Merkezi)		
has_E_mail (Aday, xsd:String)	has_Universite (Aday, Universite)		
has_Telefon (Aday, xsd:String)	has_Fakulte (Aday, Fakulte)		
has_Is_Adres (Aday, xsd:String)	has_Program (Aday, Program)		
has_Ev_Adres (Aday, xsd:String)	has_Lisans (Aday, Lisans)		
	has_Yuksekokul (Aday, Yuksekokul)		

RRSO ontolojisindeki sınıflar arası nesne tipi özelliklerin (ör. PERSON → “has\_Ehliyet” → DRIVERLICENCE) ve sınıf-veri türü arasındaki özelliklerin (ör. PERSON → “has\_Ad\_Soyad” → xsd:string “AYSE GULER”) ilk kurulması yine Java platformu üzerinden sağlanmıştır. RRSO'da toplamda 32 adet nesne tipi (Object Type Properties - OTP) ve veri tipi özellik (Data Type Properties - DTP) tanımlanmıştır. Tablo 3'te RRSO üzerinde yaratılan tüm OTP ve DTP türündeki özellikler, Kişisel Bilgiler Özellikleri, Eğitim Alanı Özellikleri, İş Bilgileri Özellikleri ve Beceri Özellikleri olarak gruplara ayrılarak sunulmuştur.

### Bireylere Özgü Özgeçmişlerin OWL Formunda RRSO'ya Entegrasyonu

İK havuzlarında yapısız halde bulunan milyonlarca özgeçmişten gerekli verinin çıkarımı sağlandıktan sonra, bu özgeçmişleri anlamsal tabanlı açık iş pozisyon tanımları ile eşleştirmek mümkündür. Bunun için, bireylerin ve açık iş pozisyonlarının RRSO gibi bir Upper ontoloji yapısında bulunan genel kavramlardan betimlenerek, yapısal halde İK havuzlarında saklanması gerekir. Bu nedenle, İK işe alım süreçlerinde anlamsal tabanlı JRS çözümleri ve RRSO gibi



bir Upper ontoloji ile, aday tarafından yapısız halde yüklenen bir özgeçmişe ait anında bir OWL dosyası oluşturulabilir. Böylece, o özgeçmişteki yerleşik kavramsal tanımlamalar, açık bir iş ilanındaki kavramsal tanımlamalar ile bir anlamsal düzlemde eşleştirilebilir. Örneğin, bir özgeçmişteki kişisel bilgiler segmenti; “has\_Medeni\_Durum”, “has\_Dogum\_Tarihi”, “has\_Dogum\_Yeri”, “has\_Uyruk”, “has\_Meslek”, “has\_Ehliyet”, vb. tanımları içerebilir.

Benzer şekilde, iş deneyimleri segmenti; “has\_Sirket\_Adi”, “has\_Unvan”, “has\_Sektor”, “has\_Meslek” vb. gibi bazı önemli özellik tanımlamaları içerebilir. Bu özelliklerin değerleri, Tablo 4’te sunulan örnek kişi için (“A000002” TC no lu birey), RRSO Upper ontoloji formuna bağlı, OWL formuna dönüştürülmesi mümkündür. Tablo 4’te ki örnekte görüldüğü gibi, “A000002” no lu özgeçmiş sahibi, bireyin OWL dosyasında medeni durumunun “Evli” olduğuna, “A1” ve “B1” olmak üzere 2 adet ehliyet sahibi olduğuna, bir iş adresi “Mecidiyekoy Bentek Is Hanı K:3 No:6 Istanbul” olduğuna ve 2 adet telefon numarası “5440909909, 2120558989” olduğuna dair özgeçmiş için gerekli bilgileri içermektedir. Bireylerin özgeçmişlerinin OWL/XML formundaki dosyaları, bir Java fonksiyonu geliştirilerek RRSO ontolojisine bağlanarak aktarılması sağlanmıştır.

**Tablo 4.** “A\_000002” Numaralı Bireyin Özgeçmişinden İlgili Verilerin OWL/XML Formunda Üretilmesi.

```
1 <ClassAssertion>
2 <Class IRI="#Aday"/>
3 <NamedIndividual IRI="#A_000002"/>
4 </ClassAssertion>
5 <ObjectPropertyAssertion>
6 <ObjectProperty IRI="# has_Ehliyet_Sınıf"/>
7 <NamedIndividual IRI="#A_000002"/>
8 <NamedIndividual IRI="#A1_Sinifi_Ehliyet"/>
9 </ObjectPropertyAssertion>
10 <ObjectPropertyAssertion>
11 <ObjectProperty IRI="# has_Ehliyet_Sınıf"/>
12 <NamedIndividual IRI="#A_000002"/>
13 <NamedIndividual IRI="#B1_Sinifi_Ehliyet"/>
14 </ObjectPropertyAssertion>
15 <DataPropertyAssertion>
16 <DataProperty IRI="#has_Is_Adres"/>
17 <NamedIndividual IRI="#A_000002"/>
18 <Literal>Mecidiyekoy Bentek Is Hanı K:3 No:6 Istanbul</Literal>
19 </DataPropertyAssertion>
20 <DataPropertyAssertion>
21 <DataProperty IRI="#has_Medeni_Durum"/>
22 <NamedIndividual IRI="#A_000002"/>
23 <Literal datatypeIRI="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#boolean">Evli</Literal>
24 </DataPropertyAssertion>
25 <DataPropertyAssertion>
26 <DataProperty IRI="#has_Telefon"/>
27 <NamedIndividual IRI="#A_000002"/>
28 <Literal datatypeIRI="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#integer">5440909909</Literal>
29 </DataPropertyAssertion>
30 <DataPropertyAssertion>
31 <DataProperty IRI="#has_Telefon"/>
32 <NamedIndividual IRI="#A_000002"/>
33 <Literal datatypeIRI="http://www.w3.org/2001/XMLSchema#integer">2120558989</Literal>
34 </DataPropertyAssertion>
```

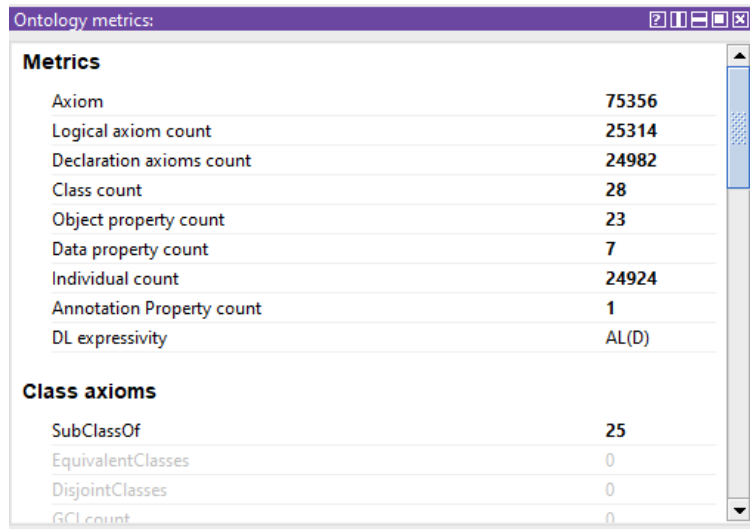
Tablo 5’in Satır 3’ünde, RRSO’nun bir ontoloji dosyası olarak yaratılması ve ontolojinin yüklenmesi, “o” değişkeni yaratılarak sağlanmıştır. Daha sonra, bir sınıf, bir DTP özelliği ve bir OWL ögesini birbirine bağlamak için, gerekli üçlü “Aksiyom” yapısının yaratılması gerekmektedir (bkz. satır # 4-5). Örneğin, “TCNO: #A000002” → “#has\_Telefon” → “#5440909909” üçlüsünün oluşturulması, #ADAY sınıfı altında tanımlı bir ögeye (“TCNO: #A000002”), “#has\_Telefon” adlı DTP’sine, bir rakamsal ifadenin (“XMLSchema#integer” → 5440909909) bağlanmasını gerektirir ve OWL API kütüphaneleri ile Java ortamından RRSO ontolojisine bağlanıp, yüzlerce aksiyomun yaratılması mümkün olmuştur. Aksiyomlar yaratılırken, eğer ontolojide eklenmek istenen hedef aksiyom zaten önceden eklenmişse, bunun kontrol edilmesi gerekir (Satır 8). Yapılan üçlü aksiyom eklemesinden sonra, ontoloji mutlaka güncellenerek kaydedilmelidir (Satır 11).

**Tablo 5.** RRSO Üzerinde “integer” Türündeki Bir DTP Özelliğinin Yaratılması.

```
1 public void save_Integer_DTP(String domindv, String dtpName, int rangeINTEGERval, File file) {
2   try {
3     o = m.loadOntologyFromOntologyDocument(IRI.create(file));
4     OWLNamedIndividual domain = f.getOWLNamedIndividual(IRI.create(Base_IRI + "#" + domindv));
5     OWLDataProperty dproperty = f.getOWLDataProperty(IRI.create(Base_IRI + "#" + dtpName));
6     OWLDataPropertyAssertionAxiom ax = f.getOWLDataPropertyAssertionAxiom(dproperty, domain, rangeINTEGERval);
7     if (o instanceof OWLMutableOntology) {
8       if (!o.containsAxiom(ax)) {
9         AddAxiom addAx = new AddAxiom(o, ax);
10        m.applyChange(addAx);
11        m.saveOntology(o, new OWLXMLOntologyFormat(), IRI.create(file));
12      }
13    }
14    m.removeOntology(o);
15  } catch (Exception e) {
16    System.out.println("Could not create ontology: " + e.getMessage());
17  }
18 }
```

## RRSO’NUN NİHAİ YAPISI VE BOYUTLARI

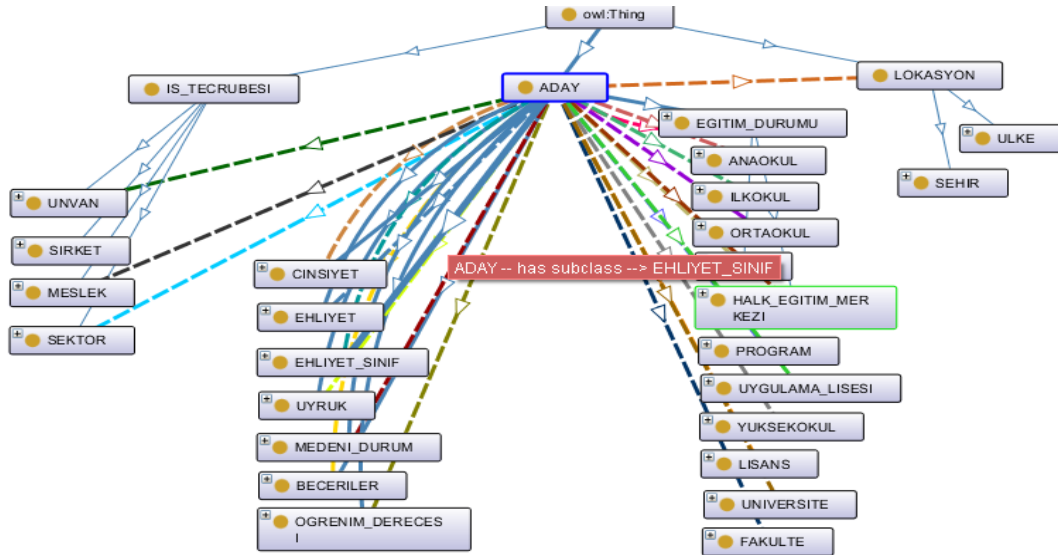
Daha önce de belirtildiği gibi, RRSO'nun son versiyonunda 28 sınıf/alt sınıf, 23 nesne tipinde özellik (OTP), 7 veri türünde özellik (DTP), 25314 mantıksal aksiyom, 24982 açıklama aksiyomu, 24924 sınıf öğeleri ve toplamda 75356 adet geniş çapta bir aksiyom seti içermektedir.



Metrics	
Axiom	75356
Logical axiom count	25314
Declaration axioms count	24982
Class count	28
Object property count	23
Data property count	7
Individual count	24924
Annotation Property count	1
DL expressivity	AL(D)
Class axioms	
SubClassOf	25
EquivalentClasses	0
DisjointClasses	0
GCI count	0

**Şekil 2.** RRSO Son Sürümünün Metrik Bilgileri.

Şekil 2, Protégé Ontoloji düzenleyicisinden elde edilen RRSO'nun istatistiksel bilgilerini göstermektedir. Ayrıca Şekil 3'te Protégé editörünün OntoGraph sekmesinden elde edilen RRSO'nun kavramsal ilişki yapısı sunulmuştur.



Şekil 3. RRSO'nun Son Sürümündeki Sınıf, Alt Sınıf, Sınıflar-Arası İlişkilere Ait Kurulan Kavramsal Bağlar.

### Çalışmanın Katkıları

Çalışmanın katkılarını özetlersek, geliştirilen RRSO bilgi tabanını oluşturmak ve doğrulamak için aşağıdaki işlem adımları sırasıyla gerçekleştirilmiştir:

- **Araştırma ve Analiz:** İlk olarak, İş Öneri Sistemleri alanındaki temel kavramları belirlemek için kapsamlı bir araştırma yapıldı. İK yönetimindeki işe alım sürecine dair kavramlar, işlem adımları, ve ilgili tüm unsurları belirlemek amacıyla, Web ortamında özgeçmiş belgeleri, ilgili literatür çalışmaları, ve ilgili diğer ontoloji çalışmaları tarandı. Özellikle, literatürde yer alan Ontoloji-tabanlı İş Öneri Sistemi uygulamaları ve önerileri araştırıldı.
- **Ana Kavramları Tanımlama:** İş Önerme sistemleri alanındaki temel kavramlar; kişi profil bilgileri (yaş, cinsiyet, ehliyet, doğum yeri, vb.), eğitim bilgileri, iş bilgileri, yetkinlikler vb. ilgili unsurlar belirlendi. Örneğin, RRSO'nun geliştirilmesi sırasında “Eğitim” segmentine ait ilgili sınıf öğeleri için, T.C. Millî Eğitim Bakanlığı'nın (MEB Okullar ve Diğer Kurumlar Arama Sitesi, 2023) resmi internet sitesinde yer alan Türkiye'deki tüm anaokulu, ilkokul, ortaokul, lise isim bilgileri şehir ve ilçe bilgileri ile toplandı. Bu öğeler, Java programlama dilinde yazılan bazı ontoloji oluşturma fonksiyonları aracılığıyla RRSO'ya “OWL Individual” öğeleri olarak aktarıldı. Ayrıca, Türkiye'deki tüm üniversiteler, fakülteler, yüksekokullar, programlar ve bölümler, Wikipedia, YÖK ve diğer bazı Web alanlarından (Wikipedia Üniversiteler Listesi, 2023; YÖK Üniversiteler Listesi, 2023; Memurlar Sitesi, 2023) taranan bilgilerle, aynı Java fonksiyonları aracılığıyla RRSO'ya eklenmiştir. Toplamda 24924 adet “OWL Individual” öğeleri RRSO bilgi tabanına eklenmiştir.
- **Sınıfları ve Alt Sınıfları Belirleme:** Bir önceki adımda belirlenen ana kavramlar (Aday, İş Tecrübesi, Lokasyon) kavramları kendi içinde alt sınıflara ayrılarak, toplamda RRSO üzerinde 25 farklı alt sınıf oluşturuldu.
- **İlişkileri Belirleme:** Bu aşamada, sınıflar arasındaki olası ilişkiler belirlendi. Örneğin, bir adayın uyruk bilgisi (Aday <Class> → hasUyruk<Property> → Uyruk<Class>) gibi ilişkiler belirlendi.
- **Özellikleri ve Nitelikleri Tanımlama:** Önceki adımda belirlenen tüm özellikler, Nesne Tipi Özelliği (OTP) ve Veri Tipi Özelliği (DTP) olarak iki türde belirlenmiştir. RRSO üzerinde yaratılan toplam 28 sınıf (3 ana sınıf + 25 alt sınıf) üzerinde, 23 adet iki kavram arası OTP ilişkileri ve 7 adet kavramlar-veri tipleri arası DTP türü ilişkiler yaratılmıştır.
- **Ontolojiyi Modelleme:** Geliştirilen RRSO, aşamalı olarak Protégé 5.0 ontoloji geliştirme aracı ve W3C standardı olan Web Ontology Language (OWL) dili kullanılarak oluşturuldu. Önceki adımlarda eklenen tüm anlamsal yapıların Protégé aracı üzerindeki sayısal bilgileri Şekil 2'de gösterilmiştir.
- **Doğrulama ve İyileştirme:** Oluşturulan RRSO'nun kalite ölçümü için OntoMetric aracı kullanıldı. Bu araç, ontolojinin tutarlılık, doğruluk ve eksiksizlik gibi kriterlere uygunluğunu değerlendirdi. Elde edilen sonuçlar, ontolojinin yüksek kalitede olduğunu göstermekte ve ileri bölümlerde detaylı bir şekilde tartışılmaktadır.

- **Uygulama ve Test Etme:** Ayrıca, RRSO üzerinde bir dizi gerçek özgeçmiş test verisi olarak kullanılarak bazı testler gerçekleştirildi. Bu sayede, gerçek dünya özgeçmişlerinin RRSO'ya uygun bir şekilde eklenebildiği, uygun kavramlara ve öğelere işaret edilebildiği, öğeler arasındaki bağlantıların doğru ve eksiksiz kurulabildiği doğrulandı. Sonuç olarak, RRSO'nun İK süreçlerindeki uygulanabilirliği ve kullanılabilirliği, gerçek dünya verileri ile test edilerek ve desteklenerek çalışmada bir konsept kanıtı sunulmuştur.

## RRSO DOĞRULAMA VE TEST ÇALIŞMALARI

Bu bölümde, geliştirdiğimiz RRSO'nun tasarımını ve kalitesini ölçmek için yaygın olarak bilinen bir ontoloji kalite ve test aracı olan OntoMetric aracı (OntoMetric Web Portal<sup>1</sup> Rostock Üniversitesi, 2023; Lantow, 2016) kullanılmıştır ve sonuçları verilmiştir. OntoMetric aracı, bir ontolojinin yapısal düzgünlüğü, ilişkisel/içerik zenginliği hakkında kalite metrikleri kullanarak bazı değerlendirme sonuçları üretir. OntoMetric beş kategoriye göre toplam 160 özelliği irdeler. Bu beş kategori; "ontolojinin içeriği", "dil", "geliştirme metodolojisi", "yaratma araçları" ve "kullanım maliyetleri" olacak şekilde irdelenir. OntoMetric aracı, bir ontoloji kalite test Web portalı olarak geliştirilmiştir. Ontoloji geliştiricileri, geliştirdikleri ontolojilerinin kaliteye dayalı metrik sonuçlarını bu portal aracılığıyla kolaylıkla elde edebilmektedirler. OntoMetric 4 farklı metrik türü altında sınıflandırılmaktadır. Bunlar: "Şema Metrikleri", "Bilgi Tabanı Ölçüm Metrikleri", "Sınıf Metrikleri" ve "Grafik Metrikleri" dir. Şekil 4'te, geliştirdiğimiz RRSO'nun son sürümü, bu 4 kalite metrikleri açısından değerlendirmek amacıyla, Rostock Üniversitesi'nin OntoMetrics ontoloji doğrulama ve test aracı üzerinde yüklenmiş, denenmiş ve elde edilen sonuçlar sunulmuştur. Bu metriklerden en önemli olanlardan bir kısmı seçilmiş olup, aşağıda amaçları ve formülleri ile irdelenmiştir.

### Schema metrics [more details](#)

Attribute richness:	0.25
Inheritance richness:	0.892857
Relationship richness:	0.479167
Attribute class ratio:	0.0
Equivalence ratio:	0.0
Axiom/class ratio:	2691.285714
Inverse relations ratio:	0.0
Class/relation ratio:	0.583333

### Knowledgebase metrics

Average population:	890.142857
Class richness:	0.892857

### Graph metrics [more details](#)

Absolute root cardinality:	3
Absolute leaf cardinality:	24
Absolute sibling cardinality:	28
Absolute depth:	64
Average depth:	2.285714
Maximal depth:	3
Absolute breadth:	28
Average breadth:	5.6
Maximal breadth:	11
Ratio of leaf fan-outness:	0.857143
Ratio of sibling fan-outness:	1.0
Tangledness:	0.0
Total number of paths:	28
Average number of paths:	9.333333

### Class metrics [more details](#)

To see the calculated class metric results, pl

Class labels only

ADAY
ANAOKUL
BECERILER
CINSIYET
EGITIM_DURUMU
EHLIYET
EHLIYET_SINIF
FAKULTE
HALK_EGITIM_MERKEZI
ILKOKUL

Class connectivity:	0
Class fulness:	0.0
Class importance:	0.65455
Class inheritance richness:	2.545455
Class readability:	0
Class relationship richness:	0
Class children count:	11
Class instances count:	16314

Şekil 4. Rostock Üniversitesinin Ontometrics Ontoloji Doğrulama ve Test Aracı Üzerinde RRSO Son Sürümünün Kalite Metrik Sonuçları.

Sorgu Sayfası: <https://ontometrics.informatik.uni-rostock.de/ontologymetrics/ServletController>

OntologyID: [Optional.of\(http://EMU/ResumeOnt\)](http://EMU/ResumeOnt), View Result in XML: <https://ontometrics.informatik.uni-rostock.de/tmp/20231215122947515.xml?>

<sup>1</sup><https://ontometrics.informatik.uni-rostock.de/ontologymetrics/index.jsp>

### Şema metrikleri

Şema metrikleri ontolojinin tasarımına odaklanır. Alan bilgisinden ziyade, ontolojinin şema tasarımının zenginliğini, genişliğini, derinliğini ve kalıtım verilerini dikkate alır. Bu kategorideki en önemli metriklerden bazıları aşağıda listelenmiştir:

**a. Öznitelik zenginliği (Attribute Richness—AR):** Tüm sınıfların özniteliklerinin (ATT) sayısının sınıf sayısına (C) bölünmesiyle bulunur. Bu metrik sonucu, RRSO için, 0.25 olarak bulunmuştur. Sınıf başına öznitelik sayısı arttıkça geliştirilen ontolojinin kalitesi de artar. Sonucun düşük çıkması sınıflara ait öznitelik sayısının az olduğunu ve sınıfların kapsamlı bir şekilde modellenmediğini göstermektedir. RRSO'da AR değeri 0.25 olup, ileri versiyonlarında sınıf başına tanımlanan özniteliklerin daha da artırılması planlanmaktadır.

$$AR = \frac{|ATT|}{C} \quad (1)$$

**b. Kalıtım zenginliği (Inheritance Richness—IR):** Sınıf başına ortalama alt sınıf sayısıdır, diğer deyişle, bir sınıfın alt sınıflarının sayısı  $|H^C(C_1, C_i)|$  olarak tanımlanır. Formüldeki H, miras ilişkilerinin sayısını belirtir. Düşük IR'li bir ontoloji, derin (veya dikey) bir ontoloji olup; ontolojinin belirli bir konu alanını ayrıntılı bir şekilde kapsadığı anlamına gelmektedir. Fakat, yüksek IR'ye sahip bir ontoloji, sığ (veya yatay) bir ontoloji olacaktır; bu durum, ontolojinin düşük düzeyde ayrıntıyla geniş bir genel bilgi yelpazesini temsil ettiğini gösterir. IR metrik sonucu, RRSO için, 0.8928 olarak bulunmuştur. Bu değer RRS'nun yapısını daha çok yatay düzlemde ilerlediğini ifade eder. Çok dar kapsamlı bir alanı modelleyen ontolojilerde şema derinliği düşük çıkarken, kapsam arttıkça derinlik daha yüksek olacaktır. RRSO'da IR değeri 0.25 olup, ileri versiyonlarında sınıf başına tanımlanan özniteliklerin daha da artırılması planlanmaktadır.

$$IR = \frac{\sum_{C_i \in C} |H^C(C_1, C_i)|}{|C|} \quad (2)$$

**c. İlişki zenginliği (Relationship Richness—RR):** IR kalıtım dışı ilişkilerin sayısının (P) ontolojide tanımlanan toplam ilişkilerin sayısına bölünmesiyle elde edilir. Toplam ilişki sayısı tüm miras ilişkileri (H) ve miras dışı ilişkilerin (P) toplamını içerir. Bu metrik sonucu, RRSO için, 0.4791 olarak bulunmuştur.

$$RR = \frac{|P|}{|H| + |P|} \quad (3)$$

**d. Öznitelik-Sınıf oranı (Attribute Class Ratio—ACR):** Bu metrik, nitelikleri içeren sınıflar ile tüm sınıflar arasındaki ilişkiyi temsil eder. AR'nin farkı, niteliklerin miktarının sayılmamasıdır. Yalnızca bir sınıfın niteliklerinin olup olmadığı sayılır. Bu metrik sonucu, RRSO için, 0.0 olarak bulunmuştur.

$$ACR = \frac{\text{ClassesWithAttribures}}{\# \text{ of Classes}} \quad (4)$$

**e. Aksiyom sınıf oranı (Axiom Class Ratio—AXCR):** Aksiyomlar ve sınıflar arasındaki orandır, diğer deyişle, sınıf başına ortalama aksiyom miktarıdır. Bu metrik sonucu, RRSO için, 2691.29 olarak bulunmuştur.

$$AXCR = \frac{\text{Axioms}}{\# \text{ of Classes}} \quad (5)$$

**f. Sınıf ilişki oranı (Class Relation Ratio—CRR):** Ontolojideki sınıflar ve ilişkiler arasındaki oranı belirtir. Bu metrik sonucu, RRSO için, 0.5833 olarak bulunmuştur.

$$CRR = \frac{\# \text{ of Classes}}{\# \text{ of Relationships}} \quad (6)$$

### Bilgi tabanı ölçüm metrikleri

Verilerin bir ontolojiye yerleştirilme şekli de ontoloji kalitesinin çok önemli bir ölçüsüdür. Çünkü ontoloji tasarımının etkililiğini ve ontoloji tarafından temsil edilen gerçek dünya bilgisinin miktarını gösterebilir. Örnek metrikleri, bilgi tabanını bir bütün olarak tanımlayan metrikleri ve her şema sınıfının bilgi tabanında kullanılma şeklini açıklayan metrikleri içerir.



**a. Ortalama nüfus (Average Population—AP):** Bir ontolojideki sınıfların ortalama popülasyonu (AP), bilgi tabanındaki (I) öge sayısının tanımlanan sınıf sayısına (C) bölünmesidir. Bu metrik sonucu 890.14 bulunmuştur.

$$AP = \frac{|I|}{|C|} \quad (7)$$

**b. Sınıf zenginliği (Class Richness—CR):** Bu ölçüm, örneklerin sınıflar arasında nasıl dağıtıldığını gösterir. Bir ontolojinin sınıf zenginliği (CR), boş olmayan sınıfların (ögelere sahip sınıflar) (C') sayısının, toplam sınıf sayısına (C) bölünmesiyle elde edilen yüzdeldir. Bu metrik sonucu, RRSO için, 0.8928 olarak bulunmuş ve sınıf zenginliğinin oldukça yüksek olarak belirlenmiştir.

$$CR = \frac{|C'|}{|C|} \quad (2)$$

### Sınıf metrikleri

Sınıf Metrikleri, ontolojilerin sınıflarını ve ilişkilerini irdeler. Şekil 4'te görüldüğü üzere, RRSO yapısındaki sınıfların listesi görülmektedir. Örneğin, "EĞİTİM DURUMU" adlı sınıfını inceleyerek, bu sınıfın önem derecesi 0.65% olarak tespit edilmiştir. Ayrıca sınıfın miras ilişkileri/zenginliği bağlantıları derecesi 2.545, miras ilişkisinde olduğu alt sınıflarının sayısı 11, ve sınıfın içinde tanımlanmış ögelerin sayısı ise 16314 olarak tespit edilmiştir. Sonuç olarak, bu sınıfın, RRSO üzerinde oldukça önemli bir ağırlığa sahip olduğunu ve zengin ilişkisel bağlantılar kurduğu anlamına gelmektedir.

### Grafik metrikleri

Grafik veya yapısal metrikler ontolojilerin yapısını irdeler. Bu bölüme dair RRSO'dan elde edilen sonuçlar, Şekil 4'te "Graph Metrics" başlığı altında sunulmuştur. Geliştirilen RRSO'nun son versiyonundaki ağaç yapısındaki derinlik, genişlik ve uzunluğa dair bilgilere işaret eden, bazı önemli metrikler hesaplanmış ve şu sonuçlar elde edilmiştir: mutlak kök önem derecesi: 3, mutlak yaprak kardinalitesi: 24, mutlak derinlik: 64, ortalama derinlik: 2,285, maksimum derinlik: 3, mutlak genişlik: 28, ortalama genişlik: 5,6, maksimum genişlik: 11, yaprak yayılma oranı: 0,857, toplam yol sayısı: 28, ve ortalama yol sayısı: 9,333.

## TARTIŞMA VE SONUÇLAR

Bir kuruluş ile çalışanları arasındaki ilişkiyi etkileyen tüm yönetim kararları/uygulamaları kurumsal firmaların İnsan Kaynakları (İK) birimleri tarafından yönetilmektedir. İnternet, küresel ölçekte dijitalleşmenin aşamalarını gözlemleyebilen organizasyonlar için çeşitli fırsatlar yaratmış, onların İK yönetimlerini ve süreçlerini etkilemiştir. Dijitalleşmeyi hızlandırmanın yanı sıra, COVID-19 gibi özel durumlar da, İK tarafının yürüttüğü iş süreçlerinde (ör., çevrimiçi personelin uzaktan performansının değerlendirilmesi, çevrimiçi işe alım görüşmesi, çevrimiçi personel memnuniyetini ölçme-değerlendirme, vb.) çeşitli değişikliklere veya yeniliklere neden olmuştur. Ayrıca, sosyal ağ iş-arama siteleri (ör, LinkedIn, kariyer.net, ResearchGate, vb.), iş adaylarının kendi profillerini oluşturmalarına ve hem resmi hem de gayri resmi çevrimiçi olarak kurumsal bilgi aramalarına yardımcı olmuştur. Bu makalede, kurumsal firmaların işe alım süreçlerinde, İK personelinin iş yükünü rahatlatacak, daha etkin süreç yönetimi sağlayacak ve JRS çözümlerine temel olacak, Özgeçmiş Öneri Sistemi Ontolojisi (Resume Recommender System Ontology- RRSO) bilgi tabanı sunulmaktadır. RRSO, Türkçe dilinde geliştirilmiş olup, Türkiye'de kurumsal firmaların İK alanında işe-alım süreçlerinde kullanabilecekleri derin bir bilgi tabanı, olarak literatüre kazandırılmıştır. Böylece, Türkçe özgeçmişler ile Türkçe iş ilanları arasında daha etkin eşleşmeler ve önermeler yapılabilecektir. Bu anlamda, çalışmanın araştırma alanına katkıları şu şekilde özetlenebilir:

- Türkiye'de yerleşik firmaların İK biriminin aday özgeçmiş havuzlarında bulunan milyonlarca özgeçmişin diğer veri kaynaklarıyla ilişkilendirilmesi RRSO Upper ontolojisi ile mümkün olabilmesi sağlanmıştır.
- Türkçe özgeçmişler ile Türkçe iş ilanları arasında kavramsal eşleşmeler ve bağlantıların çıkarılmasına yol açılmıştır.
- Araştırma çalışmalarında, Türkçe dilinde yapısız formatta saklanan özgeçmiş verilerin, yapay zekâ doğal dil işleme yöntemleri ile daha yapısal hale dönüşümünü sağlayan Adlandırılmış Varlık Tanıma (Named Entity Recognition-NER) çözümlerinde ontoloji bilgi tabanı olarak kullanılması imkânı sağlanmıştır.
- Yapısal hale dönüşümünü sağlanan Türkçe özgeçmişlerin, anlamsal tabanda OWL/XML formatında saklanmasına olanak sağlanmıştır.

— RRSO'nun son versiyonunda 28 sınıf/alt sınıf, 23 nesne tipinde özellik, 7 veri türünde özellik, 25314 mantıksal aksiyom, 24982 açıklama aksiyomu, 24924 sınıf öğeleri ve toplamda 75356 adet geniş çapta bir aksiyom seti içermektedir.

Gelecekteki bir çalışma olarak, RRSO ontolojisinin “İş Adayı — İş Pozisyon Tanımı” eşleşmesini sağlayacak kural tabanının yaratılarak genişletilmesi planlanmaktadır. Gelecekteki diğer bir çalışma ise, RRSO'nun REST API (Zhou vd.,2014) ve JAVA aracılığıyla diğer araştırmacılar tarafından arayüz/Web servisleri ile erişilebilir formda sunulması olacaktır. Çalışmanın yaygın etkisinin artırılması amacıyla İngilizce dil desteğinin eklenmesi planlanmaktadır.

## KAYNAKLAR

Berners-Lee, T., Hendler, J., & Lassila, O. (2001). The semantic web. *Scientific American*, 284(5), 34-43. <https://doi.org/10.4102/sajim.v6i1.297>

Çelik, D., Karakas, A., Bal, G., Gültunca, C., Elçi, A., Buluz, B., & Alevli, M. C. (2013). Towards an information extraction system based on ontology to match resumes and jobs. In 2013 IEEE 37th annual computer software and applications conference workshops (pp. 333-338). IEEE. <https://doi.org/10.1109/COMPSACW.2013.60>

Guarino, N., Oberle, D., & Staab, S. (2009). What is an ontology? *Handbook on ontologies*, 1-17. [https://doi.org/10.1007/978-3-540-92673-3\\_0](https://doi.org/10.1007/978-3-540-92673-3_0)

Guo, Shiqiang & Alamudun, Folami & Hammond, Tracy. (2016). Résumatcher: A Personalized Résumé-Job Matching System. *Expert Systems with Applications*. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2016.04.013>.

Hong, W., Zheng, S., Wang, H., & Shi, J. (2013). A job recommender system based on user clustering. *J. Comput.*, 8(8), 1960-1967. <https://doi.org/10.4304/jcp.8.8.1960-1967>

Horrige, M., & Bechhofer, S. (2011). The OWL API: A java api for owl ontologies. *Semantic web*, 2(1), 11-21. <https://doi.org/10.3233/SW-2011-0025>

Kariyer.Net Web Sitesi, <https://www.kariyer.net>, LVD: 13-01-2023.

Lantow, B. (2016). OntoMetrics: Putting Metrics into Use for Ontology Evaluation. In *KEOD* (pp. 186-191). <https://doi.org/10.5220/0006084601860191>

Cardoso, J., & Pinto, A. M. (2015). The web ontology language (OWL) and its applications. In *Encyclopedia of Information Science and Technology*, Third Edition (pp. 7662-7673). IGI Global. <https://doi.org/10.4018/978-1-4666-5888-2.ch755>

MEB Okullar ve Diğer Kurumlar Arama Sitesi, <https://www.meb.gov.tr/baglantilar/okullar/index.php>, Son Erişim: 27.10.2023

MEB Sektörler Listesi, <https://meslegimhayatim.meb.gov.tr/kariyer/sectorler>, Son Erişim: 27.10.2023

Memurlar Sitesi, [www.memurlar.net/common/news/documents/458260/meslekyuksekokullari.pdf](http://www.memurlar.net/common/news/documents/458260/meslekyuksekokullari.pdf), Son Erişim: 27.10.2023

Mishra, R., & Rathi, S. (2020). Efficient and scalable job recommender system using collaborative filtering. In *ICDSMLA 2019: Proceedings of the 1st International Conference on Data Science, Machine Learning and Applications* (pp. 842-856). Springer Singapore. Casper proactive prospect. [https://doi.org/10.1007/978-981-15-1420-3\\_91](https://doi.org/10.1007/978-981-15-1420-3_91)

Nguyen, C. D., Vo, K. D., & Nguyen, D. T. (2013). Supporting career counseling with user modeling and job matching. In *Advanced computational methods for knowledge engineering* (pp. 281-292). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-00293-4\\_21](https://doi.org/10.1007/978-3-319-00293-4_21)

O'connor, M., Knublauch, H., Tu, S., & Musen, M. (2005). Writing rules for the semantic web using SWRL and Jess. *Protégé With Rules WS*, Madrid, Mevcut: <https://www.researchgate.net/profile/Martin-Oconnor-7>. [https://doi.org/10.1007/11574620\\_69](https://doi.org/10.1007/11574620_69)

OntoMetric Web Portal, OntoMetric tool, Web adres: <https://ontometrics.informatik.uni-rostock.de/ontologymetrics/index.jsp>, Son Erişim: 13.11.2023.

Rimitha, S. R., Abburu, V., Kiranmai, A., Marimuthu, C., & Chandrasekaran, K. (2019). Improving Job Recommendation Using Ontological Modeling and User Profiles. In 2019 Fifteenth International Conference on Information Processing (ICINPRO) (pp. 1-8). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICInPro47689.2019.9092271>

Salazar, O. M., Jaramillo, J. C., Ovalle, D. A., & Guzmán, J. A. (2015). A case-based multi-agent and recommendation environment to improve the e-recruitment process. In Highlights of Practical Applications of Agents, Multi-Agent Systems, and Sustainability-The PAAMS Collection: International Workshops of PAAMS 2015, Salamanca, Spain, June 3-4, 2015. Proceedings 13 (pp. 389-397). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-19033-4\\_34](https://doi.org/10.1007/978-3-319-19033-4_34)

Secret.CV Web Sitesi, <https://www.secretcv.com/>, Son Erişim: 27.10.2023.

Siting, Z., Wenxing, H., Ning, Z., & Fan, Y. (2012). Job recommender systems: a survey. In 2012 7th International Conference on Computer Science & Education (ICCSE) (pp. 920-924). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICCSE.2012.6295216>

Tamburri, D. A., Van Den Heuvel, W. J., & Garriga, M. (2020). Dataops for societal intelligence: a data pipeline for labor market skills extraction and matching. In 2020 IEEE 21st International Conference on Information Reuse and Integration for Data Science (IRI) (pp. 391-394). IEEE. <https://doi.org/10.1109/IRI49571.2020.00063>

Wikipedia Meslekler Listesi, [https://tr.wikipedia.org/wiki/Meslekler\\_listesi](https://tr.wikipedia.org/wiki/Meslekler_listesi), Son Erişim: 27.10.2023

Wikipedia Şirketler Listesi, [https://tr.wikipedia.org/wiki/T%C3%BCrkiye\\_merkezli\\_%C5%9Firketler\\_listesi](https://tr.wikipedia.org/wiki/T%C3%BCrkiye_merkezli_%C5%9Firketler_listesi), Son Erişim: 27.10.2023

Wikipedia Üniversiteler Liste, [https://tr.wikipedia.org/wiki/T%C3%BCrkiye%27deki\\_%C3%BCniversiteler\\_listesi](https://tr.wikipedia.org/wiki/T%C3%BCrkiye%27deki_%C3%BCniversiteler_listesi), Son Erişim: 27.10.2023

Wikipedia Ünvanlar Listesi, [https://tr.wikipedia.org/wiki/Meslek\\_unvanlar%C4%B1\\_listesi](https://tr.wikipedia.org/wiki/Meslek_unvanlar%C4%B1_listesi), Son Erişim: 27.10.2023

YÖK Üniversiteler Listesi, <https://www.yok.gov.tr/universiteler/universitelerimiz>, Son Erişim: 27.10.2023

Zhou, W., Li, L., Luo, M., & Chou, W. (2014). REST API design patterns for SDN northbound API. In 2014 28th international conference on advanced information networking and applications workshops (pp. 358-365). IEEE. <https://doi.org/10.1109/WAINA.2014.153>



# Kahramanmaraş Sütçü İmam University

## Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 16.11.2023  
Kabul Tarihi : 22.12.2023

Received Date : 16.11.2023  
Accepted Date : 22.12.2023

### GÜNCEL SANATTA BİR ÜRETİM BİÇİMİ OLARAK ÇEKİŞMELİ ÜRETKEN AĞLAR

#### GENERATIVE ADVERSARIAL NETWORKS AS A PRACTICE IN CONTEMPORARY ART

Serdar ÇİFTÇİ<sup>1</sup>\* (ORCID: 0000-0001-7074-2876)  
Dilara KARAKAŞ TABAK<sup>2</sup> (ORCID: 0000-0002-5476-081X)

<sup>1</sup> Harran Üniversitesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Şanlıurfa, Türkiye  
<sup>2</sup> Harran Üniversitesi, Güzel Sanatlar Eğitimi Bölümü, Şanlıurfa, Türkiye

\*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Serdar ÇİFTÇİ, serdarciftci@harran.edu.tr

#### ÖZET

Üretken modeller son yıllarda görüntü oluşturmada etkileyici sonuçlar gerçekleştirmektedir. Yapay zekâ alanında yaşanan önemli gelişmeler geniş bir kullanım alanını etkilerken sanatsal açıdan pek çok tartışmayı da gündeme getirmiştir. Yapay zekâ uygulamalarının sanatsal yaratıcılıkla ilgili sorunlarına dikkat çekmeyi ve yapay zekanın insani yaratıcılığa ulaşabilme ve sanatçının ikamesini bulanıklaştırma kapasitesini sorgulamayı amaçlayan bu çalışmada çekişmeli üretken ağlardan DCGAN modeli uyarlanıp görseller oluşturulmuş ve kritiği yapılmıştır. Modelin eğitilmesi için kendi özgün resimlerimiz taranmış ve veri artırım teknikleri kullanılarak veri kümesi hazırlanmıştır. Model eğitimi sonucunda oluşan görüntüler üzerinde sanatçı gözüyle eleştirel değerlendirmeler yapılmıştır. Oluşturulan görüntülerin değerlendirilmesi neticesinde yaratıcılık ve üretim arasındaki ilişkinin nasıl tanımlanabileceği ve sanatsal üretim bakımından yapay zekanın sınırlarının ne olduğuna dair bir argüman oluşturulmuştur. Bu bakımdan, yapay zekâ ve beşerî zekâ arasında birbiriyle çelişmeyen, başka bir deyişle aynı amaca hizmet eden bir ortaklıktan hareketle, yapay zekanın üretim sürecini optimize eden bir araç olarak konumlandırılabilmesi görüşüne odaklanılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Güncel sanat, resim oluşturma, çekişmeli üretken ağlar, DCGAN

#### ABSTRACT

Generative models have achieved impressive results in image generation in recent years. While significant developments in the field of artificial intelligence have influenced a wide range of applications, they have also sparked many artistic debates. In this study, we adapted the DCGAN model, a type of generative adversarial network, for image generation and criticism to draw attention to the problems of artificial intelligence applications to artistic creativity and to question the ability of artificial intelligence to achieve human creativity and obscure the replacement of artists. To train the model, we scanned our own original paintings and created the dataset using data augmentation techniques. The generated images were critiqued with an artist's eye. As a result of the evaluation of the generated images, a discussion emerged on how to define the relationship between creativity and production and where the limits of artificial intelligence lie in relation to artistic production. In this context, we focused on the view that artificial intelligence and human intelligence are not opposites and often serve the same purpose and that artificial intelligence can be positioned as a tool that optimizes the production process of paintings.

**Keywords:** Contemporary art, generate painting, generative adversarial networks, DCGAN

## GİRİŞ

Sanat, var olduğu her dönemde teknolojik ve iletişimsel şartlara en uygun biçimde kendi güncel dilini oluşturmuştur. Tarih boyunca her farklı dönem, sanatçılara yeni bakış açıları ve farklı teknikleri uygulama imkânı sağlamıştır. Bu bağlamda hemen her şeyin dijitalleştiği günümüzde sanatçıların konvansiyonel teknik ve ifade biçimlerini kullanmaya devam etmesini beklemek herhangi bir şekilde sınırlandırılmayacak özgün sanat fikrine ters düşmektedir. Sanatsal üretim malzemesi olarak; boya, fırça, kâğıt, kumaş, duvar, insan bedeni, hayvan cesedi, kan, dışkı gibi pek çok nesne kullanabilen sanatçı, artık dijital veriler kullanılarak bilgisayarda üretilen yeni bir anlatım dili ile karşı karşıyadır. Bu karşılaşma, sanatın doğasıyla alakalı biçimde hep sanatın lehine sonuçlanmıştır. “Örneğin; dönemin teknolojik, coğrafi ve teolojik gelişmeleri sonucunda Rönesans’ın ortaya çıkışı, 1826 yılında Joseph Nicéphore Niepce’in fotoğraf makinesini icadıyla İzlenimcilik akımının başlaması, I. Dünya Savaşı’nın Dadaizm’in doğuşuna zemin hazırlaması, savaş yanlısı tavrıyla dikkat çeken Fütürizmin döneme uygun biçimde hız ve makineleşmeyi yüceltmesi, 1960’lardan başlayarak kuantum, görelilik ve olasılık gibi bilimsel gelişmelerin devamında, modernizmin yarattığı kültürel, sosyolojik ve felsefi boşluğun sorunsallaştırılması gibi çalışmalarla kavramsal ve post modern sanatın kendini göstermesi, sanatın her sürece spontane şekilde uyum sağlayabildiğini göstermektedir” (Karakaş Tabak, 2022).

Yapay zekâ ve sanat birlikteliğinin kısa tarihine bakıldığında ise ilk kez 1973 yılında Harold Cohen tarafından kurulan Aaron sistemi ile başladığı bilinmektedir (Sundararajan, 2021). Cohen sanat ve yapay zekâ arasında kurduğu interdisipliner bağla yaratıcı sürecin odağında sadece sanatçı olmadığını göstermiştir. Yapay zekâ kullanımı süreç içerisinde günlük yaşamımıza dahil olacak kadar yaygınlaşmış ve 2014 yılında ise Çekişmeli Üretken Ağların (Goodfellow vd., 2014) ortaya çıkışı sanat tarihinde oldukça ilginç bir gelişmeye olanak sağlamıştır; yapay zekâ ile üretilen (Edmond Belamy’nin Portresi), Christie’s müzayede evi tarafından 432.500 dolara satın alınmıştır (Messingschlager vd., 2023). Bir müzayede evine satılan ilk yapay zekâ resmi olan eser, 2018’de Obvious isimli bir sanatçı topluluğu tarafından, 14. yüzyıldan 19. yüzyıla kadar yapılmış 15.000 adet portrenin veri olarak kullanılmasıyla oluşmaktadır. Bu gelişme bilgisayar üretimi olan bir resmin sanatsal özellikler taşıdığına kanaat getirilerek sanat piyasasında ciddiye alındığının kanıtıdır. Süreç odaklı değerlendirildiğinde insan yapımı ancak sonuç itibarıyla bilgisayar çıktısı olan eser, beraberinde getirdiği pek çok tartışmaya rağmen, yapay zekanın sanat tarihinde daha önce hiç var olmamış bir hızda analiz ve sentez yapabildiğini göstermiştir. İnsan hafızasıyla kıyaslanamayacak bir güce sahip olan yapay zekâ, farklı teknikler ve dönemlerden elde ettiği bilgileri toparlayarak tek bir eser haline getirmiştir.

Yapay zekâ, bilgiyi kullanma becerisi bakımından muazzam bir beceriye sahiptir ancak yaratıcı edim sözü konusu olduğunda yalnızca antropomorfik bir bakışla açıklanabilir. Bu bakımdan sezgi, deneyim, heyecan gibi beşerî bilgiyi oluşturan özellikler yaratıcı bir edim olarak yapay zekâda yer almamaktadır. Çünkü bilgi dış dünyayı algılamayla ve deneyimlemeyle alakalıdır. “Tasarladığımız şey, nesnel dünyayı algılayan bilen öznenin anlama yetisindeki bir süreçten başka bir şey değildir” (Schopenhauer, 2009).

Tüm bu algı ve deneyim insan zihninde kullanıma hazır birikimlere dönüşerek sanatsal temsiller yoluyla tezahür edebilir. Dolayısıyla bir sanat eseri yorumlanırken sadece sonucuna bakılmaz, eser süreçle bir bütün olarak değerlendirilmelidir. Dolaysız insan yapımı bir eserle yapay zekâ üretimi bir eserin belki de en temel farkı, sürece yapılan müdahaledir. Yapay zekanın özgünlüğü her zaman tartışmaya açıkken insani üretim herhangi bir manipüle olmadan, tamamen kişisel iç dinamiklerle açıklanmaktadır. Sanatsal üretim için hayati olan sezgi, duygu, hayal gibi soyut becerilerin yapay zekâda –henüz- var olmayışı, onu insan yaratıcılığının yalnızca bir simülasyonu olarak konumlandırabilmektedir. Belamy’nin portresi örneğine dönecek olursak, yapay zekanın veri tabanına yüklenen görüntülerden referans alarak, aynısını değil benzerini üretmeye çalıştığı ancak ortaya çıkan eserin/ürünün sanat tarihiyle hiç de kopuk olmayan bir yarı-benzer sentez olduğu görülmektedir.



Yapay zekanın sanatla olan müşterehi arttikça etik, özgünlük, sanatsallık gibi yeni sorunlar da artmaya başlamıştır. Tıpkı Belamy portresi örneği gibi görüntüler bileşimi hem eserin özgünlüğü hem de sanatçının ikamesi bakımından pek çok kez sorgulanmıştır. Ayrıca “Birçok yorumcu, yeni elektronik ve bilişimsel medyanın –sanat buluşlarının sonu değilse bile- görüntülerin başkallığının sonu olacağını düşünme eğilimindeydi. Fakat nasıl fotoğraf veya sinema vaktiyle görüntü ve sanatın sonunun geldiğini göstermiyorduydu, bugün de bir bütün olarak bilgisayarlar, sentetizörler ve yeni teknolojiler böyle bir sona işaret etmiyor” (Ranciere, 2013). Yapay zekanın insan zihnini, sanatı ve hatta tüm dünyayı ele geçireceğine yönelik kaygılar oldukça distopik senaryolardır. Bilgiyi kullanma becerisi bakımından insan zekasından üstün kabul edilebilecek yapay zekanın bu bilgiyi insan kontrolünde ve inisiyatifinde edinmiş olması, onun –şimdilik- insana ihtiyaç duyduğunun göstergesidir. Şöyle ki; yapay zekâ veri tabanına yüklenen kadar bilebilir, bu bakımdan bilgisi sınırlıdır, insan kurallarına tabiidir ve bu kurallar dahilinde üretebilir. Yalnızca görsel kombinasyon yapabilen ve sanatsal yaratıcılığa sahip olmadığı için anlam üretimi gibi bir mesuliyet taşımayan yapay zekanın sanatsal üretim için yeni bir araç olduğu düşünülebilir. “Cohen’e göre bir makinenin Rembrandt veya Picasso gibi yaratıcı olabilmesi için benlik duygusunun oluşması gerekmektedir. Çünkü sanatçı sosyal, duygusal, tarihsel, psikolojik etmenlerden beslenmekte bu deneyimleri kendi benliğinde süzerek eserinde bulunan anlatı gücüne yansıtmaktadır” (Artut, 2019).

Tasarım sürecinde bunun bilincinde olmayan yapay zekanın sanat eseri üretip üretemeyeceği sorunu, sanatın ne olduğu ve güncel sanatın nasıl değerlendirildiği ile açıklanabilir. Kavramsal sanatın doğası gereği, var olan ya da olmayan her şeyin sanatçı kontrolünde bir “eser” niteliği taşıyabileceği, sıradan bir nesnenin sanatçı dokunuşuyla sanat mertebesine yükseleceği gerçeğinden hareketle dijital verilerden elde edilen görüntülerin de sanat olarak kabul edilmeye hakkı vardır. Sanatsal değerlendirmenin en temelde nesnel ve öznel kriterlerle yapılıyor olması ve bu kriterleri belirleyenlerin insan olması yapay zekâ üretiminin insan kontrolü olmadan anlamsız olduğunu göstermektedir. Erzen’e göre “Çağdaş dönemde sanatta beğeni ve ölçüt problematiğinin en iyi örnekleme Duchamp’tan gelmiştir aslında. O şunu söyler gibidir: “bunu kim yapmış olursa olsun, bunu yaparken ondaki sanat değerini görmüyordu, ben görüyorum. Bundan dolayı bu benim eserimdir. Ben de bunu alıp müzeye koyuyorum. Onun için, sanatı yaratan en önemli şey, yine insan aklı ya da yargısıdır, yargılama gücüdür, onu seçebilme gücüdür.” (Erzen, 2012). O halde yapay zekanın sanatsal üretimde sanatçı için yalnızca bir araç olduğu kanısına varılabilir.

Yapay zekâ hayatın çeşitli alanlarında kendisine yer bulmuştur (Wang vd. 2023). Yapay zekâ, işlem yoğun çalışmalarını hatasız bir şekilde gerçekleştirerek insanların hayatlarını kolaylaştırmıştır. Klasik yapay zekâ, öğrenmesini denetimli (etiket bilgisi olan), denetimsiz (etiket bilgisi olmayan) veya pekiştirmeli (ödül/ceza bildirimleri) bir şekilde gerçekleştirir. Günümüzde yapay zekâ üretken modeller üzerinde yoğunlaşmış ve resim, müzik, edebiyat gibi çeşitli alanlarda etkileyici düzeyde çıktılar oluşturabilmektedir (Shahriar, 2022; Cao vd., 2023). Resim alanında yapılan çalışmalarda sivil transferi (Gatys vd., 2015; Cai vd., 2023), metinden görüntüler oluşturma (Agnese vd., 2020; Elasıri vd., 2022), ve sanat eseri çalışmalarına benzer görüntüler oluşturulabilmektedir (Elgammal vd., 2017; Cetinic & She, 2022). Hatta GAN temelli çalışmaların yaygınlaşmasından dolayı literatüre “GANizm” kavramı yerleşmiştir (Grba, 2022). Özellikle son yıllarda büyük dil modellerinin geliştirilmesiyle görüntü oluşturmak kolaylaşmış ve genç sanatçılar için birer ilham kaynağı olmuştur (Midjourney, 2023; Dall-e, 2023).

Bu bilgiler ışığında bu makaledeki önemli katkılar aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

- Yapay zekanın, sanatsal biliş tarafından yönlendirilerek sanatın nesnel kriterlerine uygun biçimde üretm yapabildiği görülmektedir.
- Çekişmeli üretken ağların kullanımıyla, sanatçının referans alınarak yeni resimler oluşturulabilmektedir.
- Yapay zekâ araçları modern sanatlarda bir üretim biçimi olarak kullanılabilir.

## MATERYAL VE YÖNTEM

### *Derin Evrişimsel Çekişmeli Üretken Ağlar*

Çekişmeli üretken ağlar (GAN) birbirini alt etmeye çalışan (besleyen), *üretici (generator)* ve *ayırt edici (discriminator)* olarak adlandırılan iki farklı ağın birleşiminden oluşan bir mimardır (Goodfellow vd., 2014). Üretici ağ  $G(z)$ , rassal bir gürültü vektörünü ( $z$ ) girdi olarak alıp eğitim veri kümesinin dağılımına benzer yeni veriler oluşturan bir ağıdır. Ayırt edici ağ ise eğitim kümesinden gelen veriyi gerçek, üretici ağdan gelen veriyi de sahte olarak sınıflandırmayı hedefleyen bir ağıdır. Eğitim kümesinden gelen veriler  $x$  ile gösterildiğinde,  $D(x)$  gerçek verilerin gerçek olarak sınıflandırma olasılığını gösterirken,  $D(G(z))$  ise üreticiden gelen verilerin gerçek olma olasılığını gösterir. Üreticinin amacı, ürettiği verileri ayırt edici ağa verdiği ayırt edicinin bunu gerçek olarak sınıflandırmasını beklemektir. Bu iki ağın davranışları minimax oyununa benzetilmektedir. Ayırt edici  $D$ , gerçek ve sahte verileri doğru bir şekilde sınıflandırarak olasılığı maksimum yapmayı hedeflerken, üretici  $G$ ,  $D$ 'nin sahte verileri gerçek olarak tanınmasına yol açarak doğruluk olasılığını minimuma çekmeyi hedeflemektedir. Bu yaklaşım ile GAN modelinin hata fonksiyonu aşağıdaki şekilde hesaplanmaktadır:

$$\min_G \max_D V(D, G) = E[x \sim p_{data(x)}][\log(D(x))] + E[z \sim p_{z(z)}][\log(1 - D(G(z)))] \quad (1)$$

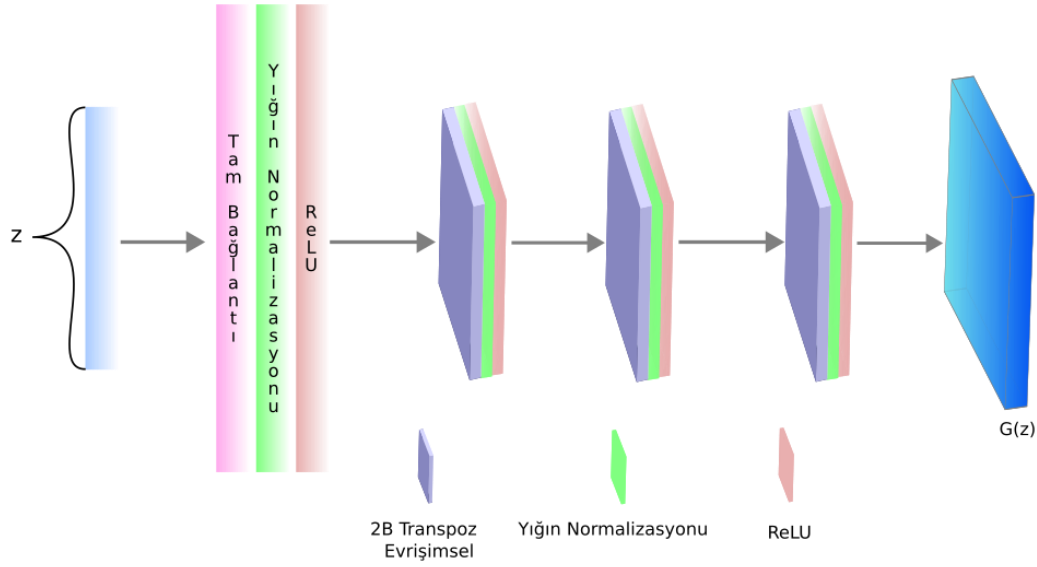
Burada  $\min_G$ , üreticinin daha gerçekçi veriler oluşturması için üreticinin hatasını minimum eden,  $\max_D$  ise ayırt edicinin gerçek veri ile sentetik veriyi daha iyi bir şekilde sınıflandırabilmesi için  $V(D, G)$  değerini maksimum eden parametrelerin belirlenmesini sağlar.

### *Derin Evrişimsel Çekişmeli Üretken Ağlar (DCGAN)*

Derin öğrenme modellerinden evrişimsel sinir ağları (CNN) bilgisayarlı görünün çeşitli alanlarında başarılı performanslar sergilemiştir (Li vd., 2021). Klasik GAN modeli bir gürültü vektörünü girdi olarak alıp sonrasında takip eden tam bağlantılı katmanlarla sentetik görüntüyü oluşturmaktadır. DCGAN (Radford vd., 2015) modelinde ise yine bir gürültü vektörü girdi olarak alınmakta ama bu defa tam bağlantılı katmanlar ile ilerlemek yerine CNN blokları ile görüntüler oluşturulmaktadır. Bu modelde, CNN blokları arasında havuzlamalar kaldırılmış yerine üretici blokta kesikli evrişim (fractional convolution) ayırt edici blokta ise sıçramalı evrişim (strided convolution) kullanılmıştır. Hem üretici blokta hem de ayırt edici blokta yığın normalizasyonu dahil edilmiştir. Üretici bloğun tüm katmanında ReLU aktivasyon fonksiyonu sadece son katmanda Tanh aktivasyon fonksiyonu kullanılmış, ayırt edici bloğun tüm katmanında ise LeakyReLU aktivasyon fonksiyonu kullanılmıştır. Çekişmeli üretken ağlarda evrişimsel bloklar ile oluşturulan görüntülerin daha stabil oldukları gözlemlenmiştir (Kodali vd., 2017). Bu çalışmamızda yeni resimler oluşturmak için DCGAN modelini kendi çalışmamıza uyarlayarak kullandık (bkz., Şekil-1). Kullanılan DCGAN modelinin üretken kısmı; transpoz evrişim, yığın normalizasyonu ve ReLU katmanı olmak üzere 4 bloktan oluşarak 256x256 boyutlarında görüntüler oluşturmaktadır.

### *Veri Kümesi*

Geçmiş resim çalışmalarımız kullanılarak (bkz., Şekil-2) veri artırma yöntemiyle veri kümemiz hazırlanmıştır. Veri artırma için PyTorch kütüphanesi kullanılarak renk titreşimi (jittering) ve yatay eksende döndürme (horizontal) yöntemleri uygulanmıştır. Renk titreşimi fonksiyonu için parlaklık, kontrast, doyum (saturation) ve ton (hue) özellik değerleri değiştirilmiştir. Böylelikle 80 adet orijinal resim veri artırmayla 2,880 adete çıkarılmıştır. Oluşturulan veri kümesindeki bazı görüntüler Şekil-3'te gösterilmiştir.



**Şekil-1:** Resim oluşturmak için kullanılan DCGAN (Radford vd., 2017 çalışmasından uyarlanmış) üretici modeli.

### **Deney Konfigürasyonu**

Model eğitimi PyTorch kütüphanesi kullanılarak TÜBİTAK TRUBA sistemi üzerinde Nvidia Tesla V100 GPU desteği ile 3000 epok (epoch) için çalıştırılmıştır. Optimizasyon için Adam optimizasyonu ( $\beta:0.5-0.999$ ), öğrenme katsayısı 0.0002 ve yığın (batch) değeri 16 belirlenmiştir.

## **BULGULAR VE TARTIŞMA**

### **Bulgular**

TRUBA sistemi üzerinde uyarlanmış DCGAN modelinin eğitilmesiyle oluşturulan bazı görüntüler Şekil-4'te gösterilmiştir. GAN uygulamalarının yaratıcı edim ve sanatsal ifade için sanatçılara yeni imkanlar sağlaması, farklı bakış açıları kazandırması ve sanatçıların malzeme-teknik olanakları çağa uygun biçimde kullanmasına fırsat vermesi bakımından sanatın optimizasyonunu mümkün hale getirebilir. Eroğlu (2014)'na göre "sürekli yenilenen yaratıcılık boyutlarının yaratıcı sanata sonsuz olanaklar sunacağı da çok açıktır". Bu bağlamda GAN tarafından desteklenen sanatsal üretimde sanatçının ikamesinde herhangi bir değişim olmadığı, başka bir deyişle eserin kime ait olduğu gibi bir sorunun yersiz olduğu görülmektedir. Eseri yaratım sürecinde aklından geçenlerin teknolojik bir araç sayesinde görünür kılınmasıyla ortaya çıkan görüntüde kendince eklemeler-çıkarmalar yaparak yaratıcı sürecini sonlandıracak, buna karar verecek olan sanatçıdır. Gasset (2013)'e göre yaratıcı süreci başarıyla sonuçlandırmak dünyanın en zor işidir, "tümüyle anlamdan yoksun, anlaşılmasız ya da bir hiç olan şeyi söylemek ya da çizmek kolay iştir: bağlantısız sözcükleri peş peşe sıralamak ya da rastgele çizgiler çekmek yeter. Ama "doğal"ın kopyası olmayan, yine de belli bir tözlüğü bulunan bir şeyi yapılandırmak sanatçıya en yüce bir yeteneğin bağışlanmış olmasını gerektirir". Böyle bir yetenekle kuşatılmış olan sanatçı, ortaya çıkan yüzlerce yeni veriden sanatsal potansiyeli olanları rafine edebilir, bu noktada sanatsal bilgi-becerisi yeterince yaratıcı değilse zaten yapay zekayı da diğer sanatsal araçlar gibi etkin kullanamaz.

Yapay zekanın işi, sanatsal restorasyon değil, kendisine öğretilen veriler kadar görüntü üretmektir. Ortaya çıkan görüntüleri kullanmak, anlamlandırmak, işlemek, kolajlamak, eklektik hale getirmek ise sanatçının işidir. Baudrillard (2010)'a göre "Aynıdan aynıyı söküp almak gerekir. Her imge dünyanın gerçekliğinden bir şeyler götürmeli, her imgede bir şeyler kaybolmalıdır; ama imhanın, katı entropinin cazibesine de kapılmamak gerekir-kayboluş etkin halde kalmalıdır: sanatın ve ayartmanın sırrı budur". Şimdilik bu sırâ vâkıf olan herhangi bir yapay zekâ uygulaması mevcut değildir.

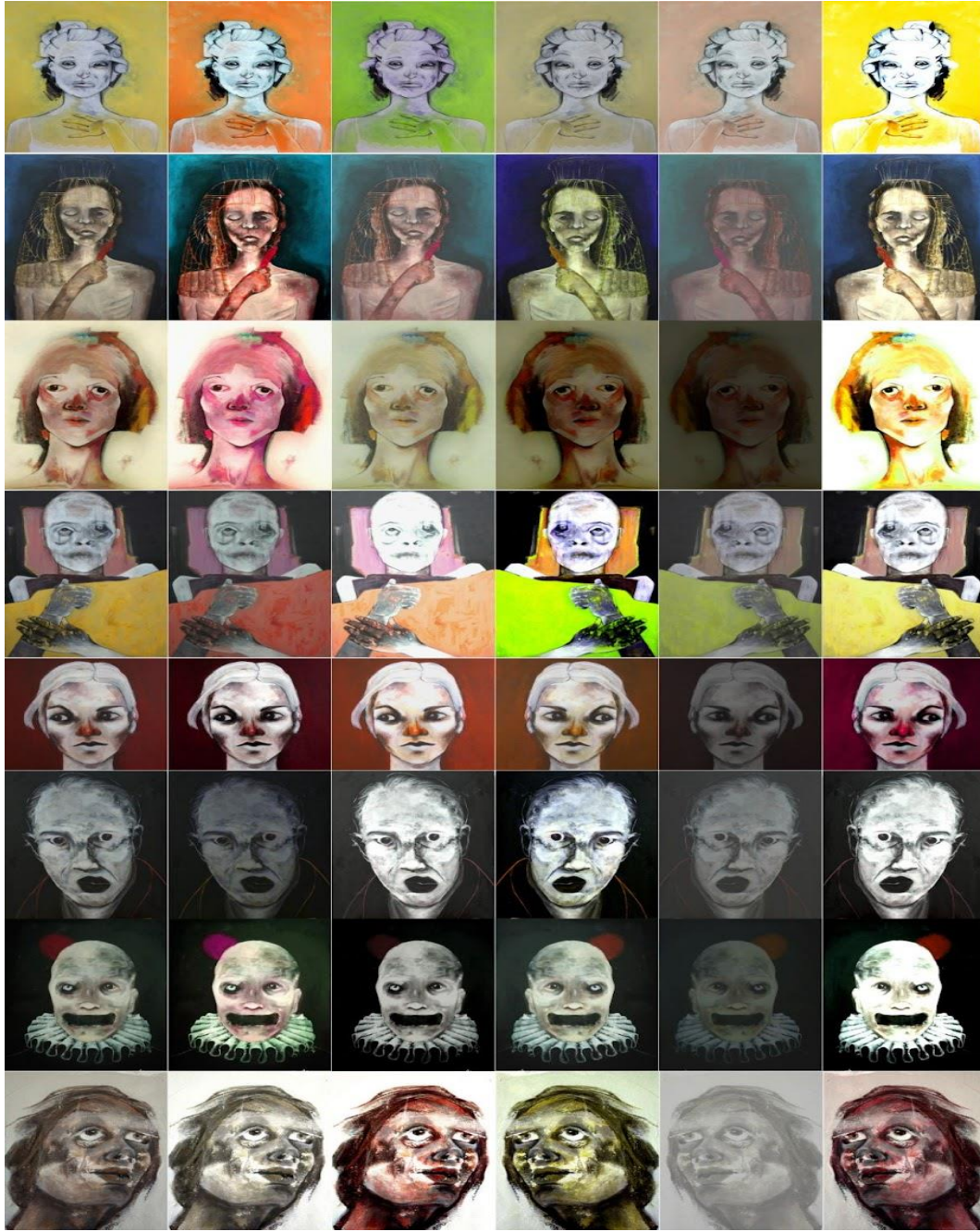




**Şekil-2:** DCGAN Modelinin Eğitimi İçin Kullanılan Görüntüler Akademisyen Sanatçı Yazarın Kendi Eserleri Taranarak hazırlanmıştır. Kullanılan o görüntülerden oluşan bir kolaj<sup>1</sup> gösterilmiştir. Makale kör değerlendirme olduğundan sanatçının ismi belirtilmemiştir, makalenin kabulü sırasında sanatçı ile ilgili bilgi bu şekil başlığında verilecektir.

<sup>1</sup> Kolaj oluşturmak için <https://gandr.io/online-collage-maker.html> web adresinden yararlanılmıştır.





**Şekil-3:** Akademisyen sanatçı yazarın eserlerinden veri artırımı ile oluşturulmuş veri kümesinden bazı görüntüler. Veri artırımı için renk titreşimi (jittering) ve yatay ekseninde döndürme (horizontal) yöntemleri uygulanmıştır.

Görüntülerin yeniden üretimi, bir taklit olarak değil, öğrenme-öykünme olarak değerlendirilirse, sanatsal her bir dönemin, -izm'in aynı öykünmeyle açıklanması gerekir. Zira her yaratıcı edim için bir referans şarttır. Kimi zaman doğayı, dış dünyayı referans alan sanatçı, kimi zaman da öz-dinamiklerini ya da teknolojik imkanları kullanmıştır. Ayrıca "Temsilin ne tür araçlarla üretildiği ve aktarıldığı, ne tür düzenler içerdiği özne için olduğu kadar kültür için de önde gelen değerleri ve dünyayla ilişkileri belirler. Sanatın ifade ettiği değerler ve ilişkiler sistemi aynı zamanda belirli bir dönem ya da kültürel ortamda, sözel dilin biçimleri, düzenleri ve genel iletişim dilinin şekli ve tekniği ile de ilgilidir" (Erzen, 2012). Sanat eserinde öz-biçim ilişkisinin sağlam temellerde kurulması yani sanatçının göstermek istediği şeyi, uygun malzemenin etkin kullanımıyla görünür kılmayı eserin başarısını belirler. Sanatçının bu noktada yapay zekaya yüklediği veriler, çıktılarının sanatsallığını belirlemektedir.





**Şekil-4:** Uyarlanmış DCGAN modeli ile üretilmiş bazı görüntüler.

Bu bağlamda makalede kullanılan resimlerin *yazarlardan birine* ait olması ve *söz konusu yazarın* bir akademisyen sanatçı olması, çıktılarının değerlendirilmesi aşamasında yeterli özgünlük ve sanatsal bilışı sağlamaktadır. Oluşturulan görüntüler herhangi bir beklenti olmaksızın, yalnızca yapay zekayı ve sanatsal bakımdan yapabileceklerini anlamaya yönelik bir tutum içinde değerlendirilmiştir. Yapay zekâ üretimi olan resimlerin kaynağının insan üretimi olması, onları değerlendirmeyi daha da kolaylaştırmaktadır. Ortaya çıkan verilerden görüldüğü üzere, yapay zekâ sanatçının tarzına uygun özellikte çalışmıştır. Sanatçının portrelerde kullandığı renkleri, geçişleri, figürlerdeki deformasyonu taklit ederek aslına uygun “yeni” resimler oluşturmuştur. Ortaya çıkan verilerin sanatsallığından ziyade, sanatçının çalışmalarına uygun biçimlerde ve benzer özelliklerde şekillendirerek yaratıcı rol üstlenmesi ve sanatçıya üretim sürecinde farklı alanlar işaret etmesi, yapay zekanın esas başarısıdır. Kullanılan sanatsal hammaddenin seçimi, işin yalnızca kodlama, yazılım gibi teknolojik süreçlerden ibaret olmadığını göstermektedir. “Yapay zekâ –özellikle daha önceki görüntülerin kombinasyonundan- yeni örüntüler üretebilir. Ancak hangisinin iyi, güzel, havalı,

çekici olduğuna karar veremez. Davenport'un dediği gibi, “yapay zekâ daha iyi kararlar vermez, fakat kararlarımızı daha bilgiye dayalı hale getirebilir” (Dörfler, 2023).

### **Tartışma**

Görüntülerin yeniden üretilmesi kavramını konu ile ilgisinde biraz daha açıklamak gerekirse; sanatçıların dijital imkanlar aracılığıyla var olan imgelerden yeni imgeler üretmesi, postmodern söylemle pastiş tekniğini düşündürse de aslında yapılan yalnızca yeni bir biçim vermektir. Berger'e göre; “Resim hakkındaki modern yanılısma (ki postmodernizm bunu düzeltmek için hiçbir şey yapmadı), ressamın bir yaratıcı olduğudur. Aslında ressam bir alıcıdır. Yaratma gibi görünen şey, aldığına biçim verme fiilidir.” (Berger, 2014). Herhangi bir teknikle biçim verebilme özgürlüğüne sahip olan sanatçının, dijital teknikleri tercih etmesi oldukça anlaşılır bir durumdur. Yapay zekâ elbette kendiliğinden biçimler üretemez hem veri kümesinin belirlenmesi hem de ortaya çıkan görüntülerin değerlendirilmesi aşamalarında kesintisiz biçimde insana ihtiyaç duyar. Bilinçsiz üretim yapması sebebiyle, sanatçı kopya etmeyi tercih ediyorsa yapay zekâ ürünü de kopyadır. Kopya ve pastiş bu noktada birbirinden ayrılmaktadır. En basit ifadeyle kopya, bir şeyin aynısını yapmaya çalışmaktır. Pastiş ise alıntılanmaktır, bir sanat eserinin üslubunu örnek alarak ve yapısını bozmadan yeniden üretmektir. Bir şeyin kopyası ve bir şeyin sanatsal görüntüsü birbirinden tamamıyla farklıdır ve pastiş sanatsal görüntü olarak değerlendirilmelidir. Postmodern sanatın üretim pratiklerinden biri olan pastiş, “yeni bir üslubun keşfedilmesinin daha fazla mümkün olmadığı bir dünyayı temsil eder ve geçmişteki “Ölü Üsluplar”ın taklididir. Alay ve ironinin taklidi olarak ‘Parodi’den farkı, başkalık ve ayrıksılığından (heterogenity) dolayı alaysılanacak, özgün (authentic) bir kuralın daha fazla mümkün olmamasından dolayı anlamsız (blank) olmasıdır” (Şahiner, 2013). Burda ‘ölü üslup’tan kasıt, aslında o üslupların yok olması değil, bir daha asla eski biçimleriyle var olamayacak olmalarıdır. Başka bir deyişle, hiçbir şey ölmez sadece şekil değiştirir.

Postmodern sanata kadar var olan her türlü üslup ve tema metinler arası biçimde bir araya gelebilir ve yeni bir sanat formuna dönüşebilir. Bazı noktalarda yapay zekâ ile üretilen eserler ve pastiş arasında benzerlikler görülse de tam olarak aynı şeyi ifade etmezler. Pastişte geçmişteki eserin ya da eserlerin üslubuna uygun biçimde taklit söz konusuysen yapay zekâ yalnızca benzerini üretir.

### **SONUÇ**

Günlük hayatta etkisini giderek arttıran yapay zekâ kullanımı, kaçınılmaz olarak sanatsal üretimde de kendisini göstermektedir. Sanatsal üretim biçimleri koşulların etkisiyle dönem dönem değişse de sanatın amacı tam olarak değişmemiştir. Her türlü dirimsel ve estetik deneyimi karşı tarafa/izleyiciye iletmekle yükümlü olan sanatın bu temel amacının genel itibarıyla benzer olduğu görülmektedir. Bu bakımdan günümüz sanatçısının da dönemine uygun biçimde üretim yapması oldukça normaldir. Kullanılan teknik her ne olursa olsun, amaç değişmediği sürece sanata ve sanatçıya hizmet eden her şey araç olarak kabul edilebilir. Çalışmanın odağında yer alan çekişmeli üretken ağlar da benzer bir bakış açısıyla değerlendirilmiştir. Yapay zekanın kendi özgür iradesiyle seçtiği bir konuyu daha önce var olmayan bir görüntüyle açıklamaya çalışması şimdilik mümkün görünmemektedir. Günün birinde yapay zekâ yaratım sürecinde tüm kararları verebilecek yetkinliğe ulaştığında sanat ile olan müşteregi tekrar değerlendirilebilir. Yapay zekanın sezgiden ve duygudan yoksun olması, üretim sonucunda ortaya çıkan ürünle/eserle alakalı bir kanaate varamadığını göstermektedir. Bu nedenle eserin kime ait olduğu sorunsalı sanatçının lehine olacak şekilde çözümlenebilir. Yapay zekâ, sanat tarihini ya da sanatçının bizzat kendi eserlerini referans alarak simbiyotik bir ilişki kuran ve sanatsal üretimi yalnızca mekanize eden değil yaratıcı potansiyeli geliştirmek suretiyle gerçekleştiren bir teknolojik imkandır. Bu pragmatik yaklaşımla, sanatçının/üreticinin her türlü teknolojik olanağı keşfetme ve kullanmaya hakkı olduğu ve dahası onu kullanarak özgün üretim yapabilecekleri sonucuna varılmıştır.

### **TEŞEKKÜR**

Bu araştırmada yer alan tüm/kısmi nümerik hesaplamalar TÜBİTAK ULAKBİM, Yüksek Başarım ve Grid Hesaplama Merkezi'nde (TRUBA kaynaklarında) gerçekleştirilmiştir.



## KAYNAKLAR

- Agnese, J., Herrera, J., Tao, H., & Zhu, X. (2020). A survey and taxonomy of adversarial neural networks for text-to-image synthesis. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Data Mining and Knowledge Discovery*, 10(4), e1345.
- Artut, S., (2019). Yapay Zekâ Olgusunun Güncel Sanat Çalışmalarındaki Açılımları. *İnsan&İnsan*, Yıl/6, Sayı/22, Güz/2019, 767-783.
- Baudrillard, J. (2010). *Sanat Komplosu*. Elçin Gen, Işık Ergüden (Çev.). İstanbul: İletişim Yayınları.
- Berger, J. (2014). *Görünüre Dair Küçük Bir Teoriye Doğru Adımlar*. Bülent Somay (Çev.). İstanbul: Metis Yayınları.
- Cai, Q., Ma, M., Wang, C., & Li, H. (2023). Image neural style transfer: A review. *Computers and Electrical Engineering*, 108, 108723.
- Cao, Y., Li, S., Liu, Y., Yan, Z., Dai, Y., Yu, P. S., & Sun, L. (2023). A comprehensive survey of ai-generated content (aigc): A history of generative ai from gan to chatgpt. *arXiv preprint arXiv:2303.04226*.
- Cetinic, E., & She, J. (2022). Understanding and creating art with AI: Review and outlook. *ACM Transactions on Multimedia Computing, Communications, and Applications (TOMM)*, 18(2), 1-22.
- Dall-e. (2023). <https://openai.com/dall-e-3>, Son erişim: 7 Kasım 2023.
- Dörfler, V., (2023). *Yöneticiler İçin Yapay Zeka*. Cihan Altay (Çev.). İstanbul: Türkiye İş Bankası Kültür Yayınları
- Elasri, M., Elharrouss, O., Al-Maadeed, S., & Tairi, H. (2022). Image generation: A review. *Neural Processing Letters*, 54(5), 4609-4646.
- Elgammal, A., Liu, B., Elhoseiny, M., & Mazzone, M. (2017). Can: Creative adversarial networks, generating" art" by learning about styles and deviating from style norms. *arXiv preprint arXiv:1706.07068*.
- Eroğlu, Ö., (2014). *Sanatın Yeniden İnşası*. İstanbul: Tekhne Yayınları.
- Erzen, J., (2012). *Çoğul Estetik*. İstanbul: Metis Yayıncılık.
- Gasset, J. O., (2013). *Sanatın İnsansızlaştırılması ve Roman Üstüne Düşünceler*. Çev. Neyyire Gül Işık. İstanbul: Yapı Kredi Yayınları.
- Gatys, L. A., Ecker, A. S., & Bethge, M. (2015). A neural algorithm of artistic style. *arXiv preprint arXiv:1508.06576*.
- Goodfellow, I., Pouget-Abadie, J., Mirza, M., Xu, B., Warde-Farley, D., Ozair, S., ... & Bengio, Y. (2014). Generative adversarial nets. *Advances in neural information processing systems*, 27.
- Grba, D. (2022). Deep else: A critical framework for ai art. *Digital*, 2(1), 1-32.
- Jiang, H. H., Brown, L., Cheng, J., Khan, M., Gupta, A., Workman, D., ... & Gebru, T. (2023, August). AI Art and its Impact on Artists. In *Proceedings of the 2023 AAAI/ACM Conference on AI, Ethics, and Society* (pp. 363-374).
- Karakaş Tabak, D. (2022). Nesneden Piksele: NFT Sanatı, *International Social Sciences Studies Journal*, 8(99), 2078-2087, <http://dx.doi.org/10.29228/sss.j.62831>.
- Kodali, N., Abernethy, J., Hays, J., & Kira, Z. (2017). On convergence and stability of gans. *arXiv preprint arXiv:1705.07215*.
- LeCun, Y., Bengio, Y., & Hinton, G. (2015). Deep learning. *nature*, 521(7553), 436-444.
- Li, Z., Liu, F., Yang, W., Peng, S., & Zhou, J. (2021). A survey of convolutional neural networks: analysis, applications, and prospects. *IEEE transactions on neural networks and learning systems*.
- McCormack, J., Gifford, T., & Hutchings, P. (2019, April). Autonomy, authenticity, authorship and intention in computer generated art. In *International conference on computational intelligence in music, sound, art and design (part of EvoStar)* (pp. 35-50). Cham: Springer International Publishing.
- Messingschlager, T. V., & Appel, M. (2023). Mind ascribed to AI and the appreciation of AI-generated art. *New Media & Society*, 0(0), <https://doi.org/10.1177/14614448231200248>.
- Midjourney. (2023), <https://www.midjourney.com/home>, Son erişim: 7 Kasım 2023.
- Radford, A., Metz, L., & Chintala, S. (2015). Unsupervised representation learning with deep convolutional generative adversarial networks. *arXiv preprint arXiv:1511.06434*.

Ranciere, J., (2013). *Özgürleşen Seyirci*. Burak Şaman (Çev.). İstanbul: Metis Yayıncılık

Schopenhauer, A., (2009). *İsteme ve Tasarım Olarak Dünya*. Levent Özşar (Çev.). İstanbul: Biblos Kitabevi.

Shahriar, S. (2022). GAN computers generate arts? a survey on visual arts, music, and literary text generation using generative adversarial network. *Displays*, 73, 102237.

Şahiner, R., (2013). *Sanatta Postmodern Kırımlar*. Ankara: Ütopya Yayınevi.

Wang, H., Fu, T., Du, Y., Gao, W., Huang, K., Liu, Z., ... & Zitnik, M. (2023). Scientific discovery in the age of artificial intelligence. *Nature*, 620(7972), 47-60.



# Kahramanmaraş Sütçü İmam University

## Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 17.11.2023  
Kabul Tarihi : 25.01.2024

Received Date : 17.11.2023  
Accepted Date : 25.01.2024

### SİMÜLASYON VE MATEMATİKSEL MODEL YAKLAŞIMLARI İLE MÜŞTERİ ŞİKAYETLERİNİ ÇÖZME SÜRESİ VE MALİYETİNİN ARAŞTIRILMASI

#### INVESTIGATING THE TIME AND THE COST OF SOLVING CUSTOMER COMPLAINTS WITH SIMULATION AND MATHEMATICAL MODEL APPROACHES

Vedat ÇEKİCİ<sup>1</sup>\* (ORCID: 0000-0002-6489-5080)

<sup>1</sup>Çukurova University, Industrial Engineer Department, Adana-Türkiye

\*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Vedat ÇEKİCİ, vedat.cekici5@gmail.com

#### ÖZET

Şirketler katma değerli ürün ve hizmetler üreterek müşterilerinin beklentilerini karşılamayı ve onları mutlu etmeyi amaçlamaktadır. Müşteri memnuniyeti ise birçok faktörden etkilenmektedir. Şikayetin hızlı ve beklenen kalitede çözülmesi bu faktörlerden biridir. Bunun için şikayet sistemine optimum kaynakların sağlanması gerekir. Bu çalışmada, oluşturulan simülasyon modeli sayesinde şikâyetlerin ulaşmasından kapatılmasına kadar geçen aşamalar değerlendirilerek, şikayet sisteminde kullanılan kişi sayısı ve maliyeti belirlenmiştir. Ayrıca çalışmada şikayet gelişinden kapanışına kadar olan servis süreleri üstel dağılım alınarak matematiksel model kurulmuş ve çözülmüştür. Sonrasında aynı koşullardaki simülasyon sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Karşılaştırmanın sonucunda, simülasyon ve matematiksel model sonuçlarının birbirine çok yakın olduğu tespit edilmiştir. Servis süreleri üstel dağılımlı olan matematiksel model ve servis süreleri üstel dağılımlı olan simülasyon model çözümleri arasındaki şikayet kapatma süresi farkı sadece % 0,381 olmuştur. Ayrıca servis süreleri üstel dağılım olarak alındığında, elde edilen şikayet kapatma süresi, servis sürelerinin fiili dağılım değeri ile elde edilenden %6,749 daha düşük çıkmıştır. Sonuçlara göre servis sürelerini üstel dağılım olarak almanın şirketler için uygulanabilir bir seçenek olduğu gösterilmiştir. Optimum eleman kullanımı ile, müşteri memnuniyeti artacak ve elemanların daha verimli kullanılmasına katkı sağlanacaktır.

**Anahtar Kelimeler:** Şikayeti değerlendirme, kuyruk sistemi, simülasyon optimizasyonu, matematiksel modelleme.

#### ABSTRACT

Companies aim to meet their customers' expectations and make them happy by producing value-added products and services. Customer satisfaction is affected by many factors. Resolving the complaint quickly and with the expected quality is one of these factors. For this, optimum resources must be provided to the complaint system. In this study, the number of people used in the complaint system and its cost were determined by evaluating the stages from the arrival of the complaints to their closure, thanks to the simulation model created. In addition, in the study, a mathematical model was established and solved by taking the exponential distribution of service times from complaint arrival to closure. Afterwards, it was compared with the simulation results under the same conditions. As a result of the comparison, it was determined that the simulation and mathematical model results were very close to each other. The difference in complaint closing time between the mathematical model with exponential distribution of service times and the simulation model solutions with exponential distribution of service times was only 0,381%. Additionally, when service times are taken as an exponential distribution, the resulting complaint closing time is 6,749% lower than that obtained with the actual distribution value of service times. The results show that taking service times as an exponential distribution is a viable option for companies. With optimum use of personnel, customer satisfaction will increase, and more efficient use of personnel will be contributed.

**Keywords:** Complaint handling, queueing system, simulation optimization, mathematical modeling.



## GİRİŞ

Müşteriler, aldıkları ürünün-servisin kendi istedikleri özellikleri karşılması ve ürünü-servisi kullanımı sırasında sorun yaratmaması durumunda memnun olurlar. İşletmeler ise müşterilerini mutlu ettiği sürece satışlarına devam ederler. Müşteri memnuniyeti, işletme için hayati öneme sahiptir (Estelami, 2000). Çünkü müşteri memnuniyeti sağlanmazsa müşteri tekrar aynı firmadan ürün-servis almayacak ve şirket üretim-servis faaliyetlerine devam edemeyecektir. Bu kapsamda firma müşterileri memnun etmek için müşterilerden gelen şikayetleri hızlıca değerlendirmeli ve çözmelidir. Bunun için firmanın şikâyetleri çözmeye istekli olması ve uygun kaynak tahsis etmesi önemlidir. Buna rağmen işletmelerin birçoğunun şikâyetleri ele almak ve müşteriye yanıt vermek için yeterli kaynak ayırmadığı tespit edilmiştir. Müşteri, firmaya şikâyet bildirdikten sonra, şikâyeti giderildiğinde tekrar aynı şirketle alışverişe devam etmektedir. Herhangi bir mal veya servisteki kusur, müşteri tarafından firmaya şikâyet olarak bildirilmeyebilir. Aslında ürün-servis kusurlarının %5'ten azını müşteri firmaya iletmektedir. Bu problemlerin de yarısı kadarına yeterli çözüm üretilmektedir (Estelami, 2000). Yapılan bir araştırmaya göre sorun yaşayan müşterilerin %95'inin sorun yaşadığında sessiz kaldığı belirtilmiştir (Timur & Sarıyer, 2004).

Müşterinin ilettiği problemleri araştırma ve müşteriye cevap verme müşterinin firma ile ilişkisini sürdürmesi için önemlidir. Verimli bir servisin kilit elemanlarından biri müşterinin yaşadığı probleme yanıt vermektir. Benzer şekilde, problemleri ele almadaki hatalar, müşteriye hayal kırıklığına sürüklemektedir (Davidow, 2000). Yapılan bir çalışmada şikâyeti etkin olarak inceleyen ve nedenini ilk seferde doğru çözen firmaların, şikâyeti de birinci çözümden giderdiği tespit edilmiştir (Çekici & Yüregir, 2020). İşletmeler müşteriden gelen sorunları analiz ederek ürünlerini geliştirme şansı da yakalamaktadır. Müşteri merkezli olmanın belirgin bir göstergesi müşterinin yaşadığı sorunları gidermektir. Bundan dolayı müşteri problemini çözmek için yeterli kaynak tahsis edilmesi ve bu kaynağın en uygun verimle kullanılması çok önemlidir.

Müşteri şikâyetlerini çözüme ve müşteriye kazanma için yapılan çalışmalar sadece ülkemizde değil tüm dünyada öncelik gösterilen bir konu olduğu için bu alanda uygulama çalışması yapılmıştır. Bu çalışma hem simülasyon hem de matematiksel modelleri kullanarak müşteri şikâyetlerinin çözüm süresini ve maliyetini belirlemeye dair iki farklı uygulama seçeneği sunmaktadır. Çalışmada uygulanan yöntemler sadece müşteri şikâyetleri için değil ayrıca üretim hatlarında, lojistik zinciri uygulamalarında ve diğer servis sektörlerinde de hayata geçirilebilir. Modele ilave süreç eklenerek, süreçler değiştirilerek, eleman sayısı değiştirilerek yeni uygulamalar yapılabilir ve çözümler bulunabilir. Bu çalışmada, şikâyetleri değerlendirmek ve beklenen seviyede çözmek için süreçler belirlenmiş ve bu süreçlerin zamanları istatistiksel olarak analiz edilmiştir. Ana süreçlerin zaman dağılımlarını kullanarak simülasyon modeli kurulmuştur. Şikâyet kapanma maliyetini minimum yapabilmek için sistemdeki optimum kişi sayısı simülasyon optimizasyonu ile tespit edilmiştir. Çalışmada ayrıca, şikâyet değerlendirme sistemine ait şikâyet giderme zamanının maliyeti formüllerle matematiksel ifadelerle dönüştürülmüş ve çözüm üretilmiştir. Bu kapsamda çalışmada, geliş süreleri ve servis süreleri üstel dağılım olarak alınmıştır. Sonrasında, hesaplanan sonuçlar aynı şartlardaki simülasyon bulguları ile mukayese edilmiştir.

## ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Araştırmacılar uygulama yapılan modelin verimliliğini belirlemek ve iyileştirmek için uygulamada simülasyon yönteminden faydalanmıştır. İmalat prosesleri üzerine oldukça fazla çalışma olmasına rağmen, servis sistemleri için simülasyon uygulamaları sınırlı sayıdadır. Çünkü servis süreçleri rastgeledir (stokastiktir) ve belli bir düzeni yoktur. Örneğin hastanelerin acil servis birimlerine gelen hastaların gelme zamanları ve belirsiz hastalık türüne göre gelmeleri karmaşık bir yapıyı oluşturduğu için simülasyon kullanımı sınırlıdır. Daha önce birçok sisteme simülasyon yöntemi uygulanmıştır, fakat şikâyet değerlendirme sisteminde yer alacak eleman sayısını ve maliyetini hem simülasyon optimizasyonu ile modelleme hem de matematiksel modelleme teknikleri ile belirleyen bir çalışmaya rastlanmamıştır. Bu nedenle gerçek verilerle yapılan uygulama çalışmamızın bu konudaki boşluğu dolduracağı amaçlanmıştır. Ayrıca, aynı problem basit kabuller ile formülleştirilmiş, matematiksel model oluşturulmuş ve çözülmüştür. Çalışmada, matematiksel model ve simülasyon model ile üretilen sonuçların birbirine yakın çıkıp çıkmayacağı araştırılmıştır. Literatürde uygulama yapılan problemlere çözüm aranırken sadece belli bir teknik üzerine yoğunlaşarak çözüm aranmıştır, problemin çözümünü iki farklı teknikte gerçekleştirme çalışmalarına pek rastlanılmamıştır. Bu çalışmanın literatüre olan en önemli katkılarından biri gerçek hayattan bir örnek uygulama olarak müşteri şikâyet yönetim süreçlerinin hem matematiksel modele dönüştürülmesi ve hem de matematiksel modelden elde edilen sonuçların, aynı şartlarda simülasyon optimizasyonu ile elde edilen sonuçlarla doğrulanmaya çalışılmasıdır. Daha sonraki araştırmacılar da farklı sistemler veya süreçler için oluşturacakları matematiksel model formüllerinden elde edilen sonuçları yine simülasyon optimizasyonu modeli kurarak (veya genetik algoritma, yapay

sinir ağları, bulanık mantık gibi farklı teknikler kullanarak) elde edilen sonuçlarla doğrulayabilecek ve çözüm için şirketlere daha kolay ve farklı alternatif teknikler sunabileceklerdir. Bu çalışmada şirketin hedef olarak belirlediği müşteri şikayetlerini çözme süresini sağlayan optimum personel ataması her iki farklı teknikle gerçekleştirilmiş ve sonuçların birbirine yakın olduğu belirlenmiştir. Optimum personel tahsis edilmesi ile bu iş için kullanılacak personeller en verimli şekilde çalıştırılabilir ve atıl işgücü ortadan kaldırılacaktır. Şirket, personel verimliliği ile kazanılan işgücünü yine şirket içinde farklı süreçlerde değerlendirebilecektir. Müşteri şikâyetlerini ele alma ve çözme prosesi hakkında yapılan önceki araştırmalar Tablo 1’de sunulmuştur.

**Tablo 1.** Müşteri Sorunlarını Ele Alma ve Şikâyet Sistemi Proseslerini Geliştirmek İçin Yapılan Uygulamalar

YIL	YAZAR	PROBLEM	ÇÖZÜM YAKLAŞIMI
1988	Fornell & Wernerfelt	Müşteriyi kaybetmemek ve kaybolan müşteriyi geri kazanmak	Şikâyet sistemini verimli uygulamak müşterinin satın aldığı ürün ve servisten beklediği kazancı artırmaktır.
1998	Greasley & Barlow	Polis şubesindeki eleman istihdam problemi.	Simülasyon yöntemi ile bir karakol prosesi incelenmiş ve süreç değişiklikleri ile optimum eleman istihdam edilmiştir.
2000	Estelami	Piyasa faktörlerinin firmanın tüketici şikâyetlerini talep etme motivasyonuna etkisini belirleme	Önceki çalışmalardan elde edilen ampirik tahminler girdi olarak kullanılmış. Simülasyon ile anket çıktılarında tutarlık görülmüştür.
2002	Baykoç vd.	Bir Fast Food müşterilerinin kuyrukta fazla beklemesi.	Şirketler şikâyet alma etkinliklerini iyileştirdiğinde yarar sağlayacaktır. Var olan sistem incelendikten sonra, simülasyon ile farklı bir sistem önerilmiştir.
2003	Kim et al.,	Online alışveriş mağazalarının yarattığı rekabet ile memnun olmayan tüketicileri yönetme.	Çalışma, memnun olmayan müşteri sadakatinin düşük olduğunu göstermektedir. Çalışmada, müşteri memnuniyetini artırmak için müşteri şikâyetlerinin nasıl yönetileceği önerilmiştir.
2003	Mattila & Mount	Müşteri hizmet merkezlerinin şikâyet değerlendirme sürecine olan etkisinin tespiti.	Anket ile otellerden gelen dataların analizi ile elde edilen bilgiler şikâyetin ele alınmasının ve müşterinin tekrar satın alma isteğinin, şikâyetleri cevaplama süresi ile ilgili olduğunu belirtmektedir.
2005	Armaneri	Vantilatör montaj istasyonu için optimal işgücü dağılımının optimizasyon ile incelenmesi.	Arena OptQuest modülü yardımıyla yeni bir model oluşturularak çalışanlar üretim yerlerine dağıtılmış ve vantilatörlerin sistemde kaldığı zamanın en az olması sağlanmıştır.
2006	Lin & Horng	G/G/1/K model optimizasyon algoritması ile yeterli servis kullanarak, kuyrukta kalma zamanını minimum yapmak.	Çalışma, genel varış süreçlerinde sınırlı kuyruk uzunluğu, servis ve varış zaman dağılımlarını hesaplamaktadır. Çalışılan G/G/1/K yöntemi ile elde edilen ortalama bekleme süresi, Genetik algoritma ile bulunandan daha iyi çıkmıştır.
2009	Akdeniz & Tatar	İzmir Milletlerarası Üniversite Olimpiyatları nedeniyle uçuş yoğunluğunun optimizasyonu.	Uçak hareketi en sık olan gün 100 uçak incelenmiş olup havaalanının olimpiyat yükünü karşılayamayacak derecede olduğu tespit edilmiştir.
2012	Hamad & Arisha	Bir hastaneye ait acil servis süreçlerinin iyileştirilmesi.	Kuyruk olmaması için ikinci piste ihtiyaç duyulduğu tespit edilmiştir. Simülasyon yöntemi ile hastalara yatak ataması sağlanmış ve acil servis süreçlerindeki blokaja engel olunmuştur.
2015	Faed et al.,	Limanda müşteri kabul edilen sürücülerden alınan müşteri şikâyetlerini çözme konusu.	Limanda araç kullananlardan toplanan problemler incelenmiştir. Analizde, problemler önceliklendirilmiş ve kullanım performansı optimizasyon ile arttırılmıştır.
2016	Liu & Yen	Otobüs yolcularının şikâyetlerini çözme problemi.	Otobüs yolcularında alınan şikâyetler analiz edilmiş şikâyet prosesi geliştirilmiş ve yeni model önerilmiştir.
2019	Atalan & Dönmez	Acil olmayan veya acil servislerde ileri düzey hemşireler çalıştırarak hasta bekleme sürelerini azaltmak.	Bir acil servis ayrık olay simülasyon yöntemi uygulayarak tedavi edilen hasta sayısının günlük %26,71, haftalık ise %15,13 arttığı belirlendi. Acil serviste kalış süresi 82,46 dakikadan 53,97 dakikaya düştü.
2019	Belgin	İmalat sisteminde en uygun çalışan sayısını bulma.	Belli kısıtlar ile üretim hatlarında çalışanların işe atanma optimizasyonu simülasyon tekniği ile tespit edilmiştir.
2019	Düzgit vd.	Ev aletleri endüstrisinde satış sonrası teknik servisin verimliliğini artırma problemi.	Etkinliği yükseltmek için personellere iş ataması yapılmıştır. Teknik adamları işe görevlendirmek için karmaşık tam sayılı programlama modeli oluşturulmuş ve harcanan süre en aza indirilmiştir.
2019	İbiş vd.	Otel işletmelerine internetten yapılan müşteri yorum ve şikâyetlerin incelenmesi.	Yapılan çalışmada Hotelde konaklayanların şikâyetleri değerlendirilmiş ve konaklayanlara daha kaliteli servis sağlamak için şikâyetlere kalıcı çözüm bulmaları önerilmiştir.
2020	Ahmedl at al.,	200 kişinin ankete katılımı ile toplanan verilerin analizi.	Şikâyetlerin değerlendirilmesi ve çok hızlı yanıtlanmasının, müşteriyi memnun ettiği ve sadık kalma olasılığını yükselttiği belirlenmiştir. Ayrıca iş operasyonlarının verimi arttırmıştır.
2020	Atalan & Dönmez	Deneysel simülasyon yöntemi ile matematiksel olarak modellenen ancak çözülemeyen modellerin çözülmesi.	Bir acil servis için kesikli olay simülasyonu tekniği ile deneysel tasarım entegre edilmesiyle hastanın ortalama bekleme süresi düşürülmüştür. Günlük acil servise yönelik kaynak sayısı artırılmadan kaynak kapasitesi artırılarak tedavi edilen hasta sayısı artırılmıştır.
2020	Bahari & Asadi	Hastane yöneticilerine, acil durumlarda taburculuk süresini optimize etmek ve verimi arttırmak	Bu çalışmada, acil servisteki kaynaklar araştırılmış ve acil servisteki hastaların bekleme süresini azaltmak için simülasyon optimizasyon yaklaşımı ile bu kaynakların optimal kombinasyonunu sağlanmıştır.
2020	Ordu vd.	Tam teşekküllü bir hastanede travma ve ortopedi polikliniğinin	Geliştirilen simülasyon modeli ile poliklinik kullanım oranlarının, gelecekte ihtiyaç duyulacak personel, yeterli bütçe ve ekipman gibi

		gelecek yıllarda sahip olabileceği klinik kullanım oranlarının hesabı.	kaynak ihtiyaçlarının önceden tespit edilmesi ve daha iyi kaynak planlaması için hastane yönetimine bir öngörü sunulmuştur.
2021	Baş vd.	Bir bulaşık makinesi fabrikasında robot çalışma alanı belirleme ve istasyona çalışan kişileri atama.	Çalışma alanlarının seçimi ile ilgili yeni bir tam sayılı programlama modeli önerilmiştir. Benzer işler sınıflanarak çalışma yeri miktarı 68%, işçi sayısı 10% düşürülmüş ve üretilen makine sayısı %43 arttırılmıştır
2021	Çekici & Yüregir	Müşteri şikâyet değerlendirme sisteminin süreçlerinin simülasyon metodu ile optimizasyonu.	İncelenen şikâyet süreçleri sadeleştirilerek en verimli sistem belirlenmiştir. Eski sistem sonuçları ile karşılaştırıldığında, yeni sistemin ortalama şikâyet kapanma süresi %38,9 oranında kısalmıştır.
2021	Şenses vd.	Bir madencilik şirketi için en az maliyetle yedek parça envanter optimizasyonu.	Endüstriyel yağlar için bir vaka çalışması yapılarak optimizasyon modeli kurulmuş. Modelin uygulanmasıyla şirket ekonomik kazançlar sağlanmıştır.
2022	Atalan	Hastanenin acil servisinde tedavi gören hasta sayısı, hasta bekleme süreleri ve çalışan hemşire ve doktor sayısına bağlı olarak bir hastanın tedavi maliyetinin analizi.	Kesikli olay simülasyon modeli, hemşire ve doktor sayısına göre dokuz senaryodan türetilmiş ve senaryo sonuçları ile gerçek sonuçlar arasında karşılaştırma yapılmıştır. Senaryolar arasında senaryo 6, en iyi performansa sahip üç doktor ve iki hemşireyi çalıştırarak bir hastaya en düşük tedavi maliyetini sağlamıştır.
2022	Atalan vd,	Bir acil servisteki sağlık hizmeti kaynaklarının sayısına göre bekleyen hasta sayısını, süresini ve hastaneye maliyetini analiz etmek.	Kesikli olay simülasyonu modeli ile makine öğrenmesi algoritmalarının entegrasyonu yapılmıştır, çalışmada kaynak maliyet katsayısına bağlı olarak çıktı değişkenlerinin tahmini hesaplanmış makine öğrenmedeki bekleme zamanı azaltılarak hastane maliyeti düşürülmüştür.
2022	Akin & Ordu	Sağlık hizmetleri yöneticilerinin, sonraki covid19 dalgalarında yaşanabilecek hemşire ihtiyacı sorunlarının simülasyon - optimizasyon ile planlanması.	Çalışmada hasta değişkenliğine göre haftalık hemşire ihtiyacı tespit etmek için simülasyon modeli geliştirildi. Haftalık vardiya sayılarını belirlemek için ilk matematiksel model kullanılmıştır. Pandemi servisinde adil hemşire vardiya takvimi hazırlamak için ikinci matematiksel model uygulanmıştır.
2022	Mutlu vd.	Ulaştırma ürünlerin arz noktasından talep noktalarına minimum maliyetle taşınması.	Çalışmada, taşıma problemi için maksimum maliyetten kaçınma yöntemi önerilmiştir. Sonuçlar önerilen optimizasyon yönteminin tutarlı ve iyi çözümler ürettiğini göstermiştir.
2022	Ordu & Korhan	Bir tekstil firmasında darboğazları tespit etmek ve malzeme akışını iyileştirmek.	Simülasyon yöntemi kullanılarak tekstil firmasının kesim departmanına tesis yerleşimi için yerleşim planlaması önerilmiş ve departmandaki üretim verimliliği yaklaşık %14 artmıştır.
2022	Ordu	Türkiye Bireysel Emeklilik Sistemi'nin (BES) katılımcılara uygulanabilirliğinin araştırılması.	Çalışmada farklı senaryolar ampirik olarak araştırılmıştır. BES yatırımının kısa vadeli yatırımlar için uygun olmadığı ancak orta-uzun vadede tüm emeklilik planlarının karlı olduğu belirlendi. Uzun vadede BES'in, dinamik ve agresif fonlarının da karlı olduğu belirlenmiştir.
2022	Tian at al.,	Hollanda'da bir su şirketine gelen müşteri şikâyet metinlerini değerlendirme.	Derin öğrenmenin sağladığı doğal dil işleme (NLP) ve evrimsel sinir ağlarının kullanımı ile müşteri şikâyetlerine ait belirlenmiştir. Şikâyeti ele alma süreci otomatikleştirilmiştir.
2023	Kocaer & Kuruca	Servis süreçleri üzerine benzetim programı oluşturma ve çalışan kişilerin optimizasyonu.	Servis sektörü için kuyruk modelinin simülasyonunu yapabilen, verimliliğini ölçebilen ve işgücünü optimize edebilen bir benzetim programı (QS-Sim Tool) oluşturulmuştur.
2023	Güleryüz & Koyuncu	Bir yoğun bakım ünitesinde kuyrukta beklemeden gelen tüm hastaları barındırmak için gereken yatak sayısını belirleme.	Hastaların gelişler arası süre ve servis süresi karışım dağılımları kullanılarak gereken yatak sayısını belirlemek için simülasyon modeli kuruldu. Sonuçlar, karışım dağılımlarının ampirik istatistiksel dağılımlardan daha iyi bir tahmin sağladığını göstermektedir.
2023	Uncu & Koyuncu	Acil tıbbi hizmet (EMS) sistemlerinde ambulans tahsisi.	Ayrıntılı olay sistemi simülasyon ve optimizasyon modeli çalışmasıyla Kentsel ve kırsal bölgelerdeki vakalara müdahale süreleri sırasıyla %40 ve %45 iyileşti. Ambulans sayısının revize edilmesi ve mevcut sistemdeki istasyonlara tahsisinin yeniden düzenlenmesi önerildi.

## MATERYAL VE METOD

Bu araştırma çalışmasında, uygulamadan alınan şikâyet zaman verileri değerlendirilerek simülasyon modeli kurulmuştur. Öncelikle şikâyet yönetim modelinin temel süreçleri belirlenmiş, sonrasında her sürece ait zamansal dağılım, istatistiksel incelemeler sonucunda bulunmuştur. Simülasyon modeli kurmak için uygulamadaki temel proseslerin zaman dağılımlarından faydalanılmıştır. Sonrasında değişik girdi değerleriyle simülasyon modeli çalıştırılmış ve hedeflenen çözüm zamanını karşılayan en uygun personel sayısı tespit edilmiştir. Ayrıca, şikâyet kapanma maliyeti basit varsayımlarla matematiksel olarak ifade edilmiş ve matematiksel modelden elde edilen zamanlar aynı şartlarda simülasyonla elde edilen zamanlar ile karşılaştırılmıştır. Çalışmanın sonunda şikâyet kapanma süresi, servis süreleri ve birim şikâyet kapanma maliyeti hesaplanmıştır.

### Materyal

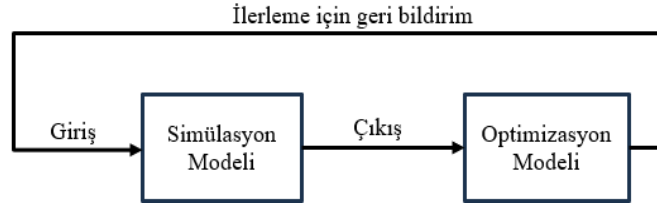
Bu çalışmada uygulamadan alınan 1839 adet gerçek şikâyet zaman verileri ve uzman görüşlerinden elde edilen bilgilerden faydalanılmıştır. Mevcut durumu belirlemek için öncelikle müşteri şikâyet sisteminin her sürecine ait zaman verilerinden faydalanılmıştır. Elde edilen dağılımlarla proseslerde görev alan personel sayısı Arena yazılımına

tanımlanmıştır. Şikayetlerin gelişler arası zamanları, kök nedenini bulmak için ilgiliye yönlendirme zamanı, kök nedeni bulma zamanı, çözüm bulan kişiye yönlendirme zamanı, bölümlerin şikâyeti çözme zamanları incelenmiştir.

### Metot

i. Simülasyon: Bilgisayar simülasyonu, modelin hareket tarzını matematiksel ve mantıksal iletişim kuran bilgisayar üzerinden zamanla ilişkili halde denemeler gerçekleştiren ve sayılarla ifade edilen bir tekniktir (Rossetti, 2010). Rastgele prosesleri, bilinen matematiksel modellerle açıklamak oldukça zordur. Fakat, belirli varsayımlarla bu prosesler matematiksel ifadelere çevrilebilir. Ancak bu matematiksel formüller de gerçek durumu tam anlamıyla sembolize etmemektedir. Rastgele prosesleri açıklamak için çoğunlukla simülasyon metodundan faydalanılmaktadır. Simülasyon, mevcut bir sistemi bilgisayar modeline aktaran, gerçek sistemin değişik koşullardaki davranışının bilgisayar modelinde izlenmesine olanak sağlayan bir modelleme tekniğidir. Simülasyon giriş değişkenlerini değiştirerek, çıkış değişkenlerinin nedenlerini belirlemek için gerçekleştirilen testlerdir (Carson & Maria 1997).

ii. Simülasyon Optimizasyonu Metodu: Simülasyon optimizasyonu, tüm olasılıkları analize gerek duymadan tüm olasılıklar içinden en uygun girdi değişken değerlerini bulma sürecidir. Optimal olmayan girdi değerler ile başlanırsa hesap maliyeti artacaktır. Modelin ürettiği çıktı, optimal çözüm araştırırken geri bildirim sağlayan yöntem kullanır (Carson & Maria 1997). Bilgisayar simülasyonu, servis ve üretim modellerinin tasarlanması ve incelemesinde geniş çaplı kullanılmaktadır. Simülasyon girdi değişkenlerinin miktarı çok ve sistem karmaşık ise simülasyon denemesinin çözülmesine engel olur. Simülasyon-optimizasyon yönteminin (Şekil 1.) amacı, bir simülasyon denemesinden elde edilecek çıktı verilerini maksimum yaparken, minimum kaynak tüketmektir.



Şekil 1. Bir simülasyon optimizasyon modeli

Simülasyon optimizasyon metodunun sunduğu en anlamlı fayda, gerçek modeli tanımlayacak matematiksel ifadelerle gerek duymadan modeli bilgisayarda çalıştırarak bulunan çıktılarla simülasyon optimizasyonu gerçekleştirebilmektir. Gerçek sistem problemi çözülürken daha az kabul ile gerçeğe yakın olan neticeler bulunacak ve sonuçların değerlendirilmesi kolaylaşacaktır. Karmaşık, büyük ölçekli ve rastgele (stokastik) modellerin amaç fonksiyonunu formülleştirmek zordur, ama, regresyon modeli ile tahmini olarak formülleştirilebilir.

Çalışmamızda şikâyet sisteminin başlangıç durumu incelenmiş ve anahtar performans göstergeleri belirlenmiştir. Daha sonra, şikâyet değerlendirme sistemine ait simülasyon modeli kurulurken, belirlenen ölçütler (kök neden araştırma, görev atama, çözüm araştırma, şikâyeti kapatma zamanları, çalışan sayısı) giriş verisi olarak alınmıştır. Ana proseslerin zaman dağılımları ile simülasyon modeli kurulmuştur. Kısıt ve amaç fonksiyonu ile toplam kaç elemanla, şikâyetin ne kadar sürede çözüleceği hesaplanmıştır. Ayrıca, şikâyet kapanma maliyeti basit kabullerle ve gelişler arası ve servis zamanları üstel dağılım varsayımlarıyla matematiksel ifadelerle tanımlanmış ve matematiksel modelden elde edilen süreler aynı şartlarda simülasyonla elde edilen süreler ile karşılaştırılmıştır. Matematiksel model yardımıyla her bir süreç için gerekli eleman sayısı, kuyruk sisteminde bekleyen toplam şikâyet sayısının beklenen değeri (adet), beklenen kuyruk uzunluğu (işlem gören şikâyetler hariç), serviste görev alan kişilerin maliyeti, bekleme süresi maliyeti, toplam (servis + bekleme) maliyeti, toplam bekleme maliyeti hesaplanmıştır. Ortalama şikâyet çözüm maliyetini minimum yapacak personel sayısını tespit etmek amacıyla Arena yazılımı yardımıyla simülasyon optimizasyonu yapılmıştır.

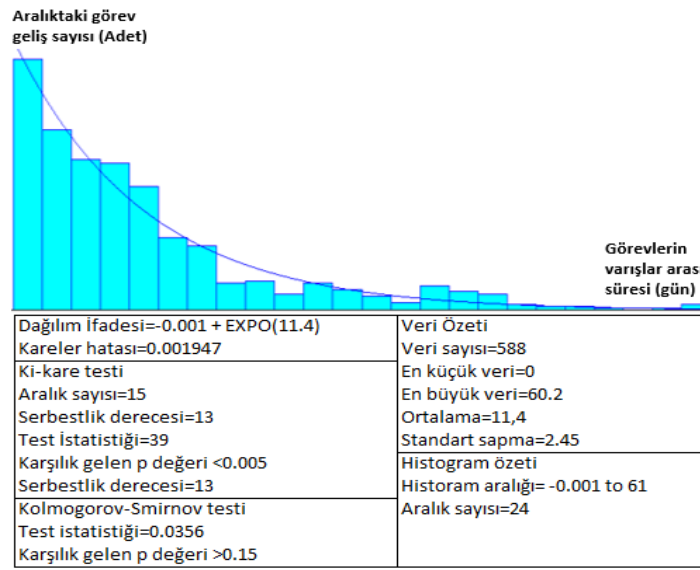
iii. Çalışmanın Zaman Dağılımları ve Uygulanan Testler: Çalışmada uygulamadaki gerçek şikâyetlerin zaman değerleri (rasgele ve sürekli) incelenmiş ve her temel prosesin zaman dağılımı istatistiksel olarak tespit edilmiştir. Bu çalışmada Arena programının gelişmiş bir fonksiyonu olan Input Analyzer modülünden faydalanılmış ve şikâyet süreleri analiz edilerek süreçlerin zaman dağılımları tespit edilmiştir, ulaşılan teorik dağılımlar simülasyon yazılımı ile tutarlı ve etkili çalıştığından seçilmiştir. Servis süreleri Arena programına tanımlanmış ve en uygun dağılım Arena programı tarafından belirlenmiştir. Şikâyet gelişleri ve servis süresi verileri rastgele olduğu için program verilere uyum sağlayan en yakın dağılımı belirlemektedir.



**Tablo 2.** Şikayet Süreçlerinin Gerçek Zaman Dağılımı ve Uygulanan Testler

Süreç ismi	Servis süreçlerinin gerçek dağılımları	p değeri		Kareler hatası
		$\chi^2$ test	K-S test	
Şikâyet gelişleri	EXPO (1,55)	<0,005	<0,01	0,02368
Kök neden araştırma için görev atama	0,771*BETA (0,705 , 1,36)	0,0053	>0,15	0,00520
Kök neden araştırma	EXPO (1,08)	<0,005	<0,01	0,00514
Çözüm birimine görev atama	0,821*BETA (0,712 , 1,41)	0,245	>0,15	0,00304
Ar-Ge çözüm araştırma	GAMM (11 , 1,16)	0,05	>0,15	0,00234
Satın alma çözüm araştırma	EXPO (11,4)	<0,005	>0,15	0,00201
Üretim/Servis çözüm araştırma	WEIB (6,49 , 0,877)	0,5	=0,0263	0,00095
Kalite çözüm araştırma	LOGN (8,68 , 14,1)	<0,005	>0,15	0,01067

Şikayet süreçlerinin zaman dağılımı ve uygulanan testlere örnek olarak Şekil 2’de Satın alma çözüm araştırma bölümüne ait verilerin histogramı ve zaman dağılım bilgileri verilmiştir. Veri sayısı=588, verilerin ortalaması 11,4, standart sapması 2,45’tir. Benzer şekilde, tüm servis süreçlerine ait zaman dağılımları ayrı ayrı hesaplanarak incelenmiştir.

**Şekil 2.** Satın Alma Çözüm Araştırma Bölümüne Ait Verilerin Histogramı ve Zaman Dağılım Bilgileri

Uygulamadaki şikayetlerin giriş verisi olan varışlar arasındaki zamanlar üstel dağılıma uymaktadır. Şikayet geliş sürelerine ait üstel dağılım standart sapma değeri 2,45 gün, ortalama değeri 1,55 gündür. Her 1,55 günde sisteme bir adet yeni şikayet gelmektedir. Oluşturduğumuz modelde uygulama yapılan şikayet sistemindeki zaman verileri Kolmogorov-Smirnov (K-S) uyum iyiliği ve Ki-Kare ( $\chi^2$ ) testleri ile istatistiksel anlamda analiz edilmiştir. Tablo 2’de belirtildiği gibi kareler hatası oldukça küçüktür. Örnek olarak, müşteri şikayetlerinin geliş süreleri, üretim-servis çözüm araştırma bölümüne ait servis süreleri ve kalite çözüm araştırma bölümüne ait servis süreleri için uygulanan Ki-Kare ve Kolmogorov-Smirnov uyum iyiliği testleri açıklanmıştır. K-S testi: Gözlenen bir frekans dağılımının kuramsal bir dağılıma uyup uymadığını belirlemek için kullanılır.

1. Şikayet geliş verilerine uygulanan testler: EXPO(1,55)

Şikayet gelişlerine ait Ki-kare testi: Aralık sayısı=10, Serbestlik derecesi=8, Test istatistiği=632.

Ki kare testi:  $H_0$  = Gözlenen frekans dağılımı kuramsal bir dağılıma uygun değildir.

Serbestlik derecesi=8 ve  $\alpha=0,05$  için tablodan  $\chi^2$  değeri 22,362 okunur, hesaplanan ki kare test istatistiği=632.

$\chi^2_{hesap}=632 > \chi^2_{tablo}=22,362$  olduğu için  $H_0$  hipotezi reddedilir. Sonuç olarak ki kare testine göre seçilen dağılım verileri ile uyumludur. Ayrıca, eğer p değeri  $> \alpha$ ,  $H_0$  reddedilmez, eğer p değeri  $< \alpha$ , ise  $H_0$  reddedilir.  $p < 0,005$  değeri  $\alpha = 0,05$ ’ten küçük olduğu için hipotez reddedilir. Sonuçta, Ki-Kare testine göre seçilen dağılım verileriyle uyumludur.

Şikayet geliş sürelerine ait Kolmogorov-Smirnov Testi: Test istatistiği=0,826, Karşılık gelen p değeri  $< 0,01$

K-S testinde  $H_0$  hipotezi olarak "Kuramsal ve örnekten elde edilen gözlenen eklemeli frekansların oranları birbirine eşittir" alınır. Örnekten bulunan D değeri, K-S tablosundaki kritik D değerine eşit ya da daha büyükse  $H_0$  reddedilir. Aksi olduğunda ise ( $K-S_{tablo} > K-S_{hesap}$ )  $H_0$  kabul edilir. Kolmogorov-Smirnov (K-S), p-değeri  $< 0,01$ .

$D(0,1)_{tablo} = 0,0317$ ,  $D(0,1)_{tablo} = 0,0317 > D_{hesap} < 0,01$  olduğu için  $H_0$  hipotezi kabul edilir. Sonuçta, K-S testine göre seçilen dağılım veriler ile uyumludur.

2. Üretim-servis çözüm araştırma bölümüne ait servis süresi verilerine uygulanan testler: WEIB (6,49 , 0,877)  
Üretim-Servis sürelerine ait Ki-kare testi: Ki-kare testinde  $H_0 =$  Gözlenen frekans dağılımı kuramsal bir dağılıma uygun değildir. Serbestlik derecesi=5 ve  $\alpha=0,05$  için tablodan ki-kare değeri 16,919 okunur, hesaplanan ki kare test istatistiği=4,35.  $\chi^2_{hesap} = 4,35 > \chi^2_{tablo} = 16,919$  olduğu için  $H_0$  hipotezi kabul edilir. Sonuç olarak Ki-kare testine göre seçilen dağılım veriler ile uyumlu değildir. Ayrıca, eğer p değeri  $> \alpha$ ,  $H_0$  reddedilmez, Eğer p değeri  $< \alpha$ , ise  $H_0$  reddedilir.  $p \leq 0,5$  değeri  $\alpha=0,05$ 'ten büyük olduğu için hipotez kabul edilir.

Üretim-Servis sürelerine ait Kolmogorov-Smirnov Testi: K-S, p-değeri  $< 0,0263$ ,  $D(0,1)_{tablo} = 1,36 / ((365)^{0,5}) = 0,0712$ ,  $D(0,1)_{tablo} = 0,0712 > D_{hesap} \leq 0,0263$  olduğu için  $H_0$  hipotezi kabul edilir. Sonuç olarak K-S testine göre seçilen dağılım veriler ile uyumludur.

3. Kalite çözüm araştırma bölümüne ait servis sürelerine uygulanan testler: LOGN (8.68, 14.1)  
Ki-kare testinde  $H_0 =$  Gözlenen frekans dağılımı kuramsal bir dağılıma uygun değildir. Serbestlik derecesi=2 ve  $\alpha=0,05$  için tablodan Ki-kare değeri 9,488 okunur, hesaplanan ki kare test istatistiği=25,2.  $\chi^2_{hesap} = 25,2 > \chi^2_{tablo} = 9,488$  olduğu için  $H_0$  hipotezi reddedilir. Sonuç olarak Ki-kare testine göre seçilen dağılım veriler ile uyumludur. p değeri 0,005  $\alpha=0,05$ 'ten küçük olduğu için hipotez reddedilir.

K-S, p-değeri  $> 0,15$ ,  $D(0,1)_{tablo} = 1,36 / ((122)^{0,5}) = 0,123$ ,  $D(0,1)_{tablo} = 0,123 < D_{hesap} < 0,15$  olduğu için  $H_0$  hipotezi reddedilir. Sonuç olarak K-S testine göre seçilen dağılım veriler ile uyumlu değildir.

iv. Simülasyon Uzunluğu: Oluşturulan modelin çalıştığı zamandır. Herhangi bir değer belirtilmezse simülasyon modeli devamlı çalışır. Çalışmada simülasyon zamanının ne kadar olması gerektiği Little formülü ile hesaplanmıştır. Formül basit olup kuyruk süreçlerini doğrulamak için kullanılır. Formül (1), sistemde bilinmeyen neden ile kalan gelişleri ortaya çıkarmak için de kullanılır (Altıok ve Melamed, 2007). N, proseslerdeki ortalama iş miktarıdır, W işin model içinde kaldığı zamanın ortalamasıdır ve  $\lambda$  sadece etkili geliş değeridir.

$$N = \lambda W \quad (1)$$

Little formülü alt kuyruk modelleri için de kullanılır. Arena Create modülünde önce 1839 geliş yazılmış ve program çalıştırılmış, daha sonra 4000 yazılmış ve tekrar program çalıştırılmıştır. Elde edilen süreler uygulamadaki başlangıç verileri ile karşılaştırılmıştır. Müşteri şikayetlerinin simülasyon uzunluğu 1839 gün olduğunda kurulan model % 98,75 oranında, 4000 gün olduğunda ise %99,97 oranında güvenilirlik sağlanmıştır.

v. Kurulan Modelin Geçerliliğinin Doğrulanması: Model fiili uygulama verileri ve simülasyon ile bulunan değerler mukayese edilerek doğrulanmıştır. Simülasyon modelinin hassasiyetini arttırmak için simülasyon uzunluğu arttırılmıştır. Ayrıca, doğrulama kurulan modelin alt bölümlerinin Little formülü ile test edilmesiyle de gerçekleştirilmiştir (Tablo 3). Uygulama çalışmasında müşteri şikayetlerine çözüm için görevlerin %40'ı Ar-Ge , %32'si satın alma, %19'ü üretim/servis, %9'u kalite birimlerine yönlendirilmiştir.

**Tablo 3.** Simülasyon Optimizasyonu Modelinin Doğruluğunun Little Formülü ile Kontrolü

No	Süreç ismi	Başlangıca ait süreç zamanları (gün)	Kişi sayısı (adet)	Servis süreleri	Süreç zamanları 1839 geliş için (gün)	Servis süreleri	Süreç zamanları 4000 geliş için (gün)
1	Kök neden bulma için görev atama	0,308	1		0,306		0,308
2	Kök neden bulma	1,190	2		1,180		1,190
3	Çözüm birimine karar verme	0,324	1		0,322		0,324
4	Ar-Ge çözüm bulma	12,662	5	0,4*12,41	4,9656	0,4*12,662	5,0648
5	Satın alma çözüm bulma	13,998	4	0,32*13,83	4,4256	0,32*13,998	4,4793
6	Üretim/Servis çözüm bulma	9,436	2	0,19*9,42	1,79018	0,19*9,436	1,7928
7	Kalite çözüm bulma	15,891	1	0,09*15,69	1,4121	0,09*15,891	1,43
8	Ortalama Şikayet kapatma süresi	14,585	16	Toplam	14,402		14,589

Modelin doğruluğu	98,75%	Modelin doğruluğu	99,97%
-------------------	--------	-------------------	--------

vi. Simülasyon Modeline Ait Replikasyon Sayısı: Simülasyon esas olarak bir modelin veriminin örnekleme ile tahminidir. Her bir replikasyon, simülasyonun bağımsız bir tekrarıdır. Bu araştırma çalışmasında t dağılımı temel alınarak iterasyon ile her proses için farklı replikasyon değeri bulunmuştur. Replikasyon değerini belirlemek amacıyla denklem (2) ile verilen formülden yararlanılmıştır (Rossetti, 2010).

$$n \geq ((t_{\alpha/2}, (n-1)^S) / E)^2 \quad (2)$$

Güven aralığı, tahminin güvenilirliğini gösterir. Bu çalışmada %95 olan güven aralığı kullanılmıştır.  $\alpha=1-0,95=0,05$  (yarım genişliğe sahip güven aralığında  $\alpha/2=0,025$ ), S=verilere ait standart sapma, E=Verilere ait ortalama, n=Başlangıçtaki replikasyon değeri. Formülde “t  $\alpha/2$ , n-1” n’e bağlıdır, bu nedenle iterasyon yapılması gereklidir.

**Tablo 4.** Kök Neden Bulma Zamanı için Replikasyon Sayısı

Başlangıç replikasyon sayısı (n)	ortalama	ort*hata= ort*0,99	standart sapma	t $\alpha/2$ , n-1	n (formül)	Notlar
2	1,080	1,069	1,48	12,7	309,04	10 $\geq$ 9,8
3	1,080	1,069	1,48	4,303	35,48	
4	1,080	1,069	1,48	3,182	19,4	n=10
5	1,080	1,069	1,48	2,776	14,77	yeterli
6	1,080	1,069	1,48	2,571	12,67	
7	1,080	1,069	1,48	2,447	11,47	
8	1,080	1,069	1,48	2,365	10,72	
9	1,080	1,069	1,48	2,306	10,19	
10	1,080	1,069	1,48	2,262	9,8	

**Tablo 5.** Ana parametreler için bulunan replikasyon sayısı

Ana parametreler	Minimum Replikasyon sayısı
Şikâyeti kapatma süresi	2
Kök neden bulma için görev atama süresi	5
Kök neden araştırma süresi	10
Çözüm için birime görev atama süresi	6
Ar-Ge çözüm araştırma süresi	6
Satın alma çözüm araştırma süresi	7
Üretim/Servis çözüm araştırma süresi	8
Kalite çözüm araştırma süresi	7

Hesaplamalar sonucunda çıkış verisi şikâyeti kapatma zamanı için n=2, kök neden araştırma için n=10 (Tablo 4), satın alma çözüm araştırma süresi için n=7 replikasyon yeterli çıkmıştır. Hesaplanan değerler replikasyon sayısının en küçük değeridir, doğruluk değerini artırmak için 100 replikasyon ile program çalıştırılmıştır. Replikasyon sayıları ise geliştirilen modelin bütün anahtar performans göstergeleri için ayrı ayrı hesaplanmıştır (Tablo 5).

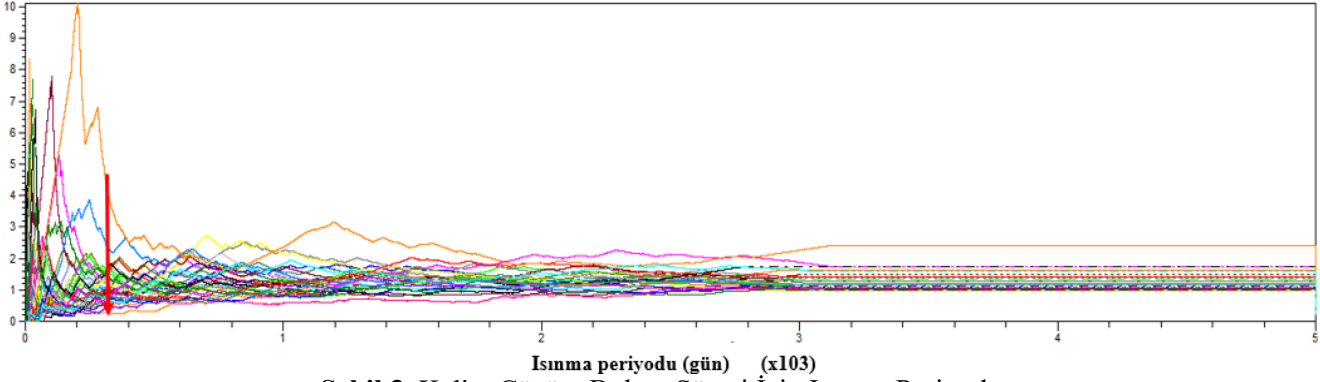
vii. Simülasyon Modeline Ait Isınma (Warm-up) Periyodu: Isınma periyodunun bulunması için farklı metotlar vardır. Araştırmamızda ise Welch Grafik metodu ile ısınma periyodu belirlenmiştir (Rossetti, 2010). Metodun özeti aşağıda verilmiştir.  $R > 5$  replikasyon yapılması önerilir ve  $r = 1, 2, \dots, R$  ve  $i = 1, 2, \dots, nr$  için replikasyonda yer alan i'inci gözlemin değeri  $Y_{ri}$  olsun. Her bir  $i = 1, 2, \dots, n$  değeri için replikasyona ait ortalama belirlenir (3).

$$\hat{Y}_{.i} = (\sum_{r=1}^R Y_{ri}) / R \quad (3)$$

$i=1, 2, \dots, n$  değerine ait  $\hat{Y}_{.i}$  grafiğinin şekli oluşturulur.  $\hat{Y}_{.i}$ ,  $i=1, 2, 3, \dots, n$ 'e düzleştirme yöntemleri uygulanır. Göz ile grafiklerin düzleşmeye başladığı yer belirlenir. Görüntü bakımından düzleşmeye başlayan bölge warm up değeri kabul edilir. Arena programı ile tüm servis süreçleri için grafikler çizilmiş olup çizilen grafiklerden faydalanarak warm-up periyodu 300 gün olarak belirlenmiştir. Kalite bölümünün çözüm bulma süresi için bulunan ısınma periyodun grafiğinde (Şekil 3), görüldüğü gibi ~300 gün değerine kadar dalgalanmalar görülmektedir. Benzer şekilde çözüm birimine görev atama süresi için elde edilen ısınma periyodu grafiğinde de (Şekil 4) ~300 gün değerine kadar aşırı dalgalanmalar görülmektedir. Bu nedenle dalgalanmaların olduğu ilk 300 gün için elde edilen değerler

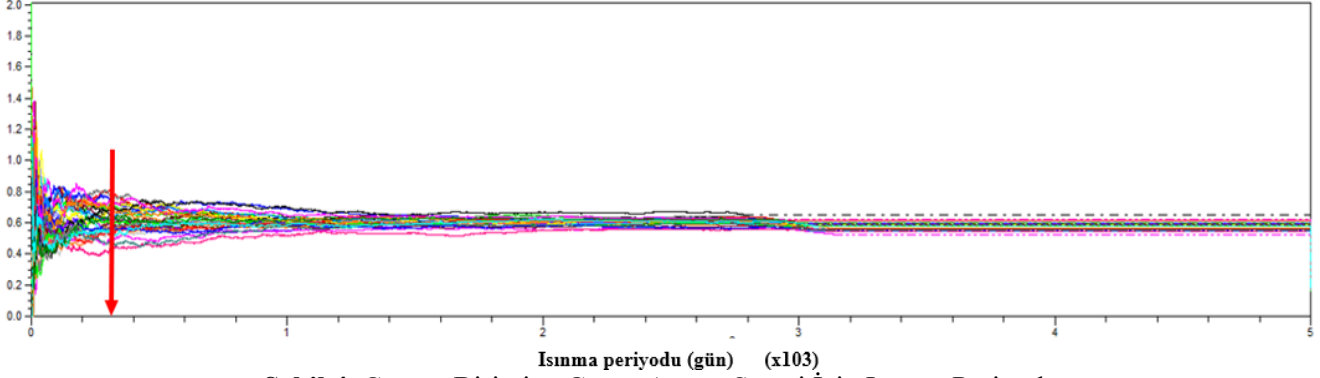
istatistiklere dahil edilmemiştir. Isınma periyodu grafiği ilk oluşturulurken Arena program run setup değerlerinde ısınma periyodu değeri sıfır alınmış ve Şekil 3 ile Şekil 4'teki grafikler elde edilmiştir. Grafikte ~300 civarında eğrinin düzleşmeye başladığı görülmüştür.

**Kalite Çözüm bulma süresi (gün)**



**Şekil 3. Kalite Çözüm Bulma Süresi İçin Isınma Periyodu**

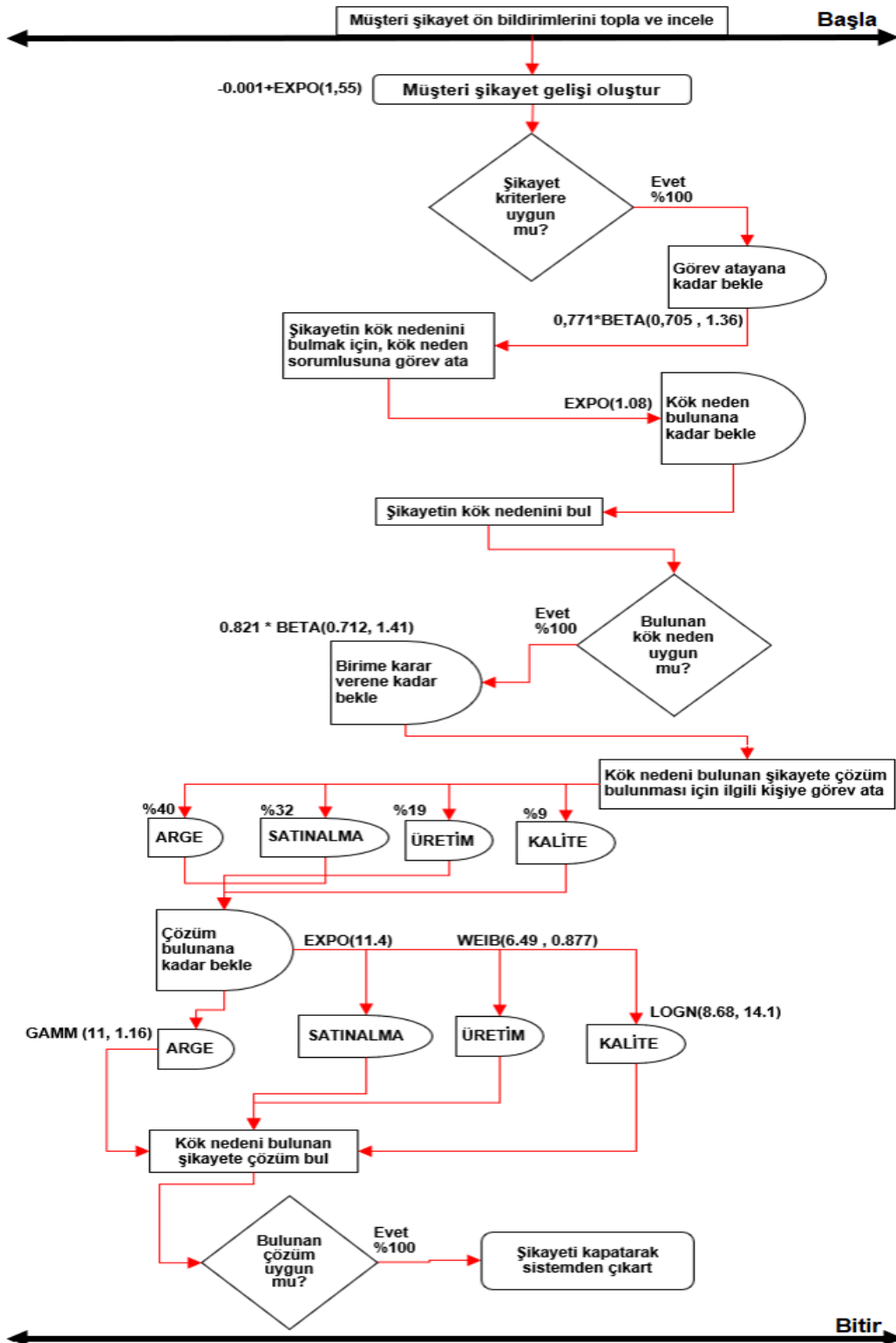
**Çözüm birimine görev atama süresi (gün)**



**Şekil 4. Çözüm Birimine Görev Atama Süresi İçin Isınma Periyodu**

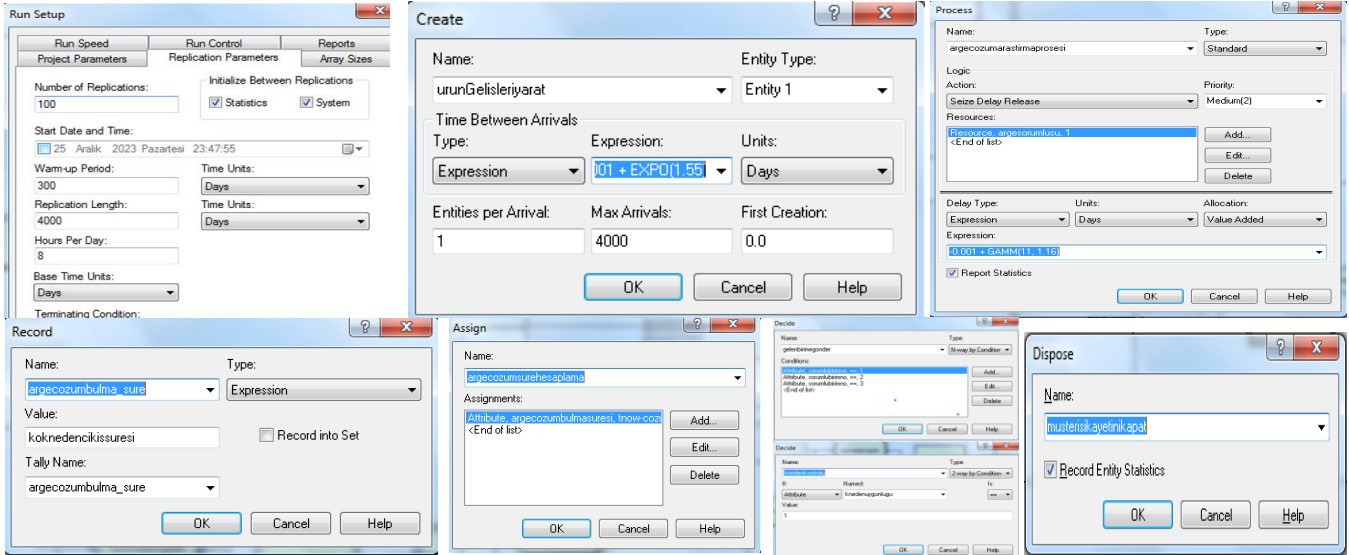
viii. Müşteri şikayetlerini değerlendirme süreçlerine ait simülasyon akış çizelgesi Şekil 5'te verilmiştir. Simülasyon modeli kurulurken iletilen şikayetlerin tamamının kriterlere uygun olduğu kabul edilmiştir. Uygulamaya göre başlangıç durumunda şikayetin kök nedeninin ve çözümünün ilk seferde doğru olarak bulunduğu kabul edilmiştir.





Şekil 5. Müşteri şikayetlerini değerlendirme süreçlerine ait simülasyon akış çizelgesi

ix. Arena simülasyon modelinin kurulum modülleri: Kurulan modele ait tekrar değeri ve simülasyon modelinde kullanılan modüllerin ekran görüntüleri Şekil 6’da tanımlanmıştır. Program çalıştırma verileri Run Setup ekranında verilmiştir, Create modülü ile müşteri şikayet gelişleri yaratılmıştır (Expression: EXPO:1,55). Proces modülüne servis süreçlerin (Ar-Ge vs..) dağılımı (-0,001+GAMM(11 , 1,16) tanımlanmıştır. Decide modülü ile karar verilmesi gereken durumlar tanımlanmıştır. Evet/Hayır gibi 2 seçenek gerektiren durumlarda 2-way by condition, 2 seçenekten fazla olan durumlarda (çözüm birimlerine görev atama) N-way by condition kullanılmıştır. Record modülünün istenen süreçlere bağlanması ile gerekli kayıtlar yaratılmış ve rapor çıktısında her bir sürecin verileri yazdırılmıştır. Dispose modülü ile de çözülen müşteri şikayetlerinin kapatılması ve sistemden çıkarılması sağlanmıştır.



Şekil 6. Simülasyon Modelinde Kullanılan Modüllerin Örnek Ekran Görüntüleri

## x. Matematiksel Modelleme

Müşteri şikayetlerini ele alma modelinde şikayeti giderme zamanının maliyeti matematiksel ifadelerle formüle edilerek, şikâyet kapatma maliyetini en küçük yapmak hedeflenmiştir. Şikâyet kapanma süresi, şikayetlerin gelişler arası zamanlarına, sistemde çalışan kişi sayısına ve şikâyetin bölümlerdeki servis sürelerine bağlıdır. Şikayete ait gelişler arası süreler, kuyrukta kalma süresi, her bölümün şikâyeti gidermek için kullandığı ortalama zaman ve şikâyetin giderilme zamanı tesadüfidir. Bu kapsamda matematiksel model oluşturulurken aşağıdaki varsayımlar, özellikler ve notasyonlar kullanılmıştır. Belirtilen varsayımların kullanımıyla, tesadüfi proseslere sahip sistem matematiksel olarak modellenmiştir.

Modelin özellikleri aşağıda belirtilmiştir.

- Şikâyetlerin geliş sayısında sınırlama bulunmuyor.
- İlgili bölümlere ve çalışan kişilere gelecek şikâyet sayısında sınırlama bulunmuyor.
- İlgili bölümlerde görev alacak kişi sayısı kısıtlıdır.
- İlgili bölümün personeli yalnızca kendi bölümüne iletilen şikayetleri çözüyor
- Her bölümde çalışan kişiler tüm gün (8 saat) çalışmaktadır.

Problemin hipotezleri aşağıdadır.

- Proseslerde çalışan kişilerin ücreti eşit varsayılmıştır.
- Proseslerde çalışan kişilerin hızları aynı kabul edilmiştir.
- Masraflar, yalnızca işgücü ve bekleme masrafıdır.
- Bölümlerin servis süreleri aynı değildir.
- Ulaşan şikayetlerin birbirine göre önceliği yoktur.
- Proseslerde çalışan servis elemanları kendi işlerini biliyorlar (öğrenme özelliğine ihtiyaç bulunmuyor),
- Sisteme ulaşan bütün şikayetler doğru şikayet olarak alınmış ve çözüm bulma çalışması başlatılmıştır.
- Problemin kök nedeninin ve çözümünün ilk seferde doğru olarak bulunduğu kabul edilmiştir.
- Ortalama varış ve servis zamanlarının üstel dağılıma uyduğu varsayılmıştır.
- Kuyruk modelindeki azami ortalama servis süresinin ( $s_u$ ), ortalama geliş süresi  $\lambda$ 'yı geçtiği dengeli hal kabul edilmiştir.

Modelde kullanılan notasyonlar aşağıdadır.

İndis :  $i = 1 \dots n$   $i$ : birim indisi,

Karar değişkenleri

$s$  : Servis elemanı sayısı (adet)

Kısıtlar

Uygulamadaki verilere göre her bir süreçte yer alacak servis elemanı sayısı  $s \geq 1$  ile ifade edilmiştir.

Parametreler

$C_s$ : Her bir servis elemanının maliyeti (TL/gün)

$C_w$ : Kuyruk sistemindeki her müşteri şikayeti için bekleme süresi maliyeti (TL/gün)

$$E(TC) = E(WC) + E(SC) \quad (4)$$

$E(TC)$ : Birim zaman başına beklenen toplam (servis + bekleme) maliyet (TL/gün)

$E(WC)$ : Birim zaman başına beklenen bekleme maliyeti (TL/gün)

$E(SC)$  = birim zaman başına beklenen servis maliyeti, her sunucunun maliyeti aynı olduğunda, servis maliyeti  $E(SC)=C_s s$ ,

$L$  : Kuyruk sisteminde bekleyen toplam şikâyet sayısının beklenen değeri (adet)

$L_q$  : Beklenen kuyruk uzunluğu (işlem gören şikâyetler hariç)

$n$  :  $t$  anında kuyruk sistemindeki toplam şikâyet sayısı (adet)

$P_0$  : Kuyruk sisteminde sıfır adet şikâyet bulunma olasılığı

$P_n$  : Kuyruk sisteminde tam olarak  $n$  adet şikâyetin bulunma olasılığı

$s_i$  : Her bir birimdeki servis elemanı sayısı (kişi)

$W$  : Her bir şikâyetin sistemde kalma zamanı (servis zamanı dahil – gün)

$W_q$  : Kuyruksız kalma zamanı (servis zamanı dahil değil - gün)

$W_s$  : Kuyruksız bekleyen şikâyet gelişinin ortalama servis zamanı (gün)

$\lambda$ : Şikâyetlerin ortalama geliş hızı (şikâyet/gün)

$\lambda_n$  : Sistemde  $n$  adet şikâyet mevcutken yeni şikâyet gelişlerinin ortalama hızı.  $\lambda_n$  tüm  $n$  değerlerinde aynı ise, bu  $\lambda$  sabiti ile belirtilir.  $1/\lambda$  (gün) gelişler arasındaki zamandır.

$\mu_n$ : Sistemde  $n$  adet şikâyet varken şikâyetlerin ortalama servis süresi (1/gün). Beklenen servis süresi  $1/\mu$  (gün)

$\rho$  : Kullanım faktörü

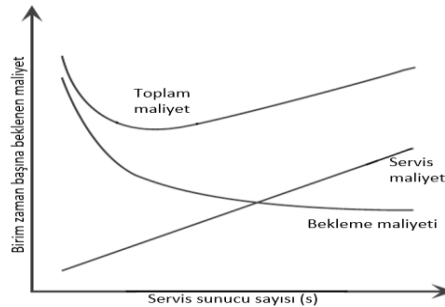
$\rho_i$  : Çözüm araştıran  $i$ . birim için kullanım oranı faktörü

Modelin Amaç Fonksiyonu: Şikâyetleri ele alma sisteminde şikâyetleri kapatma maliyeti, proseslerde çalışan kişilerin ( $s$ ) maliyetidir. Bu modeli çözme metodu,  $s$ 'nin aldığı belirli değerler için  $E(TC)$  yi belirlemek ve en az olan değeri seçmektir. Modelin amaç fonksiyonu eşitlik (5) ile formüle edilmiştir (Hillier ve Lieberman, 2010).

$$\text{Minimize } E(TC) = C_s * s + E(WC) = C_s * s + C_w * L \quad (5)$$

Karar değişkeni sunucu sayısı olduğunda amaç fonksiyonunu (5) formüle etmek için,  $E(TC)$  birim zamandaki beklenen toplam maliyet,  $E(SC)$  birim zamandaki beklenen hizmet maliyeti,  $E(WC)$  birim zaman başına beklenen bekleme maliyeti. Daha sonra amaç,  $E(TC) = E(SC) + E(WC)$ 'yi en aza indirecek şekilde sunucu sayısını seçmektir. Her sunucunun maliyeti aynı olduğunda hizmet maliyeti  $E(SC) = C_s * s$  olur, burada  $C_s$ , bir sunucunun birim zaman başına marjinal maliyetidir. Herhangi bir  $s$  değeri için  $WC$ 'yi değerlendirmek için,  $L = \lambda * W$  kuyruk sisteminde birim zaman başına beklenen toplam bekleme miktarını vermektedir. Dolayısıyla bekleme maliyeti, bekleme miktarıyla orantılı olduğunda bu maliyet şu şekilde ifade edilebilir. Lineer durum için, M/M/s kuyruk modelinde  $E(WC) = C_w * L$  olur (6).

$$E(WC) = C_w \sum_{n=0}^{\infty} n P_n = C_w L \quad (6)$$



Şekil 7. Servis sunucu sayısının beklenen maliyet ile değişimi

Şikâyetlerin gelişleri tesadüfidir, farklı bölümlerin şikâyeti çözme zamanları da tesadüfidir. Modelde çözüm zamanlarının ortalaması kullanılmıştır. Modelimizde her bölümün harcadığı sürelerin toplamı, ortalama şikâyet giderme süresi olarak hesaplanmıştır. Kararlı halde yeterince zaman geçince, modelin konumu başlangıç durumuna ve geçen süreye bağımlı olmaz. Kuyruk modeli, ortalama maksimum servis hızının ( $s*\mu$ ) ortalama geliş hızını ( $\lambda$ ) geçtiği istikrarlı duruma hedeflenmiştir. Şekil 7'deki gibi (Hillier ve Lieberman, 2010) bekleme hattı için optimum çözüm aranmaktadır.

Kuyrukta kalma zamanı sistem içinde görev alan kişi sayısına ve şikâyetlerin gelişler arası hızına göre değişiklik gösterir. Sistemde çalışan kişi sayısı arttıkça bekleme maliyeti azalır, fakat serviste çalışan kişilerin maliyeti artar. Proseslerde çalışan kişi sayısı ve bekleme zamanını birbirine bağlamak için, kuyruk modeli denklemlerinden faydalanılmıştır. Kuyruk teorisine ait genel denklemler (7) ~ (20) aşağıda verilmiştir.

$$\rho = \lambda / (s * \mu) < 1 \quad (7)$$

$\rho$  = Servis tesisi için kullanım faktörüdür.

$$\sum_{i=1}^n P_i = 1 \quad (8)$$

$$\lambda = \sum_{i=1}^n \lambda_i \quad \lambda = \lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_n \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (9)$$

Üstel dağılımın toplama ve bölünmeden etkilenmeme özelliği kullanılarak kuyruk sistemi modeli kurulmuştur. Geliş sürecinin Poisson olması özelliği üstel dağılım için de geçerlidir.  $\rho$  çözüm araştıran i. birim için kullanım oranı faktörü olmak üzere,  $s\mu$  ortalama varış oranı  $\lambda$ 'yı aştığında (7) bu modele uyan bir kuyruk sistemi sonunda kararlı durum haline ulaşacaktır. n farklı tipte şikâyetin  $\lambda_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) parametreye sahip Poisson gelişine göre sistem içerisine girdiğini kabul edelim (8). Şikâyet gelişleri tesadüfi olup birbirine bağlı değildir. Bu özellikten tüm şikâyet geliş sürecinin yine  $\lambda = \lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_n$  parametrelili bir Poisson sürecine uyduğu söylenebilir.  $P_i$  sisteme ulaşan şikâyetlerin i. inci tip olma olasılığıdır. Ayrıca,  $\lambda_i = P_i * \lambda$  olsun. Bu özellik, her bir "i" şikâyeti için varış prosesinin tekrar  $\lambda_i$  parametrelili Poisson süreci olacağını ifade eder (Hillier ve Lieberman, 2010). Kuyruk sisteminde, s (sistemdeki kişi sayısı),  $\mu$  (ortalama servis zamanı) ve  $\lambda$  (her bölüme gelen ortalama şikâyet varış zamanı). Problemde,  $\mu$ ,  $\lambda$  ve  $C_s$  değerleri bellidir. Bir servis işletmesinde  $\mu$  ve  $\lambda$  belliyse, çalışan kişi sayısı tespit edilebilir. Kurulan modelde, her farklı bölüme varan şikâyetlerin kuyrukta kalma zamanı çok kanallı M/M/s tekniğine göre (gelişler arası süre(M) ve servis süresi(M) Poisson veya Markovyan, s=servis sayısı) aşağıdaki gibi hesaplanabilir, bu değerler (5) numaralı formülde yazılarak şikâyetin toplam maliyeti hesaplanır (Hillier ve Lieberman, 2010). Çoklu servis sayısı ( $s > 1$ ) durumuna ilişkin sonuçlar aşağıdaki (10) ~ (20) denklemlerinde verilmiştir.  $s > 1$  olduğunda  $C_n$  faktörü denklem (11) ile olasılık dağılımı  $P_0$  denklem (11) ve (12) ile verilmiştir.

$$C_n = \begin{cases} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^n / n! & \text{Eğer } n = 1, 2, \dots, s \text{ ise} \\ \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^n / (s! s^{n-s}) & \text{Eğer } n = s, s + 1, \dots, \text{ ise} \end{cases} \quad (10)$$

$$P_0 = 1 / \left( \sum_{n=0}^{s-1} \left( \frac{\lambda}{\mu} \right)^n / n! + \frac{\left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^s}{s! \left(1 - \left(\frac{\lambda}{s\mu}\right)\right)} \right) \quad (11)$$

$$P_n = \begin{cases} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^n / n! P_0 & \text{Eğer } 0 \leq n \leq s \text{ ise} \\ \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^n / (s! s^{n-s}) P_0 & \text{Eğer } n \geq s \text{ ise} \end{cases} \quad (12)$$

$$P_n = C_n P_0 \quad n = 0, 1, 2, \dots \text{ Durağan durum olasılığı} \quad (13)$$

$$W_q = L_q / \lambda \quad (14)$$

$$W = W_q + (1/\mu) \quad (15)$$

$$\sum_{n=0}^{\infty} P_n = 1 \quad \left( \sum_{n=0}^{\infty} C_n \right) P_0 = 1 \quad (16)$$



$$P_0 = 1 / \left( \sum_{n=0}^{\infty} C_n \right) \quad (17)$$

$$L = \sum_{n=0}^{\infty} n P_n \quad (18)$$

$$L = \frac{P_0 \left( \frac{\lambda}{\mu} \right)^s \rho}{s!(1-\rho)^2} \quad (19)$$

$$L_q = \sum_{n=0}^{\infty} (n-s) P_n \quad L_q = \frac{\left( \frac{\lambda}{\mu} \right)^s \rho}{s!(1-\rho)^2} \quad (20)$$

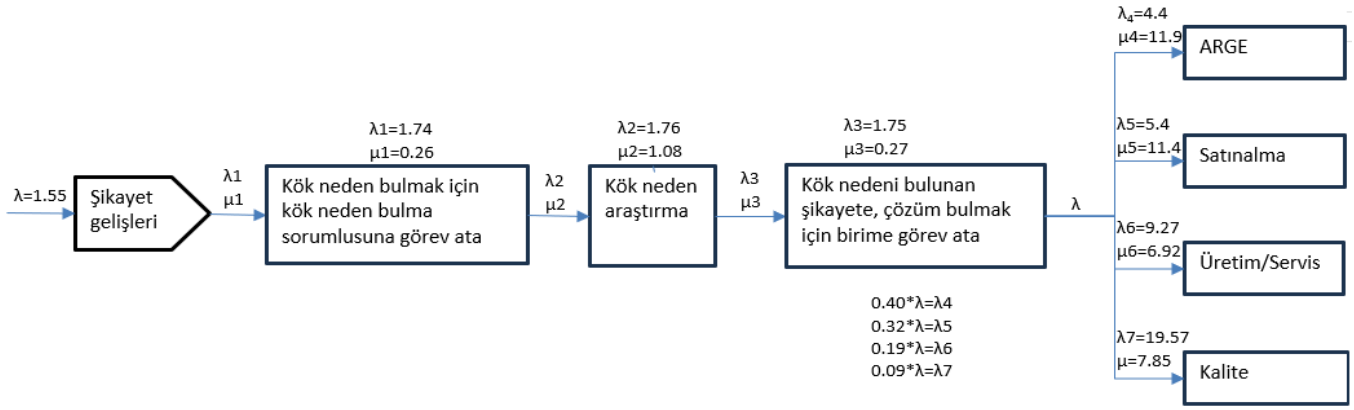
$\lambda < s * \mu$  olması koşuluyla istenilen t anında, s,  $\lambda$  ve  $\mu$  değerleri için tüm hesaplamalar Excel programı ile yapılabilir (Hillier ve Lieberman, 2010). Eğer  $\lambda \geq s * \mu$  olursa, ortalama varış hızı servisi tamamlamanın maksimum ortalama değerini aşarsa, bu durumda kuyruk sınırsız olarak büyür, dolayısıyla önceki kararlı durum çözümleri uygulanamaz.

## BULGULAR VE TARTIŞMA

i. Matematiksel Model Sonuçları: Servis zamanının üstel olmadığı çok kanallı kuyruk modelinin tam çözümü yoktur. Bunun yanında, gelişler arası ve servis zamanları üstel dağılırsa matematiksel formüller yardımıyla çözülebilir. Bu kapsamda şikayetleri ele alma sisteminde, birim şikâyet giderme zamanının maliyeti formüllerle ifade edilip çözüm üretilmiştir. Şekil 8'de gösterilen kuyruk modelindeki temel proseslerin  $\lambda$  ve  $\mu$  değerleri uygulamadan alınan veriler dikkate alınarak çözülmüştür. Şikâyeti çözme maliyeti (5) nolu formül ile hesaplanmıştır (Hillier ve Lieberman, 2010). Benzer olarak tüm süreçler için de belirtilen parametreler ayrı ayrı hesaplanmıştır (Tablo 6) (kök neden araştırmak için atama, kök nedeni bulma, çözüm bulan birime atama, Ar-Ge, satın alma, üretim, kalite çözüm araştırma süreleri). Problemden  $C_s$  ile  $\lambda$  ve  $\mu$  değerleri bellidir. Bu veriler kullanılarak her bir süreçte yer alan, servis elemanı adedi s hesaplanabilmiştir. Hesaplamalarda her gün için  $C_s=70$  TL/kişi ve  $C_w=140$  TL/kişi alınmıştır. İlave olarak, serviste çalışan kişilerin (s) tam gün 8 saat çalıştığı kabul edilerek hesaplamalar yapılmıştır.

**Tablo 6.** Temel proseslerin gelişler arası ( $\lambda$ ) ve servis ( $\mu$ ) zamanları

Süreç ismi	$\lambda$ (gün)	$\lambda$ (1/gün)	$\mu$ (gün)	$\mu$ (1/gün)
Şikayet gelişleri	1,55			
Kök neden bulma için görev atama	1,74	0,575	0,262	3,817
Kök neden araştırma	1,76	0,568	1,080	0,926
Kök neden uygunluk kararı	1,75	0,569	0,275	3,636
Ar-Ge çözüm araştırma	4,40	0,227	11,90	0,084
Satın alma çözüm araştırma	5,40	0,185	11,40	0,088
Üretim/Servis çözüm araştırma	9,27	0,108	6,92	0,145
Kalite çözüm araştırma	19,57	0,051	7,85	0,127



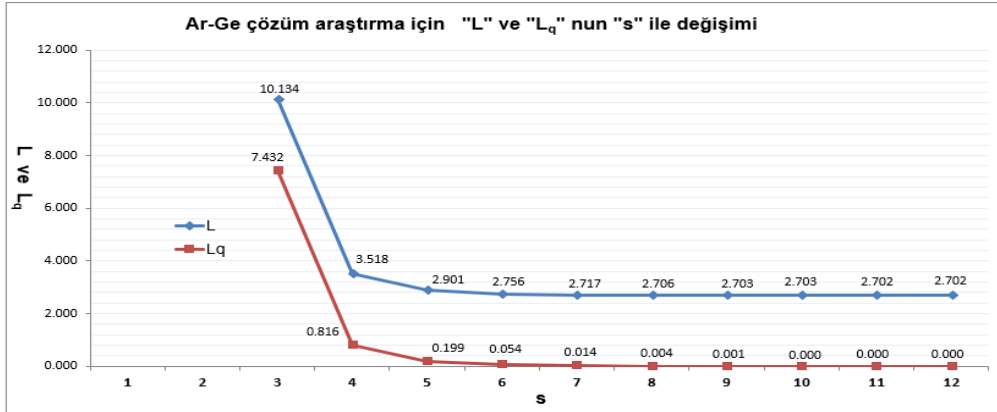
Şekil 8. Müşteri Şikâyet Değerlendirme Sistemine Ait Kuyruk Modeli

Ar-Ge çözüm bulma bölümüne atama için tüm parametreler Tablo 7’de verildiği gibi hesaplanmıştır.

Tablo 7. Ar-Ge Çözüm Bulma Birimi İçin Parametreler

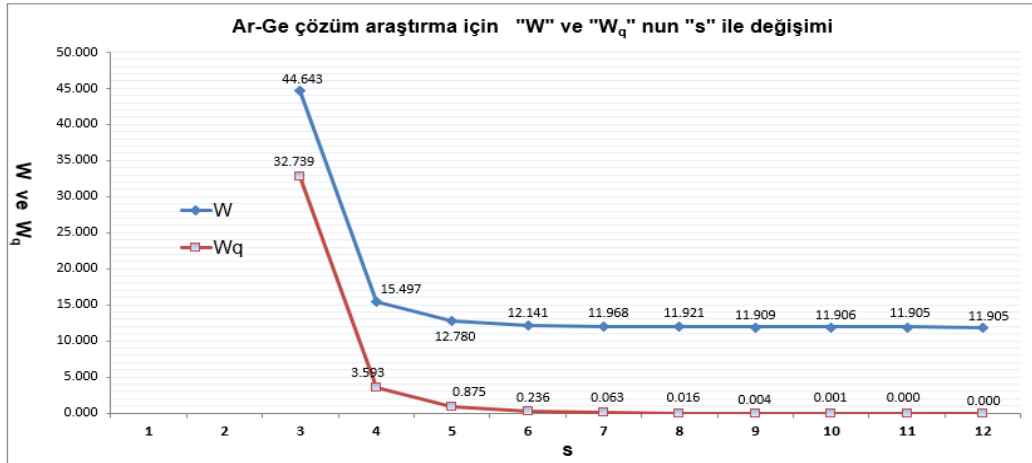
s	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
L	10,13	3,52	2,90	2,76	2,72	2,71	2,70	2,70	2,70	2,70
L <sub>q</sub>	7,4	0,8	0,2	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
W	44,6	15,5	12,8	12,1	12,0	11,9	11,9	11,9	11,9	11,9
W <sub>q</sub>	32,7	3,6	0,9	0,2	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
C <sub>s</sub> s	210	280	350	420	490	560	630	700	770	840
E(WC)	1419	493	406	386	380	379	378	378	378	378
E(TC)	1629	773	756	806	870	939	1008	1078	1148	1218
ρ	0,90	0,68	0,54	0,45	0,39	0,34	0,30	0,27	0,25	0,23

Şekil 9’da Ar-Ge bölümüne çözüm bulma için atama bekleyen şikâyetlerin adedi "L" ile kuyruk uzunluğu "L<sub>q</sub>" ve "s" kişi adedi yükseldikçe düşmektedir. s≥5 üzeri değerlerde yaklaşık olarak sabit kalmaktadır. s=3 iken Ar-Ge’de bekleyen iş sayısı 10,13 adettir. Kuyruktaki iş sayısı ise 7,4 adettir. Ar-Ge için s=5 eleman yeterli görülmektedir.



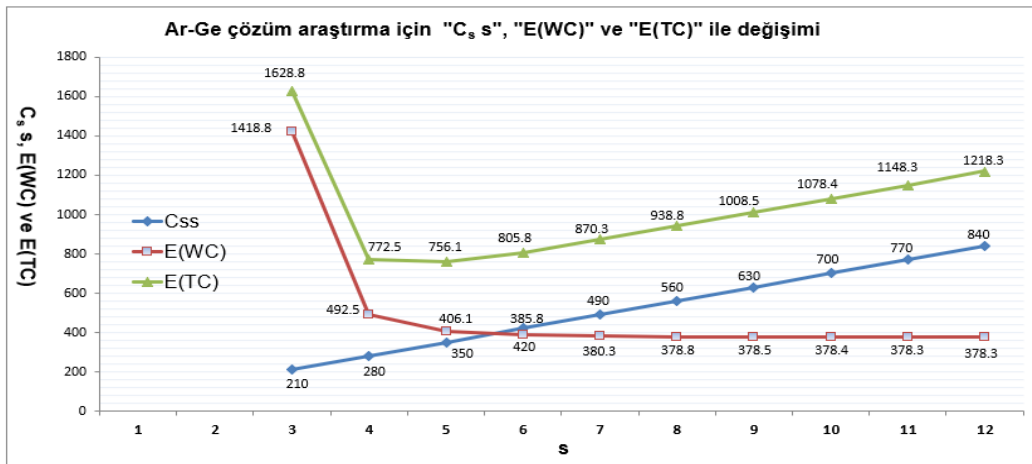
Şekil 9. Ar-Ge Çözüm Bulma Biriminde L ve L<sub>q</sub>'nun s ile Değişimi

Ar-Ge bölümünün çözüm bulma zamanı "W" ve şikâyet görevinin kuyruktaki kalma zamanı "W<sub>q</sub>", "s" kişi adedi yükseldikçe düşmektedir (Şekil 10). s=3 iken şikâyet ortalama 44,6 günde kapanmaktadır. Kuyruktaki süre ise ortalama 32,7 gün olmaktadır. s=5 olduğunda şikâyetin toplam süresi ortalama 12,8 gün'dür. Sadece kuyruktaki bekleme süresi ise ortalama 0,88 gün olmuştur. s≤2 değerlerinde sonuç elde edilememiştir.

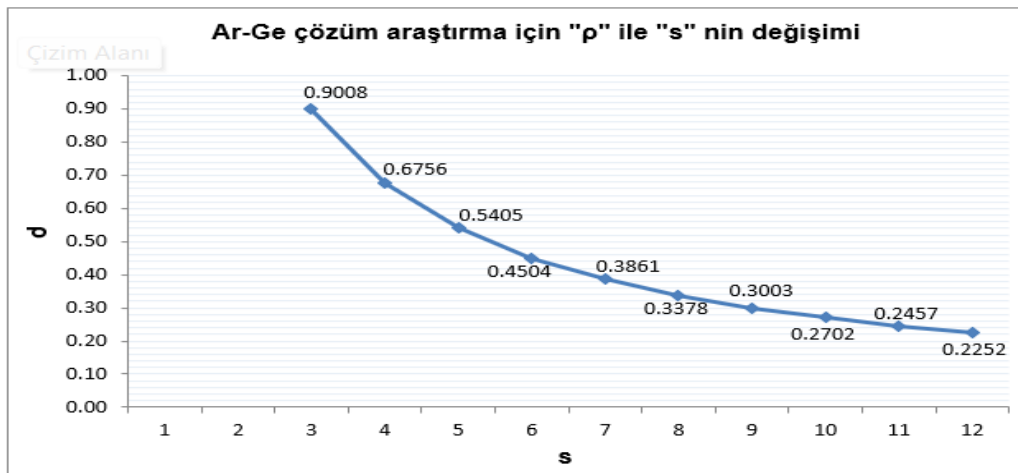


Şekil 10. Ar-Ge Bölümü için s ile W ve W<sub>q</sub>'nin Değişimi

Şekil 11'de ise, Ar-Ge bölümünün çözüm bulma maliyeti "C<sub>s</sub>", beklenen toplam maliyet "E(TC)" ile kuyrukta kalma maliyeti E(WC), "s" kişi adedi yükseldikçe yükselmektedir. s=1 ve s=2 için çözüm bulunamamıştır. Çözüm üretilmesi için s'nin en az 3 kişi olması gereklidir. s=3 iken beklenen maliyet günlük 1628,8 TL, kuyrukta kalma masrafı ise 1418,8 TL'dir. Şekilden Ar-Ge bölümünde 5 kişi çalışınca optimum değerler elde edilmiştir.



Şekil 11. Ar-Ge Bölümü için s ile E(WC), C<sub>s</sub> ve E(TC)'nin Değişimi



Şekil 12. Ar-Ge Bölümü için ρ ile s'nin Değişimi

Belirtilen s değerleri için,  $\rho = \lambda / (s * \mu) \leq 1$  sağlamaktadır. s=3 iken,  $\rho=0,9008$ , s=4 iken  $\rho=0,6756$  ve s=5 iken  $\rho=0,5405$  değerini almaktadır. Bölüm iş planına göre servis elemanının kalan zamanı  $\rho=0,4595$  (%45,95) başka işler yapmak için değerlendirilebilir (Şekil 12).

Matematiksel model ile, kuyrukta bekleyen toplam şikâyet sayısı, beklenen kuyruk uzunluğu (işlem gören şikâyetler hariç), her bir şikâyetin sistemde kalma zamanı (servis zamanı dahil), kuyrukta kalma zamanı (servis zamanı dahil değil), birim zaman başına beklenen toplam (servis + bekleme) maliyet, birim zaman başına beklenen bekleme maliyeti, birim zaman başına beklenen servis maliyeti, servis maliyeti ve servisin kullanım oranı hesaplanmıştır.

ii. Simülasyon Model Sonuçları: Uygulamaya ait her sürecin zaman verilerinden faydalanılarak her sürecin zaman dağılımları bulunmuştur. Elde edilen dağılımlar ve proseslerde görev alan personel sayısı Arena yazılımına tanımlanmıştır. Şikâyetlerin gelişler arası zamanları, kök neden araştırma için görev atama zamanı, kök neden araştırma zamanı, çözüm birimine görev atama zamanı, çözüm araştıran bölümlerin çözüm bulma zamanları elde edilmiştir. Simülasyon programı hem gerçek servis süreleri dağılımı ile hem de üstel dağılımlar ile ayrı ayrı çalıştırılmıştır. Verilerin zaman birimi gün 'dür. Mevcut verilere göre şikâyetlerin varışları EXPO (1,55) olan üstel dağılıma karşılık gelmektedir. Ortalama olarak her 1,55 günde 1 adet şikâyet gelişmektedir.

iii. Simülasyon modeli ile elde edilen sonuçların, matematiksel model ile bulunan sonuçlarla karşılaştırılması: Elde edilen sonuçlara göre simülasyon model ve matematiksel model sonuçları birbiri ile uyumlu olmuştur (Tablo 8). Matematiksel model ile bulunan üstel dağılım sürelerine göre bir adet şikâyet ortalama 13,663 günde kapanmıştır, Simülasyon ile bulunan üstel dağılım sürelerine göre ise bir adet şikâyet ortalama 13,715 günde kapanmıştır ve aralarındaki fark sadece %0,381 olmuştur.

Simülasyon ile bulunan gerçek dağılım sürelerine göre bir adet şikâyet ortalama 14,585 günde, simülasyon ile bulunan üstel dağılım sürelerine göre ise bir adet şikâyet ortalama 13,715 günde kapanmıştır ve fark %5,965 olmuştur.

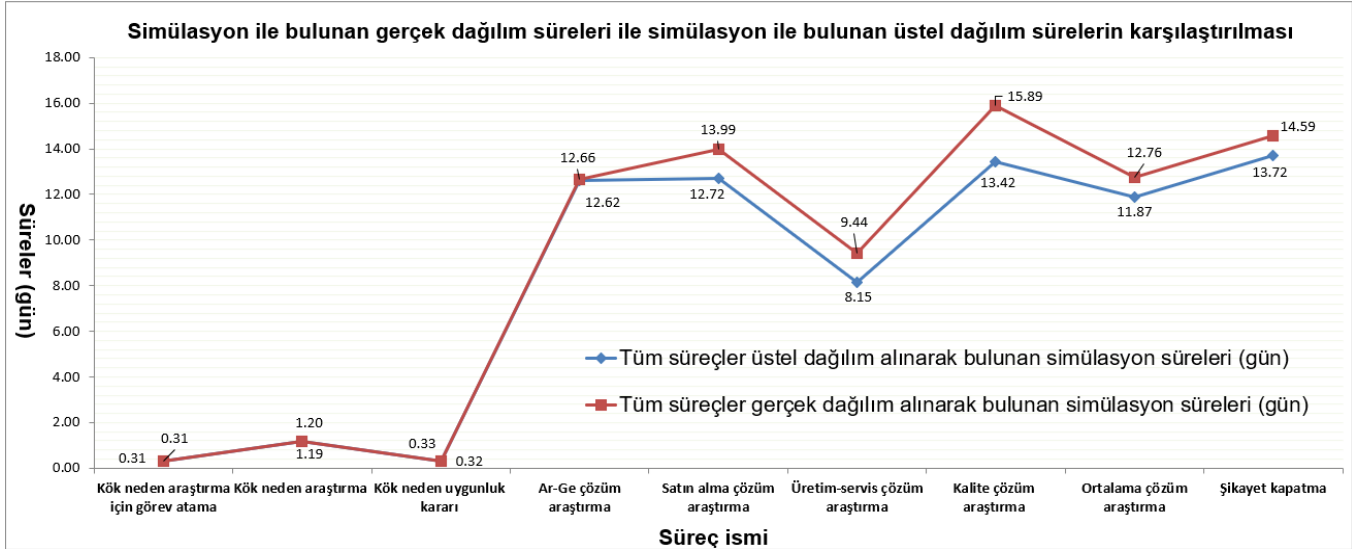
**Tablo 8. Her Birimdeki Eleman Sayısı ve Toplam Maliyeti**

Süreç ismi	s (adet)	Toplam maliyet (TL/gün)	Matematiksel model ile bulunan üstel dağılım süreleri (gün)	Simülasyon ile bulunan gerçek dağılım süreleri (gün)	Simülasyon ile bulunan üstel dağılım süreleri (gün)	Üstel dağılımlı matematiksel model ve gerçek dağılımlı simülasyon farkı (%)	Üstel dağılımlı matematiksel model ve üstel dağılımlı simülasyon farkı (%)
Kök neden araştırma için görev atama	1	94,48	0,308	0,308	0,307	0,0000	0,3247
Kök neden araştırma	2	234,79	1,192	1,19	1,196	0,1678	-0,3356
Çözüm birimine görev atama	1	95,92	0,326	0,324	0,327	0,6135	-0,3067
Ar-Ge çözüm araştırma	5	756,1	12,78	12,662	12,62	0,9233	1,252
Satın alma çözüm araştırma	4	605,34	12,561	13,988	12,72	-11,361	-1,266
Üretim-servis çözüm araştırma	2	261,07	8,007	9,436	8,15	-17,847	-1,786
Kalite çözüm araştırma	1	163,95	13,158	15,891	13,42	-20,771	-1,991
Ortalama çözüm araştırma	12	560,508	11,837	12,764	11,87	-7,831	-0,279
Şikâyet kapatma sistemi	16	985,698	13,663	14,585	13,715	-6,749	-0,381

Gerçek sistemin gelişler arası ve servis zamanları üstel olarak alındığında, ortalama şikâyet giderme zamanı % 6,749, bölümlerin ortalama çözüm bulma zamanı ise %7,831 daha düşük çıkmıştır. Matematiksel model ile bulunan değerler aynı şartlardaki simülasyon değerleriyle karşılaştırılmıştır. Üstel dağılımlı matematiksel modele göre 16 kişi ile ortalama 13,66 günde, günlük 985,7 TL masrafla bir adet şikâyete çözüm bulunmaktadır, gerçek dağılımlı simülasyona göre ise ortalama %6,749 daha fazla maliyetle 14,59 günde 1052,22 TL masrafla bir adet şikâyet çözülmektedir (Tablo 8). Şikâyet gelişleri ve servis sürelerinin gerçek ve üstel dağılımları Tablo 9'da verilmiştir.

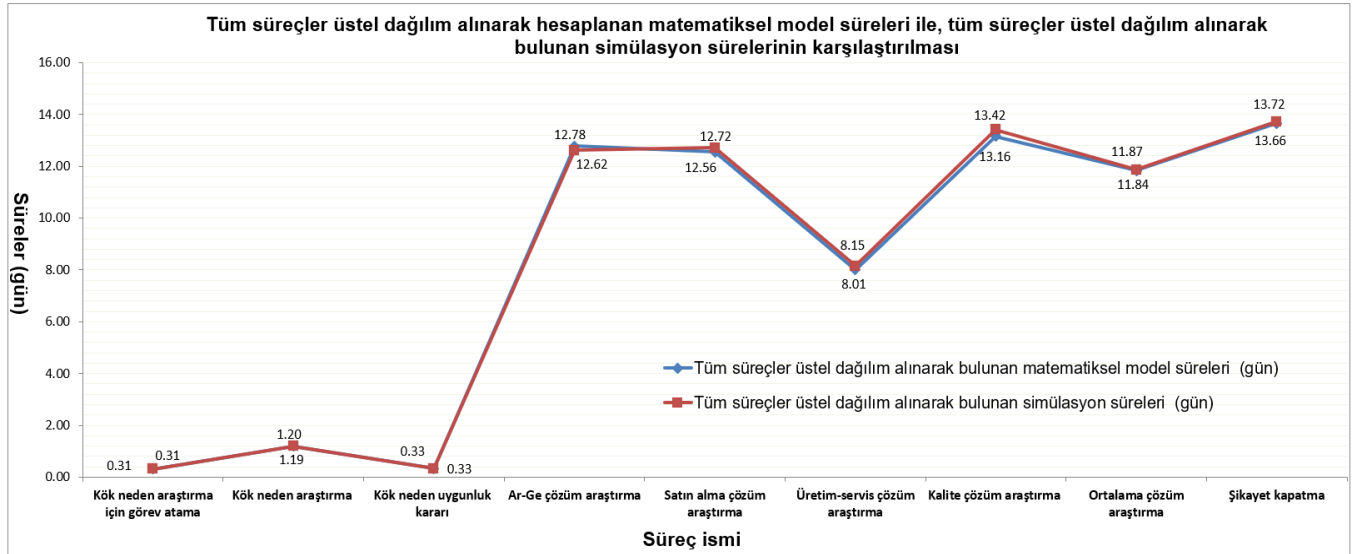
**Tablo 9. Servis Sürelerinin Gerçek ve Üstel Dağılımı**

Süreç ismi	Servis sürelerinin gerçek dağılımları	Servis sürelerinin üstel dağılımları
Şikâyet gelişleri	EXPO(1,55)	EXPO(1,55)
Kök neden bulma için görev atama	0,771*BETA(0,705 , 1,36)	EXPO(0,262)
Kök neden araştırma	EXPO(1,08)	EXPO(1,08)
Kök nedenin uygunluk kararı	0,821*BETA(0,712 , 1,41)	EXPO(0,275)
Ar-Ge çözüm araştırma	GAMM (11 , 11,6)	EXPO(11,9)
Satın alma çözüm araştırma	EXPO (11,4)	EXPO(11,4)
Üretim/Servis çözüm araştırma	WEIB(6,49 , 0,877)	EXPO(6,92)
Kalite çözüm araştırma	LOGN(8,68 , 14,1)	EXPO(7,85)



Şekil 13. Gerçek ve Üstel Dağılımlara Ait Simülasyon Süreleri

Servis süreleri gerçek ve üstel olan dağılımlara ait simülasyon süreleri Şekil 13'te verilmiştir. Gelişler arası ve servis süreleri üstel dağılım alınarak, aynı şartlarda hem simülasyon yöntemi ile hem de matematiksel olarak çözülmüştür. Sonuçlara göre her ikisi üstel olan matematiksel formül ile simülasyon çıktı değerleri birbirine yakın çıkmıştır (Şekil 14).



Şekil 14. Her İki Üstel Dağılım Olan, Matematiksel Model ve Simülasyon Model Sonuçları

Çalışmanın sonuçlarına göre şikayet geliş zamanları ve servis zamanlarını üstel olarak almanın pratikte uygulanabilir olduğu görülmektedir. Endüstride yer alan şirketler tarafından geliş zamanları ve servis zamanları üstel dağılım alınarak ihtiyaç duyulan eleman sayıları hesaplanabilecektir. Optimum eleman kullanımı ile şirketler kendi hedeflerine uygun olarak müşteri memnuniyetini arttıracak ve elemanların verimli kullanılmasına katkı sağlayacaktır.

## SONUÇLAR

Müşteri şikayetlerini çözme ve müşteriye kazanmak için yapılan çalışmalar sadece ülkemizde değil tüm dünyada öncelik gösterilen bir konudur. Liu & Yen (2016) otobüs yolcularında alınan şikayetleri analiz etmiş şikayet proseslerini geliştirerek yeni model önermiştir. Belgin (2019) çalışmasında belli kısıtlar ile üretim hatlarında çalışanların işe atanma optimizasyonunu simülasyon tekniği ile tespit etmiştir. Çalışma sonucunda iş gücü verimliliğinde %4,5 düzeyinde artış, yarı mamulde ise %16,9 düzeyinde azalma olmuştur. Baykoç (2021), bir Fast Food mağazası müşterilerinin kuyrukta fazla beklemesini önlemek için, var olan sistemi incelendikten sonra, mevcut sisteme alternatif olarak önerilen sistemde ele alınan performans ölçütleri olan müşterinin kuyrukta ve sistemde geçirdiği zaman, kuyruktaki müşteri sayısı ve makina kullanım oranında önemli iyileşmeler kaydedilmiştir. Çekici



& Yüregir (2021) tarafından yapılan çalışmada ise, müşteri şikayet değerlendirme sisteminin süreçleri simülasyon metodu ile incelenmiş ve süreçler sadeleştirilerek en verimli sistem belirlenmiştir. Eski sistem sonuçları ile karşılaştırıldığında, yeni sistemin ortalama şikayet kapanma süresi %38,9 oranında kısalmıştır. Kocaer & Kuruca (2023) Servis sektörü için kuyruk modelinin simülasyonunu yapabilen, verimliliğini ölçebilen ve işgücünü optimize edebilen bir simülasyon programı (QS-Sim Tool) oluşturmuştur.

Literatürdeki çalışmalar genellikle tek yöntem ile örneğin ya simülasyon yöntemi ya da matematiksel model kullanarak problemlere çözüm aramaya çalışmıştır. Bu çalışmada ise hem simülasyon hem de matematiksel model yaklaşımı ile müşteri şikayetlerini çözme süresi ve maliyeti araştırılmıştır. Çalışmada, müşteri şikayetlerini değerlendirmek ve beklenen seviyede çözmek için süreçler belirlenmiş ve bu süreçlerin zamanları istatistiksel olarak analiz edilmiştir. Ana süreçlerin zaman dağılımlarını kullanarak simülasyon modeli kurulmuştur. Şikâyet kapanma maliyetini minimum yapabilmek için sistemdeki optimum kişi sayısı simülasyon optimizasyon metodu ile tespit edilmiştir. Çalışmada ayrıca şikâyet değerlendirme sistemine ait şikâyet giderme zamanının maliyeti formüllerle matematiksel ifadelerle dönüştürülmüş ve çözüm üretilmiştir. Bu kapsamda, geliş süreleri ve servis süreleri üstel dağılım olarak alınmış olup sonrasında, hesaplanan sonuçlar aynı şartlardaki simülasyon bulguları ile mukayese edilmiştir. Karşılaştırma sonucunda simülasyon ve matematiksel model sonuçlarının birbirine çok yakın olduğu tespit edilmiştir. Servis süreleri üstel dağılımlı olan matematiksel model ve servis süreleri üstel dağılım olan simülasyon model çözümleri arasındaki şikayet kapatma süresi farkı sadece % 0,381 olmuştur. Ayrıca, servis süreleri üstel dağılım kabul edildiğinde elde edilen şikayet kapanma süresinin değeri, servis süreleri gerçek dağılıma sahip olan şikayet kapanma süresinden %6,749 daha düşük çıkmıştır. Şirketler geliş sürelerini ve servis sürelerini üstel dağılım olarak matematiksel model yöntemini kullanabilir ve şikayet kapatma süresini, kullanılacak eleman sayısını ve şikayet kapatma maliyetini hesaplayabilir. Geliştirilen modeller, şikayetlerin varışından tamamlanışına kadar olan evreleri ve hangi süreçte ne kadar zaman harcandığını ve optimum eleman sayısını belirlemektedir. Bu modellerden faydalanarak elemanların sayısının artırılması/azaltılması durumunda hangi süreçlerde darboğaz yaşanacağı da belirlenmektedir. Çalışmada uygulanan yöntemler sadece müşteri şikayetleri için değil ayrıca üretim hatlarında, lojistik zinciri uygulamalarında ve diğer sektörlerde hayata geçirilebilir. Modele ilave süreç ve eleman eklenerek/çıkarılarak yeni uygulamalar yapılabilir. Bu model, endüstride hem servis hem de üretim sektörü gibi birçok alanda uygulanabilme özelliğine sahiptir. Farklı şirketler kendi süreçlerini bu yöntemle uyarlayabilir ve sonuçlar elde edebilir. Gelecekte yapılabilecek çalışmalar için öneriler aşağıda verilmiştir.

- i. Çalışmamız üretim ve servis sağlayan firmalar için şikâyetleri ele alma proseslerini kapsamaktadır. Fakat farklı sektörlerde ve farklı servis süreçlere ait veriler ile yeni uygulamalar yapılabilir.
- ii. Müşteri şikâyet sisteminin simülasyonu için Arena yazılımından faydalanılmıştır. Genetik algoritma, yapay sinir ağları, bulanık mantık gibi farklı yöntemler kullanarak çözümler bulmaya çalışılabilir.

## TEŞEKKÜR

Çalışmayı MMF2011D1 numaralı proje ile destekleyen Çukurova Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinatörlüğü'ne teşekkürlerimi sunarım.

## KAYNAKLAR

- Akdeniz, H.A. & Tatar, B. (2009). Hava limanında Kuyruk Simülasyonu: İzmir-Gaziemir Adnan Menderes Havalimanı Uygulaması. Dokuz Eylül Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi; 11(3): 03-12.
- Akın, H.K, Ordu M. (2022). A Novel Simulation-Based Two Stage Optimization Approaches For Nurse Planning, International Journal of Simulation Modelling, 21(4): 591-601.
- Altrok, T., & Melamed, B. (2007). Simulation Modelling and Analysis With Arena. Academic Press, Elsevier, USA, 440s.
- Armaneri, Ö. (2005). Bir Montaj Hattı Üretim Sisteminde Optimal İşgücü Dağılımının Arena Proses Analyzer (PAN) ve OptQuest Kullanılarak Belirlenmesi. Uygulamalı Bilimler ve Mühendislik Dergisi, 11(1), 1-16.
- Atalan, A. (2022). A cost analysis with the discrete-event simulation application in nurse and doctor employment management. Journal of Nursing Management, 30(3), 733-741.
- Atalan, A., Şahin, H., & Atalan, Y. A. (2022, September). Integration of Machine Learning Algorithms and Discrete-Event Simulation for the Cost of Healthcare Resources. In Healthcare (Vol. 10, No. 10, p. 1920). MDPI

- Atalan, A., & Dönmez, C.C. (2020), "Optimizing experimental simulation design for the emergency departments", *Brazilian Journal of Operations & Production Management*, 17(4). <https://doi.org/10.14488/BJOPM.2020.02>
- Atalan, A., & Donmez, C. C. (2019). Employment of emergency advanced nurses of Turkey: A discrete-event simulation application. *Processes*, 7(1), 48.
- Bahari, A., & Asadi, F. (2020). A Simulation Optimization Approach for Resource Allocation in an Emergency Department Healthcare Unit. *Global Heart*, 15(1): 14. DOI: <https://doi.org/10.5334/gh.528>
- Baş, İ., Tosun Ö., & Bayram, V. (2021). Robot yer seçimi ve işçi-istasyon ataması düşünceleri altında hat dengeleme optimizasyonu. Bir bulaşık makinesi fabrikası vaka analizi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 27(4), 495-503.
- Baykoç, Ö.F., Abacı, S., & Duyar, M. (2002). Tam Zamanında Üretim Sisteminin Servis Sistemlerine Uygulanabilirliği. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University* , 17(4), 139-155.
- Belgin Ö. (2019). Hybrid approach in a production line for multi-objective simulation optimization. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 34(4): 1847-1859.
- Carson, Y., & Maria, A. (1997). Simulation Optimization. Methods & Applications. *Proceedings of the 1997 Winter Simulation Conference* ed.
- Çekici, V., & Yüregir O.H., (2021). Process optimization of the customer complaints handling system and a new customer oriented model proposal, *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 36:2, 855-869.
- Çekici, V., & Yüregir O.H., (2020). Investigation and Analysis of Customer Complaints Handling System of the Companies in Turkey, *Çukurova University Journal of the Faculty of Engineering and Architecture*, 35 (3), 753-768.
- Çekici, V (2013). A Conceptual Model For Customer Complaint Handling Processes And Evaluation With Simulation Optimisation Method, *Cukurova University, Faculty of Engineering and Architecture, Industrial Engineering Doctoral Thesis*, Adana p247.
- Davidow, M. (2003). Organisational Responses to Costomer Complaints. What Works and What Doesn't. *Journal of Service Research*, 5(3), 225-250.
- Düzgit, Z., Toy, A.Ö, Çoban, S., Alibaşoğlu, Z., Tok, Ö., Özkeskin, Ö.T., Karakaya, M., & Bayrak, Y. (2019). Hizmet lojistiğinde iş atama ve rotalama politikaları tasarımı. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 25(9), 1071-1079.
- Estelami, H. (2000). The Profit Impact of Consumer Complaint Solicitation Across Market Conditions. *Journal of Professional Services Marketing*, 20 (1): 165- 195.
- Faed, A., Chang, E., Saberki, M., Hussain, O.K., & Azadeh, A. (2016). Intelligent Customer Complaint Handling Utilising Principal Component and Data Envelopment Analysis (PDA). *Applied Soft Computing*, 47 (1), 614-630.
- Fornell. C., & Wernerfelt, B. (1998). A Model for Customer Complaint Management Source. *Marketing Science*, Published by INFORMS, 7(3), 287-298.
- Greasley, A., & Barlow, S. (1998). Using simulation modelling for BPR: resource allocation in a police custody process. *International Journal of Operations & Production Management*, 18(9/10), 978-988.
- Güleryüz, S.S., Koyuncu M. (2023). Simulation of Intensive Care Bed Capacity Based On Mixture Distribution. *International Journal of Simulation modelling*, 22(2), 221-232.
- Hamad, W. A., & Arisha, A. (2013). Simulation-based framework to improve patient experience in an emergency department. *European Journal of Operational Research*, 224, 154-166.
- Hillier, F.S., & Lieberman, G.J. (2010). *Introduction to Operations Research* Ninth Edition, The McGraw-Hill Companies, page: 1075.
- İbiş, S., Kızıldemir, Ö., & Çöp, S. (2019). Evaluation of comments and e-complaints for five star hotel enterprises in Afyonkarahisar, *Electronic Journal of Social*, 18 (71), 1315-1324.
- Kim, C., Kim, S., Im, S., & Shin, C. (2003). The effect of attitude and perception on consumer complaint intentions. *Journal of Consumer Marketing*, 20 (4), 352-371.

- Koruca, H.İ., & Kocaer, E.R.(2024). Simulation software development and workforce optimization for service systems: QSSim software. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 39(1), 77-89.
- Lin, S.Y., & Horng, S.C. (2006). Ordinal Optimization Approach To Stochastic Simulation Optimization Problems And Applications. *Proceeding of the 15th Lasted International Conference. Applied Simulation and Modeling*. 26-28.
- Liu, W.K., & Yen, C.C. (2016). Optimizing Bus Passenger, Complaint Service through Big Data Analysis. *Systematized Analysis for Improved Public Sector Management. Sustainability*, 8 (12), 1-21.
- Mattila, A.S., & Mount, D.J. (2003). The impact of selected customer characteristics and response time on E-complaint satisfaction and return intent. *Hospitality Management*, 22, 135–145.
- Mutlu, Ö., Karagül, K., & Şahin, Y. (2022). Ulaştırma probleminin başlangıç uygun çözümünün belirlenmesi için en büyük maliyetten kaçınma yöntemi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 28(4), 569-576.
- Ordu, M. (2022). A Simulation-Based Decision-Making Approach to Evaluate the Returns on Investments. *International Journal of Simulation Modelling*, 2022, 21(3), 441-452. <https://doi.org/10.2507/IJSIMM21-3-609>.
- Ordu, M. & Korhan, E. (2022). Simülasyon Destekli Tesis Yerleşim Tasarımı ve İyileştirme Çalışmaları: Bir Tekstil Firması Örneği. *Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 5(Özel Sayı), 26-39. <https://doi.org/10.47495/okufbed.1034177>
- Ordu, M., Eren, D., TOFALLIS, C. (2020). Simulation-Based Outpatient Clinic Capacity Management Integrated With Population Growth Projection, *Journal of Industrial Engineering* 31(3), 411-429.
- Rossetti, M.D. (2010). *Simulation Modeling and Arena*. Editor: Repasky, N. And Ruel, C, John Wiley & Sons, Inc., Danvers, USA, 573.
- Şenses, S., Gölbaşı, O., & Bakal, İ.S. (2022). Madencilikte bir yedek parça envanter optimizasyonu çalışması. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 28(1), 128-138.
- Tian, X., Vertommen, I., Tsiami, L., Thienen, P., & Paraskevopoulos, S. (2022). Automated Customer Complaint Processing for Water Utilities Based on Natural Language Processing. *Case Study of a Dutch Water Utility Water*, 14, 674.
- Timur, M.N., & Sarıyer, N. (2004). Kayseri'deki Otomobil Bayilerinde Müşteri Tatmin Aracı Olarak Şikâyet Toplama Yöntemlerine İlişkin Bir Uygulama. *Erciyes Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, 1 (17) , 9-32.
- Uncu, & Koyuncu, M. (2023). An improved emergency medical service system simulation-optimization model with Poisson mixture distribution, *Journal of Engineering Research*, 11(3), 100-111.



# Kahramanmaraş Sütçü İmam University Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 20.11.2023  
Kabul Tarihi : 15.05.2024

Received Date : 20.11.2023  
Accepted Date : 15.05.2024

## PİRAZOL TÜREVİ BİR BİLEŞİĞİN KURAMSAL HESAPLAMALARI VE HIRSHFELD YÜZEY ANALİZİ

### THEORETICAL CALCULATIONS AND HIRSHFELD SURFACE ANALYSIS OF A PYROZOLE-DERIVED COMPOUND

Gonca ÖZDEMİR TARI<sup>1</sup> (ORCID: 0000-0001-5919-1778)

<sup>1</sup>Ondokuz Mayıs Üniversitesi, Vezirköprü Meslek Yüksekokulu, 55900, Samsun, Türkiye

\*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Gonca ÖZDEMİR TARI, gozdemir@omu.edu.tr

#### ÖZET

Bu çalışmanın temeli, pirazol grubu bir bileşiğin kuramsal hesaplamaları üzerine kurulmuştur. Molekül yapısı daha önce X-ışını (Wang vd., 2005) ile aydınlatılmış olan bileşiğin teorik hesaplamaları yapılmış, deneysel sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Bileşiğin en düşük enerjili kararlı durumuna ulaşabilmek için molekül Hartree Fock (HF) yöntemi ve Yoğunluk Fonksiyonel Kuramı (YFK)/B3LYP ve B3PW91 yöntemleri ve 6-311(d,p) ve 6-311++(d,p) baz setleriyle optimize edilmiştir. Moleküler yapının bu yöntemlerden B3LYP yöntemi ile en düşük enerjili duruma sahip olduğu belirlenmiştir. Molekülün reaktif olduğu bölgeleri belirleyebilmek için moleküler elektrostatik potansiyel haritaları, yük analizleri ve Fukui fonksiyonları belirlenmiş, sonuçlar karşılaştırılmıştır. Ayrıca, molekülde bulunan etkileşimlerin belirlenebilmesi için Hirshfeld yüzey analizi yapılmış, sonuçlar tartışılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Doğrusal Olmayan Optik Özellikler, Hirshfeld Yüzey Analizi, Pirazol Türevi Bileşikler, Yoğunluk Fonksiyonel Kuramı.

#### ABSTRACT

The basis of this study is based on theoretical calculations of a pyrazole group compound. Theoretical calculations of the compound, whose molecular structure was previously illuminated with X-rays (Wang et al., 2005), were made and compared with experimental results. In order to reach the lowest energy stable state of the compound, the molecule was optimized with the Hartree Fock (HF) method and Density Function Theory (DFT)/B3LYP and B3PW91 methods and 6-311(d,p) and 6-311++(d,p) basis sets. It was determined that the molecular structure had the lowest energy state by the B3LYP method, one of these methods. In order to determine the regions where the molecule is reactive, molecular electrostatic potential maps, charge analyzes and Fukui functions were determined and the results were compared. Additionally, Hirshfeld surface analysis was performed to determine the interactions in the molecule and the results were discussed.

**Keywords:** Nonlinear Optical Properties, Hirshfeld Surface Analysis, Pyrazole Derivative Compounds, Density Functional Theory.

ToCite: ÖZDEMİR TARI, G., (2024). PİRAZOL TÜREVİ BİR BİLEŞİĞİN KURAMSAL HESAPLAMALARI VE HIRSHFELD YÜZEY ANALİZİ. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 27(2), 447-458.

## GİRİŞ

Pirazol, beş üyeli bir halka sistemi olup, heterosiklik bileşiklerin önemli bir kısmında yer alan, farmakolojik, biyolojik ve endüstriyel etkilerinden dolayı araştırmalarda yer alan çok önemli bir bileşik sınıfıdır. Pirazol halkası içeren kimyasal bileşiklerin literatürde antikanser, antiviral, antioksidan, anti-inflamatuar, antipiretik gibi birçok farmakoloji çalışmasında kullanıldığını söylemek mümkündür (Devrim Can vd, 2016; Amir vd., 2008; Kaplancıklı vd.,2009; Demir Özkay vd., 2012; Aydın vd., 2022; Şen vd., 2018; Levent vd., 2018; Kurt vd, 2018). İlaç sektöründeki ve endüstride geniş kullanım alanı bulması pirazol bileşiklerine olan ilgiyi artırmış ve yeni sentezlerin geliştirilmesine olanak sağlamıştır. Bu çalışmanın konusu pirazol türevi bir bileşik olan, 1-[5-(4-Hydroxy-3-methoxyphenyl)-3-methyl-4,5-dihydro-1H-pyrazol-1-yl]ethanone,  $C_{13}H_{16}N_2O_3$ , molekülünün hesaplamalı kimya yöntemiyle kuramsal hesaplarını içermektedir. Molekül daha önce x-ışınları kırınımı yöntemiyle yapısal olarak aydınlatılmış (Wang vd., 2005) ve sonuçlar elde edilen yeni sonuçlarla karşılaştırılmıştır. Hesaplamalar, Yoğunluk Fonksiyonel Kuramı (YFK) ve Hartree Fock (HF) yöntemleri ve 6-311(d,p) ve 6-311++(d,p) baz setleriyle yapılmış olup ilk olarak molekülün minimum enerjili olan en kararlı yapısı belirlenmiştir. Molekülün en düşük enerjileri sırasıyla 6-311(d,p) baz seti için; HF için -835.25516131 a.u., B3LYP için -840.38399581 a.u., ve B3PW91 yöntemi içinse -840.05673767 a.u. olarak bulunmuştur. Bu enerji değerlerinin 6-311++(d,p) baz seti için değerleri ise aynı sırayla enerji değerleri -835.26952090 a.u., -840.40166114 a.u. ve -840.07263242 a.u. olarak elde edilmiştir. Elde edilen enerji değerlerinden yola çıkarak en kararlı durumun B3LYP yönteminden elde edildiği ve deneysel verilerle en iyi uyumun bu yöntemle olduğu sonucuna varılmaktadır.

## MATERYAL VE METOD

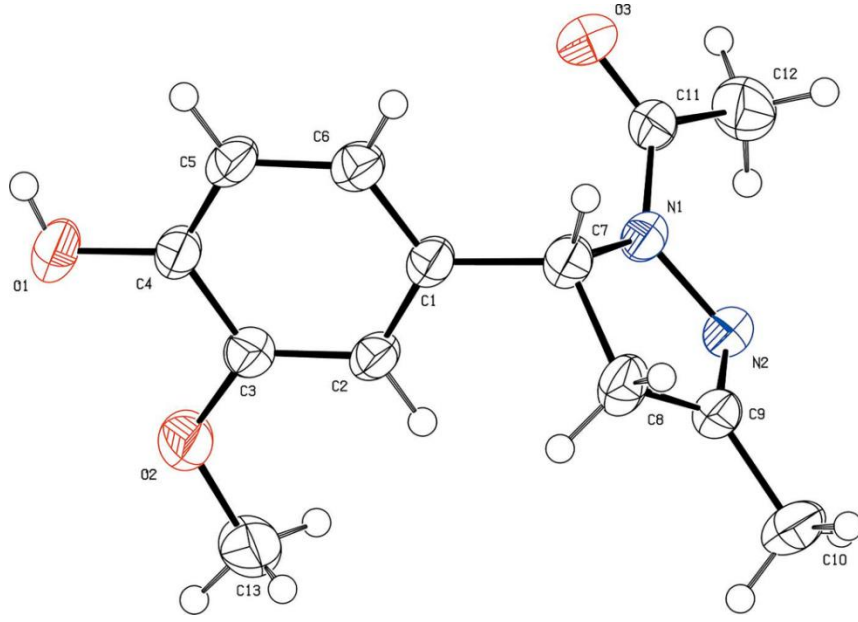
Yapılan hesaplamaların tümü Gaussian 03W (Frisch vd., 2004) programı kullanılarak yapılmış ve elde edilen sonuçların görselleri GaussView (Dennigton vd., 2007) programı kullanılarak gösterilmiştir. Teorik çalışmalar, HF ve YFK'nın, B3LYP/B3PW91 yöntemleri ve 6-311(d,p) ve 6-311++(d,p) baz setleri kullanılarak yapılmıştır. Moleküle ait elektrofilik ve nükleofilik bölgeleri belirleyebilmek için sınır orbitalleri (HOMO ve LUMO) ve yük analizlerine ilaveten Moleküler Elektrostatik Potansiyel (MEP) haritaları belirlenmiştir. Tüm baz setleri için moleküle ait geometrik parametreler belirlenmiş ve sonuçlar karşılaştırılmıştır.

## BULGULAR VE TARTIŞMA

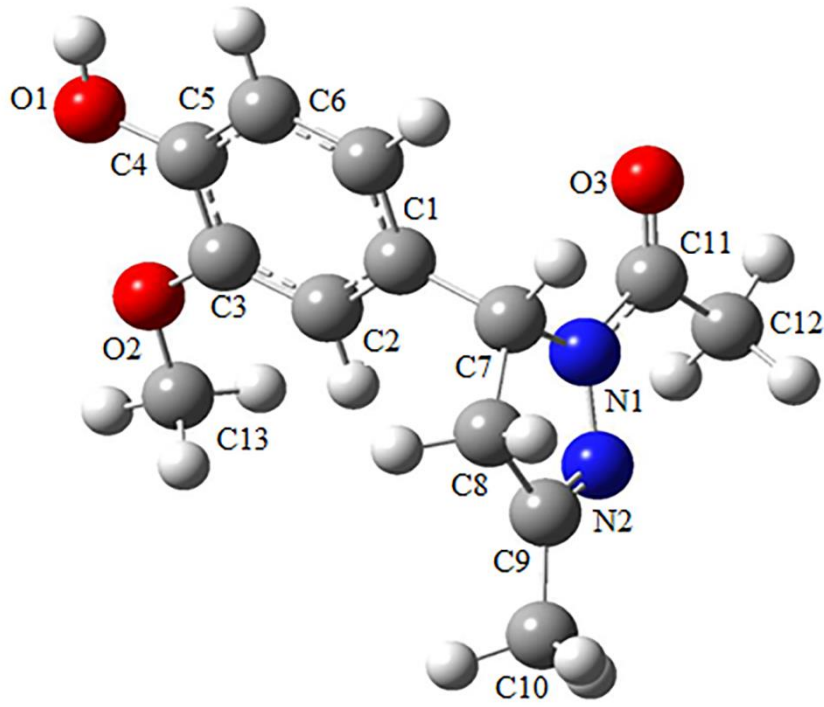
### Optimize Yapı

Şekil 1'de x-ışınlarından elde edilmiş moleküler yapı (Wang vd., 2005) ile teorik hesaplamalardan elde edilmiş şekiller verilmektedir. Optimize edilmiş molekülün bağ uzunlukları, bağ açıları ve dihedral açılarına bakıldığında deneysel olarak elde edilmiş parametrelerle büyük bir uyum içinde olduğu söylenebilir. Pirazol halkasına ait seçilen bazı geometrik parametreler Tablo 1'de raporlanmıştır. N1-C7, N2-C9 bağ uzunlukları deneysel olarak 1.4869(18) ve 1.2763(18) Å (Wang vd., 2005) bulunmuş olup teorik olarak hesaplanan bağ uzunlukları ise 1.48639 ve 1.28097 Å değerleri ile bu verilerle oldukça uyumludur. Benzer şekilde O1-C4 ve O3-C11 bağ uzunluklarına bakıldığında deneysel olarak 1.3670(16) ve 1.2285(18) Å (Wang vd., 2005) olarak bulunmuşken aynı bağ uzunlukları sırasıyla 1.36407 ve 1.21838 Å olarak hesaplanmıştır ve yine deneysel verilerle uyumlu olduğu gözükmektedir. 6-311++(d,p) baz seti ile elde edilen geometrik parametrelerde Tablo 1'de rapor edilmiştir. Optimizasyonda kullanılan yöntemlerin güvenilirliğini belirlemek için KOK (atomik parametreler arasındaki farkların karelerinin ortalamasının karekökü) hesaplamaları yapılmış ve Tablo 1'de verilmiştir. Elde edilen bağ uzunlukları için hata değerleri sırasıyla; HF/6-311G(d,p) için 0.0176 6-311++G(d,p) için 0.0178; B3LYP/6-311G(d,p) için 0.0132 ve 6-311++G(d,p) için 0.0125; B3PW91/6-311G(d,p) için 0.0139 ve 6-311++G(d,p) için 0.0133 olarak bulunmuştur. Hata değerleri incelendiğinde deneysel parametrelerle en iyi uyumu sağlayan optimize yapının B3LYP yöntemi ve 6-311++G(d,p) baz seti ile hesaplatılan yapı olduğu ve sistemin moleküler ve elektriksel özellikleri hesaplanırken temel setlere ilave edilen difüze ve polarize fonksiyonların doğruluğu ve verimi artırdığı gözlenmektedir. Diğer taraftan Tablo 1'de verilen molekülün sahip olduğu dihedral açılardan C2-C1-C7-N1 açısı, molekülün düzlemsel bir yapıya sahip olmadığını göstermektedir.





(a)



(b)

**Şekil 1.a)** Moleküle Ait X-ışını Kırınımından Elde Edilen Yapı (Wang vd., 2005) ve **b)** Optimize Yapıya Ait Molekül Şekillerine Ait Görünümler.

**Tablo 1.** Moleküle Ait Geometrik Parametrelerin Deneysel (Wang vd., 2005) Yöntemlerle Karşılaştırılması.

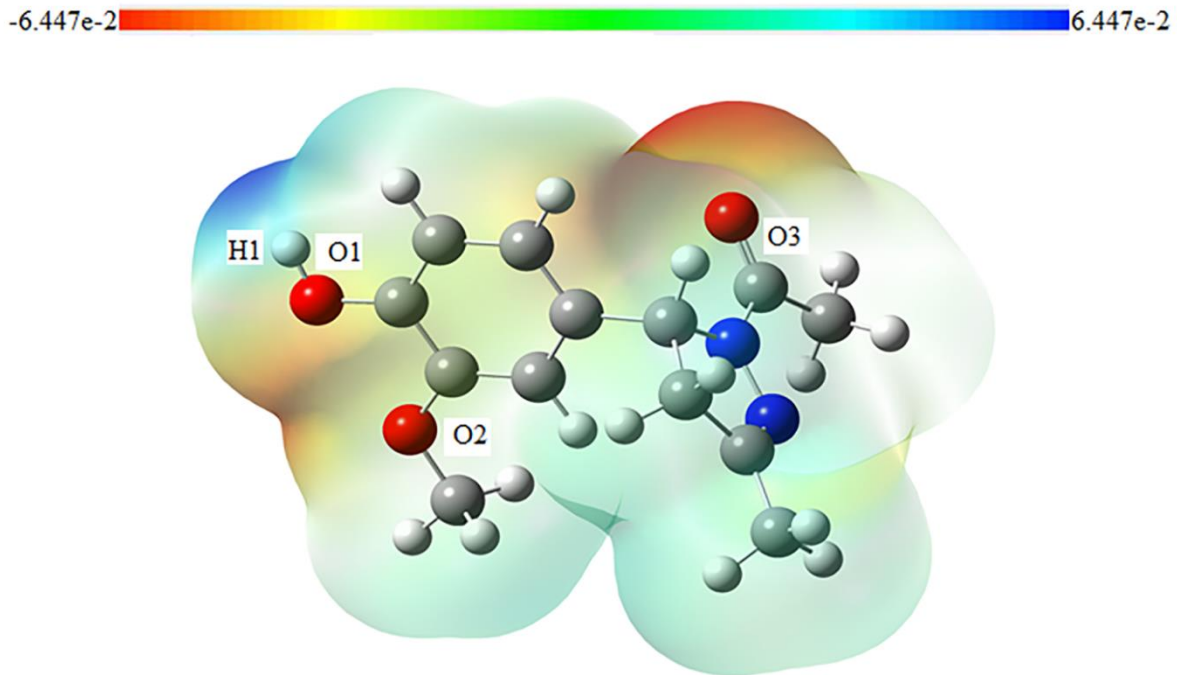
	Deneysel (Wang vd., 2005)	HF 6-311(d,p)	6-311++(d, p)	YFK/ B3LYP 6-311(d, p)	6-311++(d,p)	B3PW91 6-311(d,p)	6-311++(d,p)
<b>Bağ Uzunluğu</b>							
N1-C11	1,3443(18)	1,36405	1,36160	1,37810	1,37675	1,37427	1,37349
N1-N2	1,4055(16)	1,37739	1,37845	1,38380	1,38740	1,37385	1,37604
N1-C7	1,4869(18)	1,46604	1,46604	1,48639	1,48372	1,47744	1,47660
O1-C4	1,3670(16)	1,34934	1,34973	1,36407	1,36659	1,35807	1,35982
N2-C9	1,2763(18)	1,25406	1,24495	1,28097	1,28146	1,28073	1,28100
O3-C11	1,2285(18)	1,19441	1,19705	1,21838	1,22123	1,21673	1,21901
C4-C5	1,3730(2)	1,37079	1,37208	1,38695	1,38757	1,38541	1,38577
C4-C3	1,4009(19)	1,40587	1,40429	1,41336	1,41128	1,41134	1,40970
O2-C3	1,3711(18)	1,34400	1,34321	1,36098	1,36052	1,35517	1,35484
O2-C13	1,4090(2)	1,39700	1,39760	1,41858	1,42003	1,41160	1,41214
C5-C6	1,3927(19)	1,39513	1,39451	1,39724	1,39699	1,39488	1,39495
C1-C6	1,3782(19)	1,37070	1,37250	1,38659	1,38867	1,38457	1,38576
C1-C2	1,4000(2)	1,40028	1,39862	1,40443	1,40188	1,40163	1,40012
C1-C7	1,5163(18)	1,51599	1,51702	1,51562	1,51766	1,51127	1,51246
C2-C3	1,3853(19)	1,37529	1,37751	1,39017	1,39228	1,38814	1,38956
C9-C10	1,4868(18)	1,49456	1,49447	1,49222	1,49228	1,48710	1,48709
C9-C8	1,4920(2)	1,50949	1,50951	1,51436	1,51363	1,50895	1,50835
C7-C8	1,5345(18)	1,54657	1,54666	1,55315	1,55375	1,54660	1,54761
C11-C12	1,4990(2)	1,50941	1,50944	1,51463	1,51356	1,50874	1,50796
<b>Maks.fark</b>		<b>0,03409</b>	<b>0,03145</b>	<b>0,0338</b>	<b>0,03245</b>	<b>0,03165</b>	<b>0,0294</b>
<b>KOK</b>		<b>0,0176</b>	<b>0,0178</b>	<b>0,0132</b>	<b>0,0125</b>	<b>0,0139</b>	<b>0,0133</b>
<b>Bağ Açısı</b>							
C11-N1-N2	121,66(12)	121,40273	121,52670	122,50937	122,38238	122,75186	122,66046
C11-N1-C7	125,55(12)	123,14238	123,56860	123,09362	123,48491	123,10897	123,28367
N2-N1-C7	113,27(10)	113,17332	113,14625	113,39750	113,24480	113,52369	113,43777
C9-N2-N1	107,38(12)	109,52034	109,46423	108,98758	108,88437	108,90028	108,90028
O1-C4-C5	122,96(12)	123,33933	123,17388	123,57767	123,57603	123,57603	123,37459
O1-C4-C3	117,38(13)	117,29617	117,43843	117,10047	117,16036	117,16036	117,29013
C5-C4-C3	119,66(12)	119,36360	119,83207	119,32042	119,26185	119,26185	119,33268
C3-O2-C13	118,37(12)	119,67689	120,94470	118,19507	117,84441	117,84441	117,99520
C4-C5-C6	120,27(13)	120,96067	118,93358	120,93822	121,00838	121,00838	120,96546
C6-C1-C2	118,89(12)	118,94627	120,31686	119,02310	119,06964	119,06964	119,12659
C6-C1-C7	119,43(13)	120,57941	120,70136	120,63544	120,72817	120,72817	120,36450
C2-C1-C7	121,68(12)	120,43880	120,19099	120,32939	120,18292	120,18292	120,43752
C1-C6-C5	120,84(13)	120,18849	121,29956	120,24875	120,17786	120,17786	120,13370
C3-C2-C1	120,48(13)	121,28815	124,90239	121,20982	121,22633	121,22633	121,18762
O2-C3-C2	125,22(13)	125,11174	115,85844	125,28310	125,22087	125,22087	124,97949
O2-C3-C4	114,99(12)	115,63821	119,24246	115,46091	115,52658	115,52658	115,76723
C2-C3-C4	119,78(13)	119,25000	122,47803	119,25577	119,25224	119,25224	119,25261
N2-C9-C10	122,19(14)	122,41555	113,76716	122,13674	122,21846	122,11216	122,20058
N2-C9-C8	114,96(12)	113,80119	123,78159	113,68056	113,65099	113,51308	113,53493
C10-C9-C8	122,84(13)	123,78159	113,13908	124,17943	124,12397	124,36648	124,25826
N1-C7-C1	112,73(11)	113,13908	113,34093	112,68905	113,18447	112,53233	112,97427
N1-C7-C8	100,64(10)	100,99880	100,74011	100,71212	100,74011	100,72146	100,80390
C1-C7-C8	115,89(12)	113,72638	113,66960	114,33092	113,66960	113,94173	113,51778
O3-C11-N1	120,05(14)	120,46210	120,11600	120,15216	120,11600	120,11063	120,05417
O3-C11-C12	121,63(13)	122,90538	122,75129	123,66309	123,40392	123,87249	123,59429
N1-C11-C12	118,33(14)	116,63168	116,80773	116,18473	116,47998	116,01637	116,34803
C9-C8-C7	103,66(11)	102,26778	102,26582	102,77557	102,67071	102,59318	102,58242
<b>Mak.fark</b>		<b>4,9983</b>	<b>4,8222</b>	<b>5,4452</b>	<b>5,1500</b>	<b>5,6136</b>	<b>5,2819</b>
<b>KOK</b>		<b>1,9688</b>	<b>2,0702</b>	<b>1,9708</b>	<b>1,9121</b>	<b>2,0595</b>	<b>1,9895</b>
<b>Torsiyon açısı</b>							
C11-N1-N2-C9	164,29(13)	161,13861	162,18644	165,34321	165,01429	166,57597	166,67045
C7-N1-N2-C9	-2,11(15)	-2,21097	-3,21391	-3,53668	-4,53875	-4,67815	-4,58133
O1-C4-C5-C6	-177,85(13)	-179,73028	-179,66713	-179,70186	-179,56839	-179,66409	-179,46475
C3-C4-C5-C6	2,6(2)	-0,08466	-0,08712	-0,15183	-0,17594	-0,16138	-0,06712
C2-C1-C6-C5	-1,8(2)	0,55610	0,48435	0,66801	0,41957	0,62018	0,31044
C7-C1-C6-C5	177,73(12)	-177,28591	-177,00858	-178,07220	-176,66562	-177,78634	-176,63073
C4-C5-C6-C1	-0,2(2)	-0,40183	-0,35136	-0,15183	-0,29316	-0,40414	-0,25641
C6-C1-C2-C3	1,3(2)	-0,23690	-0,18964	-0,33885	-0,08095	-0,28108	-0,04486
C7-C1-C2-C3	-178,18(12)	177,60823	177,29334	178,40531	176,98080	178,13434	176,89403
C13-O2-C3-C2	2,9(2)	-2,66570	-2,98339	-1,49034	-2,03365	-1,53824	-2,18983
C13-O2-C3-C4	-177,34(14)	177,25113	176,81223	178,33630	177,60252	178,25773	177,51019
C1-C2-C3-O2	-179,16(13)	179,67149	179,54664	179,58677	179,24139	179,51130	179,41543
C1-C2-C3-C4	1,1(2)	-0,24258	-0,24258	-0,23383	-0,32825	-0,27768	-0,27494
O1-C4-C3-O2	-2,42(19)	0,14548	0,17440	0,21792	0,27830	0,22120	0,04417
C5-C4-C3-O2	177,17(13)	-179,52135	-179,42950	-179,36096	-179,15051	179,31313	-179,38979
O1-C4-C3-C2	177,39(13)	-179,93249	-179,98230	-179,94429	-179,93661	-179,96984	-179,76246
C5-C4-C3-C2	-3,0(2)	0,40067	0,37840	0,47683	0,50779	0,49583	0,32849
N1-N2-C9-C10	-179,20(13)	179,18319	179,28445	179,46218	179,19201	179,53003	179,39417
N1-N2-C9-C8	0,16(17)	-1,27124	-1,34616	-1,16982	-1,70547	-1,47436	-1,47801
C11-N1-C7-C1	72,79(17)	79,44547	79,03854	75,20266	77,07346	75,28664	75,41396
N2-N1-C7-C1	-121,11(12)	-117,53700	-115,90477	-115,99171	-113,50603	-113,49490	-113,39669
C11-N1-C7-C8	-163,13(13)	-158,62904	-159,13371	-162,55004	-161,20759	-162,99774	-163,11049
N2-N1-C7-C8	2,98(14)	4,38849	5,92298	6,2558	8,21292	8,22073	8,07885
C6-C1-C7-N1	-109,30(14)	-137,83972	-141,98431	-130,03604	-145,72212	-132,54800	-143,66713
C2-C1-C7-N1	70,21(16)	44,35058	40,56752	51,24024	37,24427	49,06318	39,43205
C6-C1-C7-C8	135,50(13)	107,67496	103,55623	115,74985	100,13098	113,58723	102,34557
C2-C1-C7-C8	-45,00(18)	-70,13474	-73,89194	-62,97388	-76,90263	-64,80159	-74,55524
N2-N1-C11-O3	-172,01(13)	-167,81673	-169,53889	-170,85062	-171,97821	-172,26809	-172,56599
C7-N1-C11-O3	-7,0(2)	-6,15301	-5,68958	-3,04808	-3,50118	-1,84901	-2,17511

N2-N1-C11-C12	8,1(2)	12,50733	10,72888	9,09323	7,91119	7,48223	6,77574
C7-N1-C11-C12	173,06(13)	174,17105	174,57820	176,89577	176,38821	177,90131	177,16662
N2-C9-C8-C7	1,70(17)	3,90162	4,91115	4,97240	6,68588	6,44746	6,36192
C10-C9-C8-C7	-178,96(13)	-176,55992	-175,72867	-175,67451	-174,23133	-174,58317	-174,53104
N1-C7-C8-C9	-2,58(14)	-4,52878	-5,93065	-6,14542	-8,16741	-8,02437	-7,91111
C1-C7-C8-C9	119,30(13)	116,98488	115,72231	114,94394	113,20916	112,69265	113,18021

Elde edilen sonuçların x-ışını kırınımından elde edilen verilerle uyum sağlaması hem optimizasyon işleminin hem de seçilen yöntemlerin uygunluğunu ve de güvenilirliğini ortaya koymaktadır. Teorik çalışma ile deneysel verilerin sonuçlarında gözlenen küçük farklılıklar ise, teorik çalışmaların gaz form ve etkileşimsiz ortamda hesaplanması ile açıklanabilmektedir.

### Moleküler Elektrostatik Potansiyel Haritası

Molekül yüzeyindeki değişken olan yük bölgelerinin ve bu bölgelerin molekülün elektrofilik ve nükleofilik bölgelerini belirlemeyi hedeflemektedir. Kırmızıdan maviye doğru renk geçişleri ile yorumlanan haritalarda, kırmızı ile belirtilen bölgeler en negatif bölgeleri temsil ederken, mavi ile belirtilen bölgeler en pozitif bölgeleri temsil etmektedir. Ayrıca bu haritalar, molekülde tepkimelerin gerçekleşeceği bölgelerin belirlenmesinde ve molekül içi oluşan hidrojen bağlarının tahmininde bize önemli bilgiler sunmaktadır. Şekil 2’de moleküle ait en negatif bölgelerin oksijen atomları üzerinde en pozitif bölgelerin ise hidrojenler üzerinde yerleştiği söylenebilir. Benzer şekilde MEP haritalarındaki sonuçları karşılaştırmak için molekülün yük analizleri sonucu nükleofilik ve elektrofilik bölge tayinleri yapılmıştır. Moleküler yapıya ait en negatif yük değerleri ise O3 atomu için -0.061474, O2 atomu için -0.0551615, O1 atomu içinse -0.0571782 olarak gözlenmiştir, en pozitif değer ise O1 atomuna bağlı hidrojende gözlenmiş olup değeri +0.05827832’dir ve elde edilen değerler molekül içi hidrojen bağımlı destekler niteliktedir.



Şekil 2. Moleküle Ait Moleküler Elektrostatik Potansiyel Haritası.

### Yük Analizi ve Fukui Fonksiyonları

Bu analizler ile molekülde meydana gelen kimyasal reaksiyonların anlaşılması ve elektro-nükleofilik bölgelerin belirlenmesi sağlanmaktadır. Mulliken ve doğal yük analizleri tüm hesaplama yöntemleri ile elde edilmiş ve sonuçlar Tablo 2’de verilmiştir. B3LYP yöntemine ve Mulliken yük analizine göre elde edilen sonuçlara bakıldığında en negatif yükler O3>O2>N1>N2>O1>C1>C5 iken doğal yük analizine göre ise C12>O1>O3>C10>O2>C8>N1>N2>C2>C5>C1>C7>C1 olarak bulunmuştur. Benzer şekilde pozitif yükler Mulliken yük analizine göre sıralanacak olursa C11>C13>C3>C4>C10>C19>C12>C9>C8>C6>C2 şeklinde, doğal yük analizine göre sıralanacak olursa C11>C4>C3>C9 şeklinde sonuçlar elde edilmektedir.

**Tablo 2.** Moleküle Ait Yük Analiz Sonuçları.

<i>NPA</i>	<i>HF</i>	<i>B3LYP</i>	<i>B3PW91</i>	<i>Mulliken</i>	<i>HF</i>	<i>B3LYP</i>	<i>B3PW91</i>
C1	-0,03645	-0,04459	-0,04683	C1	-0,076288	-0,064816	-0,076611
C2	-0,28226	-0,29118	-0,29951	C2	-0,007315	0,019285	0,032149
C3	0,34139	0,29313	0,28921	C3	0,282347	0,173326	0,178840
C4	0,34323	0,30475	0,29982	C4	0,211252	0,144958	0,150964
C5	-0,25638	-0,26992	-0,27624	C5	-0,011984	-0,028874	-0,029816
C6	-0,18678	-0,19701	-0,20364	C6	0,003399	0,037775	0,040688
C7	0,02901	-0,02566	-0,03569	C7	0,200365	0,125350	0,105187
C8	-0,39295	-0,44262	-0,45385	C8	0,060626	0,045082	0,049215
C9	0,31994	0,26574	0,26076	C9	0,129284	0,081973	0,096313
C10	-0,53424	-0,60797	-0,62160	C10	0,132133	0,108864	0,116118
C11	0,85361	0,70780	0,70074	C11	0,498581	0,342333	0,367808
C12	-0,59004	-0,65822	-0,67420	C12	0,107460	0,079576	0,080817
C13	-0,08398	-0,19615	-0,21035	C13	0,254837	0,214705	0,212470
O1	-0,70653	-0,65862	-0,65432	O1	-0,187759	-0,104142	-0,106805
O2	-0,58434	-0,51316	-0,50439	O2	-0,452819	-0,336913	-0,338627
O3	-0,70658	-0,61411	-0,61012	O3	-0,480573	-0,361609	-0,371082
N1	-0,40035	-0,31036	-0,30418	N1	-0,427173	-0,301773	-0,318307
N2	-0,30894	-0,27807	-0,27613	N2	-0,236337	-0,175100	-0,189321

Fukui fonksiyon analizinde ise elde edilen doğal yük analiz sonuçları kullanılmaktadır. Fukui fonksiyonları ile molekülde yer alan atomların sahip oldukları nükleofilik, elektrofilik ve serbest radikal atağa olan yatkınlıklar belirlenmektedir. Hesaplamalara göre elde edilen nükleofilik bölgeler C1, C2, C5, C6, C7, C8, C9, C10, C12, C13 atomları üzerinde, elektrofilik bölgeler ise C3, C4, C11 atomları üzerinde gözlenmiştir. Sonuçlar Tablo 3'de verilmiştir. Molekülün yük analizi ve FF sonuçlarına bakıldığında, molekülün nükleofilik özelliği daha belirgindir sonucuna varılabilmektedir.

**Tablo 3.** Moleküle Ait Doğal Yüklerden Elde Edilmiş Fukui Fonksiyonları.

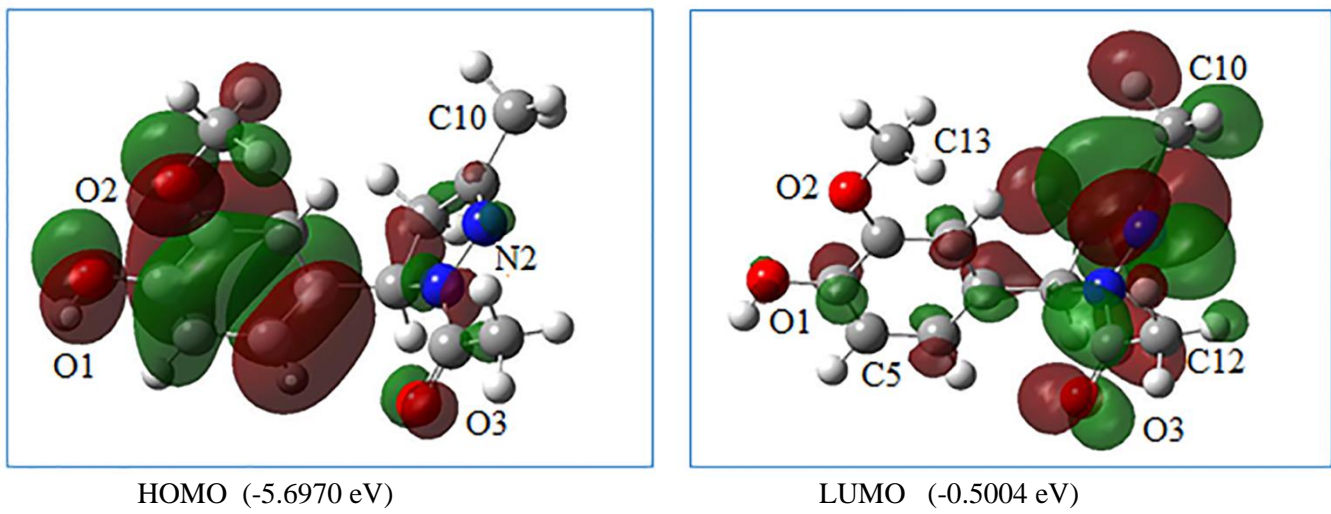
	$q^0$	$q^+$	$q^-$	$f_k^+$	$f_k^-$	$\Delta f(r)$
O1	-0,65862	-0,34663	-0,33817	0,31199	-0,32045	0,63244
O2	-0,51316	-0,28468	-0,26618	0,22848	-0,24698	0,47546
O3	-0,61411	0,06616	-0,31394	0,68027	-0,30017	0,98044
N1	-0,31036	0,41822	-0,16464	0,72858	-0,14572	0,87430
N2	-0,27807	-0,25381	-0,10698	0,02426	-0,17109	0,19535
C1	-0,04459	-0,02530	0,00314	0,01929	-0,04773	0,06702
C2	-0,29118	-0,15424	-0,11013	0,13694	-0,18105	0,31799
C3	0,29313	0,18477	0,13100	-0,10836	0,16213	-0,27049
C4	0,30475	0,18308	0,17146	-0,12167	0,13329	-0,25496
C5	-0,26992	-0,11818	-0,12777	0,15174	-0,14215	0,29389
C6	-0,19701	-0,09028	-0,11023	0,10673	-0,08678	0,19351
C7	-0,02566	-0,03509	-0,00847	-0,00943	-0,01719	0,00776
C8	-0,44262	-0,21599	-0,21761	0,22663	-0,22501	0,45164
C9	0,26574	0,38169	0,18678	0,11595	0,07896	0,03699
C10	-0,60797	-0,29746	-0,30176	0,31051	-0,30621	0,61672
C11	0,70780	0,12629	-0,11023	-0,58151	0,81803	-1,39954

C12	-0,65822	-0,27835	-0,32704	0,37987	-0,33118	0,71105
C13	-0,19615	-0,04407	-0,09510	0,15208	-0,10105	0,25313

$$f_k^+(r) = q_k(r)(N + 1) - q_k(r)(N); f_k^-(r) = q_k(r)(N) - q_k(r)(N - 1), \Delta f(r) = f_k^+(r) - f_k^-(r)$$

### HOMO-LUMO ve Kimyasal Aktivite Parametreleri

HOMO, moleküldeki en yüksek enerjili dolu orbitali LUMO ise, moleküldeki en düşük boş orbitali temsil etmektedir ki bu orbitallere sınır orbitalleri denilmektedir ve molekülün en kararlı olduğu durumuna ait orbitaller Şekil 3'de verilmiştir. HOMO orbitallerinin fenil halkası üzerinde konumlandığı, LUMO orbitallerinin ise pirazol halkası üzerinde konumlandığı görülmektedir. Sınır orbitallerinin belirlenmesi, molekülün kimyasal kararlılığın belirlenmesinde oldukça önem taşımaktadır. HOMO-LUMO aralığının küçük olması bu orbitaller arası etkileşimin ve reaksiyonların daha kolay olacağı anlamına gelmektedir.



Şekil 3. Molekülün HOMO-LUMO Şekilleri.

Tablo 4'te molekülün en kararlı olduğu hali üzerinden sınır orbitalleri ve bunlardan türetilmiş nicelikler verilmektedir. Tablodaki değerlere göre B3LYP yönteminden elde edilen  $n=2.5983$  değeri ile yüksek sertlik ve  $S=0.1924$  değeriyle düşük yumuşaklık değerine sahip olduğunu ve bu durumun ise molekülün düşük kimyasal aktivitesiyle kararlı bir yapıya sahip olduğu sonucuna ulaşabiliriz.

Tablo 4. Moleküle Ait Sınır Orbitalleri ve Kimyasal Aktivite Parametreleri.

	HF	B3LYP	B3PW91
İyonizasyon enerjisi, I	8,0233	5,6970	5,7438
Elektron ilgisi, A	-3,6381	0,5004	0,5303
Enerji aralığı, $\Delta E$	11,6614	5,1966	5,2135
Elektronegatiflik, $\chi$	2,1926	3,0987	3,1370
Kimyasal sertlik, $\eta$	5,8307	2,5983	2,6067
Kimyasal yumuşaklık, S	0,0000085	0,1924	0,1918
Elektrofilik indeks, $\omega$	0,4122	1,8477	1,8875

$$I = -E_{HOMO}, A = -E_{LUMO}, \Delta E = |E_{HOMO} - E_{LUMO}|, \chi = \frac{I + A}{2}, \eta = \frac{I - A}{2}, S = \frac{1}{2\eta}, \omega = -\frac{\chi^2}{2\eta}$$

### Moleküle Ait Doğrusal Olmayan Optik Özellikler



Son araştırmalarında gösterdiği gibi doğrusal olmayan optik özellikler taşıyan materyaller optik sinyal işleme, bilgi teknolojileri, lazer ve hologramlarda, veri kaydetme ve optik bağlantı materyallerinin tasarımında endüstriyel uygulamalarda oldukça sık şekilde kullanılmaktadır (Uzun S vd., 2019; Özdemir Tari G., 2022). Moleküle ait dipol moment ( $\mu$ ), doğrusal kutuplanabilirlik ( $\alpha$ ), yönelime bağlı kutuplanabilirlik ( $\beta$ ) değerleri hesaplanmış ve Tablo 5’de verilmiştir. Molekülün en kararlı durumuna ait, doğrusal olmayan optik özelliklerini belirleyen  $\beta$  değerlerine bakıldığında  $5.9352 \times 10^{-30}$  esu değeriyle, NLO materyali olan referans üre değeri (Adant, M., 1995) ile karşılaştırıldığında yaklaşık 45 kez daha büyük bir değere sahip olduğu söylenebilir. Elde edilen bu yüksek  $\beta$  değeri ile bileşik, doğrusal olmayan optik materyal olarak kullanılabilir bir potansiyeldedir sonucuna ulaşılabilir.

**Tablo 5.** Moleküle Ait Optik Özellik Hesaplamaları ve Bileşenleri.

<i>6-311G(d,p)</i>	Dipol Moment (Debye)		Doğrusal kutuplanabilirlik, Yönelime bağlı kutuplanabilirlik (esu)		1. mertebeden kutuplanabilirlik (esu)	
<b>HF</b>	$\mu_x$	0,6263779	$\alpha_{xx}$	168,53138	$\beta_{xxx}$	202,9924624
	$\mu_y$	1,2489407	$\alpha_{xy}$	12,1360036	$\beta_{xxy}$	30,6263039
	$\mu_z$	-0,978439	$\alpha_{xz}$	147,441023	$\beta_{xyy}$	97,0704712
	$\mu$	<b>1,7057</b>	$\alpha_{yy}$	0,7294252	$\beta_{yyy}$	57,1760482
			$\alpha_{yz}$	8,6315885	$\beta_{xxz}$	-72,5935859
			$\alpha_{zz}$	136,5141546	$\beta_{xyz}$	-39,4365488
			$\alpha$	<b>22,3280</b>	$\beta_{yyz}$	-15,6953897
			$\Delta\alpha$	<b>36,9716</b>	$\beta_{xzz}$	106,8567344
					$\beta_{yzz}$	-49,6307124
					$\beta_{zzz}$	-39,3558178
				$\beta$	<b><math>3.6991 \times 10^{-30}</math></b>	
<b>B3LYP</b>	$\mu_x$	0,3258089	$\alpha_{xx}$	188,9995875	$\beta_{xxx}$	325,92611
	$\mu_y$	1,2107285	$\alpha_{xy}$	15,7151304	$\beta_{xxy}$	59,720389
	$\mu_z$	-0,8428013	$\alpha_{xz}$	170,9027615	$\beta_{xyy}$	166,1337673
	$\mu$	<b>1,5107</b>	$\alpha_{yy}$	0,1359049	$\beta_{yyy}$	107,748209
			$\alpha_{yz}$	7,7792799	$\beta_{xxz}$	-127,4224469
			$\alpha_{zz}$	144,6779382	$\beta_{xyz}$	-67,0346817
			$\alpha$	<b>24,8986</b>	$\beta_{yyz}$	-45,0931223
			$\Delta\alpha$	<b>53,0650</b>	$\beta_{xzz}$	156,6721
					$\beta_{yzz}$	-71,4929071
					$\beta_{zzz}$	-32,1971933
				$\beta$	<b><math>5.9352 \times 10^{-30}</math></b>	
<b>B3PW91</b>	$\mu_x$	0,3096032	$\alpha_{xx}$	186,7422707	$\beta_{xxx}$	314,4736652
	$\mu_y$	1,2098049	$\alpha_{xy}$	15,1111070	$\beta_{xxy}$	53,6877921
	$\mu_z$	-0,863515	$\alpha_{xz}$	169,0522344	$\beta_{xyy}$	156,9056944
	$\mu$	<b>1,5182</b>	$\alpha_{yy}$	0,24741370	$\beta_{yyy}$	101,2537389
			$\alpha_{yz}$	7,57021770	$\beta_{xxz}$	-125,6129266
			$\alpha_{zz}$	145,3365696	$\beta_{xyz}$	-64,1059505
			$\alpha$	<b>24,7284</b>	$\beta_{yyz}$	-51,5982364
			$\Delta\alpha$	<b>49,3288</b>	$\beta_{xzz}$	152,7357596
					$\beta_{yzz}$	-73,5049714
					$\beta_{zzz}$	-37,3452347
				$\beta$	<b><math>5.7448 \times 10^{-30}</math></b>	

### Molekülün Termodinamik Özellikleri

Entropi, ısı kapasitesi ve entalpi gibi değişkenler termodinamik fonksiyonlar olarak adlandırılırlar. Birçok termodinamik fonksiyon belirlenirken değişkenlerin birbirlerine göre değişimleri incelenir. Termodinamik fonksiyonlardan, molekülün toplam enerjisine gelen katkılar (öteleme, elektronik, dönme ve titreşim) belirlenerek tabloda verilmiştir. Tablo 6 incelendiğinde, elektronik için 0.000, öteleme ve dönme için 0.889 titreşim için 193.953 ve toplam enerji için 195.730 değerleri elde edilmiştir. Termal enerjiye en büyük katkının titreşim enerjisinden geldiği gözükmektedir.

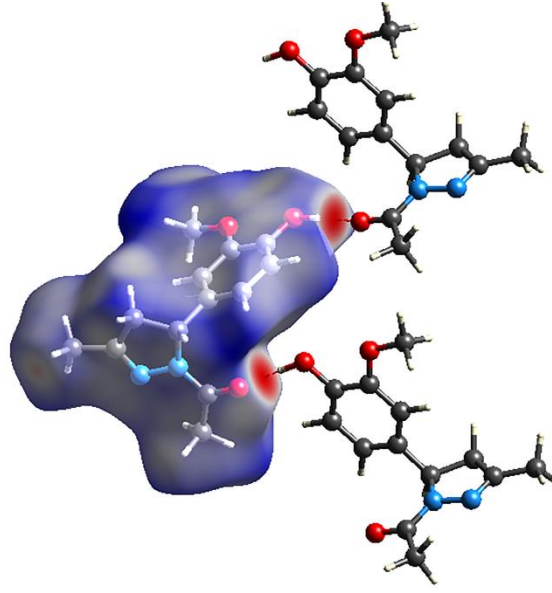
**Tablo 6.** Moleküle Ait Termodinamik Fonksiyonlar ve Bileşenleri.

<b>6-311G(d,p)</b>	<b>HF</b>	<b>B3LYP</b>	<b>B3PW91</b>
<b>Termal, E (cal/mol K)</b>			
<i>Elektronik</i>	0,000	0,000	0,000
<i>Öteleme</i>	0,889	0,889	0,889
<i>Dönme</i>	0,889	0,889	0,889
<i>Titreşim</i>	193,953	181,947	182,512
<b>Toplam</b>	<b>195,730</b>	<b>183,724</b>	<b>184,289</b>
<b>Isı kapasitesi, Cv (cal/mol K)</b>			
<i>Elektronik</i>	0,000	0,000	0,000
<i>Öteleme</i>	2,981	2,981	2,981
<i>Dönme</i>	2,981	2,981	2,981
<i>Titreşim</i>	56,336	60,739	60,583
<b>Toplam</b>	<b>62,298</b>	<b>66,701</b>	<b>66,544</b>
<b>Entropi, S (cal/mol K)</b>			
<i>Elektronik</i>	0,000	0,000	0,000
<i>Öteleme</i>	42,427	42,427	42,427
<i>Dönme</i>	33,320	33,341	33,307
<i>Titreşim</i>	59,697	63,698	63,433
<b>Toplam</b>	<b>135,444</b>	<b>139,466</b>	<b>139,166</b>
<b>Dönme Sıcaklıkları (Kelvin)</b>			
<i>A</i>	0,02959	0,02890	0,02895
<i>B</i>	0,01286	0,01312	0,01329
<i>C</i>	0,01200	0,01179	0,01203
<b>Dönme sabitleri (GHz)</b>			
<i>A</i>	0,61661	0,60228	0,60328
<i>B</i>	0,26794	0,27328	0,27682
<i>C</i>	0,24997	0,24557	0,25059
<b>Sıfır-nokta titreşim enerjisi (kcal/mol)</b>	185,08488	172,46905	173,05879
<b>Sıfır-nokta düzeltmesi*</b>	0,294952	0,274847	0,275787
<b>Enerjide termal düzeltme*</b>	0,311916	0,292783	0,293683
<b>Entalpide termal düzeltme*</b>	0,312861	0,293728	0,294628
<b>Gibbs serbest enerjisine termal düzeltme*</b>	0,248507	0,227463	0,228505
<b>Elektronik ve sıfır nokta enerjisinin toplamı *</b>	-834,960210	-840,109149	-839,780951
<b>Elektronik ve termal enerjilerin toplamı *</b>	-834,943245	-840,091212	-839,763054
<b>Elektronik ve termal entalpi toplamı *</b>	-834,942301	-840,090268	-839,762110
<b>Elektronik ve termal serbest enerjilerin toplamı *</b>	-835,006654	-840,156533	-839,828232
<b>Toplam enerji (Hartree)</b>	-835,2551613	-840,3839958	-840,0567377

### Hirshfeld Analizi

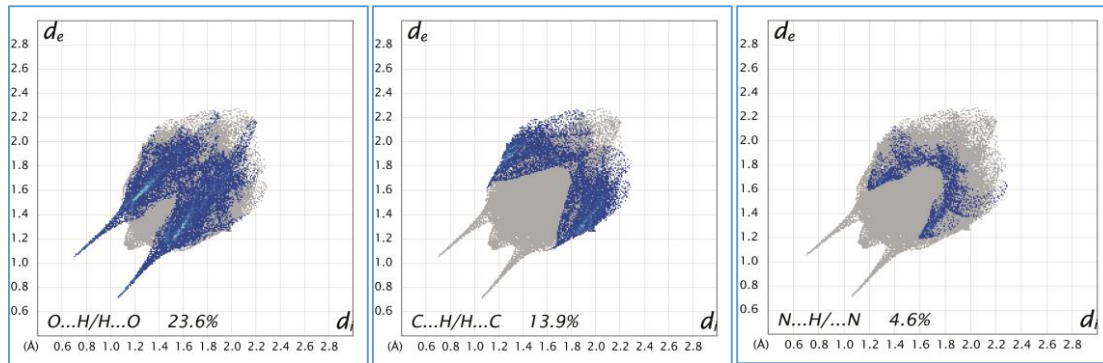
Kristal yapıya ait molekül içi etkileşimleri Hirshfeld yüzey analizi yöntemi ile Crystal Explorer 3.0 programı kullanılarak belirlenmiştir (Wolff D.S.K. vd., 2012). Moleküller arası etkileşimleri belirleyebilmek içinse 2-boyutlu parmak izi yöntemi kullanılmıştır. Elde edilen haritalar kırmızı ve mavi renklerin bulunduğu yerlere göre yorumlanır. Kırmızı bölgeler Van der Waals yarıçaplarından daha kısa, mavi bölgeler ise Van der Waals yarıçaplarından daha uzun etkileşimlere karşılık gelmektedir. Bir başka deyişle kırmızı olarak gözükmekte olan bölgeler aktif hidrojen bağının bulunduğu yerleri temsil etmektedir. Yüzey analizi ve molekülün sahip olduğu etkileşimler ile Şekil 5'de verilmiştir. Molekül için  $d_{norm}$  -0.650 ile 1.418 a.u. aralığındadır. Şekle göre, O3 atomu civarının moleküller arası

hidrojen bağı için aktif olduğu görülebilmektedir. Deneysel sonuçlarda aktif olan bu bölgede moleküller arası O1-H1...O3 bağı olduğu zaten rapor edilmiştir (Wang vd., 2005).



Şekil 5. Molekülün Hirshfeld Yüzeyi ( $d_{\text{norm}}$  -0.650 ile 1.418 a.u.)

Hirshfeld yüzeyine en fazla katkıyı sunan bazı etkileşimlere ait 2-boyutlu parmak izi haritaları Şekil 6'da verilmektedir. O...H/H...O etkileşimleri incelenecek olursa iki keskin sivri uç oldukça belirgin bir şekilde gözükmemektedir ve bu durum mevcut hidrojen bağlarının bir özelliğidir. Bu etkileşim Hirshfeld yüzeyine % 23.6 katkı sunarken, C...H/H...C ve N...H/H...N etkileşimlerinin Hirshfeld yüzeyine katkısı sırasıyla %13.9 ve %4.6 şeklinde belirlenmiştir.



Şekil 6. Moleküle ait bazı etkileşimlerin ait 2-boyutlu parmak izi haritaları.

## SONUÇLAR

1-[5-(4-Hydroxy-3-methoxyphenyl)-3-methyl-4,5-dihydro-1H-pyrazol-1-yl]ethanone molekülünün kuramsal hesaplamaları HF ve YFK/B3LYP ve B3PW91 yöntemleri ve 6-311(d,p) ve 6-311++(d,p) baz setleri ile incelenmiştir. Molekülün optimizasyonu sonucunda elde edilen geometrik parametreler x-ışını kırınımından elde edilen parametrelerle karşılaştırılmış ve sonuçlar yorumlanmıştır. Ayrıca molekülün HOMO-LUMO orbitalleri, MEP haritaları, Fukui fonksiyonları ve de Hirshfeld yüzey analizleri yapılmış ve moleküldeki mevcut etkileşimleri desteklediği belirlenmiştir. Diğer taraftan molekülün sahip olduğu termal özellikler ve doğrusal olmayan optik özellikler belirlenerek molekülün deneysel olarak elde edilemeyen fiziksel ve kimyasal özelliklerine ulaşılmıştır. Molekülün elde edilen 1. mertebeden kutuplanabilirlik değerleriyle gelecekteki çalışmalarda optik materyal olarak kullanıma uygun olduğu söylenilebilmektedir.

### ***Teşekkür***

#### *Acknowledgement*

Bu çalışmanın yazarı olarak herhangi bir destek ve teşekkür beyanımın olmadığını bildiririm.

### ***Yazarların Katkısı***

#### *Author contribution*

Tüm yazarlar çalışmaya eşit katkıda bulunmuştur.

### ***Çıkar Çatışması Beyanı***

#### *Conflicts of interest*

“Yazarlar herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan eder”

### ***Etik Beyanı***

#### *Declaration of ethical code*

“Bu makalenin yazarları, bu çalışmada kullanılan materyal ve yöntemlerin etik kurul izni ve / veya yasal-özel izin gerektirmediğini beyan etmektedir.”

## KAYNAKLAR

- Amir M, Kumor, H. & Suroor A Khan, (2008). Synthesis and pharmacological evaluation of pyrazoline derivatives as new anti-inflammatory and analgesic agents. *Bioorg Med Chem Lett.*;18:918-22.
- Aydın A., Turanlı S., Akkurt M., Banoğlu E. & Özçelik N., (2022) Pirazol'un Kristal Yapısı ve Hirshfeld Yüzey Analizi, *Bilim ve Düzce Üniversitesi Teknoloji Dergisi*, 10 128-138.
- Can Ö.D., Turan N. & Alyu F., (2016). 1,3,5-triaril-4,5-dihidro-1h-pirazol türevi bazı bileşiklerin benzodiazepin reseptörleri aracılıklı anksiyolitik-benzeri etkileri, *Çukurova Medical Journal*;41(2):304-315.
- Demir Özkay Ü., Can Ö. D., & Kaplancikli Z. A., (2012). Antinociceptive activities of some triazole and pyrazoline moieties-bearing compounds. *Med Chem Res.*;21:1056-61.
- Dennigton R. II, (2007). GaussView, Version 4.1.2, Semichem, Inc., Shawnee Mission.
- Frisch M. J. G.W. Trucks, H.B. Schlegel, G.E. Scuseria, M.A. Robb, J.R. Cheeseman, J.A. Montgomery Jr., T. Vreven, K.N. Kudin, J.C. Burant, J.M. Millam, S.S. Iyengar, J. Tomasi, V. Barone, B. Mennucci, M. Cossi, G. Scalmani, N. Rega, G.A. Petersson, H. Nakatsuji, M. Hada, M. Ehara, K. Toyota, R. Fukuda, J. Hasegawa, M. Ishida, T. Nakajima, Y. Honda, O. Kitao, H. Nakai, M. Klene, X. Li, J.E. Knox, H.P. Hratchian, J.B. Cross, V. Bakken, C. Adamo, J. Jaramillo, R. Gomperts, R.E. Stratmann, O. Yazyev, A.J. Austin, R. Cammi, C. Pomelli, J.W. Ochterski, P.Y. Ayala, K. Morokuma, G.A. Voth, P. Salvador, J.J. Dannenberg, V.G. Zakrzewski, S. Dapprich, A.D. Daniels, M.C. Strain, O. Farkas, D.K. Malick, A.D. Rabuck, K. Raghavachari, J.B. Foresman, J.V. Ortiz, Q. Cui, A.G. Baboul, S. Clifford, J. Cioslowski, B.B. Stefanov, G. Liu, A. Liashenko, P. Piskorz, I. Komaromi, R.L. Martin, D.J. Fox, T. Keith, M.A. Al-Laham, C.Y. Peng, A. Nanayakkara, M. Challacombe, P.M.W. Gill, B. Johnson, W. Chen, M.W. Wong, C. Gonzalez, J.A. Pople, Gaussian 03, Revision E.01, (2004). Gaussian, Inc., Wallingford CT.
- Kaplancikli Z.A., Turan-Zitouni G, Ozdemir A, Can Ov, Chevallet P., (2009) Synthesis and antinociceptive activities of some pyrazoline derivatives. *Eur J Med Chem.*; 44:2606-10.
- Kurt H., Çetin A. & Bozarı S., (2018). *Iğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enst. Dergisi*, 8(2):223-229.
- Levent S. d., (2013), "Pyrazole derivatives as inhibitors of arachidonic acid-induced platelet aggregation," *European Journal of Medicinal Chemistry*, vol. 64, pp. 42–53.
- Özdemir Tari G., *Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi*, 12(1), 178-192, 2022.
- Şen, F., "4-(3-metil-3-fenilsiklobütil)-2-(2-(piridin-4-ylmetilen)hidrazinil) tiyazol'un sentezi, karakterizasyonu, kristalografik yapısı ve Hirshfeld yüzeyinin incelenmesi," *Iğdır Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, c. 8, s. 1, ss. 157–168, 2018. Cilt: 8 Sayı: 1, 157 - 168, 31.03.2018.
- Uzun S. & Demircioğlu Z, *Karadeniz Fen Bilimleri Dergisi*, (2019) 9(2), 275-288.
- Wang S. Zhu W., Yang W., & Zhou, L., (2005). 1-[5-(4-Hydroxy-3-methoxyphenyl)-3-methyl-4,5-dihydro-1H-pyrazol-1-yl]ethanone, *Acta Cryst. E61*, o3985–o3986.
- Wolff D. S. K., Grimwood D. J., McKinnon J. J., Turner M. J., & M.A. Spackman, Crystal Explorer (Version 3.1), *Univ. West. Aust.* (2012).
- M. Adant, M. Dupuis, J.L. Bredas, *Int. J. Quantum Chem.* 56 (1995) 497–507.





# Kahramanmaraş Sütçü İmam University

## Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 20.11.2023  
Kabul Tarihi : 29.04.2024

Received Date : 20.11.2023  
Accepted Date : 29.04.2024

### GERİ DÖNÜŞTÜRÜLMÜŞ AGREGA İÇEREN KENDİLİĞİNDEN YERLEŞEN BETONUN MÜHENDİSLİK ÖZELLİKLERİNİN OPTİMİZASYONU

### OPTIMIZATION OF ENGINEERING PROPERTIES OF SELF-COMPACTING CONCRETE CONTAINING RECYCLED AGGREGATE

Şevin EKME\* (ORCID:0000-0002-2577-696X)

\*Harran Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Şanlıurfa, Türkiye

\*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Şevin EKME, ekmenşevin@harran.edu.tr

#### ÖZET

Kendiliğinden yerleşen beton yüksek işlenebilirliğe sahip olmasının yanı sıra mühendislik özellikleri açısından yeterli performansı göstermesi nedeni ile oldukça ilgi gören özel bir beton çeşididir. Bu çalışmada geri dönüştürülmüş agrega içeren kendiliğinden yerleşen beton uygulamalarının yer aldığı literatür çalışmaları dikkate alınarak Tepki Yüzey Metodu ile optimizasyon çalışması gerçekleştirilmiştir. Yürütülen optimizasyon çalışmasında geri dönüştürülmüş ince ve iri agrega yüzdeleri ile su/çimento oranı girdi parametreleri olarak seçilmiştir. Bu kapsamda kendiliğinden yerleşen betonun taze özelliğini yansıtan yayılma çapı değerleri ile sertleşmiş performansını gösteren basınç dayanımı parametreleri irdelenmiştir. Kullanılan bu yöntem sayesinde dikkate alınan girdi değişkenlerinin çıktı parametreleri üzerindeki etkisini yansıtan modeller oluşturulmuştur. Agreganın miktarları ve basınç dayanımı maksimize edilmiş olup diğer parametreler serbest bırakılmıştır. Yayılma çapı için ise hedef değer tanımlaması yapılmıştır. Ayrıca gerçekleştirilen varyans analizi sonucunda oluşturulan modellerin anlamlılığı ortaya konulmuştur. Oluşturulan modelin arzu edilebilirlik değeri 0.734 olarak elde edilmiştir. Böylece istenilen düzeye anlamlı bir derecede yaklaşılarak geri dönüştürülmüş agrega içeren kendiliğinden yerleşen beton için optimum tasarım parametrelerine ulaşılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Kendiliğinde yerleşen beton, geri dönüştürülmüş agrega, tepki yüzey metodu, optimizasyon

#### ABSTRACT

Self-compacting concrete is a special type of concrete that attracts a lot of attention due to its high workability and adequate performance in terms of engineering properties. In this study, an optimisation study was carried out with the Response Surface Method considering the literature studies on self-compacting concrete applications containing recycled aggregates. In the optimisation study, recycled fine and coarse aggregate percentages and water/cement ratio were selected as input parameters. In this context, spread diameter values reflecting the fresh property of self-compacting concrete and compressive strength parameters showing the hardened performance were examined. Thanks to this method, models reflecting the effect of the input variables on the output parameters were created. Aggregate amounts and compressive strength were maximised and other parameters were left free. A target value was defined for the spreading diameter. In addition, the significance of the models created as a result of the analysis of variance was revealed. The desirability value of the model was obtained as 0.734. Thus, the optimum design parameters for self-compacting concrete containing recycled aggregate were reached by significantly approaching the desired level.

**Keywords:** Self compacting concrete, recycled aggregate, response surface method, optimization

## GİRİŞ

Dünya çapında nüfus artmaya devam ettikçe yeni altyapıya olan talep de artmaktadır. Bu durum neticesinde beton dünyada en yaygın kullanılan inşaat malzemesi olmaktadır. Beton yapılara olan talebin yüksek olması ile birlikte de inşaat sektörünün doğal kaynak tüketimi de son yıllarda önemli ölçüde artmıştır. Aynı zamanda artan inşaat ve yıkım atıkları da çevre açısından olumsuz bir etki yaratmaktadır.

İnşaat sektöründe daha sürdürülebilir bir sistemin oluşması açısından beton teknolojisine farklı açılardan yaklaşılması gerekmektedir. Doğal kaynakların kullanımının azaltılacağı alanlar farklılık göstermek ile birlikte yeni beton üretiminde geri dönüştürülmüş agregaların kullanılması giderek daha yaygın hale gelmektedir. Bu sayede azaltılan agrega kaynak tüketimi ve maliyet durumlarının yanı sıra atık depolama, taşıma gibi sorunların çözümüne de katkı sağlanmış olmaktadır. Bu kapsamda hem ekonomik hem de çevresel sorunlara çözüm getirmesi açısından geri dönüştürülmüş malzemelerin yenilikçi kullanımının önemini gösteren ve inşaat sektöründe sürdürülebilir kaynakların geliştirilmesine odaklanılan çalışmalar yürütülmektedir (Soares vd., 2014; Behere vd., 2014; Evangelista ve De Brito, 2014; Silva vd., 2015; Silva vd., 2018; Guo vd., 2018)

Kendiliğinden yerleşen beton (KYB), dışarıdan bir kuvvet veya titreşim olmadan karışımın yüksek akışkan yapısı sayesinde normal betonun kullanılmasının mümkün olmadığı dar, sıkışık uygulama alanlarına segregasyon olmadan rahatlıkla yerleşebilen bir beton türüdür (Corinaldesi ve Moriconi, 2011). Bu yüksek işlenebilirlik yapısına ulaşılması katkı maddelerinin kullanımı ile sağlanmaktadır. KYB üretimi sırasında işlenebilirlik gerekliliklerine yeterince uyması açısından akış kapasitesi, geçiş kapasitesi, viskozite ve ayrışmaya karşı direnç gibi özelliklerinin analiz edilmesi gerekmektedir (Concrete, 2005). Kendiliğinden Yerleşen Betonda geri dönüştürülmüş agrega kullanımı henüz yakın zamanda incelenmiştir, ancak bu agrega kullanımının sağladığı bazı avantajlar dikkate alındığında bu alanda yapılacak daha fazla çalışmalara ihtiyaç duyulacağı aşikardır. Araştırmacılar, geri dönüştürülmüş agrega içeren KYB'nin taze özelliklerinin yanı sıra dayanım ve dayanıklılık performanslarının da istenilen ölçülerde elde edilmesi için bazı kapsamlı çalışmalar gerçekleştirmişlerdir (Garcia-Troncoso vd., 2021; Mu vd., 2021; Sasanipour ve Aslani, 2020).

Literatürde, inşaat mühendisliğinin farklı alanlarında olmak üzere karışım oranlarının belirlenmesinde kullanılan değişken parametrelerin betonun mühendislik özellikleri üzerindeki etkisinin incelendiği optimizasyon çalışmaları mevcuttur (Ekmen vd., 2020; Şimşek vd., 2013; Khargotra vd., 2022; Broyles vd., 2022). Bu optimizasyon çalışmalarında deney tasarımı, model geliştirme ve optimum değerlere ulaşmak için kullanılan en yaygın yaklaşımlardan biri Tepki Yüzey Metodudur (TYM) (Yan vd., 2011; Bayramov vd., 2004; Ekmen ve Avci, 2023; Nambiar ve Ramamurthy, 2006; Adamu vd., 2022; Avci ve Ekmen, 2023). Haque vd., (2021), değişken olarak kabuk külü ve cam elyaf kullanarak betonun özelliklerini tahmin etmek ve optimize etmek için TYM'yi kullanmışlardır. Siamardi (2022), TYM sayesinde deneysel tasarım ve model geliştirerek hafif kendiliğinden yerleşen betonun mühendislik özelliklerinin tahminini gerçekleştirmiştir. Awolusi vd., (2019), çelik lif ve kireçtaşı tozunu girdi parametreleri olarak kullanarak betonun yayılma çapı, basınç dayanımı, yarmada çekme dayanımı ve su emmesini tahmin etmek için TYM ile modeller oluşturmuşlardır. Geliştirdikleri modeller yüksek derecede doğruluğa ve daha az hata ile tahmine sahiptir. Hameed vd., (2021), yüksek dayanımlı betonun dayanımını TYM desteği ile modellemişlerdir.

Bu çalışmada KYB üretiminde geri dönüştürülmüş agrega kullanımının gerçekleştirildiği çalışmalardan edinilen veriler ışığında TYM kullanılarak optimizasyon çalışması gerçekleştirilmiştir. Karışım tasarımında yer verilen oranlar dikkate alınarak üretilen KYB'ye ait yayılma çapı ve basınç dayanım değerleri değerlendirilmiştir. Hem iri agrega hem de ince agrega ikame yüzdelilerinin KYB performansını belirleyen taze ve sertleşmiş özellikler üzerindeki etkisi ortaya konularak gelecek çalışmalara yön vermesi hedeflenmiştir. Böylece kendiliğinden yerleşen beton için optimum tasarım parametrelerine ulaşılmıştır.

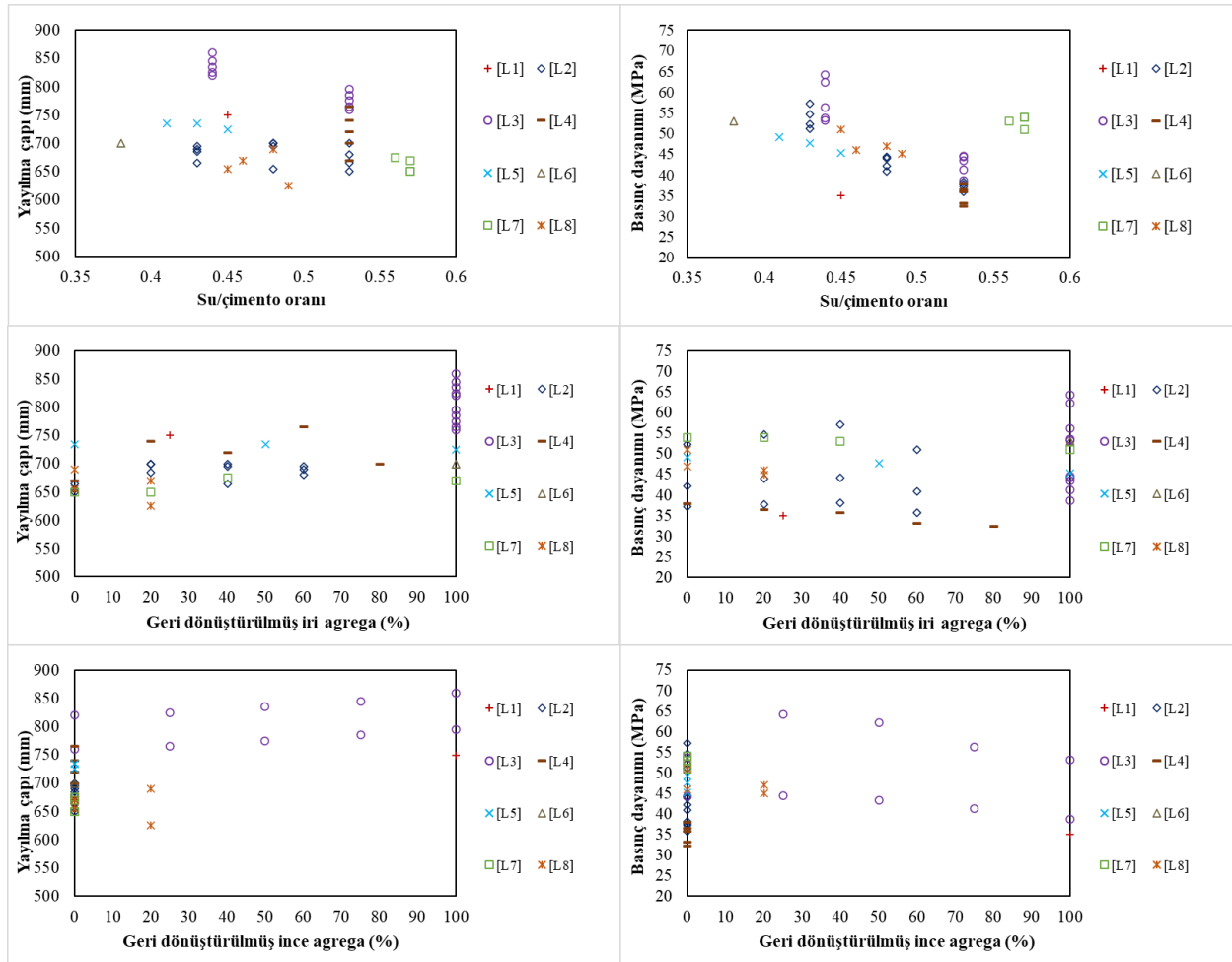
## MATERYAL VE YÖNTEM

### *Materyal*

Yürütülen bu çalışma kapsamında geri dönüştürülmüş agrega ikamesi içeren KYB üretimleri dikkate alınmıştır. Bu alanda yürütülen literatür çalışmaları (Corinaldesi ve Moriconi, 2004; Kou ve Poon, 2009; Grdic vd., 2010; Tayan, 2014; Pereira-de-Oliveira vd., 2014; Modani ve Mohitkar, 2014; Güneyisi vd., 2014; Campos vd., 2018) araştırılarak

ulaşılan veriler irdelenmiştir. KYB karışım tasarımı gerçekleştirilirken taze özellikler ile birlikte mekanik performansın da istenilen seviyelerde olması gerekmektedir. Üretilen KYB'nin yeterli işlenebilirlik seviyelerine ulaşması ve aynı zamanda basınç dayanım değerinin de yapısal kullanılabilirliğe uygun olması gerekmektedir. Su/çimento (s/ç) oranının artırılması daha akışkan bir yapı elde edilebilmesine olanak sağlarken aynı zamanda basınç dayanım değerlerinde de azalmaya sebep olabilmektedir. Bu iki önemli özellik dikkate alındığında s/ç oranının da en uygun şekilde ayarlanması gerekmektedir. Tüm bu durumlar göz önüne alınarak bu çalışmada geri dönüştürülmüş iri agrega ( $GDA_{iri}$ ) ve geri dönüştürülmüş ince agrega ( $GDA_{ince}$ ) ikame yüzdelerinin yanı sıra s/ç oranının da KYB'nin yayılma çapı (mm) ve basınç dayanım (MPa) değerleri üzerindeki etkisinin irdelendiği bir optimizasyon çalışması gerçekleştirilmiştir.

Bu kapsamda dikkate alınan literatür çalışmalarından istenilen parametre ve oranlarını içeren 40 veri değerlendirilmiş olup sonuçlar irdelenmiştir. Kullanılan veriler için s/ç oranı 0,38-0,57 arasında,  $GDA_{iri}$  ve  $GDA_{ince}$  yüzdeleri ise 0-100 arasında değişmektedir. Çıktı parametreleri olan yayılma çapı (mm) ve basınç dayanım (MPa) değerleri ise sırasıyla 625-860 mm ile 32,3-64,3 MPa arasında değişmektedir. Kullanılan veriler ve ait olduğu çalışmaları gösteren grafik Şekil 1'de verilmiştir. Literatür çalışmalarını temsil eden göstergeler çalışmaların metin içerisinde verildiği sıra ile belirtilmiştir. Örneğin L<sub>1</sub>, Corinaldesi ve Moriconi, (2004) tarafından yürütülen çalışmayı temsil etmektedir.

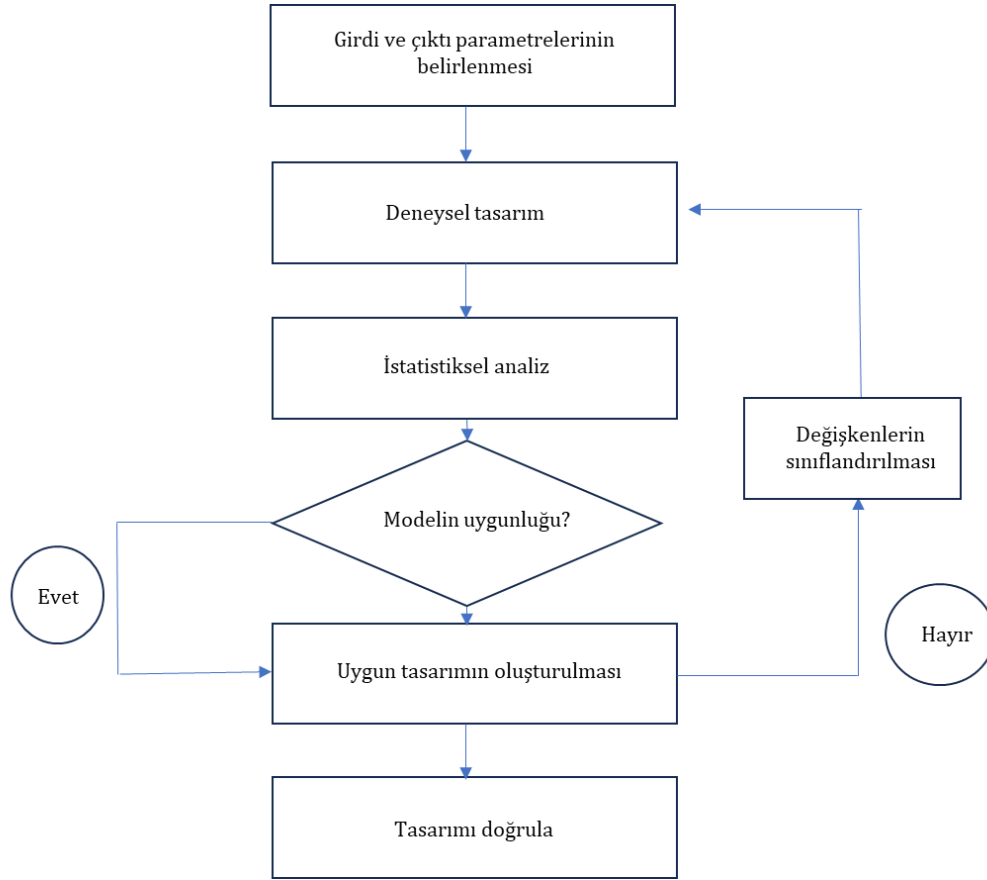


Şekil 1. KYB Üretimi Gerçekleştirilmiş Literatür Çalışmalarına ait Veriler

## Yöntem

Tepki Yüzey Metodu ilk kez Box ve Wilson (Myers vd., 2016) tarafından 951 yılında tanıtılmıştır ve halen deney tasarım çalışmalarında kullanılmaktadır. Tepki Yüzey Metodu, ilgilenilen bağımsız değişkenlerin birkaç bağımlı değişkenden etkilendiği ve amacın yanıtı optimize etmek olduğu problemlerin modellenmesi ve analizi için

kullanılabilen, matematiksel-istatistiksel tekniklerden oluşan güçlü bir metodolojidir (Montgomery, 2013). Şekil 2’de Tepki Yüzey Metodunun çalışma mekanizmasını gösteren akış şemasına yer verilmiştir.



Şekil 2. Tepki Yüzey Metodunun Çalışma Mekanizmasını Gösteren Akış Şeması

TYM’de, birden fazla değişken söz konusu olduğunda iyi bir deneysel program kullanarak ikinci dereceden etkilerin etkileşimleri ortaya konulabilmektedir. Ayrıca, girdi parametrelerinin yanıt üzerindeki etkilerini değerlendirmek, model denklemleri oluşturmak ve en iyi performans değerlerine ulaşılmasını sağlayan optimum miktarlar belirlenebilmektedir (Adamu vd., 2022). TYM, oluşturulacak olan karışım tasarımında sağladığı avantajların yanı sıra yanıt özelliklerinin birbirleriyle olan ilişkileri hakkında da bilgi edinilmesini mümkün kılmaktadır. Bina ve inşaat uygulamalarında TYM tabanlı yaklaşımın kullanılması sayesinde daha az deney gerçekleştirilerek zaman ve maliyette azalma sağlanmış olmaktadır (Adamu vd., 2022).

## BULGULAR VE TARTIŞMA

Çalışma kapsamında gerçekleştirilen istatistiksel değerlendirme ve modelleme işlemleri Design Expert versiyon 10 (Design Expert, 2010) paket programı ile gerçekleştirilmiştir. Tepki Yüzey Metoduna bağlı olan Merkezi Birleşik Tasarım modeli kullanılmıştır. Su/çimento oranı, geri dönüştürülmüş iri agrega yüzdesi ve geri dönüştürülmüş ince agrega yüzdesi girdi parametreleri olarak kullanılırken yayılma çapı (mm) ve basınç dayanımı (MPa) çıktı parametreleri olarak belirlenmiştir. TYM ile oluşturulan model sayesinde tepki parametrelerinin optimum değerleri elde edilmiştir. Modelleme gerçekleştirilirken 750 mm hedef yayılma çapı ile maksimum basınç dayanımı sonucuna ulaşmaya çalışılmıştır. Bu hedefler doğrultusunda s/ç oranı veri aralığında serbest seçilirken  $GDA_{iri}$  ve  $GDA_{ince}$  yüzdesi maksimum olacak şekilde tasarım gerçekleştirilmiştir. Böylece deneysel verilere en yakın sonuçların ulaşılacağı en iyi model oluşturulmuştur.

Oluşturulan her bir modelin deneysel verilere uyup uymadığı istatistiksel olarak kontrol edilmiştir. Varyans analizi ile ulaşılan istatistiksel parametrelere Tablo 1’de yer verilmiştir. TYM’den elde edilen varyans analizinde (ANOVA) gerçekleşen bir dizi adım sonrasında ulaşılan P-değerleri kullanılarak istatistiksel anlamlılık belirlenmiş ve geliştirilen modellerin yeterliliği kontrol edilmiştir. Hem yayılma çapı (mm) hem de basınç dayanımı (MPa) için istatistiksel değerlendirme sonucunda  $p < 0,05$  olduğundan oluşturulan modellerin %95 güven aralığında anlamlı

olduğu belirlenmiştir. Bu nedenle, belirlenen değişkenler ile oluşturulan modeller arasında anlamlı bir ilişki olduğu söylenebilmektedir.

**Tablo 1.** Yayılma Çapı (mm) ve Basınç Dayanımı (MPa) için ANOVA Sonuçları

Tepki	Kaynak	İstatistiksel parametreler			Kareler ortalaması	F değeri	p-değeri	Anlamlılık
		Model	Kareler toplamı	Serbestlik derecesi				
Yayılma çapı (mm)	Model		1,02E+05	3	33885,08	27,9	< 0.0001	Anlamlı
	A-S/Ç		5136,59	1	5136,59	4,23	0,047	
	B-GDA <sub>iri</sub> (%)	Lineer	33013,85	1	33013,85	27,18	< 0.0001	
	C-GDA <sub>ince</sub> (%)		20975,43	1	20975,43	17,27	0,0002	
	Artık		43722,27	36	1214,51			
Basınç dayanımı (MPa)	Model		1,59E+03	9	176,85	5,52	0,0002	Anlamlı
	A-S/Ç		645,56	1	645,56	20,16	< 0.0001	
	B-GDA <sub>iri</sub> (%)		107,76	1	107,76	3,36	0,0765	
	C-GDA <sub>ince</sub> (%)		136,7	1	136,7	4,27	0,0476	
	AB	Kuadratik	2,02	1	2,02	0,063	0,8034	
	AC		130,88	1	130,88	4,09	0,0522	
	BC		146,96	1	146,96	4,59	0,0404	
	A <sup>2</sup>		367,8	1	367,8	11,48	0,002	
	B <sup>2</sup>		7,71	1	7,71	0,24	0,6273	
	C <sup>2</sup>		257,2	1	257,2	8,03	0,0081	
Artık		960,72	30	32,02				

Deneysel tasarım, veri üretimi ve analizi tamamlandıktan sonra, çıktıları tahmin etmek için kullanılacak model denklemleri oluşturulmuştur. Yayılma çapı ve basınç dayanımı için bu model denklemleri sırasıyla Eşitlik (1) ve Eşitlik (2)'de verilmiştir. Tepki modellerini temsil eden bu denklemlerin katsayı değerlerine ise Tablo 2'de yer verilmiştir.

$$\text{Yayılma çapı (mm)} = (x_1 - x_2A + x_3B + x_4C) \quad (1)$$

$$\text{Basınç dayanımı (MPa)} = (y_1 - y_2A + y_3B - y_4C + y_5AB - y_6AC + y_7BC + y_8A^2 + y_9B^2 - y_{10}C^2) \quad (2)$$

**Tablo 2.** Yayılma Çapı ve Basınç Dayanımı için Regresyon Modellerinde (Denklem 1-2) Kullanılan Katsayılar

Tepki	Katsayılar													
	x <sub>1</sub>	x <sub>2</sub>	x <sub>3</sub>	x <sub>4</sub>	y <sub>1</sub>	y <sub>2</sub>	y <sub>3</sub>	y <sub>4</sub>	y <sub>5</sub>	y <sub>6</sub>	y <sub>7</sub>	y <sub>8</sub>	y <sub>9</sub>	y <sub>10</sub>
Yayılma çapı (mm)	749,4	21,45	40,5	41,04	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Basınç dayanımı (MPa)	-	-	-	-	46,91	16,52	4,2	4,38	0,6	7,42	5,31	13,56	1,23	9,85

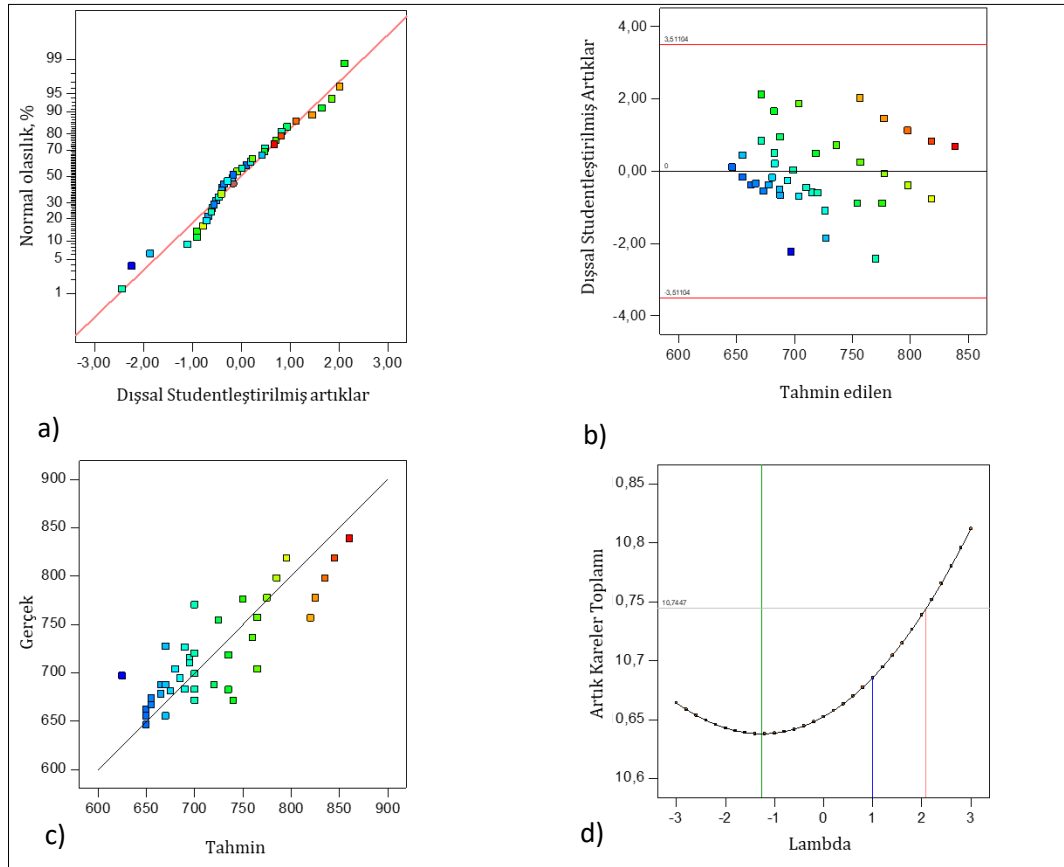
Gerçekleştirilen optimizasyon çalışmasında kullanılan bağımlı ve bağımsız değişkenler, hedef aralıkları ve sonuç olarak ulaşılan optimum değerler Tablo 2'de verilmiştir. En uygun model oluşturulurken öncelikli olarak geri dönüştürülmüş agrega yüzdelilerinin ve basınç dayanımı değerlerinin maksimum olması koşuluyla diğer faktör ve değişkenlerin hedefleri belirlenmiştir. S/Ç oranı, GDA<sub>iri</sub> (%) ve GDA<sub>ince</sub> (%) faktörleri için optimum değerler sırasıyla 0,42, %81,03 ve %67,46 olarak elde edilirken tepki parametreleri olan yayılma çapı (mm) ve basınç dayanımı (MPa) için bu değerler sırasıyla 801,61 mm ve 64,3 MPa olarak elde edilmiştir.



**Tablo 3.** Optimizasyon Analizinde Kullanılan Değişkenlere Ait Hedefler ve Optimum Değerler

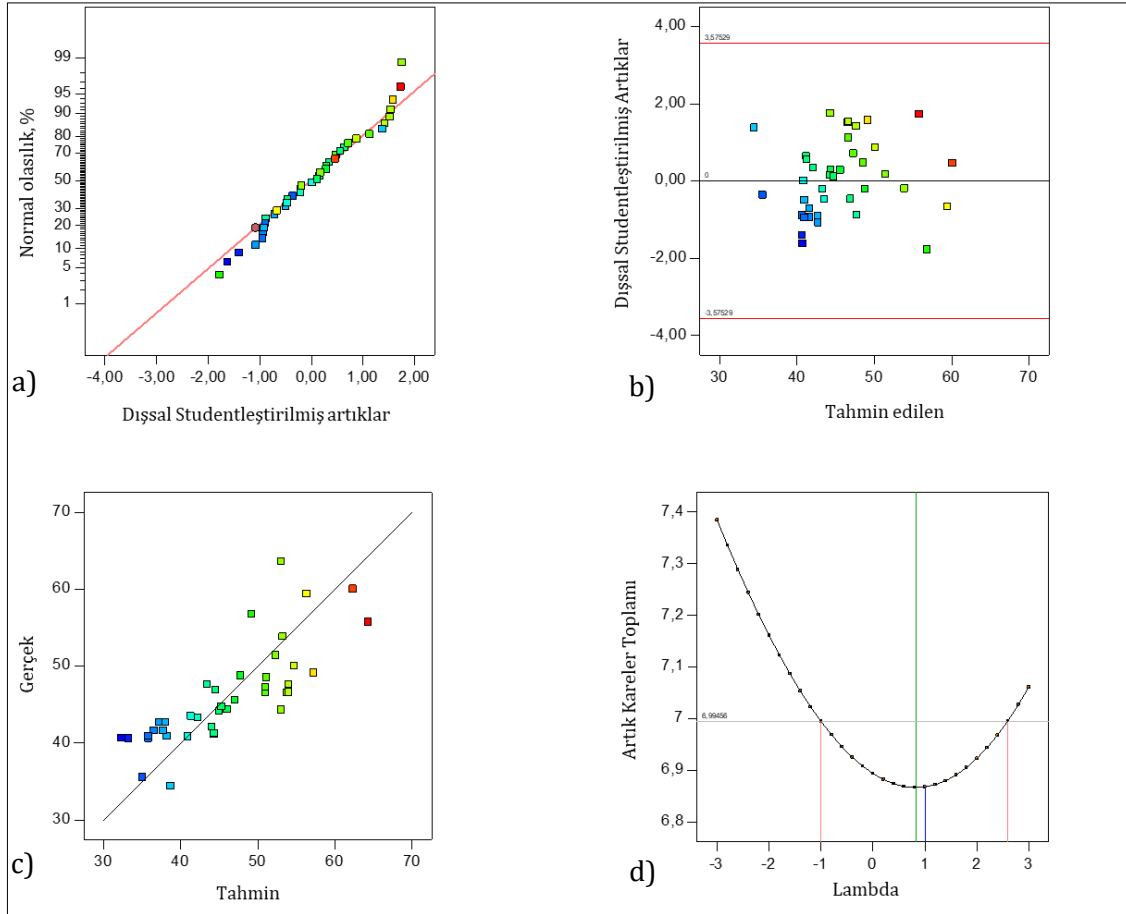
Faktörler ve Tepkiler	Hedef	Alt limit	Üst limit	Optimum değerler
S/Ç	aralıkta	0,38	0,57	0,42
GDA <sub>iri</sub> (%)	maksimum	0	100	81,03
GDA <sub>ince</sub> (%)	maksimum	0	100	67,46
Yayımla çapı (mm)	hedef	625	860	801,61
Basınç dayanımı (MPa)	maksimum	32,3	64,3	64,3

Yayımla çapı (mm) tepki modeli için artıkların normal grafiği Şekil 3 (a)'da verilmiş olup, bu şekilde artıkların düz bir hattın oldukça yakınında olduğu görülmektedir. Bu durum, belirlenen hedeflere ulaşılması doğrultusunda oluşturulan tepki modeline ait artıkların uygun bir dağılımda olduğunu göstermektedir. Şekil 3 (b)'de, oluşturulan model için elde edilen artıklar ve tahmin edilen yayılma çapı değerleri arasındaki ilişkiyi gösteren grafik verilmiştir. Grafikte modele ait veriler sınır çizgileri arasında rastgele dağılmıştır. Şekil 3 (c)'de gerçek değerler ile tahmin edilen yayılma çapı (mm) tepki değerleri arasındaki ilişki verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi eğimli çizgi verileri yaklaşık eşit olarak bölmüştür. Şekil 3 (d)'de ise elde edilen yayılma çapı (mm) modeli için Box-Cox transformasyon analizine ait grafiğe yer verilmiştir. Bu grafikte lambda için en uygun olan 1 değeri alınmıştır.



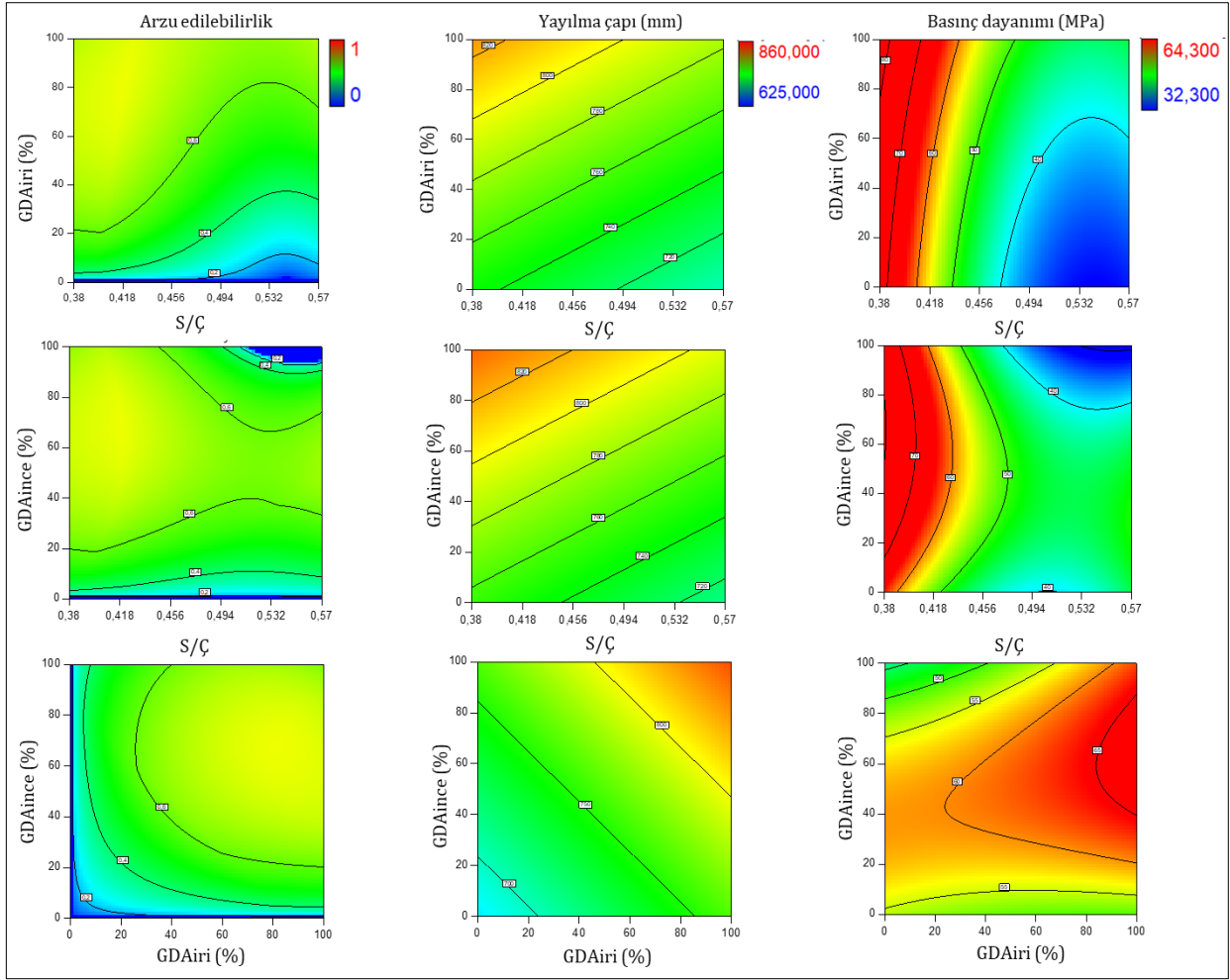
**Şekil 3.** Yayımla Çapı Modelinin Regresyon Analizi için Grafikler (Denklem 1): a) Artıkların Normal Grafiği; b. Artıklara Karşı Tahmin Edilen Tepkinin Grafiği; c. Tahmin Edilene Karşı Gerçek Tepkinin Grafiği; d. Üssel Transformasyon için Box-Cox Dönüşüm Grafiği

Basınç dayanımı (MPa) tepki modeli için artıkların normal grafiği Şekil 3 (a)'da verilmiş olup, bu şekilde artıkların çoğunun düz hattın üzerinde uygun bir dağılımda olduğu görülmektedir. Oluşturulan model için elde edilen artıklar ve tahmin edilen basınç dayanımı (MPa) değerleri arasındaki ilişkiyi gösteren grafik ise Şekil 3 (b)'de verilmiştir. Grafikte modele ait veriler sınır çizgileri arasında rastgele dağılmıştır. Şekil 3 (c)'de gerçek değerler ile ve tahmin edilen basınç dayanımı (MPa) tepki değeri arasındaki ilişki verilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi eğimli çizgi verileri yaklaşık eşit olarak bölmüştür. Elde edilen basınç dayanımı (MPa) modeli için Box-Cox transformasyon analizine ait grafik Şekil 3 (d)'de verilmiştir. Bu tepki modeli için de lambda değeri 1 olarak alınmıştır.



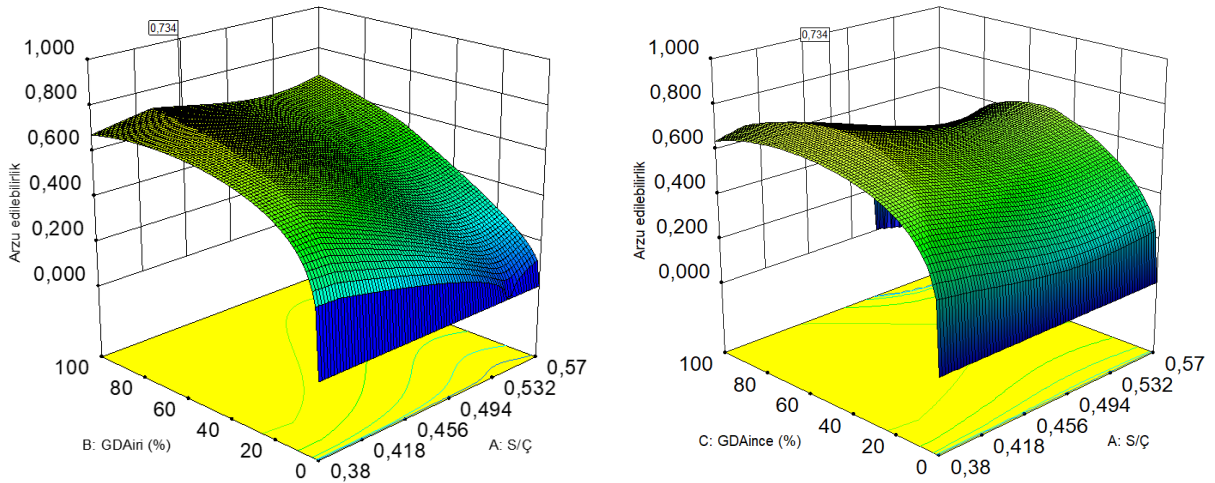
**Şekil 4.** Basınç Dayanımı Modelinin Regresyon Analizi için Grafikler (Denklem 2): a. Artıkların Normal Grafiği; b. Artıklara Karşı Tahmin Edilen Tepkinin Grafiği; c. Tahmin Edilene Karşı Gerçek Tepkinin Grafiği; d. Üssel Transformasyon için Box-Cox Dönüşüm Grafiği

TYM'deki çok amaçlı optimizasyonun sonucu, arzu edilebilirlik kullanılarak doğrulanır ve açıklanır. Arzu edilebilirlik 0 ila 1 arasında değişen ve her yanıt için arzu edilen aralıkları yansıtan bir amaç fonksiyonu  $d(x)$  kullanan çoklu bir yanıt metodudur. Yayılma çapı (mm) ve basınç dayanımı (MPa) modelleri için arzu edilebilirlik ve iki boyutlu tepki yüzeyi grafikleri Şekil 5'te verilmiştir. Şekil 5'te S/Ç oranının,  $GDA_{iri}$  (%) ve  $GDA_{ince}$  (%) değerlerinin yayılma çapı (mm) ve basınç dayanımı (MPa) tepkileri üzerindeki etkisi görülmektedir. S/ç oranındaki azalmaya bağlı olarak basınç dayanım değerlerinde artış görülmektedir. Yayılma çapı (mm) değerlerindeki değişimde hem  $GDA_{iri}$  (%) hem de  $GDA_{ince}$  (%) değerlerindeki artışlar etkili iken, basınç dayanımındaki değişimde en etkili parametre  $GDA_{iri}$  (%) miktarı olmuştur. Tasarım sırasında belirlenen hedefler doğrultusunda oluşturulan modeller için arzu edilebilirlik değeri yüksek  $GDA_{iri}$  (%) miktarı ve düşük s/ç oranı ile elde edilmiştir. Gerçekleştirilen bu optimizasyon çalışmasında arzu edilebilirlik değeri 0,734 olarak elde edilmiştir.



Şekil 5. Oluşturulan Tepki Yüzey Modellerinin Arzu Edilebilirliği ve İki Boyutlu Gösterimi

Şekil 6'da oluşturulan modele ait üç boyutlu arzu edilebilirlik grafiği verilmiştir. Arzu edilebilirlik değerinin 1'e yakın elde edilmesi optimum tasarıma istenilen derecede yaklaşıldığını göstermektedir.



Şekil 6. Oluşturulan Modele ait Üç Boyutlu Arzu Edilebilirlik Grafikleri

## SONUÇLAR

Çalışma kapsamında geri dönüştürülmüş iri ve ince agrega ikamesi yapılan kendiliğinden yerleşen beton uygulamaları irdelenmiş olup optimizasyon çalışması gerçekleştirilmiştir. Design Expert programı kullanılarak gerçekleştirilen istatistiksel ve matematiksel işlemlerin sonucunda ele alınan bağımlı ve bağımsız değişkenler arasındaki ilişki belirlenmiştir. Bu kapsamda S/Ç oranı,  $GDA_{iri}$  (%) miktarı ve  $GDA_{ince}$  (%) miktarı kaynak değerlerine karşılık yayılma çapı (mm) ve basınç dayanımı (MPa) tepki değerleri incelenmiştir. Çalışma ile ulaşılan sonuçlara aşağıda yer verilmiştir:

- İstatistiksel değerlendirme neticesinde yayılma çapı (mm) değeri için oluşturulan modelin anlamlı olması sonucunda uygun fonksiyon oluşturulabilmiştir.
- Varyans analizine göre basınç dayanımı (MPa) tepki parametresini yansıtan model anlamlı bulunmuştur.
- Gerçekleştirilen optimizasyon çalışması sonucunda girdi parametreleri olan S/Ç oranı,  $GDA_{iri}$  (%) miktarı ve  $GDA_{ince}$  (%) miktarı için optimum değerler sırasıyla 0,42, %81,03 ve %67,46 olarak belirlenmiştir.
- Çıktı parametreleri olan yayılma çapı (mm) ve basınç dayanımı (MPa) için optimum değerler sırasıyla 801,61 mm ve 64,3 MPa olarak elde edilmiştir.
- Tepki yüzey modelleri incelendiğinde S/Ç oranındaki azalmaya bağlı olarak basınç dayanım değerlerinde artış görülmüştür.
- Hem  $GDA_{iri}$  (%) hem de  $GDA_{ince}$  (%) ikame oranlarındaki artışlar yayılma çapı (mm) değerlerindeki değişimde etkili olmuştur.
- Oluşturulan modele göre basınç dayanımındaki değişimde en etkili parametre  $GDA_{iri}$  (%) ikame oranı olmuştur.
- İncelenen verileri yansıtan her tepki için arzu edilen aralıkları yansıtan arzu edilebilirlik değeri 0,734 olarak elde edilmiştir.

Böylece istenilen arzu edilebilirlik düzeyine anlamlı bir noktada yaklaşarak geri dönüştürülmüş agrega içeren kendiliğinden yerleşen betonlar için sonraki çalışmalara rehber olabilecek optimum tasarım parametreleri elde edilmiştir.

## KAYNAKLAR

- Adamu, M., Haruna, S. I., Ibrahim, Y. E., & Alanazi, H. (2022). Evaluation of the Mechanical Performance of Concrete Containing Calcium Carbide Residue and Nano Silica Using Response Surface Methodology. *Environmental Science and Pollution Research*, 29(44), 67076-67102. <https://doi.org/10.1007/s11356-022-20546-x>.
- Adamu, M., Marouf, M. L., Ibrahim, Y. E., Ahmed, O. S., Alanazi, H., & Marouf, A. L. (2022). Modeling and Optimization of The Mechanical Properties of Date Fiber Reinforced Concrete Containing Silica Fume Using Response Surface Methodology. *Case Studies in Construction Materials*, 17. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01633>.
- Avci, Y., & Ekmen, A. B. (2023). Artificial Intelligence Assisted Optimization of Rammed Aggregate Pier Supported Raft Foundation Systems Based on Parametric Three-Dimensional Finite Element Analysis. *In Structures*, Vol. 56, p. 105031. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.105031>.
- Awolusi, T. F., Oke, O. L., Akinkulore, O. O., & Sojobi, A. O. (2019). Application of Response Surface Methodology: Predicting and Optimizing The Properties of Concrete Containing Steel Fibre Extracted From Waste Tires With Limestone Powder As Filler. *Case studies in Construction materials*, 10. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2018.e00212>.
- Bayramov, F., Taşdemir, C., & Taşdemir, M.A. (2004). Optimisation of Steel Fibre Reinforced Concretes by Means of Statistical Response Surface Method, *Cement and Concrete Composites* 26, 665–675. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(03\)00161-6](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(03)00161-6).

- Broyles, J. M., Shepherd, M. R., & Brown, N. C. (2022). Design Optimization of Structural–Acoustic Spanning Concrete Elements in Buildings. *Journal of Architectural Engineering*, 28(1), 04021044. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)AE.1943-5568.000052](https://doi.org/10.1061/(ASCE)AE.1943-5568.000052).
- Campos, R. S., Barbosa, M. P., Pimentel, L. L., & Maciel, G. de F. (2018). Influência dos agregados reciclados nas propriedades reológicas e mecânicas do concreto autoadensável. *Matéria (Rio de Janeiro)*, 23(1). doi:10.1590/s1517-707620170001.0300. <https://doi.org/10.1590/S1517-707620170001.0300>.
- Concrete, S. C. (2005). The European Guidelines for Self-Compacting Concrete. *BIBM*, et al, 22, 563.
- Corinaldesi, V., & Moriconi, G. (2004). Self-Compacting Concrete: A Great Opportunity for Recycling Materials, in: *Proceedings of the International RILEM Conference on the Use of Recycled Materials in Building and Structures*, 10 p.
- Corinaldesi, V., & Moriconi, G., (2011). The Role of Industrial By-Products in Selfcompacting Concrete. *Construct. Build. Mater.* 25 (8), 3181e3186. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.03.001>.
- Design Expert, 2010. Design Expert, Stat-Ease, Minneapolis, USA.
- Ekmen, A. B., Algin, H. M., & Özen, M. (2020). Strength and Stiffness Optimisation of Fly Ash-Admixed DCM Columns Constructed in Clayey Silty Sand. *Transportation Geotechnics*, 24, 100364. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2020.100364>.
- Ekmen, A. B., Avci, Y. (2023). Artificial Intelligence-Assisted Optimization of Tunnel Support Systems Based on the Multiple Three-Dimensional Finite Element Analyses Considering the Excavation Stages. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 47(3), 1725-1747. <https://doi.org/10.1007/s40996-023-01109-7>.
- Evangelista, L., & De Brito, J., (2014). Concrete with Fine Recycled Aggregates: A Review. *Eur. J. Environ. Civ. Eng.* 18 (2), 129e172. <https://doi.org/10.1080/19648189.2013.851038>.
- Garcia-Troncoso, N., Li, L., Cheng, Q., Mo, K. H., & Ling, T. C. (2021). Comparative Study on the Properties and High Temperature Resistance of Self-Compacting Concrete With Various Types of Recycled Aggregates. *Case Studies in Construction Materials*, 15, e00678. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00678>.
- Grdic, Z.J., Toplicic-Curcic, G.A., Despotovic, I.M., & Ristic, N.S. (2010). Properties of Self compacting Concrete Prepared with Coarse Recycled Concrete Aggregate, *Constr. Build. Mater.* 24 (7), 1129–1133. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.12.029>.
- Guo, H., Shi, C., Guan, X., Zhu, J., Ding, Y., Ling, T.C., Zhang, H., & Wang, Y., (2018). Durability of Recycled Aggregate Concrete E A Review. *Cement Concr. Compos.* 89, 251e259. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2018.03.008>.
- Güneyisi, E. Gesoğlu, M., Algin, Z., & Yazıcı, H. (2014). Effect of Surface Treatment Methods on the Properties of Self-Compacting Concrete with Recycled Aggregates, *Constr. Build. Mater.* 64 172–183. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.04.090>.
- Hameed, M. M., AlOmar, M. K., Baniya, W. J., & AlSaadi, M. A. (2021). Prediction of High-Strength Concrete: High-Order Response Surface Methodology Modeling Approach. *Engineering with Computers*, 1-14. <https://doi.org/10.1007/s42107-021-00362-3>.
- Haque, M., Ray, S., Mita, A. F., Bhattacharjee, S., & Shams, M. J. B. (2021). Prediction and Optimization of the Fresh and Hardened Properties of Concrete Containing Rice Husk Ash and Glass Fiber Using Response Surface Methodology. *Case Studies in Construction Materials*, 14. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00505>.



- Khargotra, R., Kumar, R., András, K., Fekete, G., & Singh, T. (2022). Thermo-Hydraulic Characterization and Design Optimization of Delta-Shaped Obstacles in Solar Water Heating System Using CRITIC-COPRAS approach. *Energy*, 261, 125236. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.125236>.
- Kou, S.C., & Poon, C.S. (2009). Properties of Self-Compacting Concrete Prepared with Coarse and Fine Recycled Concrete Aggregates, *Cem. Concr. Compos.* 31, 622–627. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2009.06.005>.
- Mo, K. H., Ling, T. C., & Cheng, Q. (2021). Examining the Influence of Recycled Concrete Aggregate on the Hardened Properties of Self-Compacting Concrete. *Waste and Biomass Valorization*, 12, 1133-1141. <https://doi.org/10.1007/s12649-020-01045-x>.
- Montgomery, D. C. (2017). Design and analysis of experiments. John Wiley & sons.
- Myers, R. H., Montgomery, D. C., & Anderson-Cook, C. M. (2016). Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments. John Wiley & Sons.
- Nambiar, E.K.K., & Ramamurthy, K. (2006). Models Relating Mixture Composition to The Density and Strength of Foam Concrete Using Response Surface Methodology, *Cement and Concrete Composites* 28, 752–760. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2006.06.001>.
- P.O. Modani, V.M. Mohitkar, (2014). Self-Compacting Concrete with Recycled Aggregate: a Solution for Sustainable Development, *Int. J. Civil. Struct. Eng.* 4 (3) 430–440. <http://dx.doi.org/10.6088/ijcser.201304010041>.
- Pereira-de-Oliveira, L.A., Nepomuceno, M.C.S., Castro-Gomes, J.P., & Vila, M.F.C. (2014). Permeability Properties of Self-Compacting Concrete with Coarse Recycled Aggregates, *Constr. Build. Mater.* 51, 113–120. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.10.061>.
- Sasanipour, H., & Aslani, F. (2020). Durability Properties Evaluation of Self-Compacting Concrete Prepared with Waste Fine and Coarse Recycled Concrete Aggregates. *Construction and Building Materials*, 236, 117540. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117540>.
- Siamardi, K. (2022). Optimization of Fresh and Hardened Properties of Structural Light Weight Self-Compacting Concrete Mix Design Using Response Surface Methodology. *Construction and Building Materials*, 317, 125928. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125928>.
- Silva, R.V., De Brito, J., & Dhir, R.K., (2015). The Influence of The Use of Recycled Aggregates on the Compressive Strength of Concrete: a review. *Eur. J. Environ. Civ. Eng.* 19 (7), 825e849. <https://doi.org/10.1080/19648189.2014.974831>.
- Silva, R.V., de Brito, J., & Dhir, R.K., 2018. Fresh-State Performance of Recycled Aggregate Concrete: A Review. *Construct. Build. Mater.* 178, 19e31. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.149>.
- Şimşek, B., İç, Y. T., & Şimşek, E. H. (2013). A TOPSIS-Based Taguchi Optimization to Determine Optimal Mixture Proportions of The High Strength Self-Compacting Concrete. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 125, 18-32. <https://doi.org/10.1016/j.chemolab.2013.03.012>.
- Yan, S., Lin, H.-C., & Liu, Y.C. (2011). Optimal schedule adjustments for supplying ready mixed concrete following incidents, *Automation in Construction* 20, 1041–1050. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2011.04.005>.



# Kahramanmaraş Sutcu Imam University Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 21.11.2023  
Kabul Tarihi : 20.05.2024

Received Date : 21.11.2023  
Accepted Date : 20.05.2024

## LAZER KESİM MAKİNELERİNDE İŞ PARÇASI KALINLIĞININ TİTREŞİM KAYNAKLI ÜRETİM HATALARINA ETKİSİ: DENEYSEL BİR İNCELEME

### THE EFFECT OF WORKPIECE THICKNESS ON VIBRATION-INDUCED PRODUCTION ERRORS IN LASER CUTTING MACHINES: AN EXPERIMENTAL STUDY

Deniz KAYA<sup>1\*</sup> (ORCID: 0000-0001-6926-8206)

Derya MERT<sup>1</sup> (ORCID: 0000-0003-2208-6848)

Ahmet KAHRAMAN<sup>1</sup> (ORCID: 0009-0008-1684-5848)

Murat REİS<sup>2</sup> (ORCID: 0000-0001-5853-488X)

<sup>1</sup> Durmazlar Makina San. ve Tic. A.Ş., Bursa, Türkiye

<sup>2</sup> Bursa Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Bursa, Türkiye

\*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Deniz KAYA, dkaya@durmazlar.com.tr

#### ÖZET

Lazer kesimde, özellikle karmaşık hatlara ve dar toleranslara sahip küçük parçaların üretiminde titreşimler, kesim kenarlarında kusurlara neden olarak ürün kalitesini olumsuz etkileyebilmektedir. Lazer kesim kafasının ve iş parçasının birbirine göre göreceli konumundaki mikro sapmalar, lazer kesim işlemindeki hataların kaynağını oluşturmaktadır. Lazer kesim kafasını taşıyan hareketli kütlelerin ivmesinin sınırlandırılması, gövde titreşimlerini azaltarak kesim doğruluğunu artırabilmekte ancak bu önlem, üretim hızını düşmesine neden olmaktadır. Bu çalışma, yüksek kesme hızlarını temsil eden aşırı çalışma koşulları altında bir lazer kesme makinesindeki titreşimleri analiz etmektedir. Bu amaçla ölçüm hassasiyeti ve veri toplama hızı yüksek olmasına rağmen oldukça ekonomik bir titreşim ölçüm cihazı geliştirilmiştir. Bu cihaz yardımıyla makine gövdesinde ve farklı kalınlıktaki iş parçalarında meydana gelen titreşimler tespit edilmiştir. Sonuçlar, iş parçası kalınlığı azaldıkça makine gövdesi titreşimlerinin iş parçası üzerindeki etkisinin önemli ölçüde artma eğiliminde olduğunu ve bu durumun parça üzerinde kesme kusurlarına neden olabileceğini göstermektedir.

**Anahtar Kelimeler:** İvme, titreşim, lazer, sac, kesim

#### ABSTRACT

In laser cutting, especially in producing small parts with complex lines and tight tolerances, vibrations can cause defects on the cut edges, negatively affecting product quality. Micro deviations in the relative position of the laser cutting head and the workpiece relative to each other are the sources of errors in the laser cutting process. Limiting the acceleration of the moving masses carrying the laser cutting head can increase cutting accuracy by reducing body vibrations, but this measure minimizes the production speed. This study analyzes vibrations in a laser cutting machine under extreme operating conditions representing high cutting speeds. For this purpose, a very economical vibration measurement device has been developed, although its measurement sensitivity and data collection speed are high. With the help of this device, vibrations occurring in the machine body and workpieces of different thicknesses were detected. The results show that as the workpiece thickness decreases, the effect of machine body vibrations on the workpiece tends to increase significantly, which can cause cutting defects.

**Keywords:** Acceleration, vibration, laser, sheet, cutting

ToCite: KAYA, D., MERT, D., KAHRAMAN, A., REİS, M. (2024). LAZER KESİM MAKİNELERİNDE İŞ PARÇASI KALINLIĞININ TİTREŞİM KAYNAKLI ÜRETİM HATALARINA ETKİSİ: DENEYSEL BİR İNCELEME. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 27(2), 470-480.

## GİRİŞ

Lazer kesim makineleri, metal işleme, plastik işleme ve diğer endüstriyel uygulamalarda hızlı, kesin ve verimli kesim süreçleri oluşturmak için yaygın olarak kullanılır. Lazer kesim makineleri, gelişen lazer teknolojisi sayesinde daha yüksek kesim kalitesi ve iş verimliliği sunmaktadır. Teknolojik gelişmeler sayesinde bu makinelerin kapasiteleri ve kesim doğruluğu sürekli artmaktadır. Yüksek üretim hızı için lazer kesim işleminde makinelerden ani yön değiştirmeler, yüksek hızlı ve ivmeli hareketler yapması beklenir. Bu durum makine yapısında ve kesilen iş parçasında titreşimlere neden olmakta ve bu titreşimler lazer kesim kalitesini önemli ölçüde etkileyebilmektedir. Bu titreşimler hareketli kütlelere etkiyen kuvvetler veya sistemin mekanik tasarımından kaynaklanan dolaylı etkilerle oluşan salınımlar tarafından tetiklenebilir (Troncossi vd., 2008). Titreşimler, lazer kesim makineleri ve üretim robotlarının hassas pozisyonlama ve ölçüm görevlerini yapmasını zorlaştırabilir ve doğruluk ile tekrarlanabilirlik performansını bozabilir. Bu hataları önlemek için, makinelerin stabil olması ve titreşimleri sönmüleyecek tedbirlerle donatılmış olması gerekir. Ayrıca, titreşim filtreleme ve pozisyon kontrol tekniklerinin uygulanması da titreşimleri azaltmada faydalı olabilmektedir (Hace vd., 1999; Ghany vd., 2006). Robotik sistemlerin yapısal dinamiği aynı zamanda kendi hareketi nedeniyle uyarıldığı için oluşan konum hataları ve titreşimleri önlemek için birçok kontrol yöntemi geliştirilmiştir (Berninger vd, 2020). Bir lazer kesme makinesine klasik modal analiz tekniklerini uygulamış ve çalışmada çıkış verileri ile kesim sonuçlarını doğrudan etkileyen titreşim modlarını sunulmuştur (Schedlinski & Lüscher, 2002). Hashemzadeh vd., (2012), düşük güçlü CO<sub>2</sub> lazerle PMMA kesimi sırasında iş parçası titreşiminin etkisini incelemiştir. Çalışmada iş parçasının titreşiminin kesme hızını artırırken ısı tesiri altındaki bölgenin (ITAB) boyutunu artırdığını gösterilmiştir. Tonoli vd., (2011), mikro-mekanik lazer merkezinin çalışma hücrelerinde kullanılan aktif izolasyon ve titreşim sönmüleme cihazını ele almış ve aktif elektromanyetik aktüatörler kullanarak titreşim sönmülemesi gerçekleştirmiştir.

Titreşim lazer kesim işleminde her zaman istenmeyen bir durum olmayabilir. Zira, literatürde Hashemzadeh vd., (2012) iş parçası olarak polimetil metakrilatın (PMMA) kasıtlı olarak düşük frekansta titreştirilirken CO<sub>2</sub> lazerle kesilmesi sonucunda kesim kalitesine olumlu etkisi araştırılmıştır. Bahsedilen çalışmada iş parçaları CO<sub>2</sub> lazeri kullanılarak kesilirken lazer kesime paralel yönde düşük frekansta titreştirilmiş ve iş parçası titreşimi kullanımının kesme işlemini iyileştirdiği gösterilmiştir. Ancak iş parçası titreşimi kullanıldığında ısı tesiri altındaki bölgenin (ITAB) kapsamı artmıştır. Isı tesiri altındaki bölgede artış olması malzemenin kristal yapısında değişikliklere neden olabilir ve bu durum malzemenin mukavemetine, sertliğine veya diğer mekanik özellikleri üzerinde etkiler bırakabilir.

Sonlu elemanlar analizi yazılımı ANSYS ile lazer kesim makinesindeki sönmümsüz serbest titreşimini modal analiz teknikleri ile incelenmiştir (Zhang vd., 2014). Denkena vd., (2015), frezeleme işlemine alternatif olarak lazer kesimi kullanmayı amaçlayan bir makine konsepti ve kontrol stratejisi sunmuştur. Çalışmada yüksek yörünge hızı ve yörünge doğruluğunun elde edilmesi için iki yeni kontrol stratejisi uygulanmış ve başarılı sonuçlar elde edilmiştir. Lazer kesim işleminde kesim yapılacak malzemenin üzerine yerleştirilen çیتالardaki şekil bozuklukları da malzemenin tam olarak oturmamasına ve kesim esnasında titreşimlere neden olabilmektedir (Struckmeier vd., 2020). Düz yataklı lazer kesme makinelerinin programlarını otomatik olarak oluştururken ham malzemenin destek uçlarının konumunu belirlemenin önemini vurgulamış ve yeni bir ölçüm yöntemi tanıtmışlardır. Bu ölçüm yönteminin farklı çevresel değişikliklere karşı dayanıklı olduğu ve  $\pm 0.8$  mm'lik bir doğrulukla çalıştığı bulunmuştur.

Lazer kesme işlemi sırasında oluşan malzeme kaybı ve kesme aralığının genişliğini (kerf genişliği) tahmin etmek özellikle ince malzemelerin hassas lazer kesim işlemlerinde önemlidir ve titreşim kerf genişliğini etkileyebilmektedir. (Kusuma & Huang, 2023), üç farklı makine öğrenmesi modellerini kullanarak tarayıcı kafaya sahip bir sistemde atımlı lazerle düz bir hattaki kesim işlemi sonucu oluşturulan ortalama kerf genişliğini titreşim sinyallerini girdi olarak kullanıp tahmin edecek bir model oluşturmuştur. Farklı lazer parametreleriyle yapılan kesimler esnasında iş parçası üzerinden üç eksen de titreşim verileri toplanmıştır. Makine öğrenmesi aracılığıyla titreşim ve kerf genişliği arasında bir korelasyon elde edilmiştir. Kusuma ve Huang, (2023), atımlı lazer kesim makinesinden ölçülen titreşim sinyallerini kullanarak, düz bir yarığın kesit genişliğini Derin Sinir Ağları (DSA) tahmin modelleri ile öngörülmesini araştırmışlardır. Çalışmada zaman bazında titreşim sinyallerinin istatistiksel özellikleri ve dalgalet dönüşüm sinyallerinden elde edilen özellikler olmak üzere iki farklı giriş verisi işlenmiştir. DSA'nın çıkışı, iş parçasının ortalama kesit genişliğini tahmin etmek için kullanılmıştır. Giriş verileri ile kesit genişliği arasındaki ilişki, çeşitli istatistiksel analizlerle incelenmiştir. Girdu ve Gheorghe, (2023), Hardox çeliğinin lazer kesim işleminde kesilen yüzeylerin entropisi ve sertliği arasındaki ilişkiyi bulmak için yaptığı araştırmada kesim işlemi esnasında oluşan titreşimlerin sonucunda malzemenin iç yapısındaki bileşenlerin yer değiştirdiğini ve bu durumun malzemenin ısıdan

etkilenen bölgesinde sertlik düşüşüne neden olduğunu ileri sürmüştür. Venkata Rao vd., (2024) yaptıkları araştırmada 6 mm kalınlığındaki sac metalin lazer kesim işleminde farklı parametrelerle yaptıkları kesim işlemi esnasında malzeme üzerinden titreşim verilerini toplamışlardır. Bu titreşim verilerini kullanarak lazer kesim işleminin kalitesini belirleyen yüzey pürüzlülüğü, kerf genişliği ve malzeme giderme miktarını tahmin edecek bir korelasyon elde ederek matematiksel model oluşturmuşlardır. Çalışmada lazer gücü ve kesim hızının bu çıktılar üzerinde önemli etkiye sahip olduğu gözlenmiştir. Daha yüksek lazer gücünde bile kesme hızı arttığında sac metaldeki titreşimin yatay eksenlerde (x ve y yönlerinde) daha yüksek genliklere ulaştığı gözlemlenmiştir.

Lazerli üretimin haricindeki klasik üretim yöntemlerinde de makine gövdesi titreşimleri ele alınmıştır. (Vieira vd., 2012) bilgisayar destekli analizler ve prototip üretimler gerçekleştirilerek kompozit yapıda üretilen hareketli makine parçaları sayesinde titreşimleri minimize etmeye yönelik çalışmalar gerçekleştirmiştir (Çelenk, 2018). (Chen, 2016), üç boyutlu CNC lazer kesim makinesinin titreşimlerini sonlu eleman analizi yazılım platformunu kullanarak incelemiştir. Bu çalışmada, üç boyutlu CNC lazer kesim makinesinin ana hareketli parçalarının anlık modal analizi ve dinamik temas analizi için modal süperpozisyon teorileri kullanılmıştır. Mohd Ghazali ve Rahiman, (2021), makine izleme ve teşhis için güncel titreşim analizini sistemli bir şekilde gözden geçirmişlerdir. Bu çalışma, veri toplama özellik çıkarma ve yapay zeka kullanarak arıza tanıma tekniklerini içermektedir. Gelecekte, zaman etki alanı istatistiksel özelliklerinin ve derin öğrenme yaklaşımlarının birleştirilmesi beklenmektedir, böylece arıza özellikleri ham titreşim sinyallerinden otomatik olarak çıkarılabileceği ön görülmektedir.

Bu çalışmanın ilk bölümünde, makine ve sac parçanın titreşimlerini ölçmek üzere tasarlanan titreşim ölçüm cihazı tanıtılmaktadır. Cihaz endüstriyel bir veri toplama cihazının hızına yakın bir veri toplama hızına ve 12 bit gibi görece yüksek ölçüm hassasiyetine sahip olmasına karşın oldukça düşük maliyetlidir. İkinci bölümde, lazer kesim makinesinin üç eksendeki ani hareketlerinin neden olacağı muhtemel titreşimleri temsil eden test senaryoları tanıtılmakta ve son bölümde ise test sonuçları sunulmaktadır. Son bölümde, sonuçların değerlendirilmesi ile farklı sac kalınlıklarının kesiminde kaliteyi etkileyen parametreler ve üretim hatalarını minimize etmek için alınabilecek önlemler tartışılmıştır.

## MATERYAL VE METOD

### *Titreşim Ölçüm Cihazının Tasarımı*

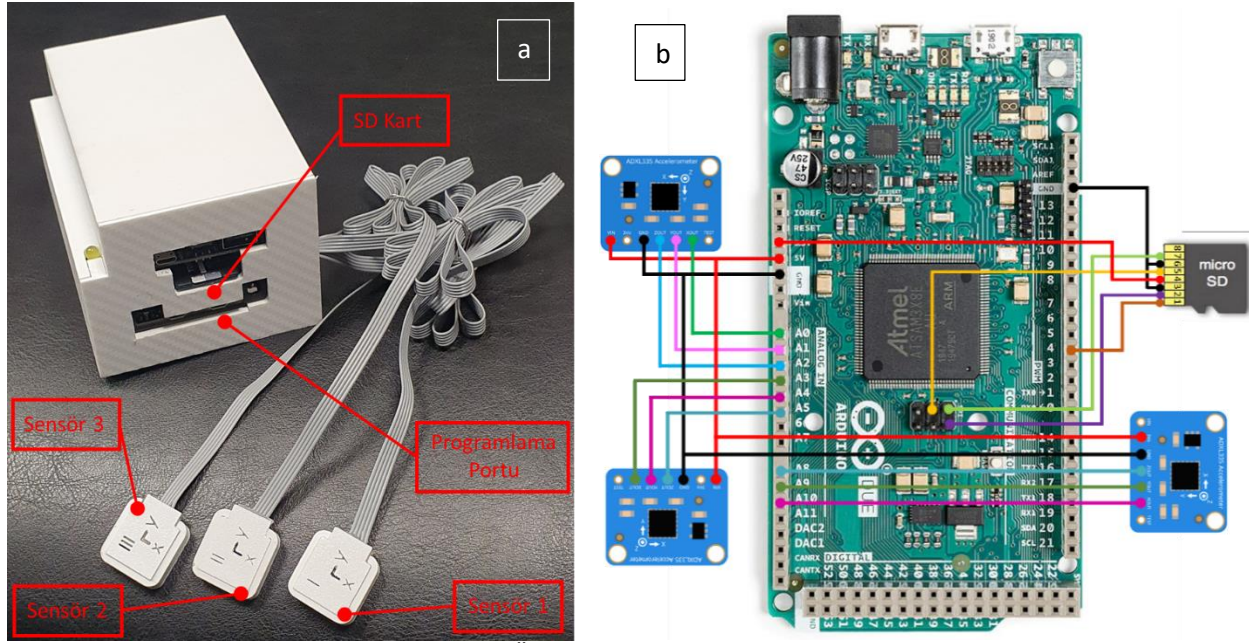
Lazer kesim makinesine entegre edilecek titreşim ölçüm sisteminin yüksek hızda ve hassas ivme ölçümü yapabilmesi, aynı zamanda ekonomik olması çalışmada isneilen özellikler olarak öne çıkmaktadır. Bu nedenle, çalışmada istenilen özellikleri taşıyan Arduino Due kontrol kartı kullanılmıştır. Arduino Due, 32-bit ARM Cortex-M3 tabanlı bir mikrodenetleyici olan AT91SAM3X8E'yi kullanır, 12-bit analog girişlere sahiptir ve 3.3V işletim gerilimi kullanır (Analog Devices, 2010). İşlem hızı gerektiren projeler için sıklıkla kullanılmaktadır. Yüksek hızlı analog ADXL serisi ivme sensörleri arasında yapılan ön testler sonucunda, ADXL335 serisi analog ivme sensörlerinin Arduino Due'nun yüksek hızına daha uygun olduğu ve daha düşük parazit değerleri ile ölçüm yapmanın mümkün olduğu görülmüştür. ADXL335, analog bir ivme sensördür ve ölçüm hızı, kullanılan mikrodenetleyici veya veri toplama cihazının örnekleme hızına bağlıdır. Yapılan çalışmada Arduino'nun ADC'si yaklaşık 10.000 örnekleme/saniye hızında çalışmaktadır. Ancak bu örnekleme hızı, ADC çözünürlüğüne, işlemci yüküne, karta bağlanan senör sayısına ve diğer işlemlere bağlı olarak değişebilmektedir.

Şekil 1.a titreşim ölçüm cihazının fotoğrafını ve Şekil 1.b devre şemasını göstermektedir. Bu sistem, üç adet ADXL335 analog titreşim sensörü kullanarak lazer kesim makinesinin üç farklı noktasından üç farklı eksende ivme ölçümü yapabilecek şekilde tasarlanmıştır. Kontrol kartı programlanırken “delay()” fonksiyonu aracılığıyla üç sensörden eş zamanlı gelen toplam veri sayısı saniyede 10.000 veri olacak şekilde sınırlandırılmıştır. Arduino'nun güç modülü sayesinde, ölçüm cihazı kablosuz olarak lazer kesim makinesinin her noktasına yerleştirilebilmektedir. En yüksek hızda veri toplamak için, ivme sensöründen gelen ham dijital sinyaller SD kartta kaydedilir ve bu veriler daha sonra MATLAB ortamında ivme sinyaline dönüştürülür. Bu yaklaşım, işlemciyi matematiksel matris işlemleri ile yavaşlatmadan mümkün olan en yüksek hızda veri toplama olanağı sağlar. SD kartta “.csv” uzantılı bir dosyada zamanın milisaniye cinsinden kaydedildiği, ardışık sütunlarda ise sırasıyla x, y ve z eksenlerindeki ivmeyi temsil eden dijital sayı değerleri bulunmaktadır. Bu ham veriler, MATLAB programı kullanılarak ivme verilerine dönüştürülür ve sonuçlar bölümünde sunulan grafikler elde edilir.



## Test Metodu

Lazer kesim makinelerinde ayarlama yapılırken, oluşabilecek titreşimler dikkate alarak hassas bir şekilde ayarlanma yapılmalıdır. Optik lazer sistemi için emniyetli ivme ve ivme türevi değerleri optik sistem üreticisi tarafından belirlenir. Bu nedenle optik lazer sistemi lazer kesim makinesine göre daha yüksek ivme ve ivme türevi değerleri ile çalışabilir. Ancak lazer kesim makinesinin eksen hareketlerinin dinamik sınırları belirlenirken, güvenli ve hassas kesim kabiliyetini artırmak için maksimum çalışma ivmesi değerleri sınırlandırılır. Bu nedenle, lazer kesim makinesinin titreşim açısından genel durumunun ortaya konulması, optik lazer kesim sistemin tam performansla kullanılabilmesi için oldukça önemlidir.



Şekil 1. a. Titreşim Ölçüm Cihazı b. Devre Bağlantı Şeması

Bu çalışma kapsamındaki testler Durmazlar Makine'ye ait HD-F 3015 V 2D lazer kesim makinesi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Cihazın toplam kütlesi 11.000 kg'dır ve 36 adet klipsli çelik dübel (M16) üzerine oturtularak 18 adet gövde ayar civatasıyla zemine sabitlenmiştir. Makinenin sabitlendiği beton derinliği 300 mm ve beton çevresi titreşimleri daha iyi sönümlemesi için asfaltla doldurulmuştur. Makinede lazer kesim kafası olarak, Precitec ProCutter 2.0 lazer kesim kafası kullanılmıştır. Lazer kesim kafasının sac üzerindeki hareketlerini kontrol eden eksenler, z ekseninin yaklaşma ve uzaklaşma hareketlerini, y eksenini boyunca yapılan hareketleri kesim parçası üzerinde sağ ve sol yönde yatay hareketleri ve x eksenini üzerindeki hareketleri kesim parçası üzerinde ileri ve geri yönde yatay hareketleri temsil eder (Şekil 2.a). Lazer kesim makinelerinde, lazer kesim başlığının x, y ve z eksenlerindeki ani hareketleri makine gövdesinde titreşimlere neden olabilir. Bu titreşimler, hızdaki ani yön değişikliklerinin yanı sıra, kütle miktarına ve gövdenin yerine bağlantı şartlarına bağlı olarak da ortaya çıkabilmektedir. Lazer kesim işleminde, makine titreşimlerini minimize etmek ve hareketli parçaları dinamik yüklerden korumak için maksimum ivme ve ivme türevi değerleri belirlenir ve lazer kesim kafası bu kritik ivme değerini aşmayacak şekilde programlanır. Maksimum ivme değerleri, kullanılan ekipmanın türüne ve üreticiye bağlı olarak değişebilir. Genel olarak, bu değerler, lazer kesim makinesinin güvenli ve etkili bir şekilde çalışmasını sağlamak için dikkatle belirlenmelidir. Lazer kesim makinelerinde kullanılan maksimum çalışma ivmeleri, farklı eksenlerde değişiklik gösterebilir. Genel olarak karşılaşılan ivme değerleri aşağıdaki gibidir:

- x eksenini üzerindeki maksimum çalışma ivmesi, genellikle 0.5 g ile 2.0 g arasında değişmektedir.
- y eksenini üzerindeki maksimum çalışma ivmesi, genellikle 0.5 g ile 2.0 g arasında değişmektedir.
- z eksenini üzerindeki maksimum çalışma ivmesi, genellikle daha düşük bir değere sahiptir ve yaklaşık 0.2 g ile 0.5 g arasında değişmektedir.

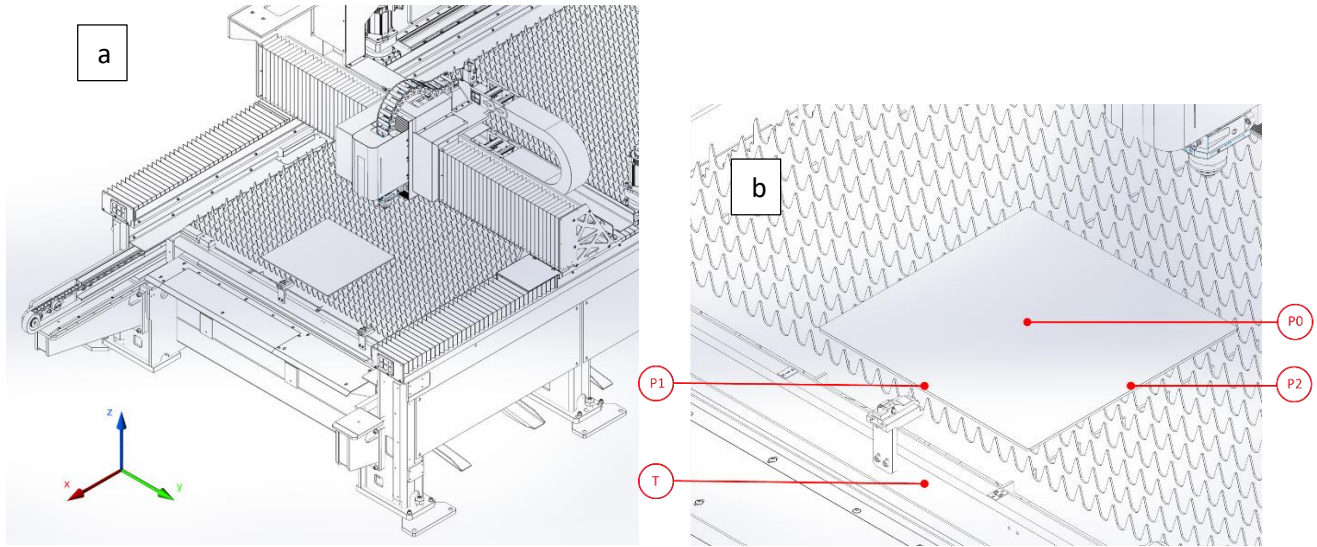
Kesim işlemi sırasında lazer kesim kafası yatayda x ve y eksenleriyle hareket ettirilir. Bu eksenlerdeki daha yüksek ivmeli hareketler kesim hızını arttıracaktır. Lazer kesim kafasının düşeydeki iş malzemesine yaklaşma ve uzaklaşma



hareketi z eksenine gerçekleştirilir. Kesim performansında bir etkisi olmadığı için daha düşük ivmeler bu eksen üzerinde yeterlidir.

Bu ivme değerleri, lazer kesim makinelerinin performansını belirler ve kesim işleminin hızını, hassasiyetini ve kalitesini etkiler. Her makinenin tasarımı ve teknik özellikleri farklı olduğundan, her makine için özel olarak hangi ivmeye ihtiyaç duyulduğunu belirlemek önemlidir.

Bu bilgilere dayanarak, titreşim ölçümleri için aşağıdaki çalışma senaryosu oluşturulmuştur: Lazer kesim makinesi, sırasıyla x, y ve z eksenlerinde (Şekil 2'de gösterildiği gibi), Tablo 1'de belirtilen maksimum ivme değerleri ile 100 mm'lik bir strok içerisinde 30 saniyede toplam 30 adet salınım hareketi yapacak şekilde tasarlanmıştır. Aynı zamanda, makinenin tablasına ve köprüsüne yerleştirilen ivme sensörleri ile ölçüm yapılır. Bu maksimum ivme değerleri, salınım hareketinin dönüş anlarında hızın yavaşlatılması ve hızlandırılması anlarını ifade eder. Toplam süresi 210 saniye olan bir test senaryosu oluşturulmuştur. Bu senaryoya göre, cihaz 0-30, 60-90, 120-150 ve 180-210 saniye aralıklarında boşta bekler. 30-60 saniye aralığında x ekseninde, 90-120 saniye aralığında y ekseninde, 150-180 saniye aralığında ise z ekseninde maksimum hızda salınım hareketi yapar. Bu test senaryosu ile lazer kesim makinesinin ekstrem çalışma koşullarını simüle etmek ve bu çalışma şartlarında oluşan maksimum ivme değerlerini ölçmek amaçlanmaktadır. Bu test yöntemi makinenin performansını değerlendirmek ve tasarımını optimize etmek için önemli veriler sunar.



Şekil 2. a. Lazer Kesim Makinesinde Lazer Kesim Kafasının Hareket Eksenleri (x ve y : Yatay Eksenler, z : Düşey Eksen), b. İş Parçası Titreşim Ölçüm Noktaları, (T, P0, P1, P2).

Tablo 1. Lazer Kesim Makinesi Test Senaryosu

Zaman (saniye)	Durum	x	y	z
0-30	Hareket yok	-	-	-
30-60	x'de salınım (485 kg)	$\pm 2g$	-	-
60-90	Hareket yok	-	-	-
90-120	y'de salınım (120 kg)	-	$\pm 2g$	-
120-150	Hareket yok	-	-	-
150-180	z'de salınım (20 kg)	-	-	$\pm 2g$
180-210	Hareket yok	-	-	-

## SONUÇLAR

Şekil 3, farklı kalınlıklardaki (1-3-4 mm) iş parçalarının Şekil 2.b'de gösterilen T ve P0 noktalarının x, y ve z eksenlerindeki normalize ivme genliklerinin (gRMS) değerlerinin zamana göre değişimini göstermektedir.

Normalize ivme (gRMS) ivmenin belirli bir aralıktaki hesaplanan ortalama genlik değerinin yer çekimi ivmesine bölünmesiyle elde edilir (Wijker, 2009). Titreşimin hasar verme etkisini gösteren kullanışlı bir büyüklüktür.

Matematiksel olarak ifade edilirse, gRMS ivme değeri Eş. 1'deki formülle hesaplanır:

$$gRMS = \frac{1}{g} \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N a_i^2} \quad (1)$$

Burada, N örnekleme sayısını,  $a_i$  her bir ivme ölçümünü ve Eş. 2 ise tüm ölçümlerin karelerinin toplamını ifade etmektedir.

$$\sum_{i=1}^N a_i^2 \quad (2)$$

Bu çalışmada her bir eksen için gRMS değeri ayrı ayrı hesaplanmış ve ortalama genlik değerinin hesabında zaman adımı 100 milisaniye olarak seçilmiştir. Şekilde dikey eksen gRMS değerlerini, yatay eksen ise zamanı göstermektedir. Noktalı mavi çizgiler x ekseninde, kesik-noktalı kırmızı çizgiler y ekseninde, sürekli sarı çizgiler ise z ekseninde oluşan gRMS değerlerini göstermektedir. 30-60 saniye aralığında lazer kesim kafası x ekseninde, 90-120 saniye aralığında y ekseninde ve 150-180 saniye aralığında z ekseninde salınım hareketi yapmaktadır.

Şekil 3 incelendiğinde lazer kesim makinesi tablası ile görece kalın sacların neredeyse aynı şekilde titreşim davranışı sergilediği görülmektedir. Lazer kesim kafasının x eksenindeki yüksek ivmeli salınımları yine tablanın, 4 mm ve 3 mm kalınlıktaki sacların orta noktalarında ve sadece x ekseninde belirgin bir titreşimin olduğu görülmektedir. Bu lazer kesim kafası ile birlikte başlığı z ve y eksenlerinde süren motorların ve tüm taşıyıcı sistemin birlikte hareket etmesinde dolayı salınım esnasında atalet kuvvetlerinin görece büyük oluşundan kaynaklanmaktadır.

Şekil 3'te lazer kesim kafasının tüm eksenlerdeki ekstrem salınımlarına karşı taşıyıcı tablanın ve iş parçasının y ekseninde belirgin bir titreşim oluşturmadığı yani y eksenindeki titreşim seviyelerinin oldukça düşük olduğu görülmektedir. Buna karşın 1 mm kalınlıktaki görece ince iş parçalarında x ve z eksenlerinde belirgin titreşimler oluşmaktadır. Bu titreşimler beklenildiği gibi lazer kesim kafasının x eksenindeki salınımlarında maksimum değerleri aldığı görülmektedir. Bunu hareketli kütle ile doğru orantılı olarak sırasıyla y ve z eksenleri izlemektedir. Buradan yola çıkarak hareketli kütlenin gövde ve iş parçası üzerindeki titreşimlerden ne oranda sorumlu olduğu anlaşılmaktadır. 1mm'lik görece en ince iş parçasında z eksenindeki titreşimlerin baskın hale geldiği şekilden anlaşılmaktadır.

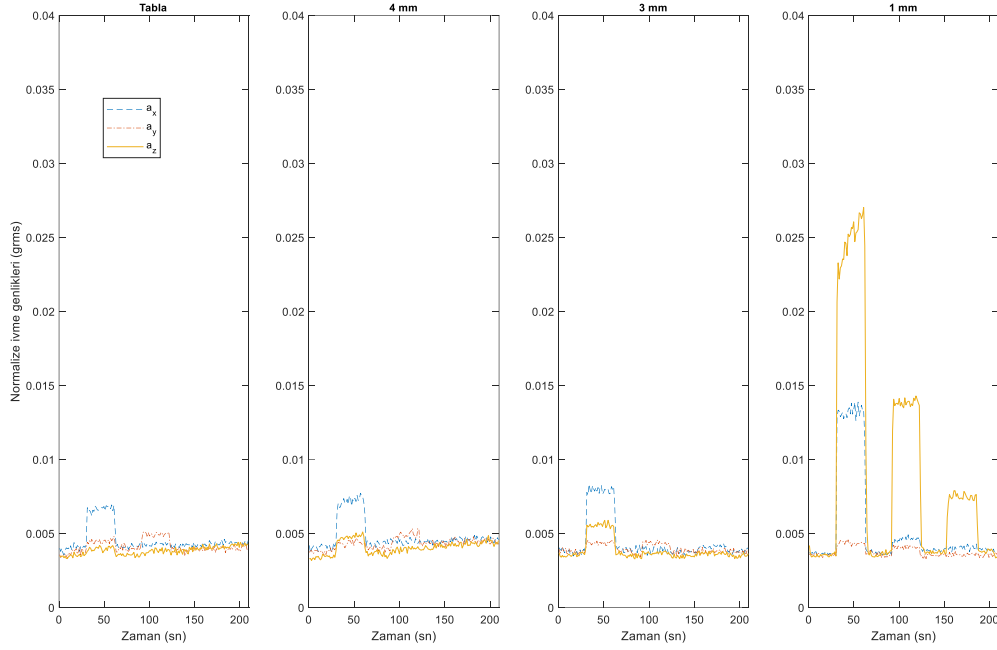
Belirli bir kalınlığın altındaki saclarda titreşimin daha belirgin olduğu ve iş parçası titreşimlerinin iş parçasını taşıyan tablanın titreşimlerinden Şekil 3'te belirgin bir şekilde ayrıştığı görülmektedir. Bunun başlıca nedeni, ince sacların daha esnek, çarpık ve hafif olması nedeniyle tabla tırnaklarına tam oturmaması olabilir. Görece ince sacların daha elastik yapısı, sacın düşük frekanslarda ancak yüksek genlikte titreşim davranışı göstermesine neden olmaktadır. Şekil 3'te görüldüğü üzere ince saclarda yüksek esnekliğin neden olduğu dalgalanma hareketi z ekseninde önemli ölçüde bir titreşime neden olmaktadır. Bu da lazer kesim işlemi esnasında muhtemel kesim hatalarına ve nihai üründe kusurlara yol açabilir. İş parçasının dalgalı ve düzensiz kesim kenarları, kesilen yüzeyin pürüzlü olması bu kusurlardan bazılarıdır.

İnce saclarda gözlenen görece yüksek titreşimler bu durumun daha detaylı olarak analiz edilmesini gerekli kılmıştır. Bu amaçla ince saclarda üç farklı noktadan eş zamanlı titreşim sinyalleri toplanarak Şekil 4'te verilen sonuçlar elde edilmiştir. Şekil 4, Şekil 5 ve Şekil 6, farklı kalınlıklardaki (0,6 mm, 1 mm ve 1,5 mm) iş parçalarının Şekil 2.b'de gösterilen noktalarının (P0), ön orta (P1) ve yan orta (P2) noktalarının x, y ve z eksenlerindeki normalize ivme genliklerinin (gRMS) değerlerinin zamana göre değişimini göstermektedir.

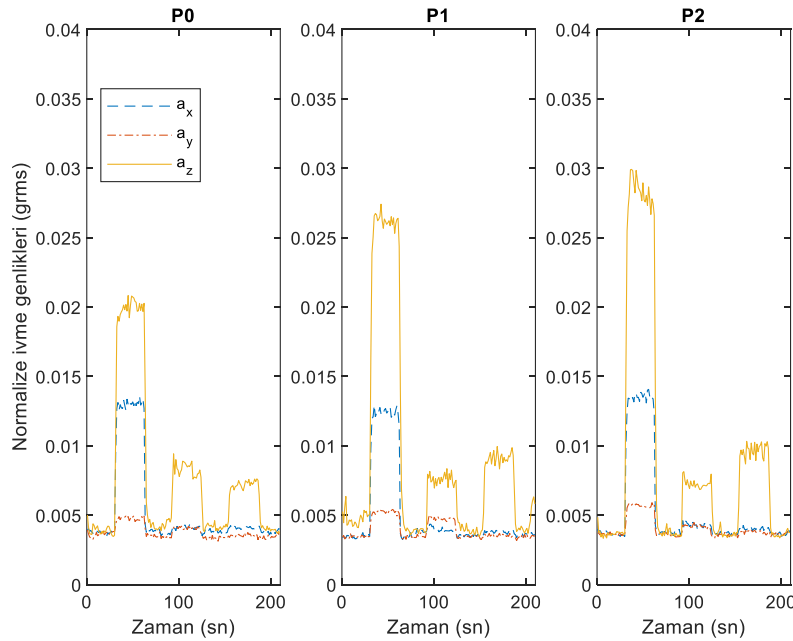
Şekil 4, Şekil 5 ve Şekil 6'da görece ince sacların farklı noktalarından alınan normalize ivme değerlerini gösteren grafikler incelendiğinde, sacın bazen kenar kısımlarındaki titreşimlerin orta bölgeye göre arttığı bazen bunun tam tersinin meydana geldiği görülmektedir. Bu durum ince sacın tabla üzerinde mükemmel bir düz yüzey olarak durmayışından kaynaklanmaktadır. Periyodik hareketlerde z eksenindeki dikey titreşimlerin arttığı noktalar sacın

düz olmamasından dolayı tabla tırnaklarına tam temas etmeyen noktalardır. Sacın düzgünsüzlüğüne bağlı olarak bu noktalar bazen sacın kenarında, bazen de sacın ortasında olabilmektedir. Bu etkinin de katkısıyla ince saclarda baskın titreşimlerin açık bir şekilde z ekseninde meydana geldiği görülmektedir.

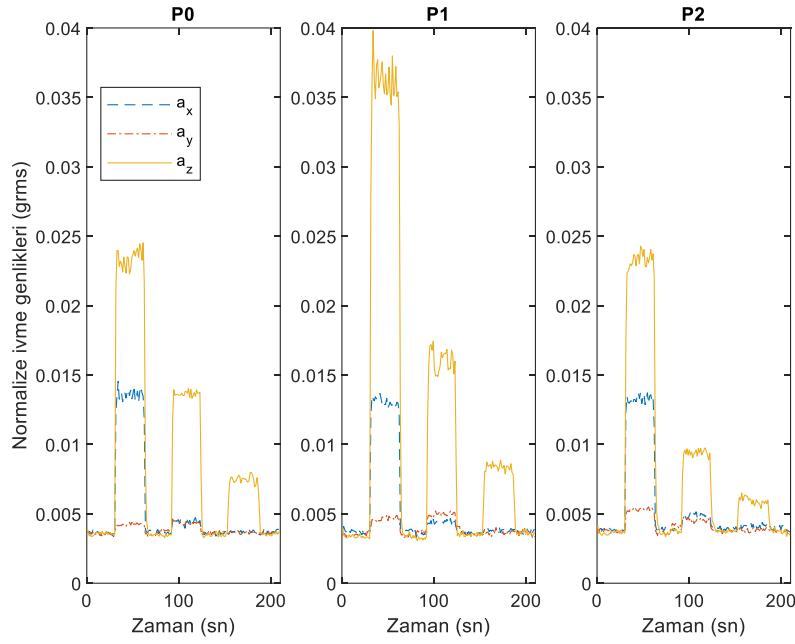
Sonuç olarak tablanın yer çekimi kuvvetinin etkisi ile zemine oturduğu, bunun sonucunda da dikey eksenin salınım hareketlerinden en az etkilendiği, ancak tablanın ray üzerinde x eksenine paralel olarak gidip gelebilme yeteneğine sahip olmasının etkisi ile kesici kafa salınımların en çok x ekseninde titreşime sebep olduğu görülmüştür. Yatay y eksenini yataklarının görece daha sabit bir yapıda ve raylar üzerinde sabitlenmiş biçimde olmasının etkisiyle y eksenindeki titreşimlerin, salınımlardan x eksenine göre daha az etkilendiği görülmüştür.



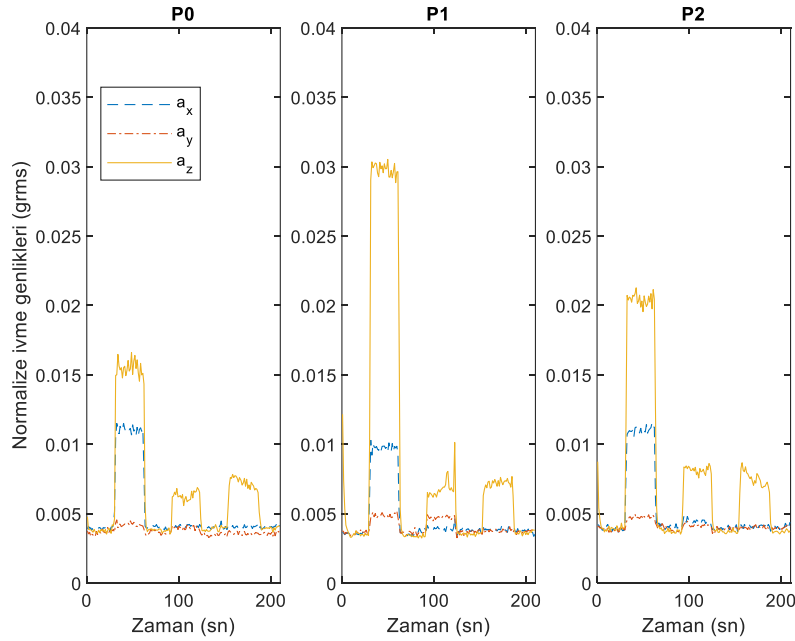
**Şekil 3.** Sac Yerleşim Tablasının (T) ve 1000 x 1000 mm Boyutlarındaki ve 4 mm, 3 mm, ve 1 mm Kalınlığındaki İş Parçalarının Orta Noktalarının (P0) x, y ve z Eksenlerindeki Normalize İvme Genliklerinin (gRMS) Değerlerinin Zamana Göre Değişimi.



**Şekil 4.** 0,6 mm Kalınlığındaki İş Parçasının Farklı Noktalarının (P0, P1, P2) x, y ve z Eksenlerindeki Normalize İvme Genliklerinin (gRMS) Değerlerinin Zamana Göre Değişimi



Şekil 5. 1 mm Kalınlığındaki İş Parçasının Farklı Noktalarının (P0, P1, P2) x, y ve z Eksenlerindeki Normalize İvme Genliklerinin (gRMS) Değerlerinin Zamana Göre Değişimi



Şekil 6. 1,5 mm Kalınlığındaki İş Parçasının Farklı Noktalarının (P0, P1, P2) x, y ve z Eksenlerindeki Normalize İvme Genliklerinin (gRMS) Değerlerinin Zamana Göre Değişimi

## TARTIŞMA

Talaşlı imalat makinelerindeki titreşimleri ölçmenin ve etkilerini anlamının, üretim kalitesi ve verimliliğe etkisi literatürdeki birçok çalışmada gösterilmiştir. Bu durum lazer kesim makinelerinde de geçerlidir ve gövde titreşimlerinin belli sınırlarda kaldığını bilmek veya bunu sağlamak kesim kalitesini artırırken, makine ömrünü de uzatmaktadır. Ancak lazer kesim makinelerinde titreşime neden olan etkenler talaşlı imalata göre çok daha azdır. Çünkü torna ve frezede tezgahlarında dönme hareketi yapan kütleler ve bu kütlelerin balansından dolayı ortaya çıkması muhtemel titreşim kaynakları bulunmaktadır. Buna karşılık servo motorlarla tahrik edilerek doğrusal hareketler yapan lazer kesim makinelerinin titreşimleri daha düşük seviyededir. Dahası iş parçası ile lazer kesim kafası arasında temas olmadığından talaş kaldırma işlemindeki titreşimler de lazer kesiminde söz konusu değildir. Lazer teknolojisindeki yenilikler çok küçük parçaların hassas bir şekilde kesimini mümkün kılmaktadır ve pek çok

alanda iş parçaları lazer kesim sonrası ek bir işlem gerektirmeden nihai formuna getirilebilmektedir. Bu nedenle günümüzde lazer kesim makinelerinden beklenen kesim hassasiyeti giderek artmakta ve çok düşük seviyelerde olsa dahi kesici kafanın hareketi neticesinde oluşan gövde ve iş parçası titreşimleri önem arz etmektedir.

Bu çalışmada, lazer kesim makinelerinde kesici kafanın aşırı salınım hareketlerinin neden olduğu gövde titreşimlerinin, farklı kalınlıktaki iş parçalarına etkileri deneysel olarak incelenmiştir. Titreşimler, kesim kalitesini etkilemenin yanı sıra makine bileşenlerinin ömrünü de kısaltabilmektedir. Titreşim zaman içerisinde makinenin bozulması, kesim kalitesinin düşmesi ve lens odaklarında kaçıklık oluşmasına sebep olabilmektedir. Özellikle mikro imalatta ince sacların kesiminde lazer kesim makinelerinin hassasiyeti önemli olmaktadır. Bu makinelerle üretilen ürünler, sağlık, savunma sanayii gibi boyut hassasiyetinin önemli olduğu alanlarda kullanılırken kesim kalitesi büyük önem taşır. Bu çalışma ile sac kalınlığına bağlı olarak makinenin çalışma eksenlerinde oluşan iş parçası titreşimlerinin belirlenmesi ve buradan yola çıkarak hangi eksenle önlemler alınması gerektiğini tespit etmeyi amaçlanmıştır. Literatürde lazer kesim makinelerinin çalışma esnasında iş parçasında oluşan titreşimleri ele alan bir çalışma bulunmamaktadır. Çalışmada lazer kesim makinesine kolayca entegre olabilen, üretim maliyetlerini minimum seviyede olacak şekilde bir titreşim ölçüm cihazı geliştirilmiştir. Bu cihaz yardımıyla ve belirlenen uç çalışma şartlarında kesim kalitesi için belirleyici olan noktalardan titreşim dataları toplanmıştır.

Deneyler hareketli kütlelerin atalet etkisinin titreşimin en belirleyici sebebi olduğunu göstermektedir. Lazer kesim makinesinde en yüksek titreşimler lazer kesim kafası x ekseninde salınım yaptığında ortaya çıkmaktadır. Zira x ekseninde hareket eden kütle y ve z eksenlerindeki hareketi sağlayan ray ve motorların yanında kesici kafa dahil olmak üzere tüm hareketli kütleleri ihtiva etmektedir. En fazla titreşimin meydana geldiği x yönünde hareket eden ve tüm hareketli kütleleri taşıyan köprü üzerinde topoloji optimizasyonu yapılabilir. Bunun dışında y ve z eksenlerinin daha az kütle içermesinden dolayı salınım hareketinin titreşime etkisi görece düşük kalmaktadır. Bu sonuçlara bakıldığında lazer kafasının bu eksenlerde daha yüksek ivmelerle çalıştırılabileceği anlamı taşımaktadır. Ancak pek çok makine üreticisi her üç eksenle de aynı limit ivme değerlerini kullanmaktadır.

Deneyler kesici kafa hareketinin salınımindan dolayı oluşan titreşimlerin ince saclarda belirgin olduğunu göstermiştir. Makine gövdesinden tablaya aktarılan düşük genlikli ancak çok yüksek frekanslı titreşimler, tabladan çok daha esnek olan saca aktarılırken daha düşük frekanslı ancak yüksek genlikli titreşimlere dönüşmektedir. Görece ince sacların daha elastik yapısı, sacın düşük frekanslarda ancak yüksek genlikte titreşim davranışı göstermesine neden olur. Bu da lazer kesim işlemi esnasında muhtemel kesim hatalarına ve nihai üründe kusurlara yol açabilir. Bu kusurlar boyutsal olarak ve kesim kenarlarından anlaşılabilir. Buna karşın kalın saclar makine gövdesi ve taşıyıcı tabla ile neredeyse aynı titreşim davranışını sergilemektedir. İnce sacların şekil bozuklukları ve yüzey düzgünlükleri sebebiyle tabla tırnaklarına tam temas etmemeleri, kenara yakın noktalarda yukarı kalkma ve kıvrılma gibi etkenler nedeniyle dikey yönde esnekliğe sahip olmaları, gövde titreşimlerinden daha çok etkilenmelerine neden olmaktadır. Hatta kesim esnasında lazer kafasından parçaya gelen koruyucu gaz akışı da iş parçasında dikey yönde titreşime ve yer değiştirmeye sebep olabilmektedir. Bu durum gelecekteki çalışmalarda detaylı olarak ele alınmalıdır.

Lazer kesim makinelerinde dikey eksen üzerinde "Clearance Control" adı verilen kesici kafa ile iş parçası arasındaki mesafe kontrolünü sağlayan, iş parçasının yüzey düzgünlüklerinde kafanın saca çarpmasını önleyen ve odak uzaklığını otomatik olarak ayarlanan mesafe değerinde tutan bir teknoloji mevcuttur. Burada kesim kalitesini etkileyen önemli risklerden biri de, iş parçasının dikey titreşim hızının, konum hatalarını kesim esnasında otomatik olarak düzelten 'Clearance Control' hızından yüksek olması kesim kalitesini olumsuz yönde etkileyen en önemli faktördür. Bu durum lazer demetinin odak ayarının bozulmasına ve kesim kalitesinin düşmesine neden olabilir. Sonuçlar kesici kafanın tüm eksenlerdeki salınım hareketlerinden en az etkilenen eksenin y eksenini olduğunu göstermektedir. Bu sacı taşıyan tablanın x ekseninde hareket serbestliğinin olması, buna karşın y ekseninde hareket serbestliğinin olmayışı nedeniyle tablanın bu eksenle daha rijit bir yatak yapısına sahip oluşu ile açıklanabilir. Buradan tüm eksenleri tahrik eden ağırlıkları taşıyan x eksenini ile ilgili hem tabla hem de sac için iyileştirme çalışmaları yapılması gerektiği görülmektedir.

Gelecekte kesim kalitesini artırmak için yapılabilecek tedbirler arasında, makinenin ve iş parçasının titreşimini azaltacak aktif titreşim sönümleyici ayaklar kullanılması gibi mekanik iyileştirmeler bulunmaktadır. Ayrıca, kesim kafasının titreşimleri ölçülerek ani hareketlerde kesim kafasının yörüngeden sapması belirlenebilir. Titreşimlerin özellikle ince saclarda daha fazla meydana geldiği gözlemlenmiştir. Bu nedenle, lazer kesim sırasında ince saclarda odak kayması etkisinin ve boyutsal düzgünlüklerin derecesinin belirleneceği deneyler yapılabilir. Ayrıca, farklı



titreşim seviyelerinde oluşan kesim yüzeyleri mikroskop altında incelenerek çalışma alanı genişletilebilir. Farklı kalınlıktaki iş parçalarında rezonans riski de gelecekte detaylı olarak ele alınması gereken araştırma konularıdır. Bu amaçla titreşim kaynaklarının ve iş parçası numunelerinin doğal frekanslarını belirlemek için spektral analizler de yapılabilir.

## TEŞEKKÜR

Bu çalışma Durmazlar Makina San. ve Tic. A.Ş. ve TÜBİTAK BİDEB tarafından, TÜBİTAK 2244 Sanayi Doktora Programı kapsamında desteklenmiştir (Proje No: 119C115). Teşekkürlerimizi sunarız.

## KAYNAKLAR

- Analog Devices, (2010). Small, Low Power, 3-Axis  $\pm 3g$  Accelerometer (ADXL335) Data Sheet <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/adxl335.pdf> 25.10.2023
- Berninger, T. F. C., Slimak, T., Weber, T., & Rixen, D. J. (2020). An external stabilization unit for high-precision applications of robot manipulators. İçinde *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems* (ss. 4276-4282). Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. <https://doi.org/10.1109/IROS45743.2020.9341454>
- Chen, Y.-X. (2016). Modal Analysis of Three Dimensional Numerical Control Laser Cutting Machine Based on Finite Element Method. *Proceedings of the 3rd International Conference on Material Engineering and Application*. <https://doi.org/10.2991/icmea-16.2016.40>
- Çelenk, O. (2018). Kompozit-Alüminyum Hibrit Yapının Lazer Kesim Tezgâhı Y-Eksenine Uygulanması, *Yüksek Lisans Tezi*, Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Bursa 127s.
- Denkena, B., Eckl, M., & Lepper, T. (2015). Advanced control strategies for active vibration suppression in laser cutting machines. *International Journal of Automation Technology*, 9(4), 425-435. <https://doi.org/10.20965/ijat.2015.p0425>
- Ghany, K. A., Rafea, H. A., & Newishy, M. (2006). Using a Nd:YAG laser and six axes robot to cut zinc-coated steel. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 28(11-12), 1111-1117. <https://doi.org/10.1007/s00170-004-2468-x>
- Girdu, C. C., & Gheorghe, C. (2023). Study of the Relationship between Entropy and Hardness in Laser Cutting of Hardox Steel. *Materials*, 16(13). <https://doi.org/10.3390/ma16134540>
- Hace, A., Jezernik, K., & Terbuc, M. (1999). VSS motion control for a laser-cutting machine. *Control Engineering Practice*, 9(1), 66-67. [https://doi.org/10.1016/S0967-0661\(00\)00089-7](https://doi.org/10.1016/S0967-0661(00)00089-7)
- Hashemzadeh, M., Voisey, K. T., & Kazerooni, M. (2012). The effects of low-frequency workpiece vibration on low-power CO 2 laser cutting of PMMA: An experimental investigation. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 63(1-4), 33-40. <https://doi.org/10.1007/s00170-011-3881-6>
- Kusuma, A. I., & Huang, Y. M. (2023). Product quality prediction in pulsed laser cutting of silicon steel sheet using vibration signals and deep neural network. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 34(4), 1683-1699. <https://doi.org/10.1007/s10845-021-01881-1>
- Mohd Ghazali, M. H., & Rahiman, W. (2021). Vibration Analysis for Machine Monitoring and Diagnosis: A Systematic Review. *Shock and Vibration*. Hindawi Limited. <https://doi.org/10.1155/2021/9469318>
- Schedlinski, C., & Lüscher, M. (2002). *Application of Classical and Output-Only Modal Analysis to a Laser Cutting Machine*. Proc.
- Struckmeier, F., Zhao, J., & León, F. P. (2020). Measuring the supporting slats of laser cutting machines using laser triangulation. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 108(11-12), 3819-3833. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05640-z>
- Tonoli, A., Bonfitto, A., Silvagni, M., D., L., & Zenerino, E. (2011). Active Isolation and Damping of Vibrations for High Precision Laser Cutting Machine. İçinde *Vibration Analysis and Control - New Trends and Developments*. InTech. <https://doi.org/10.5772/25092>

Troncossi, M., Troiani, E., & Rivola, A. (2008). Design Optimization Of A Laser Cutting Machine By Elastodynamic Modeling, *Proceedings of the 9th Biennial ASME Conference on Engineering Systems Design and Analysis*.

Venkata Rao, K., Suvarna Raju, L., Suresh, G., Ranganayakulu, J., & Krishna, J. (2024). Modelling of kerf width and surface roughness using vibration signals in laser beam machining of stainless steel using design of experiments. *Optics and Laser Technology*, 169. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2023.110146>

Vieira, D. G. P., Meireles, J. F., Nunes, J. P., & Da Silva, L. F. M. (2012). Substituting conventional steel alloys by carbon fibre composites in structural parts of an existing laser cutting equipment. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik* (C. 43, ss. 468-478). <https://doi.org/10.1002/mawe.201200983>

Wijker, Jaap J. (2009). *Random Vibrations in Spacecraft Structures Design: Theory and Applications*, Springer Dordrecht.

Zhang, Q. P., Wang, Z. R., & Wang, Y. F. (2014). Dynamic analysis and experimental research of laser cutting machines. İçinde *Advanced Materials Research* (C. 915-916, ss. 31-34). Trans Tech Publications. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.915-916.31>



# Kahramanmaraş Sütçü İmam University

## Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 24.11.2023  
Kabul Tarihi : 30.11.2023

Received Date : 24.11.2023  
Accepted Date : 30.11.2023

### DERİN ÖĞRENME TABANLI MODELLERLE AKCİĞER X-RAY GÖRÜNTÜLERİNDEN COVID-19 TESPİTİ

### DETECTION OF COVID-19 FROM CHEST X-RAY IMAGES WITH DEEP LEARNING BASED MODELS

*Hacı Ömer DOKUMACI\** (ORCID: 0000-0003-4032-0669)

Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Kahramanmaraş, Türkiye

\*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Hacı Ömer DOKUMACI, omer\_dokumaci@ksu.edu.tr

#### ÖZET

COVID-19 dünya çapında milyonlarca insanı enfekte etmiştir ve önemli hastalık ve ölümlere neden olmuştur. Akciğer röntgeni (CXR), COVID-19 hastalığını izlemek için hızlı ve etkili bir yöntemdir. CXR taramasından COVID-19 teşhisi zor olabilir ve deneyimli radyologlar bile her durumda kesin bir teşhis koyamayabilir. Bu çalışmada, çeşitli CNN tabanlı modellerin performansını değerlendirmek için COVID-19, akciğer opaklığı ve viral pnömonisi olan hastaların X-ışını görüntülerinden oluşan bir veri seti kullanıldı. Değiştirilmiş bir ConvNext'le, 4 yönlü sınıflandırmada COVID-19 görüntülerinde %98,1 doğruluk ve %97,8 kesinlik elde edildi. ConvNext, COVID-19 teşhisi için kullanılan en son tekniklere göre iyi bir performans sergilemektedir. Bu çalışmada ortaya konulan yöntem, klinisyenleri COVID-19 hastalarını taramada destekleyebilir. Böylece bu hastalar için daha hızlı tedavi ve daha iyi sağlık sonuçları mümkün olabilir.

**Anahtar Kelimeler:** Covid-19, derin öğrenme, CNN.

#### ABSTRACT

COVID-19 has infected millions of people worldwide and caused significant illness and death. Chest X-rays are a quick and efficient method for monitoring COVID-19 disease. The diagnosis of COVID-19 from a CXR scan can be challenging, and even experienced radiologists may not be able to make a definitive diagnosis in all cases. In this study, we used a dataset of X-ray images of COVID-19, lung opacity, viral pneumonia, and healthy patients to evaluate the performance of several CNN-based models. A modified ConvNext has achieved 98.1% accuracy and 97.8% precision on COVID-19 images in a 4-way classification effort. Our results compare well with state-of-the-art techniques for COVID-19 diagnosis. Our approach could support clinicians in screening patients for COVID-19, thus facilitating faster treatment and better health outcomes for COVID-19 patients.

**Keywords:** Covid-19, deep learning, CNN.

## GİRİŞ

Covid-19 ilk olarak Aralık 2019'da Çin'in Wuhan kentinde gözlemlenmiştir. Hızla dünyadaki diğer ülkelere yayılmış, milyonlarca insana bulaşmış ve ölümlere neden olmuştur (Wang vd., 2020; Gorbalenya vd., 2020; Phelan vd., 2020). Covid-19'un yüksek bulaşıcılığı, hastalığın daha fazla yayılmasını önlemek ve zamanında ve etkili tedavi sağlamak için hastaları hızlı bir şekilde taramayı, tanımlamayı ve izole etmeyi gerekli kılmaktadır.

Ters transkriptaz polimeraz zincir reaksiyonu (RT-PCR) testi, Covid-19 teşhisi için yaygın olarak kullanılan bir yöntemdir (Kucirka vd., 2020; Khan vd., 2020). Bununla birlikte, RT-PCR testi için birtakım limitler vardır. RT-PCR testinin bir limiti, sonuçlar için uzun geri dönüş süresidir. Bu, hastalığın erken evrelerinde veya hastaların ciddi hastalık riskinin yüksek olduğu durumlarda olduğu gibi, hastaların hızlı bir şekilde teşhis edilmesi gereken durumlarda da bir sorun olabilir. RT-PCR testinin bir diğer limiti, yüksek oranda yanlış negatifliğe sahip olmasıdır. Bunun nedeni, viral yükün düşük olması durumunda RT-PCR testinin virüsü tespit edememesidir.

Bu limitler göz önüne alındığında, RT-PCR testine ek olarak diğer tanı yöntemlerini de dikkate almak önemlidir. Bilgisayarlı tomografi (BT) taramaları ve akciğer röntgeni (CXR) gibi tıbbi görüntüleme yöntemleri, Covid-19'u yüksek derecede doğrulukla teşhis etmek için kullanılabilir. Bu yöntemler, hastaların RT-PCR testinin negatif olduğu ancak yine de enfekte olduğundan şüphelenildiği durumlarda özellikle yararlıdır.

Derin öğrenme (DL) teknikleri, bilgisayarla görü ve biyomedikal görüntüleme alanında, daha üst düzey sistemleri modellemek ve insan benzeri performans elde etmek için başarıyla kullanılmıştır. Bu, CXR görüntülerinden Covid-19 teşhisi için yapay zekâ kullanımına olan ilginin artmasına neden olmuştur. Covid-19 teşhisi için DL tabanlı modellerde tipik olarak evrişimli sinir ağları (CNN) veya transformer kodlayıcı modüller kullanılır. DL yöntemlerinin otomatik özellik öğrenme yeteneği, derin sinir ağlarına dayalı Covid-19 sınıflandırmasını yaygın olarak kullanılan bir yaklaşım haline getirmiştir. DL teknikleri, Covid-19 tanısını otomatikleştirmek için çok sayıda çalışmada kullanılmıştır (Umer vd., 2022; Apostolopoulos vd., 2020; Wang vd., 2020). Bilgisayar destekli tanı (CAD) sistemleri, DL modellerinin yardımıyla radyologların iş yükünü azaltmaya ve tanının doğruluğunu iyileştirmeye yardımcı olabilir. CAD sistemleri, daha yakından izlenebilmeleri için ağır Covid-19 geliştirme riski taşıyan hastaları belirlemek için de kullanılabilir.

## ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

Covid-19'un tespiti için CXR görüntülerini otomatik olarak sınıflandırmakta CNN'lerin kullanımı son yıllarda büyük ilgi görmüştür. Öztürk vd. Covid-19'da üç yönlü sınıflandırma için DarkNet'i %87 doğrulukla kullanmıştır. Apostolopoulos vd. önceden eğitilmiş beş CNN'i eğitmiştir ve iki kategorili ve üç kategorili sınıflandırmada sırasıyla %98,75 ve %93,48'lik bir doğruluk elde etmişlerdir. Yoo vd. Covid-19'u %95 doğrulukla tespit etmek için ResNet18 modelini kullanmıştır. Sethy vd. özellik çıkarımı için ResNet50 mimarisini ve sınıflandırma için SVM'i kullanarak %95,33'lük bir doğruluk elde etmiştir. Minaee vd. %95,45'lik bir doğruluk elde etmek için Squeeze Net'i kullanmıştır.

Wang vd. projeksiyon-genişleme-projeksiyon-genişletme (PEPX) mimarisine sahip COVID-Net adlı derin bir CNN ağı tasarlamış ve %93,3'lük bir doğruluk elde etmiştir. Arias-Garzón vd. daha doğru sınıflandırma sonuçları elde etmek için ön işleme aşamasını iyileştirmeye odaklanmıştır. Ön işleme aşaması, verileri frontal veya lateral olarak bölmek için bir filtreleme ağından ve akciğer bölgelerini çıkarmak için bir segmentasyon modelinden oluşuyordu ve bu da daha sonra %97'lik bir sınıflandırma doğruluğu ile sonuçlanmıştır.

## MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışmada, bugüne kadar olan en kapsamlı Covid-19 veri setlerinden birinde, Covid-19'un tespiti için, gelişmiş CNN tabanlı sinir ağı mimarilerinin performansı değerlendirilmiştir. Çalışılan bütün ağlarda sadece sınıflandırma başlığı değiştirilmiştir. Bu sayede transfer öğrenme için en uygun olan ağ mimarisini tespit edilmiştir. Literatürün önemli bir bölümünde, ağların bazı kısımları değiştirilmiştir, ancak eşlik eden kaynak kodu veya hiperparametre değerleri nadiren verildiğinden, bu değişikliklerin ve karşılık gelen sonuçların tekrarlanması zordur. Bu çalışmada standart açık kaynaklı ağların performansı değerlendirildiğinden, sonuçlar alanında uzman kişiler tarafından tekrarlanabilir. Kıyaslanan ağlar şunlardır: ResNet152, ResNext101, EfficientB7 ve ConvNext.

### *CNN Tabanlı Modeller*

Residual Network'ün kısaltması olan ResNet, 2015 yılında Microsoft Research'teki araştırmacılar tarafından tanıtılan bir tür sinir ağı mimarisidir (He vd., 2015). Çok derin sinir ağlarını eğitirken ortaya çıkan kaybolan/patlayan

gradyanlar sorununu çözmek için tasarlanmıştır. ResNet, aradaki bazı katmanları atlayarak, bir katmanın aktivasyonlarını diğer katmanlara bağlamak için atlama bağlantılarını kullanan artık bloklar kavramını sunar. Bu, ağın temel eşleme yerine artık bir eşlemeye sığdırılmasına olanak tanır. Bu metot, kaybolan/patlayan gradyanların neden olduğu sorunlar olmadan, çok derin sinir ağlarını eğitime yeteneği ile sonuçlanır.

ResNeXt, Xie vd. tarafından makalelerinde tanıtılan evrişimli bir sinir ağı mimarisidir (Xie vd., 2016). Aynı topolojiye sahip bir dizi dönüşümü bir araya getiren bir yapı taşıyı tekrarlayan ResNet mimarisinin bir uzantısıdır. Bir ResNet ile karşılaştırıldığında, ResNeXt, derinlik ve genişlik boyutlarına ek olarak önemli bir faktör olarak yeni bir boyut olan kardinalite (dönüşüm kümesinin boyutu) C'yi ortaya çıkarır. Bu, katmanları daha derin ve daha geniş istifleme yerine, ResNeXt'in her bir artık blok içindeki paralel dönüşümlerin sayısını da dikkate aldığı anlamına gelir.

EfficientNet, hem doğruluğu hem de verimliliği artırmak için yeni bir model ölçeklendirme yöntemi kullanan evrişimli bir sinir ağı mimarisidir (Tan vd., 2020). Bileşik ölçeklendirme adı verilen bu yöntem, CNN'leri daha yapılandırılmış bir şekilde ölçeklendirmek için basit ama oldukça etkili bir bileşik katsayı kullanır. Genişlik, derinlik ve çözünürlük gibi ağ boyutlarını rastgele ölçeklendiren geleneksel yaklaşımların aksine, bileşik ölçeklendirme yöntemi, her boyutu sabit bir ölçekleme katsayıları kümesi ile eşit şekilde ölçeklendirir. Bu yaklaşım, modelin farklı boyutlarının ölçeklendirilmesinin etkisi incelenerek geliştirilmiştir. Araştırmacılar ağı tüm boyutlarını (genişlik, derinlik ve görüntü çözünürlüğü) mevcut kaynaklarla dengelemenin genel performansı en iyi şekilde iyileştireceğini bulmuşlardır.

ConvNeXt, tamamen standart evrişim modüllerinden oluşturulmuş saf bir evrişim ağıdır (Liu vd., 2020). ConvNeXt'in arkasındaki motivasyon, CNN ağ yapısının tasarım alanlarını yeniden incelemek ve saf bir evrişim ağının neler başarabileceğinin sınırlarını test etmektir. Araştırmacılar, standart bir ResNet'i bir görüntü transformer tasarımına doğru kademeli olarak modernize ettiler ve yol boyunca performans farkına katkıda bulunan birkaç temel bileşen keşfettiler. Bu keşfin sonucu, ConvNeXt olarak adlandırılan saf evrişimli modellerden oluşan bir ailedir. Tamamen standart evrişimli modüllerden oluşturulan ConvNeXt, standart evrişim ağlarının basitliğini ve verimliliğini korurken, COCO algılama ve ADE20K segmentasyonunda transformer tabanlı modeller ile olumlu bir şekilde rekabet eder.

### **Veri Seti**

Bu çalışmada kullanılan Covid-19 veri seti, aşağıdaki hastalıkların CXR görüntülerinden oluşmaktadır: Normal, Covid-19, Akciğer Opaklığı ve Viral Pnömoni (Rahman vd., 2021; Chowdhury vd., 2020). Akciğer opaklığı, Covid dışı akciğer enfeksiyonu anlamına gelmektedir. Veri tabanında 3616 Covid-19 pozitif vakanın yanı sıra 10,192 Normal, 6012 Akciğer Opaklığı ve 1345 Viral Pnömoni görüntüsü ile toplam 21,165 CXR görüntüsü bulunmaktadır. Görüntülerin tümü 299×299 çözünürlüğe normalleştirilmiştir. Banco digital de Imagen Médica de la Comunidad Valenciana (BIMCV), Alman Tıp Okulu (GMS), Società Italiana di Radiologia Medica e Interventistica (SIRM), Kuzey Amerika Radyoloji Derneği (RSNA) ve Guangzhou Kadın ve Çocuk Tıp Merkezi (GWCMC) gibi çeşitli tıbbi kurumlardan toplanmıştır. Örnek resimler etiketleriyle birlikte Şekil 1'de gösterilmiştir.

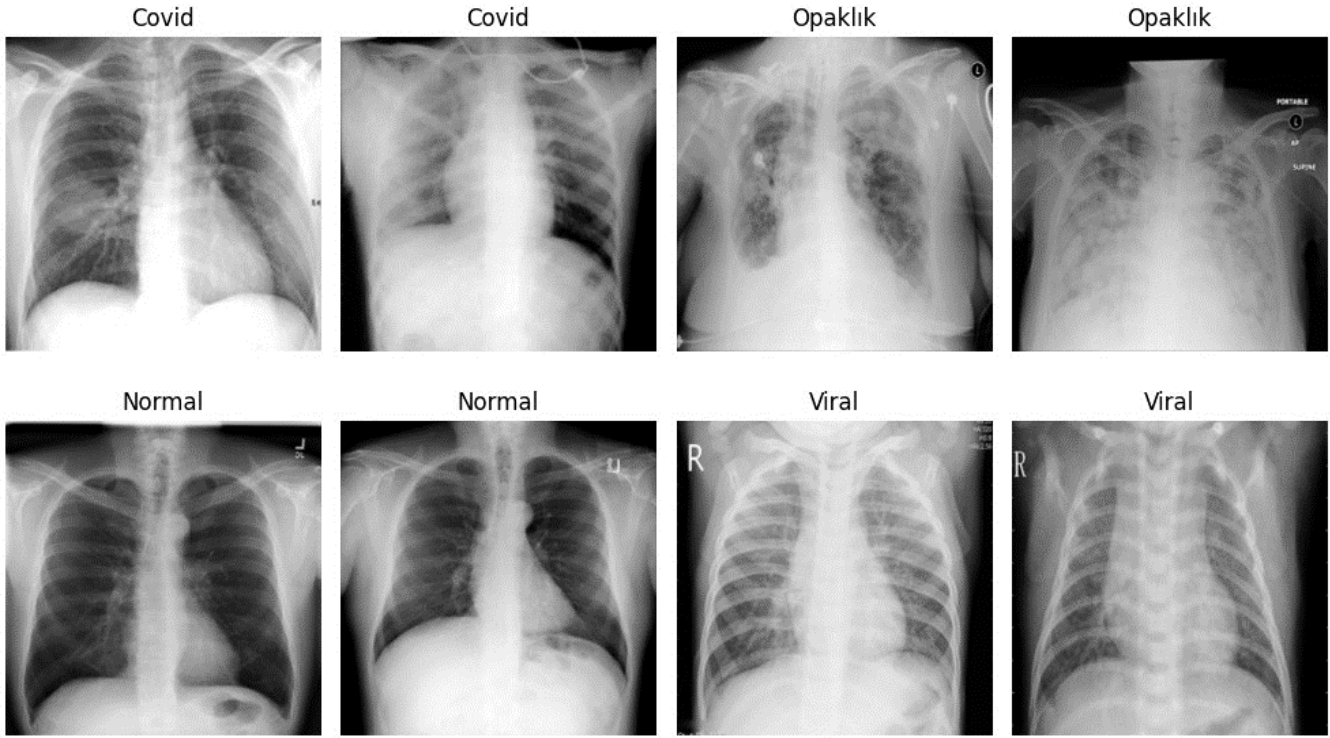
Veri seti rastgele olarak üç kategoriye ayrılmıştır: eğitim, doğrulama ve test. Test veri seti, toplam veri setinin %10'unu oluştururken, geri kalanın %80'i eğitim veri setine, %20'si ise doğrulama veri setine atanmıştır.

Veri artırma, yeni veriler toplanmadan, eğitim modelleri için mevcut veri çeşitliliğinin önemli ölçüde artırılmasını sağlayan bir stratejidir. Döndürme ve yatay çevirme gibi veri artırma teknikleri, büyük sinir ağlarını eğitmek için yaygın olarak kullanılır. Bu teknikler tek tek veya kombinasyon halinde uygulanabilir. Amaç, eğitim verileri içinde daha geniş bir örnek çeşitliliği sunarak daha sağlam bir model oluşturmaktır. Bu çalışmada da görüntüler eğitim sırasında rasgele olarak döndürülmüş ve yatay olarak çevrilmiştir. Döndürme açısı maksimum 10 derece olarak sınırlanmıştır. Görüntüler veri artırımdan önce ağların giriş çözünürlüğüne göre ölçeklendirilmiştir.

### **Transfer Öğrenme**

Transfer öğrenme, bir görev için geliştirilen bir modelin, ikinci bir görevdeki bir model için başlangıç noktası olarak yeniden kullanıldığı bir makine öğrenimi yöntemidir. Sinir ağı modelleri geliştirmek için gereken geniş bilgi işlem ve zaman kaynakları göz önüne alındığında, önceden eğitilmiş modellerin bilgisayarla görü ve doğal dil işleme görevlerinde başlangıç noktası olarak kullanılması derin öğrenmede popüler bir yaklaşımdır.





Şekil 1. Veri Seti İçindeki Örnek Görüntüler

Bu çalışmada, önceden eğitilmiş modellerin çıktı katmanları atılmıştır. Sınıf sayısı ile eşleşen yeni bir sınıflandırma başlığı eklenmiştir. Model, veri seti üzerinden yeniden eğitilerek, önceden eğitilmiş ağırlıkların değiştirilmesiyle yeni sınıflandırmayı öğrenir. Sınıflandırma başlığı, çıktı boyutu 512 olan tam bağlı (FC) bir katmandan, bir bırakma (dropout) katmanından ve 4 sınıf çıktısı olan son bir sınıflandırma katmanından oluşur.

Model eğitimi,  $1e-5$  başlangıç öğrenme hızı, 32 batch size ve 25 iterasyon sayısı (epoch) ile gerçekleştirildi. Optimize edici olarak AdamW metodu kullanıldı. Her 10 iterasyon sonrası öğrenme hızı onda birine düşürüldü. AdamW, Adam metodundaki ağırlık azalması yöntemini değiştiren stokastik bir optimizasyon yöntemidir. Adam metodunun yakınsamasını ve performansını iyileştirmek için ayrıştırılmış bir ağırlık azalması formülü ve bir AMSGrad varyantı kullanır.

## BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada, modellerin performansını değerlendirmek için dört metrik kullanılmıştır. Bu göstergelerden kesinlik (precision), geri çağırma (recall) ve doğruluk (accuracy) aşağıdaki denklemler ile ifade edilir.

$$\text{Kesinlik} = \frac{TP}{TP+FP} \quad (1)$$

$$\text{Geri çağırma} = \frac{TP}{TP+FN} \quad (2)$$

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

Bu denklemlerde TP gerçek pozitiflerin, TN gerçek negatiflerin, FP yanlış pozitiflerin ve FN yanlış negatiflerin sayısını gösterir.

$F_1$  puanı, kesinlik ve geri çağırma arasındaki harmonik ortalamadır. Kesinlik ve geri çağırma arasında bir denge bulunması gerekiyorsa veya eşit olmayan bir sınıf dağılımı varsa, o zaman  $F_1$  puanı önemlidir (Denklem 4).

$$F_1 = \frac{2 \cdot \text{Geri Çağırma} \cdot \text{Kesinlik}}{\text{Geri Çağırma} + \text{Kesinlik}} \quad (4)$$

**Tablo 1.** Makro Ortalama Metrikleri (%)

Model	Doğruluk	Kesinlik	Geri Çağırma	F1 Puanı
EfficientNet B7	94,7	96,0	94,4	95,2
Resnet152	93,8	94,0	94,6	94,3
ResNext101	94,4	95,6	93,7	94,6
ConvNext	96,0	96,9	96,1	96,4

**Tablo 2.** Covid-19 Tespit Metrikleri (%)

Model	Doğruluk	Kesinlik	Geri Çağırma	F1 Puanı
EfficientNet B7	95,3	97,5	95,3	96,4
Resnet152	97,2	92,9	97,2	95,0
ResNext101	97,5	95,9	97,5	96,7
ConvNext	98,1	97,8	98,1	97,9

**Tablo 3.** Her sınıf için F<sub>1</sub> Puanları (%)

Model	Covid-19	Normal	Opaklık	Viral
EfficientNet B7	96,4	95,1	92,7	96,6
Resnet152	95,0	94,3	91,8	95,9
ResNext101	96,7	94,6	92,5	94,6
ConvNext	97,9	96,2	94,2	97,4

Makro ortalama metrikleri için elde edilen sonuçlar Tablo 1'de gösterilmektedir. Makro ortalama metrikleri, bütün sınıfların metriklerinin ortalamasının alınmasıyla oluşturulur. Modellerin hepsi, %94 ila %97 arasında metriklere sahiptir. Bu da genel tespit için iyi performansın işaretidir. ConvNext, bu dört CNN varyantının içindeki en iyi model olarak ortaya çıkmıştır. ConvNext'in genel olarak geri çağırma ve kesinliği %96'nın üzerindedir, bu nedenle yalnızca gerçek pozitifleri yakalamak için değil, aynı zamanda yanlış pozitifleri en aza indirmek için de iyidir. EfficientNet B7 ikinci en iyi modelken, ResNet152 genel olarak en kötü performansı göstermiştir.

Tablo 2, Covid-19 tespit metriklerini göstermektedir. Bu metrikler yalnızca Covid-19 sınıflandırma performansı üzerinden hesaplanmıştır. Gene bütün modeller yüksek doğruluklar göstermektedir. ConvNext, bu dört CNN mimarisi içinde yine en iyi modeldir ve bu da onu Covid-19 teşhisi için en iyi aday yapar. ConvNext için bütün metrikler %98 civarındadır, bu nedenle hem Covid-19 pozitiflerini hem de negatiflerini tespit etmek için iyi bir modeldir. F<sub>1</sub> puanına bakılırsa, EfficientNet B7 ve ResNext101 benzer performans göstermektedir. ResNet152 en kötü F<sub>1</sub> puanına sahiptir.

Tablo 3, her sınıf ve her model için F<sub>1</sub> puanlarını gösterir. ConvNext, %97,9 ile Covid-19 görüntüleri için en yüksek puana sahiptir. EfficientNet B7 ve ResNext101, Covid-19 için benzer F<sub>1</sub> puanlarına sahipken, en düşük puanı ResNet152 almıştır. Tüm modeller, Opaklık sınıfı için en düşük puana sahiptir. Bu yüzden Opaklık sınıfı dört sınıf arasından tespit edilmesi en zor sınıftır.

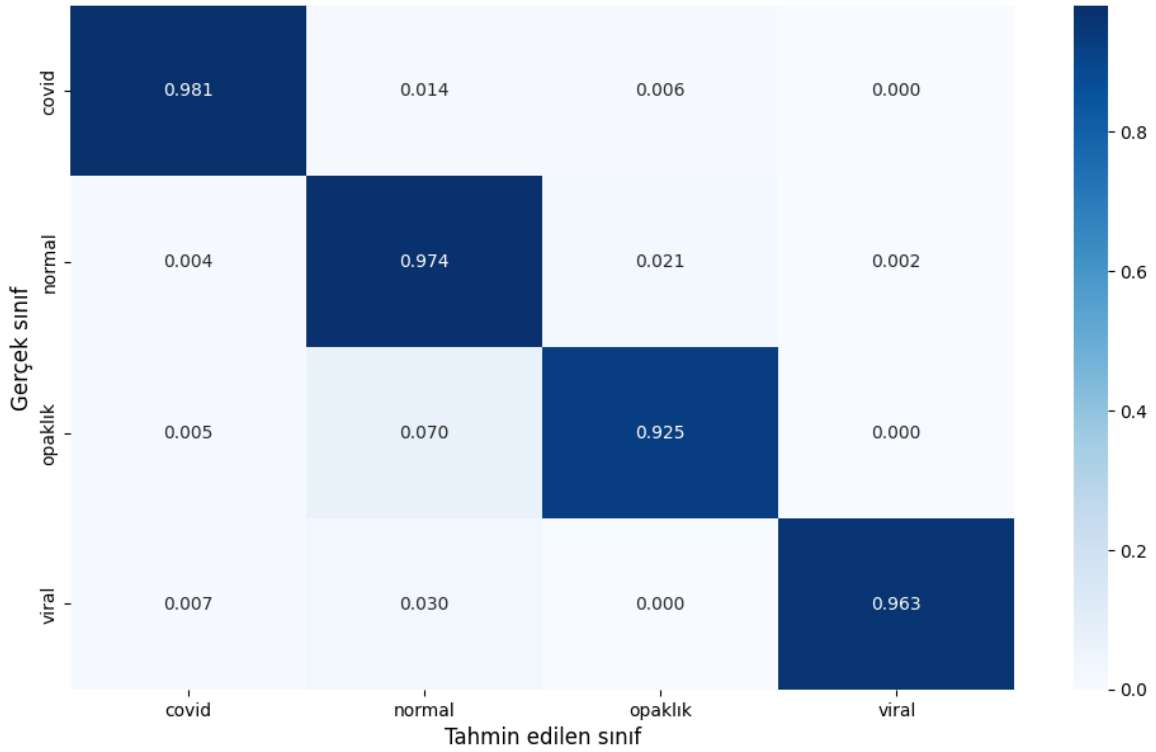
Şekil 2, en iyi CNN modeli olan ConvNext için karışıklık matrisini göstermektedir. Opaklık sınıfı, dört sınıf arasında en küçük geri çağırma sahiptir. Opaklık sınıfı ile normal sınıf arasında yanlış sınıflandırılma olmuştur. Normal ve viral sınıflar arasında da karışıklık vardır. Bazı covid görüntüleri de normal olarak değerlendirilmiştir. Bunların dışında sınıflar arasında yanlış negatifler veya pozitifler çok azdır.

Şekil 3, bu çalışmadaki en kötü CNN modeli olan Resnet152 için karışıklık matrisini göstermektedir. Normal ve opaklık sınıfları arasında önemli bir karışıklık vardır. Şekilde viral-normal sınıflar arasındaki karışıklık da görülebilir. Covid-19 için yanlış negatifler ve pozitifler çoğunlukla opaklık ve normal sınıflarından gelmektedir.

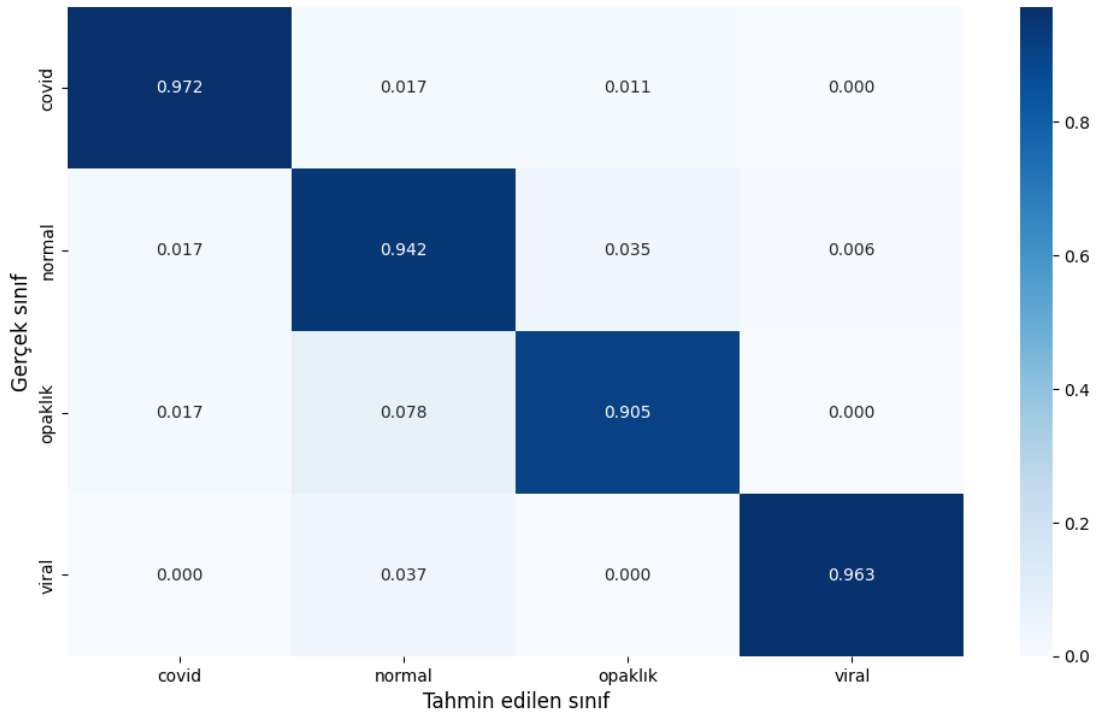
## SONUÇLAR

Bu çalışmada, en kapsamlı halka açık Covid-19 veri setlerinden biriyle, Covid-19'un tespiti için en gelişmiş CNN tabanlı sinir ağı mimarilerinin performansı değerlendirilmiş ve karşılaştırılmıştır. Kıyaslanan ağlar şunlardır:

ResNet152, ResNext101, EfficientB7 ve ConvNext. Tüm modellerin makro ortalaması %94 ila %97 arasındadır ve bu da genel algılama için modellerin iyi performansı olduğunu gösterir.



Şekil 2. ConvNext Karışıklık Matrisi



Şekil 3. ResNet152 Karışıklık Matrisi

ConvNext, bu dört CNN varyantı içindeki en iyi modeldir ve bu da onu tanı için iyi bir seçim haline getirir. ConvNext'in genel doğruluk ve kesinliği %96'nın üzerindedir, bu nedenle yalnızca gerçek pozitifleri yakalamak için değil, aynı zamanda yanlış pozitifleri en aza indirmek için de iyidir. Covid-19 için ConvNext doğruluğu %98,1'dir. Bu da dörtlü sınıflandırma için yapılan CNN çalışmalarının üst sıralarında yer alan bir performanstır.

## KAYNAKLAR

- Apostolopoulos, I. D. & Mpesiana, T. A. (2020). COVID-19: Automatic detection from x-ray images utilizing transfer learning with convolutional neural networks. *Physical and Engineering Sciences in Medicine*, 43(2), 635–640.
- Arias-Garzo'n, D., Alzate-Grisales, J.A., Orozco-Arias, S., Arteaga-Arteaga, H.B., Bravo-Ortiz, M.A., MoraRubio, A., vd. (2021). COVID-19 detection in X-ray images using convolutional neural networks. *Mach Learn Appl*, 6, 100138.
- Chowdhury, M.E., Rahman, T., Khandakar, A., Mazhar, R., Kadir, M.A., Mahbub, Z.B., Islam, K.R., Khan, M.S., Iqbal, A., Emadi, N.A., vd. (2020). Can AI help in screening viral and covid-19 pneumonia?. <https://arxiv.org/abs/2003.13145>.
- Gorbalenya, A. E., Baker, S. C., Baric, R. S., De Groot, R. J., Drosten, C., Gulyaeva, A. A & Ziebuhr, J. (2020). The species severe acute respiratory syndrome-related coronavirus: Classifying 2019-nCoV and naming it SARS-CoV-2. *Nat Microbiol*; 5, 536–44.
- He, K., Zhang, X., Ren, S., & Sun, J. (2015). Deep Residual Learning for Image Recognition. <https://arxiv.org/abs/1512.03385>.
- Khan, A. I., Shah, J. L. & Bhat, M. M. (2020). CoroNet: A deep neural network for detection and diagnosis of COVID-19 from chest x-ray images. *Computer Methods & Programs in Biomedicine*, 196(26), 105581.
- Kucirka, L. M., Lauer, S. A., Laeyendecker, O., Boon, D. & Lessler, J. (2020). Variation in false-negative rate of reverse transcriptase polymerase chain reaction-based SARS-CoV-2 tests by time Since exposure. *Annals of Internal Medicine*, 173(4), 262–267.
- Liu, Z., Mao, H., Wu, C., Feichtenhofer, C., Darrell, T., & Xie, S. (2022). A ConvNet for the 2020s. <https://arxiv.org/abs/2201.03545>.
- Minaee, S., Kafieh, R., Sonka, M., Yazdani, S., & Jamalipour Soufi, G. (2020). Deep-COVID: Predicting COVID-19 from chest X-ray images using deep transfer learning. *Med Image Anal*, 65, 101794.
- Ozturk, T., Talo, M., Yildirim, E.A., Baloglu, U.B., Yildirim, O., & Rajendra Acharya, U. (2020). Automated detection of COVID-19 cases using deep neural networks with X-ray images. *Computers in Biology and Medicine*, 121, 103792.
- Phelan, A. L., Katz, R. & Gostin, L. O. (2020). The novel coronavirus originating in Wuhan, China: Challenges for global health governance. *JAMA*, 323(8), 709– 710.
- Rahman, T., Khandakar, A., Qiblawey, Y., Tahir, A., Kiranyaz, S., Kashem, S.B.A., Islam, S.T., Maadeed, S.A., Zughair, S.M., Khan, M.S., & Chowdhury, M.E. (2021). Exploring the Effect of Image Enhancement Techniques on COVID-19 Detection Using Chest X-ray Images. *Computers in Biology and Medicine*, 132, 104319.
- Sethy, P.K., Behera, S.K., Ratha, P.K., & Biswas P. (2020). Detection of coronavirus Disease (COVID-19) based on Deep Features and Support Vector Machine. *Int J Math Eng Manag Sci*, 5(4), 643–651.
- Tan, M., & Le, Q.V. (2019). EfficientNet: Rethinking Model Scaling for Convolutional Neural Networks. <https://arxiv.org/abs/1905.11946>.
- Umer, M., Ashraf, I., Ullah, S., Mehmood, A., & Choi, G.S. (2022). Covinet: A convolutional neural network approach for predicting covid-19 from chest x-ray images. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 13(1), 535–547.
- Wang, C., Horby, P. W., Hayden, F. G. & Gao, G. F. (2020) A novel coronavirus outbreak of global health concern. *Lancet (London, England)*, 395(10223), 470– 473.
- Wang, L., Lin Z. Q., & Wong, A. (2020). Covid-net: A tailored deep convolutional neural network design for detection of covid-19 cases from chest x-ray images. *Scientific Reports*, 10(1), 1–12.
- Wang, L., Lin, Z.Q., & Wong, A. (2020). COVID-Net: a tailored deep convolutional neural network design for detection of COVID-19 cases from chest X-ray images. *Sci Rep*, 10(1), 19549.
- Xie, S., Girshick, R., Dollár, P., Tu, Z., & He, K. (2016). Aggregated Residual Transformations for Deep Neural Networks. <https://arxiv.org/abs/1611.05431>.



# Kahramanmaraş Sutcu Imam University

## Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 26.11.2023  
Kabul Tarihi : 29.04.2024

Received Date : 26.11.2023  
Accepted Date : 29.04.2024

### IMPACT OF ELECTRIC CARS ON THE CRASH PERFORMANCE OF LONGITUDINAL BARRIERS

### ELEKTRİKLİ ARAÇLARIN GÜVENLİK BARIYERLERİNİN ÇARPIŞMA PERFORMANSINA ETKİSİ

Ayhan Öner YÜCEL<sup>1</sup>\* (ORCID: 0000-0001-5888-2809)

<sup>1</sup> Aydın Adnan Menderes University, Department of Civil Engineering, Aydın, Türkiye

\*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Ayhan Öner YÜCEL, aoyucel@adu.edu.tr

#### ABSTRACT

The use of battery electric vehicles (EVs) is spreading around the world due to their advantages. The presence of large batteries makes electric cars heavier, and due to their position, the vehicle's center of gravity is lowered compared to conventional internal combustion engine cars. The weight of an impacting vehicle is one of the critical parameters for the acceptable performance of longitudinal barriers. It is anticipated that EVs could pose failure risks for conventional safety hardware, yet there is still no revision regarding the use of EVs in existing full-scale crash test standards. In this study, the effect of electric cars on the crash performance of the H1 containment level longitudinal steel safety barrier was investigated through computer simulations. Three different vehicle models, each weighing 900 kg and currently used for TB11 finite element analyses, were modified according to the features of the selected reference EVs. Barrier crash performance was evaluated in terms of occupant safety and structural adequacy. Analysis results showed that with increasing vehicle weights in EV tests, injury severity indices become smaller, while the damage to the barrier gets larger. Further investigation of the crash performance of existing barriers with EVs is highly recommended.

**Keywords:** Electric car, crash test, steel barrier, finite element analysis, roadside safety

#### ÖZET

Elektrikli araçların kullanımı, avantajları nedeniyle tüm dünyada yaygınlaşmaktadır. Büyük bataryalar elektrikli arabaları ağırlaştırmakta ve konumları nedeniyle aracın ağırlık merkezini, geleneksel içten yanmalı motorlu arabalara göre daha alçak hale getirmektedir. Çarpan aracın ağırlığı, güvenlik bariyerlerinin kabul edilebilir performansı için önemli parametrelerden biridir. Elektrikli araçların geleneksel güvenlik tertibatları için başarısızlık riski oluşturabileceği öngörülmektedir. Ancak mevcut tam ölçekli çarpışma testi standartlarında elektrikli araçların kullanımına dair henüz bir güncelleme bulunmamaktadır. Bu çalışmada, elektrikli arabaların H1 performans seviyesi çelik güvenlik bariyerinin çarpışma performansına etkisi bilgisayar simülasyonlarıyla incelenmiştir. Her biri 900 kg ağırlığında olan ve halihazırda TB11 sonlu elemanlar analizlerinde kullanılan üç farklı araç modeli, seçilen referans elektrikli araçların özelliklerine göre modifiye edilmiştir. Bariyerin çarpışma performansı, yolcu güvenliği ve yapısal yeterlilik açısından değerlendirilmiştir. Analiz sonuçları, elektrikli araç testlerinde araç ağırlığının artmasıyla yaralanma şiddet indekslerinin küçüldüğünü, bariyerdeki hasarın ise büyüdüğünü göstermiştir. Mevcut bariyerlerin elektrikli araçlarla çarpışma performansına ilişkin daha fazla araştırma yapılması önerilmektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Elektrikli araç, çarpışma testi, çelik bariyer, sonlu elemanlar analizi, yol kenarı güvenliği



## INTRODUCTION

Longitudinal barriers, positioned passively along the roadside and running parallel to the road, are safety systems designed to prevent vehicles from veering off the road in case of an accident. These road safety barriers must meet specific evaluation criteria related to material design, installation, and testing. Typically, the road safety barrier systems used on European highways must adhere to the specifications defined in the European standard EN 1317 (EN 1317-2, 2010). This standard outlines the procedures for testing and certifying newly developed guardrails, providing detailed crash test specifications that include vehicle containment levels, vehicle categories, impact velocities, and impact angles. Additionally, it specifies vehicle characteristics, such as type, dimensions, mass, and mass distribution.

All vehicles categorized in EN 1317 include those with conventional internal combustion engines (EN 1317-1, 2010). Similarly, the American MASH standard, which deals with the evaluation of road restraint systems, also lacks details on testing barriers with electric vehicles (EVs) (AASHTO, 2016). However, the use of electric vehicles has been steadily increasing in recent years (IEA, 2023). The presence of electric batteries in EVs results in a higher mass and a lower center of gravity compared to similarly sized gasoline or diesel cars. The crash performance of longitudinal barriers relies on various factors, such as the weight of the vehicle, impact speed, and the angle of impact (He & Lin, 2018). Given that weight is a crucial factor, there is concern that much heavier electric vehicles could pose a higher risk compared to gasoline or diesel cars of similar size. So far, there have been no established specifications regarding longitudinal barrier tests with electric cars. Therefore, there is a need to investigate the effects of electric cars on the performance of longitudinal safety barriers. Research on barrier crash tests considering the increased weight and lower center of gravity of electric cars could be incorporated into the upcoming revision of the European standard EN 1317.

Longitudinal barriers are divided into three main categories depending on their deformation characteristics (Kim et al., 2016). In terms of lateral deformation performance, concrete barriers are considered rigid, steel barriers are classified as semi-rigid, and cable barriers are representative examples of flexible barriers (Ozcanan & Atahan, 2021). The evaluation standards for guardrails employ a dual assessment approach: The first aspect focuses on the barrier's ability to ensure the safety of drivers and passengers, while the second aspect evaluates the structural adequacy of the barrier. Comprehensive testing is necessary before implementing designed roadside safety barriers to evaluate their safety and structural performance. The injury risk to occupants is assessed using two indices: the acceleration severity index (ASI) and the theoretical head impact velocity (THIV). Systems that pass these tests successfully receive certification and approval for implementation. The geometric features of barriers significantly affect performance (Molan et al., 2019; Molan & Ksaibati, 2021). Barrier height and post spacing are critical parameters for the safety performance of barriers (Teng et al., 2016). The severity of impact is significantly influenced by both the type and material of the post (Atahan & Yücel, 2013; Teng et al., 2016). In addition to barrier features, vehicle properties also affect the crash performance of the barrier. Even with the same weight, changes in vehicle geometric features could alter barrier crash performance (Atahan et al., 2013, 2014; Özcanan & Özcan, 2022). Therefore, there is a need to investigate the effects of increasingly used high-weight and low-center-of-gravity electric cars on the performance of existing barriers.

The use of Finite Element (FE) analysis in roadside safety assessments is indispensable due to the high costs and time constraints associated with conducting full-scale tests for developed systems. FE analysis offers significant advantages by enabling the creation of full-scale models that simulate real crash tests, and the results obtained align consistently with those from actual tests. This flexibility allows for an unlimited number of analyses using FE, facilitating the exploration of various parameters and variables. Numerous studies have investigated the crash performance of road safety systems by creating FE models (Langseth et al., 1999; Pawlak, 2016; Yücel et al., 2018; Gheres & Scurtu, 2022; Wolny et al., 2022). Comparisons between real crash tests and FE models have indicated that the computational models well represent actual conditions. Instead of conducting numerous expensive and labor-intensive real crash tests, FE simulations can be employed (Ren & Vesenjaj, 2005). The good agreement between simulation results and real crash tests enables the utilization of FE models during the development and certification process of guardrails (Borovinšek et al., 2007). In a recent study, the crash performance of Automated Driving Systems (ADS) when colliding with roadside hardware was investigated and compared to traditional vehicles (Reichert et al., 2020). The study employed various roadside hardware, different types of ADS, and impact configurations for finite element simulation using LS-DYNA software. In previous studies, the LS-DYNA program

was observed to be used for finite element analysis of the performance of roadside safety systems. In this study, the LS-DYNA software was employed (LSTC, 2012).

The main objective of this study is to investigate the impact of electric cars on the crash performance of existing longitudinal safety barriers. Crash analyses were conducted using 3-dimensional dynamic FE analysis software, LS-DYNA. For this investigation, an H1 containment level steel longitudinal barrier was employed. The FE model was validated by comparing the results of a real full-scale crash test and computer simulation of the TB11 test for the H1 barrier. To assess the effects of electric cars with a lower center of gravity and higher weight, three different car models were used in the FE simulations. Crash analyses of the H1 barrier were performed using the FE models of 900 kg weight cars and modified vehicle FE models based on selected reference electric cars. Finally, the impacts of electric cars on the severity of the collision were evaluated using ASI and THIV parameters, while the structural performance was assessed through working width (W) and the final condition of the test barrier.

## MATERIAL AND METHOD

### *Crash Performance Evaluation of Longitudinal Barriers according to EN 1317*

EN 1317 is the main standard that defines testing and certification procedures for roadside safety barriers. Road restraint systems employed on European highways must adhere to the specifications outlined in the European standard EN 1317 (EN 1317-2, 2010). The standard consists of eight separate parts. Terminology and general test criteria, including vehicle geometric details, are presented in EN 1317-1 (EN 1317-1, 2010). The second part (EN 1317-2, 2010) outlines test methods for longitudinal barriers, crash test acceptance criteria, and performance classes of the guardrails. This standard defines containment levels of safety barriers (low angle, normal, higher, and very high) and requires crash tests for each level. A total of 11 different crash tests are defined in the EN 1317-2. The standard provides vehicle type, impact speed, impact angle, and vehicle mass for each test. In this study, an H1 containment level safety barrier, classified as higher containment, was used to perform computer simulation crash tests. Table 1 presents the required crash tests for the H1 containment level and the details of those tests. As indicated in the table, an H1 safety barrier must undergo the TB11 and TB42 tests. For the acceptance of the barrier design, test results should meet the evaluation criteria described in EN 1317. In the TB11 test, a 900 kg car impacts an H1 barrier at a speed of 100 km/h at an angle of 20°. In the TB42 test, a 10000 kg rigid Heavy Goods Vehicle (HGV) impacts an H1 barrier at a speed of 70 km/h and an angle of 15°.

**Table 1.** The Details of Tests Required for H1 Containment Level (EN 1317-2, 2010)

Containment level	Required Test	Speed (km/h)	Angle (°)	Mass (kg)	Type of vehicle
Higher containment	TB11	100	20	900	Car
	TB42	70	15	10000	Rigid HGV

Crash test results of longitudinal barriers should meet the conditions outlined in EN 1317-2. Evaluation criteria can be classified into three main groups: structural adequacy, occupant risk, and vehicle trajectory. The most important conditions for crash test acceptance can be summarized as follows: the vehicle must not roll over during or after the test, barrier parts must not penetrate inside the occupant compartment, there must be no complete breakage in the longitudinal elements forming the barrier, and the vehicle must remain at the traffic side of installation (EN 1317-2, 2010). In this study, the impacts of electric cars on barrier performance were investigated. Therefore, the focus was solely on TB11 testing since this test deals with the testing of small passenger cars. One of the main purposes of the TB11 test is to evaluate the injury risk of occupants in the vehicle. ASI and THIV indices are used to assess the severity of injury (EN 1317-2, 2010). The ASI represents the impact intensity, while THIV quantifies the speed at which the occupant impacts with an object in the car during the collision. Accelerations in the x, y, and z directions are utilized to calculate ASI, as given in Equation (1).

$$ASI(t) = \sqrt{\left[\left(\frac{a_x}{\hat{a}_x}\right)^2 + \left(\frac{a_y}{\hat{a}_y}\right)^2 + \left(\frac{a_z}{\hat{a}_z}\right)^2\right]} \quad (1)$$

where,  $a_x$ ,  $a_y$ , and  $a_z$  represent the components of vehicle acceleration (measured in g, where g is gravitational acceleration) in the three axes.  $\hat{a}_x$ ,  $\hat{a}_y$ , and  $\hat{a}_z$  denote the threshold accelerations in the longitudinal (x), lateral (y), and

vertical (z) directions, respectively. These threshold values are specified in the standard as 12 g, 9 g, and 10 g, respectively. The ASI value obtained from this equation is expressed by Equation (2).

$$ASI = \max[ASI(t)] \tag{2}$$

The THIV value is calculated using the occupant's head speed inside the vehicle, as specified in Equation (3).

$$THIV = [V_{head\ x}^2(T) + V_{head\ y}^2(T)]^{0.5} \tag{3}$$

where  $V_{head\ x}$  and  $V_{head\ y}$  refer to the head velocity measurements in the longitudinal and lateral directions.  $T$  represents the time of flight required for theoretical head displacement equal to 600 mm in the x direction or 300 mm in the y direction.

Table 2 provides ASI ranges and their corresponding impact severity levels. The standard establishes the maximum acceptable THIV level as 33 km/h, with lower ASI values being desired for the safety of occupants.

**Table 2.** Impact Severity Levels According to EN 1317-2 (EN 1317-2, 2010)

Impact severity level	Characteristic values		
A	ASI ≤ 1.0		
B	1.0 < ASI ≤ 1.4	and	THIV < 33 km/h
C	1.4 < ASI ≤ 1.9		

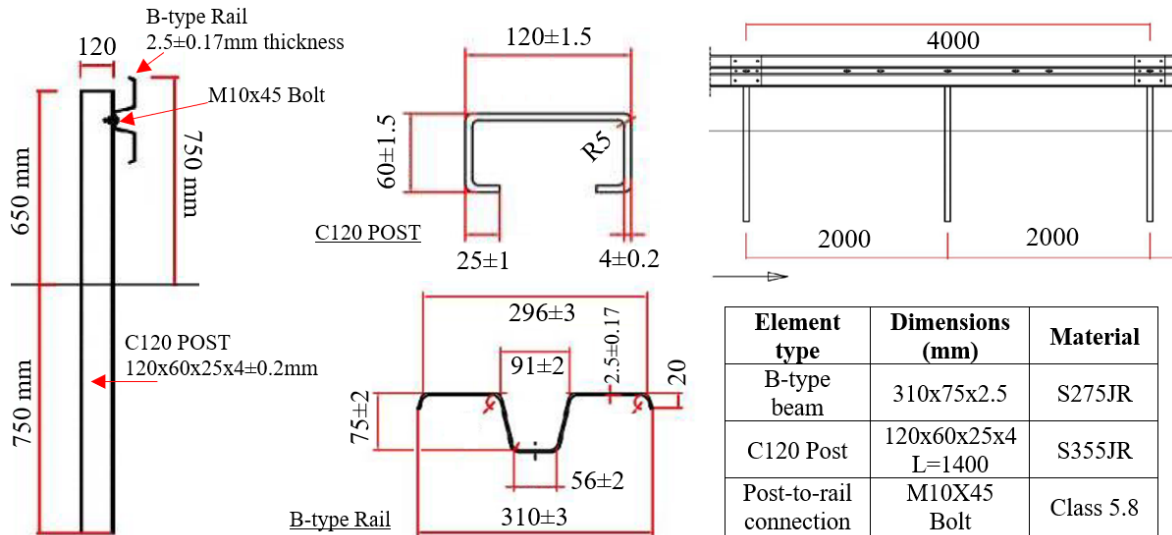
The structural adequacy of barriers is critical for their acceptance. During a collision, permanent damage and deformations occur in the guardrail components. The amount of lateral movement is defined as working width (W) in the EN 1317 standard. The lateral deformation of the system depends on the rigidity of the barrier components and connection properties. Working width is determined by measuring the maximum lateral distance between the front side of the barrier facing traffic before the impact test and any part of the barrier during the collision. Table 3 provides working width (W) ranges and their corresponding classes. After the TB11 crash test, ASI, THIV, and W classes are reported along with other details.

**Table 3.** Working width classes (EN 1317-2, 2010)

Class	W1	W2	W3	W4	W5	W6	W7	W8
Working width (m)	W ≤ 0.6	W ≤ 0.8	W ≤ 1.0	W ≤ 1.3	W ≤ 1.7	W ≤ 2.1	W ≤ 2.5	W ≤ 3.5

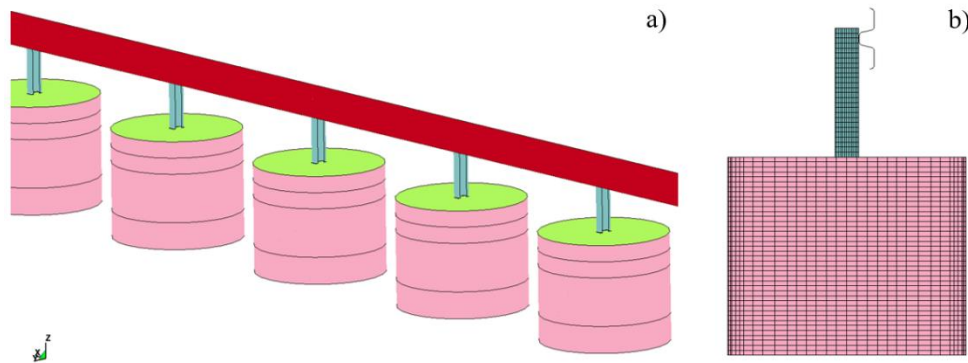
### ***Details of H1 Containment Level Longitudinal Barrier Studied***

This study investigates the impacts of heavier and lower center of gravity electric cars on barrier performance, using the H1 containment level longitudinal steel barrier. This barrier system comprises two main components: C-type post and B-type rail. Additionally, bolts are used to connect the rails and to attach rails to the posts. In this system, the spacing between posts is 2 meters. The total height of the system from the ground to the top of the rail is 750 mm, with the posts embedded 750 mm into the soil. The post and rail thicknesses are 4 mm and 2.5 mm, respectively. The length of the B-type rail is 4320 mm. The dimensions of the longitudinal barrier system components and their other details are provided in Figure 1. These drawings pertain to the system used for the TB11 crash test performed at an accredited test center located in Italy (CSI, 2014).



**Figure 1.** Details of H1 Containment Level Barrier Used in This Study (CSI, 2014)

To assess the crash performance of this barrier, its finite element (FE) model was created. The FE model of the H1 barrier system is depicted in Figure 2. In the FE model creation step, material models and geometries of the barrier components were defined to accurately represent the actual case. A three-dimensional, large deformation finite element code, LS-DYNA, was employed to conduct the crash analyses (LSTC, 2012). In the LS-DYNA model, rail and post parts were modelled as shell elements. To define steel material properties, the MAT024 (piecewise linear plasticity) material model was used in LS-DYNA. For simulating bolt connections between the rail and post, beam elements with failure were defined. The properties of the bolt were defined using the MAT098 (simplified Johnson Cook) material model. The soil was also modelled to simulate the post-soil interaction more accurately during the collision. For the solid soil parts, the MAT193 (Drucker Prager) material model was utilized.

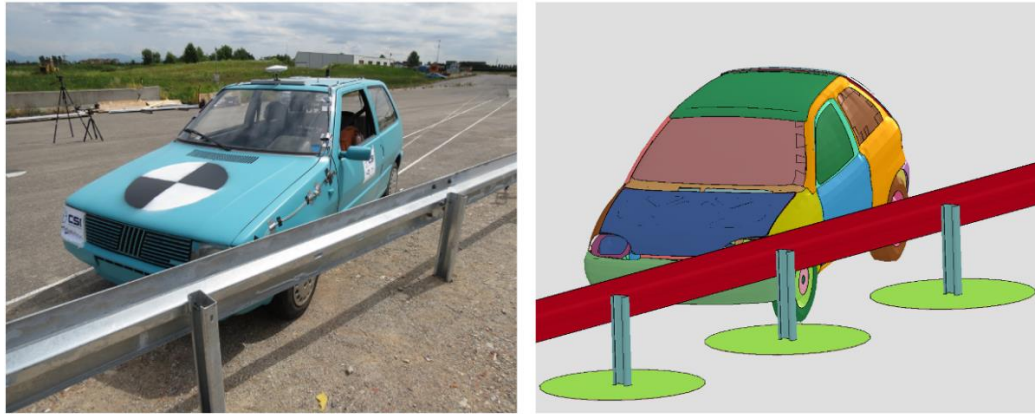


**Figure 2.** Finite Element Model of H1 Barrier System: **a)** General View, **b)** Side View (mesh view is on)

### Validation of Finite Element (FE) Model

The accuracy of the barrier FE model needs validation through an actual crash test according to EN 1317. Safety and performance parameters obtained from actual crash tests and computer simulation results should be close enough to satisfy error tolerances in EN 16303 (BS EN 16303:2020, 2020). After this validation, the developed model could be used for further crash simulations. Actual crash test data for the TB11 test were available. Therefore, a full-scale FE model of the H1 system for TB11 test conditions was developed using LS-DYNA. In the validation phase of the study, a 900 kg car FE model developed and validated by the National Crash Analysis Center was used (NCAC, 2008). The barrier model and car model were combined to run the crash simulation. The initial car speed was set to 100 km/h with an impact angle of 20°. Contact definitions were established between the vehicle and the barrier, and among the barrier parts themselves. Since this is a dynamic test, the analysis was run in explicit mode. Before the run, many simulation parameters, such as termination time and plot time intervals, were defined in the model. The ASCII card was used to record test outputs, including displacements, velocities, and accelerations. General views of the initial condition of the real full-scale TB11 crash test and the FE model are provided in Figure 3.



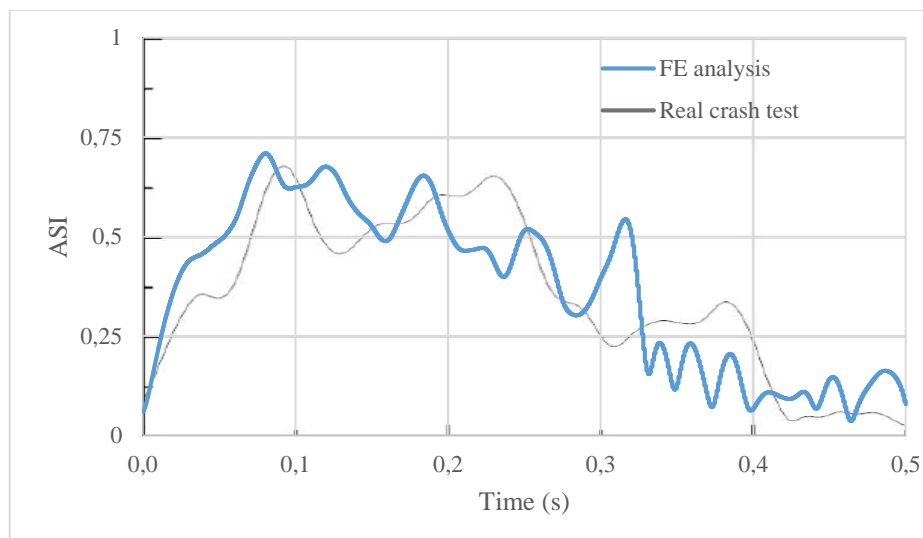


**Figure 3.** General View of H1 Barrier TB11 Test Before Test: Actual Test (left) (CSI, 2014), FE Simulation (right)

The actual full-scale crash test and computer simulation results were obtained and compared. The results and EN 16303 tolerances for the validation of virtual crash tests are summarized in Table 4. In the real TB11 test, ASI and THIV parameters were obtained as 0.68 and 20.86 km/h, respectively. According to these results, the impact severity level of this barrier is A, and the THIV result is within the EN 1317 acceptable limit. The working width was measured as 0.8 m, which corresponds to the W2 class. In the LS-DYNA simulation, on the other hand, ASI was obtained as 0.71, which is class A. THIV value was obtained as 22.5 km/h. The working width was determined as 0.77 m (W2). Results indicate that the actual crash test and simulation results are very close to each other, with variations within the specification limits. Both tests met the exit box and exit angle criteria described in EN1317-2. The relative differences between test outputs were lower than 10%. This level of deviation is acceptable for the validation of the FE model (Teng et al., 2015). In addition to these parameters, the ASI graphs of the real crash test and FE analysis are compared in Figure 4 (CSI, 2014). This graph shows the change in the ASI index over time, and there is good agreement between the curves obtained in the real test and simulation.

**Table 4.** Comparison of Barrier Performance Parameters Obtained from Real Test and Simulation.

Parameter	EN 16303 tolerance	Real crash test	FE model	Difference relative (%)
ASI	±0.1	0.68	0.71	4.4
THIV (km/h)	±3	20.86	22.5	7.9
W (m)	±0.1	0.8	0.77	3.8
Working width class	-	W2	W2	-

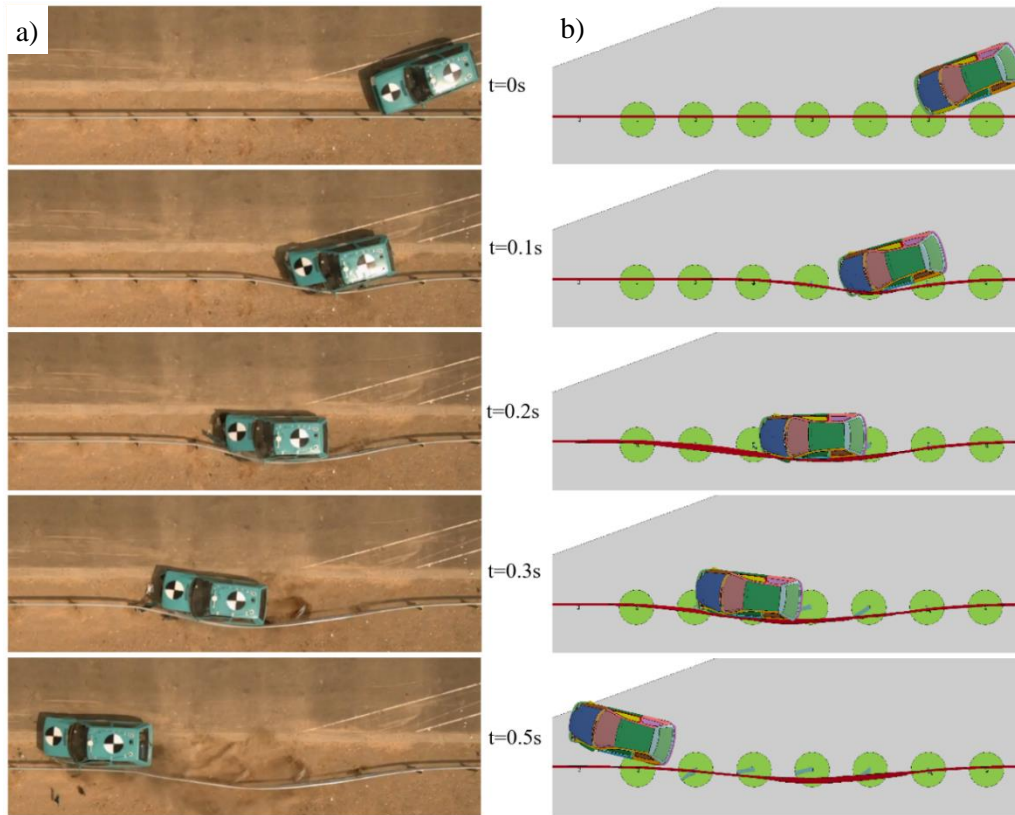


**Figure 4.** Comparison of ASI Graphs of Real Test (CSI, 2014) and Computer Simulation

The sequential picture comparison of the actual crash test and the FE model is provided in Figure 5. The impact angle and velocity were 20° and 100 km/h, respectively. The impact point was around the 10<sup>th</sup> post in the real test. During

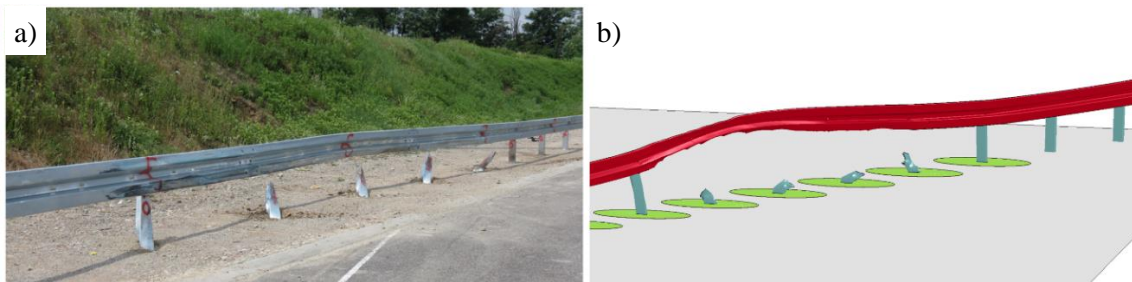


the impact, posts 10-14 were detached from the rail due to the fracture of M10 connection bolts between the rail and post components. This controlled failure ensures the containment and redirection of the cars. The vehicle was contained by the barrier and redirected towards the roadside in accordance with EN 1317-2.



**Figure 5.** Comparison of TB11 Tests: **a)** Real Crash Test (left) (CSI, 2014), **b)** FE Simulation (right)

The barrier deformations occurring after the real crash test and FE analysis are depicted in Figure 6. Results indicate a very good agreement between FE simulation and real crash test results. Validation results confirm that the FE model could be used for further analyses in this research.



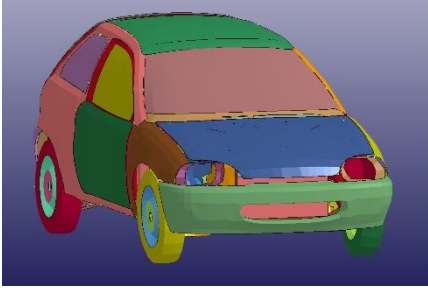

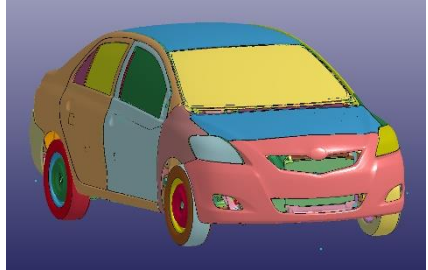



**Figure 6.** Deformation Comparison for H1 Barrier: **a)** After Real Test (CSI, 2014), **b)** FE Simulation

### ***Car FE Models Used in This Study***

To evaluate the impacts of electric cars on the crash performance of longitudinal barriers, three existing and verified car FE models were utilized. These previously validated car models were obtained from available LS-DYNA vehicle model libraries (CCSA, 2023; NCAC, 2008; NHTSA, 2023). These three models have different weights and dimensions. Before the simulations, the weights of all car FE models were adjusted to be within  $900 \pm 25$  kg. This ensured compliance with the vehicle mass requirement of the EN 1317 TB11 test. To simulate the crash performance of electric cars, reference electric car models were selected for each existing FE model, and the models were modified according to the properties of the reference cars. Electric vehicles were simulated by modifying the weights and centers of gravity (CG) of the existing car FE models. For the modification of the FE models, the Mass trimming interface (MassTr) within the LS-PrePost software was employed. Reference cars were selected to be as similar in dimensions as possible to the existing car models (Hyundai, 2023; MG, 2023; Renault, 2023).

Existing car FE models and reference cars used for electric car analyses are listed in Table 5. In addition to the TB11 simulations implemented for existing models, simulations were conducted again with vehicle FE models modified according to the reference electric vehicle properties. A total of six FE analyses, three for 900 kg vehicles and three for the modified models for electric cars were carried out.

**Table 5.** Existing FE Models and Reference Electric Cars

	Existing FE model		Reference electric car
Fiat-Uno (NCAC, 2008)		Renault Zoe (Renault, 2023)	
Toyota- Yaris (CCSA, 2023)		MG MG4 EV (MG, 2023)	
Dodge- Neon (NHTSA, 2023)		Hyundai Ioniq (Hyundai, 2023)	

Basic properties of the existing FE models, the reference electric cars, and the parameters used for the modification of the FE models are presented in Table 6. As shown in the table, the dimensions of the existing FE models and the selected reference cars are fairly similar. The first existing FE model was a Fiat-Uno brand car (Model-1). A Renault Zoe brand electric car was selected as a reference to modify the existing model. The properties of reference electric cars were obtained from the producer's webpage and other online sources (Autozine, 2023a; Renault, 2023). To simulate the behavior of the electric car, the mass and center of gravity (CG) height of the FE model were adjusted. The mass of the vehicle FE model was increased to 1502 kg. Compared to the initial model, the modified model is 602 kg heavier, and its center of gravity height is 35 mm lower. All other geometric dimensions of the model were kept the same as the initial model.

The second FE model was a Toyota-Yaris brand car (Model-2). To modify this model, an MG MG4 EV brand electric car was selected as a reference (MG, 2023). The dimensions of the reference EV were close to the existing FE model. The FE model was modified by changing its CG height and mass according to the EV properties. The FE model mass increased to 1655 kg. Compared to the initial model, the modified model is 769 kg heavier and its center of gravity height is 59 mm lower.

The third FE model was a Dodge-Neon brand car (Model-3). A Hyundai Ioniq brand car was used as a reference to modify the FE model (Hyundai, 2023). The geometric dimensions of the FE model were kept the same, and its mass and CG height were modified. Although information regarding the height of the CG of the Hyundai Ioniq brand car could not be found, since the center of gravity is 90 mm lower than the gasoline version of the electric vehicle with similar geometric dimensions, the model has been modified to have a 90 mm lower center of gravity (Autozine,

2023b). The mass of the vehicle FE model was increased to 1475 kg. Compared to the initial model, the modified model is 575 kg heavier, and its center of gravity height is 90 mm lower.

**Table 6.** Properties of Vehicle FE Models and Selected Reference Cars for EV Modification

		Brand	Height/ Width/ Length (mm)	Mass (kg)	CG height (mm)	Wheelbase (mm)	Wheel track (front/rear) (mm)
Model-1	Existing FE model	Fiat-Uno	1420/1580/3750	897	503.6	2376	1350/1370
	Reference Electric car	Renault Zoe	1562/1730/4087	1502	468.6	2588	1506-1489
	Modified FE model	Modified for Renault Zoe	1420/1580/3750	1502	468.6	2376	1350/1370
Model-2	Existing FE model	Toyota-Yaris	1465/1695/4300	886	549	2538	1490/1470
	Reference Electric car	MG MG4 EV	1504/1836/4287	1655	490	2705	1552/1562
	Modified FE model	Modified for MG MG4 EV	1465/1695/4300	1655	490	2538	1490/1470
Model-3	Existing FE model	Dodge-Neon	1370/1710/4355	900	510	2648	1450/1450
	Reference Electric car	Hyundai Ioniq	1450/1820/4470	1420-1575	-	2700	1552/1564
	Modified FE model	Modified for Hyundai Ioniq	1370/1710/4355	1475	420	2648	1450/1450

## RESULTS AND DISCUSSION

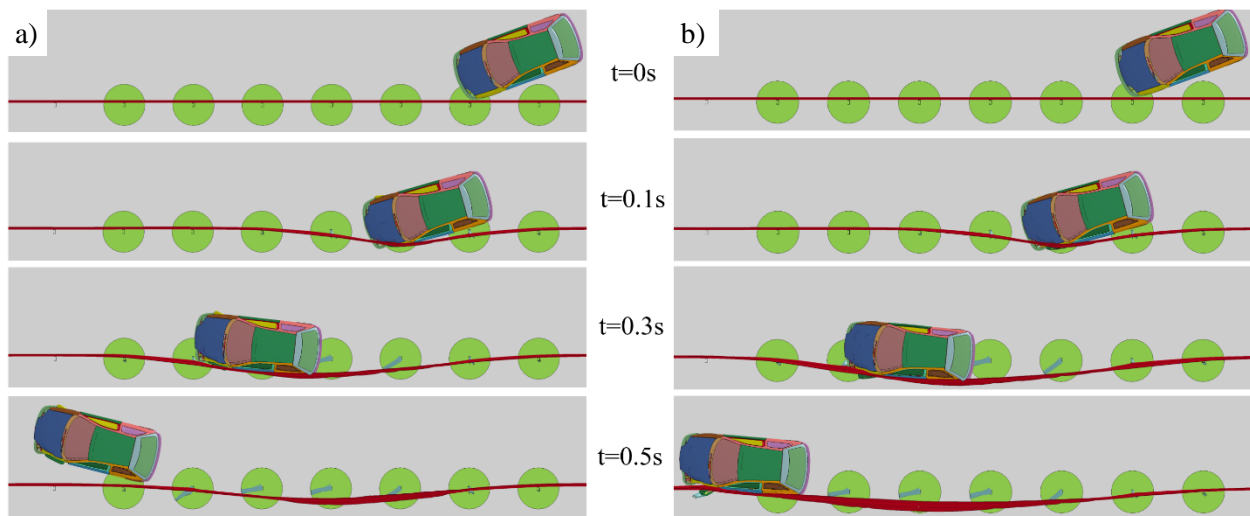
In this study, the effects of electric cars on the performance of the H1 containment level longitudinal safety barrier were investigated using explicit finite element software LS-DYNA. Computer simulations were performed using validated finite element models. Three different existing car models were utilized to conduct EN 1317 TB11 tests, which require a 900 kg car weight, 20° impact angle, and a 100 km/h impact speed. These car models were then modified using reference common EV models to represent the electric cars with heavier weights and lower center of gravity heights. To assess the effects of EVs, the performance of the barrier against existing 900 kg car models and modified models for reference EVs was evaluated. Injury severity of passengers was assessed using the ASI and THIV indices. The structural performance of the barrier was evaluated using the working width result and the final condition of the steel barrier. The calculated parameters and corresponding classes of all six tests are summarized in Table 7.

The results of the FE analyses performed using the first vehicle model (Model-1), where the vehicle weight was set to 900 kg for the TB11 test and 1502 kg to represent the Renault Zoe EV, are presented in the first column. Using the second model (Model-2), a 900 kg car test and a 1655 kg vehicle test representing MG MG4 EV were conducted. Finally, the results of the 900 kg car test performed using Model-3 and a 1475 kg vehicle test representing the Hyundai Ioniq EV are provided.

**Table 7.** Comparison of Safety and Performance Parameters Obtained Using 900 kg Models and Modified Models for EVs

Parameter	Model-1		Model-2		Model-3	
	Fiat-Uno	Modified for Renault Zoe	Toyota-Yaris	Modified for MG MG4 EV	Dodge-Neon	Modified for Hyundai Ioniq
ASI	0.71	0.69	0.73	0.44	0.83	0.73
THIV (km/h)	22.5	22	27.2	14.6	19.8	17.9
Working width (m)	0.77	0.90	0.61	Failed	0.63	0.91
Class of working width	W2	W3	W2	-	W2	W3

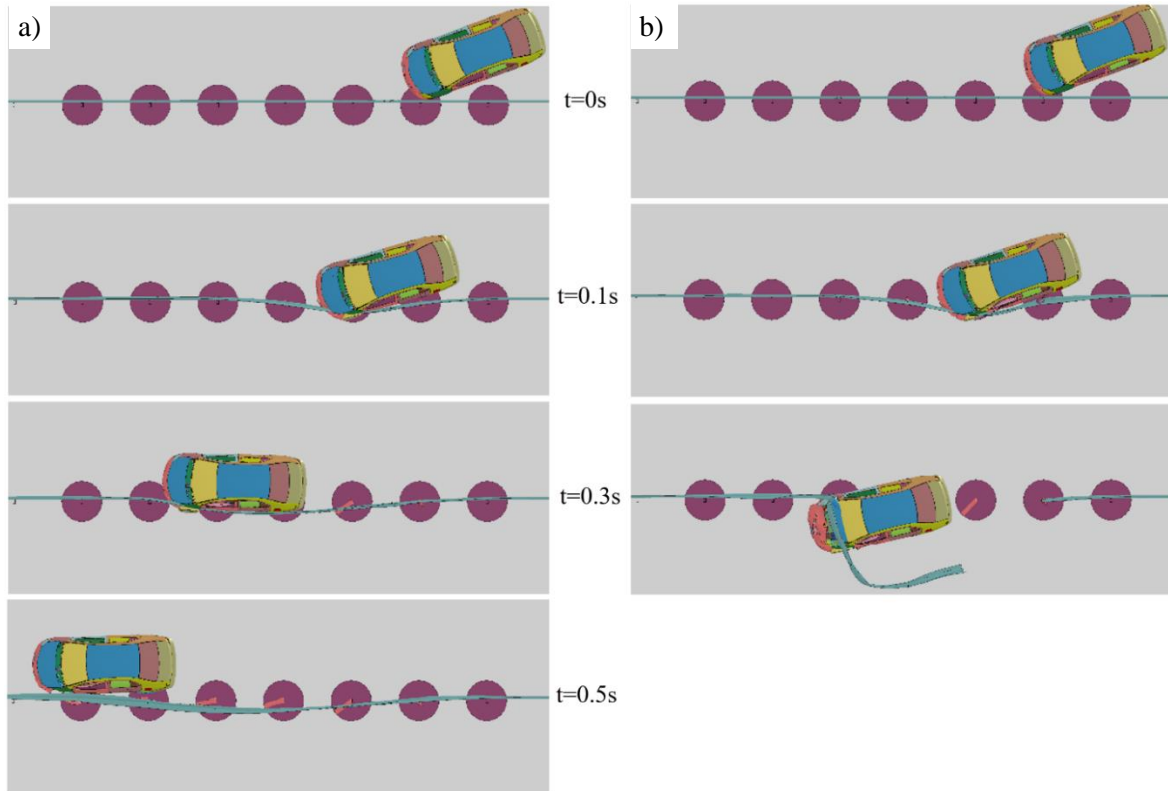
The ASI and THIV indices were calculated as 0.71 and 22.5 km/h, respectively, for the 900 kg version of Model-1. These indices were obtained as 0.69 and 22 km/h for the EV version of Model-1, respectively. The results demonstrate that increasing weight and lowering the center of gravity decrease the impact severity of occupants, as expected. In both cases, the calculated indices are within the limits of EN 1317-2, and the impact severity class is A. In both analyses, the vehicle impact points were around the 10<sup>th</sup> post. During the 900 kg vehicle impact, posts 10-14 were separated from the rail. However, in the EV analysis, posts 10-16 were separated from the rail after the failure of the beam elements defined between the post and rail. The deformed region in the barrier in the EV test was much longer compared to what was observed in the 900 kg car test. Working widths were measured as the largest lateral distance between the front side of the barrier and the deformed barrier during the impact. Working widths of the 900 kg and EV versions of Model-1 tests were measured as 0.77 m and 0.90 m, respectively. These widths correspond to W2 and W3 classes, respectively. These results indicated that damage caused by the EV was much greater than the standard 900 kg car. To better understand the structural performance of the barrier and the vehicle behavior, a comparison of the 900 kg car and EV tests is provided in Figure 7. The total test duration was set to 0.5 s, and sequential pictures were provided for these tests.



**Figure 7.** Comparison of 900 kg and EV Versions of Model-1 Crash Tests: **a)** 900 kg Car, **b)** EV Version

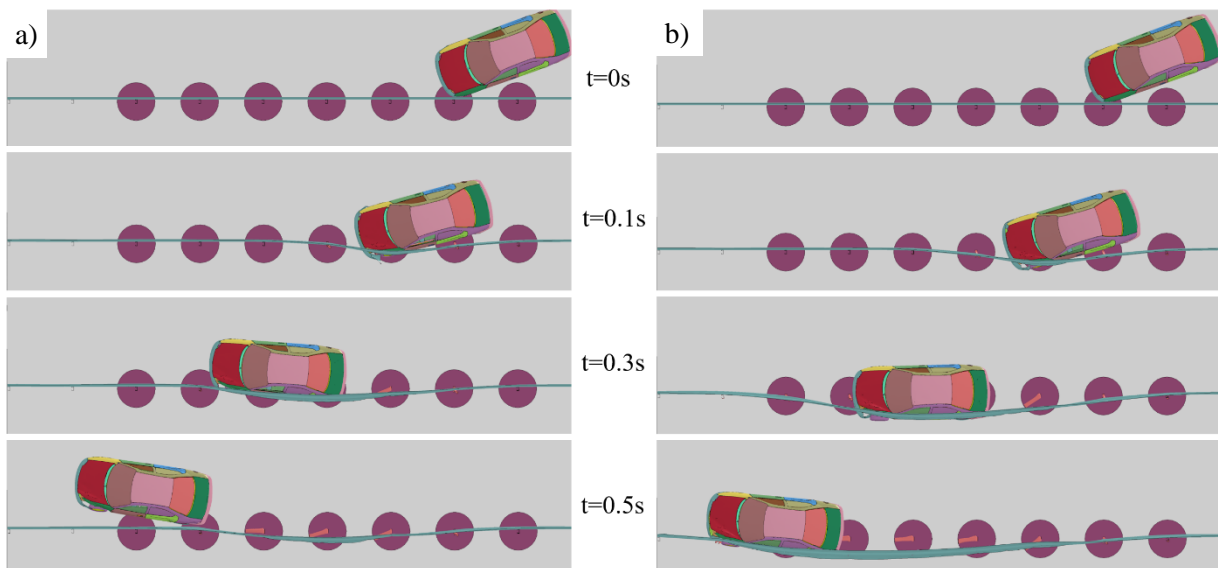
In the analyses performed with the 900 kg version of Model-2, the ASI and THIV indices were calculated as 0.73 and 27.2 km/h, respectively. In the analyses performed with the EV version weighing 1655 kg, these values were calculated as 0.44 and 14.6 km/h, respectively. Similar to the results of the Model-1, increased car weight and lower CG height reduced the impact severity of passengers. In both analyses, the impact points were around the 10<sup>th</sup> post. During the 900 kg vehicle impact, posts 10-15 were separated from the rail. The working width of the test barrier in the case of the 900 kg car impact was measured as 0.61 m, corresponding to W2 class. In the FE analysis of the H1 barrier with the EV model, the rail ruptured during the test and failed to contain the EV. The 86.8% increased impact energy (from 40 kJ to 74.7 kJ) due to the heavier vehicle caused this failure. The rupture in the rail occurred at the connection of the 10<sup>th</sup> post with the rail. With the increased impact energy, the fractured bolt connection region prorogated, and the rail was completely ruptured. A comparison of the 900 kg and EV models' behavior during the impact is shown sequentially in Figure 8.





**Figure 8.** Comparison of 900 kg and EV Versions of Model-2 Crash Tests: **a)** 900 kg Car, **b)** EV Version

In the analyses performed with the 900 kg version of Model-3, the ASI and THIV indices were calculated as 0.83 and 19.8 km/h, respectively. In the analyses performed with the EV version weighing 1475 kg, these values were calculated as 0.73 and 19.9 km/h, respectively. Similar to the results of Model-1 and Model-2, increased car weight and lower CG height reduced the impact severity on occupants. In both analyses, the impact points were around the 10<sup>th</sup> post. During the 900 kg vehicle impact, posts 10-13 were separated from the rail. The damage in the barrier was less than in other two 900 kg car tests. The working width of the test barrier in the case of 900 kg car impact was measured as 0.63 m, corresponding to W2 class. In the FE analysis of the H1 barrier with the EV model, posts 11-16 were separated from the rail after the failure of the beam elements defined between the post and rail. The deformed region in the barrier in the EV test was much longer compared to what was observed in the 900 kg car test. The working width of the EV version of Model-3 was measured as 0.91, changing the working width class to W3. These results indicated that the damage caused by the EV was much greater than the standard 900 kg car. A comparison of the 900 kg and EV models' behavior during the impact is shown sequentially in Figure 9.



**Figure 9.** Comparison of 900 kg and EV Versions of Model-2 Crash Tests: **a)** 900 kg Car, **b)** EV Version



## CONCLUSION

In this study, the impact of electric cars on the performance of the H1 containment level steel longitudinal barrier was investigated. The finite element (FE) model of the barrier was validated using the results of a real full-scale TB11 test. A total of six FE analyses were conducted to assess the effect of electric cars with heavy weight and a low center of gravity on the impact severity and structural performance of the same longitudinal barrier. Computer simulations were performed with standard 900 kg internal combustion engine test vehicles and modified FE models representing three different reference electric cars. Subsequently, analyses results were evaluated. The main conclusions of this research study can be summarized as follows:

- Increasing vehicle weight decreased impact severity indices (ASI and THIV), reducing the risk of impact severity and improving injury protection for occupants.
- Analyses of Model-1 and Model-3 showed that electric cars significantly increased the working width and damaged region length of barriers. In the Model-2 analysis, a test failure occurred as a result of the rail breaking due to the increasing impact energy during the test with the electric car.
- Visual comparisons revealed that damage to vehicles and barriers was notably higher in tests conducted with electric car models.
- TB11 tests conducted with three different models of vehicles weighing 900 kg demonstrated that changing vehicle characteristics affected barrier performance. This emphasizes that even when the weight is the same, vehicle properties such as length, width, and CG height can influence test outcomes.

For future studies, it is recommended to conduct real full-scale crash tests to investigate the effects of electric vehicles on barrier performance. Therefore, modification of EN 1317 Part 2 to include electric vehicle option is recommended.

## REFERENCES

- AASHTO. (2016). *Manual for Assessing Safety Hardware* (Second Edition). American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO).
- Atahan, A. O., Yücel, A. T., & Erdem, M. M. (2014). Crash testing and evaluation of a new generation L1 containment level guardrail. *Engineering Failure Analysis*, 38, 25-37. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2014.01.003>
- Atahan, A. O., & Yucel, A. O. (2013). Laboratory and field evaluation of recycled content sign posts. *Resources, Conservation and Recycling*, 73, 114–121. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2013.02.002>
- Atahan, A. O., Yucel, A. O., & Guven, O. (2013). Development of N2–H1 Performance-Level Guardrail: Crash Testing and Simulation. *Transportation Research Circular, E-C172*.
- Autozine. CG location of Renault (2023a). <http://www.autozine.org/Archive/Renault/new/Zoe.html> Accessed 15.10.23.
- Autozine. Renault Megane E-Tech Electric (2023b). [https://www.autozine.org/Archive/Renault/new/Megane\\_Electric.html](https://www.autozine.org/Archive/Renault/new/Megane_Electric.html) Accessed 01.11.23.
- Borovinšek, M., Vesenjāk, M., Ulbin, M., & Ren, Z. (2007). Simulation of crash tests for high containment levels of road safety barriers. *Engineering Failure Analysis*, 14(8), 1711–1718. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2006.11.068>
- BS EN 16303:2020. (2020). Road restraint systems - Validation and verification process for the use of virtual testing in crash testing against vehicle restraint system. *BSI Standards Publication*.
- CCSA. Center for Collision Safety and Analysis, Finite Element models (2023). <https://www.ccsa.gmu.edu/models/> Accessed 15.10.23.
- CSI. (2014). *TB11 Test Report, H1 class Monolateral barrier for installation on soil*, CSI-SPA, Ballote, Italy.
- EN 1317-1. (2010). *Road restraint systems, Part 1: Terminology and General Criteria For Test Methods*. European Committee for Standardization: Brussels, Belgium.

- EN 1317-2. (2010). *Road restraint systems, Part 2: Performance classes, impact test acceptance criteria and test methods for safety barriers including vehicle parapets*. European Committee for Standardization: Brussels, Belgium.
- Gheres, M. I., & Scurtu, I. L. (2022). Crash testing and evaluation of W-beam guardrail using finite elements method. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1220(1), 012049. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1220/1/012049>
- He, L., & Lin, X. (2018). An improved mathematical model for vehicle crash against highway guardrails. *Archives of Transport*, 48(4), 41–49.
- Hyundai. Car specifications (2023). <https://www.hyundai.com/worldwide/en/eco/ioniq-electric/design> Accessed 15.10.23.
- IEA. Global EV Outlook 2023 (2023). <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2023> Accessed 13.11.23.
- Kim, K.-D., Ko, M.-G., Kim, D.-S., Joo, J.-W., & Jang, D.-Y. (2016). Strategy to increase the speed of a small car impact to a semi-rigid barrier designed for high impact severity. *International Journal of Crashworthiness*, 21(4), 310–322. <https://doi.org/10.1080/13588265.2016.1175052>
- Langseth, M., Hopperstad, O. S., & Berstad, T. (1999). Crashworthiness of aluminium extrusions: validation of numerical simulation, effect of mass ratio and impact velocity. *International Journal of Impact Engineering*, 22(9), 829–854. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0734-743X\(98\)00070-0](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0734-743X(98)00070-0)
- LSTC. (2012). *LS-DYNA Keyword User's Manual*. Livermore Software Technology Corporation: Livermore, CA, USA.
- MG. Car specification (2023). <https://www.mg.co.uk/new-cars/mg4-ev> Accessed 15.10.23.
- Molan, A. M., & Ksaibati, K. (2021). Impact of side traffic barrier features on the severity of run-off-road crashes involving horizontal curves on non-interstate roads. *International Journal of Transportation Science and Technology*, 10(3), 245–253. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijtst.2020.07.006>
- Molan, A. M., Moomen, M., & Ksaibati, K. (2019). Investigating the effect of geometric dimensions of median traffic barriers on crashes: Crash analysis of interstate roads in Wyoming using actual crash datasets. *Journal of Safety Research*, 71, 163–171.
- NCAC. Finite element model archive, FHWA/NHTSA National Crash Analysis Center, George Washington University (2008). <http://www.ncac.gwu.edu/vml/models.html> Accessed 01.04.08.
- NHTSA. National Highway Traffic Safety Administration, Crash Simulation Vehicle Models (2023). <https://www.nhtsa.gov/crash-simulation-vehicle-models> Accessed 15.10.23.
- Özcanan, S., & Özcan, Ö. (2022). Criteria inadequacy of the vehicles used for the calculation of safety parameters in the EN1317-TB11 test. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 237(4), 680–690. <https://doi.org/10.1177/09544070221115010>
- Ozcanan, S., & Atahan, A. O. (2021). Minimization of Accident Severity Index in concrete barrier designs using an ensemble of radial basis function metamodel-based optimization. *Optimization and Engineering*, 22(1), 485–519. <https://doi.org/10.1007/s11081-020-09522-x>
- Pawlak, M. (2016). The Acceleration Severity Index in the impact of a vehicle against permanent road equipment support structures. *Mechanics Research Communications*, 77, 21–28. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.mechrescom.2016.08.005>
- Reichert, R., Marzougui, D., & Kan, C.-D. (2020). *Crash Simulations Between Non-Occupied Automated Driving Systems and Roadside Hardware*. United States. Department of Transportation. National Highway Traffic Safety ....
- Ren, Z., & Vesenjaj, M. (2005). Computational and experimental crash analysis of the road safety barrier. *Engineering Failure Analysis*, 12(6), 963–973. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2004.12.033>
- Renault. Car specifications (2023). <https://www.renault.co.uk/electric-vehicles/zoe/specifications.html> Accessed 15.10.23.
- Teng, T.-L., Liang, C.-C., Hsu, C.-Y., Shih, C.-J., & Tran, T.-T. (2016). Impact performance of W-beam guardrail supported by different shaped posts. *International Journal of Mechanical Engineering and Applications*, 4(2), 59–64.

Teng, T.-L., Liang, C.-C., & Tran, T.-T. (2015). Effect of various W-beam guardrail post spacings and rail heights on safety performance. *Advances in Mechanical Engineering*, 7(11), 1687814015615544. <https://doi.org/10.1177/1687814015615544>

Wolny, R., Bruski, D., Budzyński, M., Pachocki, L., & Wilde, K. (2022). Influence of a Lighting Column in the Working Width of a W-Beam Barrier on TB51 Crash Test. *Materials*, 15(14). <https://doi.org/10.3390/ma15144926>

Yücel, A. Ö., Atahan, A. O., Arslan, T., & Sevim, U. K. (2018). Traffic Safety at Median Ditches: Steel vs. Concrete Barrier Performance Comparison Using Computer Simulation. *Safety*, 4(4). <https://doi.org/10.3390/safety4040050>



# Kahramanmaraş Sütçü İmam University

## Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 28.11.2023  
Kabul Tarihi : 11.03.2024

Received Date : 28.11.2023  
Accepted Date : 11.03.2024

### KARAÇAM ODUNUNDAN ÜRETİLEN ÇAPRAZ LAMİNE AHŞABIN SEÇİLMİŞ MEKANİK ÖZELLİKLERİ ÜZERİNE RUTUBETİN ETKİSİ

#### THE EFFECT OF MOISTURE ON SELECTED MECHANICAL PROPERTIES OF CROSS-LAMINATED TIMBER MANUFACTURED FROM BLACK PINE WOOD

Aydanur HIDIR MAHSERECİ<sup>1</sup> (ORCID: 0000-0001-7097-4132)

Bekir Cihad BAL<sup>2</sup> (ORCID: 0000-0001-7097-4132)

Ela Bahşude Görür AVŞAROĞLU<sup>3\*</sup> (ORCID: 0000-0001-9373-1192)

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

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

<sup>3</sup> Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Teknik Bilimler MYO, İnşaat Bölümü, Kahramanmaraş/Türkiye

\*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Ela Bahşude Görür AVŞAROĞLU, elagorur@ksu.edu.tr

#### ÖZET

Son yıllarda ahşap ve çapraz lamine ahşap malzemeye ilgi giderek artmaya başlamıştır. Çapraz lamine ahşap birçok ülkede ahşap yapıların inşasında fazlaca kullanılmaktadır. Bu malzeme çok katlı binaların inşasında da kullanılmaya başlanmıştır. Çok katlı binaların inşasında kullanılan yapısal ahşap malzemelerin mekanik performansının yüksek olması gerekir. Ancak ahşap malzeme rutubet aldığı zaman mekanik performansı değişen bir malzemedir. Bu çalışmanın amacı, karaçam kerestesinden üretilen çapraz lamine ahşap malzemenin, seçilmiş mekanik özellikleri üzerine rutubetin etkisini belirlemektir. Bu amaç için, 3 tabakalı çapraz lamine ahşap poliüretan tutkalı kullanılarak üretilmiştir. Üretilen yapı malzemesi hem hava kurusu hem de yaş halde mekanik testlere tabi tutulmuştur. Çapraz lamine ahşap malzemenin 3 nokta eğilme direnci, elastisite modülü, eğilmede deformasyon miktarı, yapışma direnci, çivi tutma direnci tespit edilmiştir. Elde edilen verilere göre; hava kurusu haldeki test örneklerinin eğilme direnci, elastisite modülü, çivi tutma direnci ve makaslama direnci yaş haldeki test örneklerinden sırasıyla %127, %118, %35 ve %87 daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Yaş haldeki test örneklerinin eğilmede deformasyon miktarının kuru haldeki test örneklerine göre %52 daha fazla olduğu tespit edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Karaçam odunu, çapraz lamine ahşap, mekanik özellikler

#### ABSTRACT

In recent years, interest in wooden and cross-laminated Timber (CLT) materials has begun to increase. CLT is widely used in the construction of wooden structures in many countries. This material has also begun to be used in the construction of multi-storey buildings. Structural wooden materials used in the construction of multi-storey buildings must have high mechanical performance. However, wood is a material whose mechanical performance changes when it gets moisture. The aim of this study is to determine the effect of moisture on selected mechanical properties of CLT material produced from Black pine wood. For this purpose, 3-layer cross-laminated wood is produced using polyurethane glue. The produced building material was subjected to selected mechanical tests in both air-dry and wet states. Three-point bending strength, modulus of elasticity, deformation at bending, bonding strength, and nail withdrawal resistance of the CLT material were determined. According to the data obtained; It was determined that the bending strength, modulus of elasticity, nail withdrawal resistance and bonding strength of the air-dry test samples were 127%, 118%, 35% and 87% higher, respectively, than those of the wet test samples. It was determined that the bending deformation amount of the wet test samples was 52% higher than that of the dry test samples.

**Keywords:** Black pine wood, cross laminated timber, mechanical properties

## GİRİŞ

Ahşap malzeme, insanoğlunun ilk kullanmaya başladığı yapı malzemelerinden birisidir. Bu nedenle, geçmişten günümüze önemli bir yapı malzemesi olarak kullanılmaktadır (Bal ve Kılavuz, 2015). Masif ağaç malzemenin doğal halde kullanılmasının yanında, zaman içerisinde odun esaslı kompozit malzemeler de geliştirilmiş ve yapılarda kullanılan ahşap malzeme çeşitliliği artmıştır. Özellikle, yapısal kompozit keresteler ve tutkallanmış tabakalı kereste gibi yük taşıyan malzemelerle beraber, kontrplak gibi kaplama malzemeleri de yapılarda yoğun olarak kullanılan ahşap esaslı malzemelerdendir (Mengeloğlu ve Kurt, 2005). Bu malzemelerin yanında, son yıllarda çapraz lamine ahşap (Cross Laminated Timber-CLT) kullanımı da hızla artış göstermiştir. Piyasada kısa adı CLT olan ve X-lam, smartlam, masstimber, crosslam vs. gibi ticari isimler altında bulunmakta olan bu malzeme, günümüzde çok katlı binaların inşasında da kullanılmaya başlanmıştır (Çavuş, 2019). CLT çok katlı bina inşaatlarında; zemin, duvar paneli, ara bölme duvar malzemesi olarak kullanılabilir (URL1, 2023).

CLT ahşap bir yapı malzemesi olup çeşitli disiplinlerde mekanik özellikleri ile ilgili birtakım çalışmalar yapılmıştır. Örneğin; Oran (2012) çalışmasında, hindistan cevizi ağacını polivinil asetat, melamin-üre formaldehit ve üre formaldehit tutkalları ile yapıştırarak test örnekleri hazırlamıştır. Yapılan ölçümler sonucunda deney grubunun kontrol grubu değerlerinin üzerinde mekanik ve fiziksel özellikler gösterdiğini gözlemlemiştir. Hekimoğlu (2014) çalışmasında göknar ve sarıçam odunlarından nanokil takviyeli çapraz lamine ahşap üretim olanaklarını incelemiştir. Çalışmada polivinil asetat tutkalı ile kontrol ve tutkala nanokil ilavesi çeşitli oranlarda yapılmıştır. Nanokil ilavesi olan örneklerde eğilmede kayma direnci göknarda daha fazla artarken, suda bekletilen örneklerin %50' sinde tutkal hattında ayrılma meydana gelmiş ve sonuçlar daha düşük çıkmıştır. Basınç direncinde nanokil ilaveli göknar da %12 sarıçam da %31 oranında artış gözlemlenmiştir. Özcan (2017) sarıçam ve Uludağ göknarını poliüretan yapıştırıcı kullanarak birleştirmiş ve mekanik özelliklerini incelemiştir. Isıl işlem gören çapraz lamine ahşap ile ısıl işlem görmemiş çapraz lamine keresteyi karşılaştırmış ve çapraz lamine ahşabın daha sağlam olduğu sonucuna ulaşmıştır. Şanlı (2020) yaptığı çalışmada, çapraz lamine ahşabın özelliklerini ortaya koyarak sürdürülebilirlik ve performans açısından avantajlarını değerlendirmek amacıyla ve Türkiye'de üretimine katkı sağlayacak çeşitli örnekler üzerinde analiz yapmıştır. Bu analize göre çapraz lamine ahşap sistemi ile 10 kata kadar, hibrit yapı sistemi ile 24 kata kadar yapı inşa edilebileceği ve buna bağlı olarak sürdürülebilirlik ve performans açısından olumlu etkilere sahip olduğunu tespit etmiştir. Ceylan (2021), çapraz lamine ahşabın birleşimini sağlayan vida ve çivilerin tutma direncini incelemiştir. Fosfat ve reçine kaplamalı halkalı çivilerin sıyrılmaya davranışı, çakılma biçimi ve CLT örneğin lif yapısının çekme direncine etkisi ile çekme enerjileri incelenmiştir. Barutçu (2020) yaptığı çalışmada çapraz lamine ahşap kullanılarak inşa edilmiş tekil konut yapıları ile betonarme taşıyıcı sistemli tekil konut yapılarının çevresel performansını karşılaştırmalı olarak ele almıştır. Çapraz lamine ahşap örneklerin çevresel etkilerinin betonarme örneklere kıyasla çoğu etki kategorisi için daha az olduğu görülmüştür. Artun (2021) yürüttüğü çalışmada CLT malzemeli duvar katmanının ısı iletkenlik katsayısını belirlemek için deneysel ölçümler yapmıştır. Çalışma sonucuna göre CLT'nin geleneksel yapı malzemeleriyle inşa edilen binalara göre enerji performansının daha iyi olduğu sonucuna ulaşmıştır. Knorz vd. (2017), ladin ağacından üretilen CLT'nin delaminasyonunun test numunelerinin şeklinden etkilenip etkilenmediğini belirlemiştir. Ayrıca üretim parametrelerinden olan; tabaka sayısı, tabaka kalınlığı ve yapıştırmanın delaminasyon üzerindeki etkisini incelemiştir. Wang vd. (2018) çapraz lamine ahşabın blok kesme ve delaminasyon testleri ile yapılaşma kalitesini ve dayanıklılığını incelemiştir. Çalışmada, tek bileşenli poliüretan ve emülsiyon polimer izosiyanat kullanılmıştır. Tutkal türü ve basınç miktarının CLT'nin delaminasyonunu önemli ölçüde etkilediğini belirlemiştir. Hu vd. (2016) yaptıkları çalışmada, hızlı büyüyen okaliptüs ağacı odunundan ürettikleri çapraz lamine ahşap imalatının uygulanabilirliğini araştırmışlardır. Çalışmada yapıştırıcı yayılma oranı, basınç ve presleme süresinin blok kayma mukavemeti, ahşap kırılma yüzdesi ve delaminasyon üzerindeki etkisini incelemek için testler yapılmıştır. Elde edilen verilere göre; okaliptüs ağacından elde edilen çapraz lamine ahşabın mekanik özelliklerinin, yumuşak ağaçlardan elde edilenlere eşdeğer olduğu tespit edilmiştir. Çavuş (2019) mühendislik ürünü ağaç malzemelerde yükselen trend; çapraz tabakalanmış kereste başlıklı çalışmasında, bu malzemenin üretimi, özellikleri ve bu konuda yapılan çalışmalar hakkında genel bilgiler derlemiş ve yayınlamıştır.

Yukarıda verilen literatürde yer alan çalışmalar incelenmiş ve çapraz lamine ahşabın, hava kurusu hal ile yaş haldeki mekanik performansı üzerine yapılan bir çalışmaya ulaşılamamıştır. Bu nedenle, bu çalışmanın amacı; karaçam odunundan üretilen çapraz tabakalı kerestenin bazı mekanik özelliklerini iki farklı rutubet seviyesinde inceleyerek, rutubetin bu malzemenin mekanik performansı üzerine etkisini belirlemektir.



## MATERYAL VE YÖNTEM

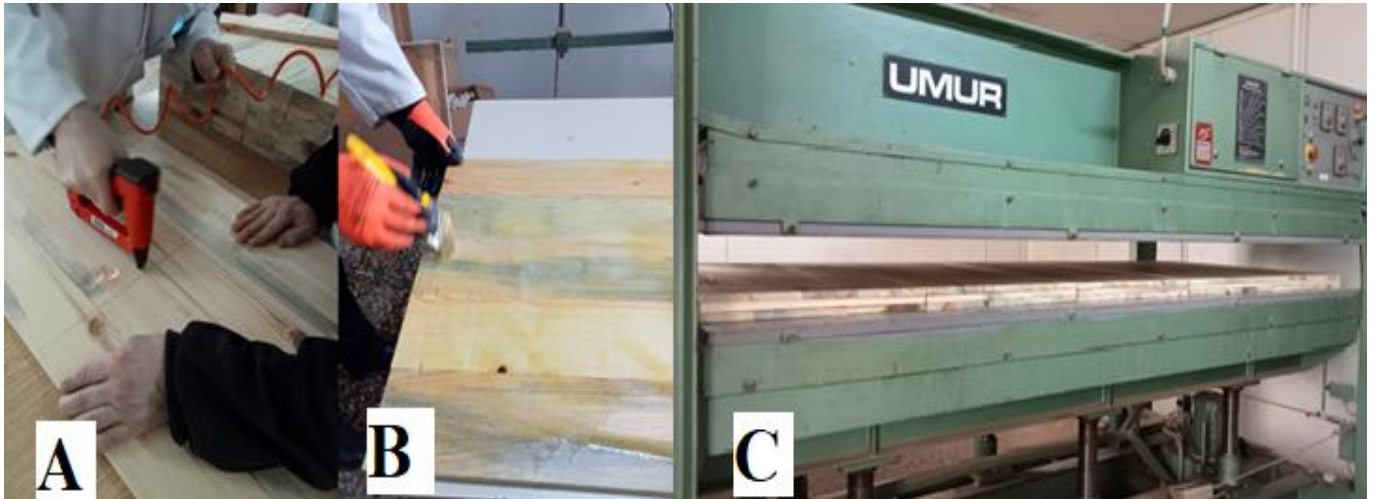
### Materyal

Bu çalışmada, materyal olarak karaçam (*Pinus nigra*) kerestesi kullanılmıştır. Karaçam kerestesi düşük maliyetli olması, kolay işlenebilmesi ve Türkiye’de birçok bölgede bulunması nedeniyle CLT üretimine uygun bir kereste türüdür. Bu nedenle çalışmada materyal olarak kullanılmıştır. Kahramanmaraş bölgesinde de yetişen bu ağaç türü satın alma yöntemi ile Kahramanmaraş sanayisinden 5.5 x 30 x 200 cm boyutlarında temin edilmiştir. Kerestenin düzgün lifli, budaksız, çürüksüz kısımları seçilerek deneme materyalinin üretilmesinde kullanılmıştır. Bu çalışmada tutkal olarak, piyasada deniz tutkalı olarak da adlandırılan, tek bileşenli, poliüretan tutkalı (4.4'-methylenediphenyl diisocyanate) kullanılmıştır. Suya ve çözücülere karşı son derece dayanıklı (D4 grubu) olması, iyi yapışma direnci göstermesi, kolay uygulanabilmesi ve akışkan olması nedeniyle tercih edilmiştir. Tutkal, satın alma yolu ile plastik tüplerde temin edilmiştir.

### Çapraz Lamine Ahşabın Üretilmesi

Karaçam kerestesi, 16 mm kalınlığa getirmek için, şerit testere, planya ve kalınlık makinesinde işlenmiştir. CLT ile ilgili çalışmalarda referans eser olarak kabul edilen *CLT Handbook cross-laminated timber* (Karacabeyli ve Douglas 2013) adlı çalışmada, CLT’yi oluşturan tabakaların minimum kalınlığı 16 mm olarak tanımlandığı için bu ölçü esas alınmıştır. Toplam 50 adet 1.6x10x50 cm boyutlarında ve 50 adet 1.6x10x100 cm boyutlarında parçalar kesilmiştir. Bu parçalar lif yönü uzun kenara paralel olacak şekilde hazırlanmıştır. Ebatlara ayrılan bu parçalardan her biri 3 tabaka olacak şekilde beş farklı CLT taslağı üretilmiştir. Her tabaka hazırlanırken, tabakaların birleştirilmesinde herhangi bir kayma ve boşluk oluşmaması amacıyla zımba yardımı ile birleştirilerek sabitlenmiştir. Tabakalar yerleştirilirken homojen dağılım yapılmasına özen gösterilmiştir. Zımba ile birleştirilen tabakalar 3 kat birbirine dik olacak şekilde poliüretan tutkalı ile tutkalanmış, sonra preslenmiş ve yapıştırılmıştır. Tutkal, kereste parçaların yüzeylerine fırça ile uygulanmıştır. Parçaların kenar kısımlarına tutkal sürülmemiştir. Tutkal hiçbir katkı veya dolgu malzemesi katılmadan kullanılmıştır. Tutkal metrekareye 250-300 gram olacak şekilde sürülmüştür. Birleştirilen üç tabakalı beş adet CLT hidrolik pres makinasında Şekil 1’de görüldüğü gibi, oda sıcaklığında, 230 bar basınçta 22 saat bekletilmiştir. Daha sonra presten çıkarılan CLT taslaklarının kenarlarındaki tutkal fazlalıkları temizlenmiş ve test örnekleri kesilip hazırlanmıştır.

Yapılan testler için 2 homojen grup oluşturulmuş ve bu gruplardan birisi hava kurusu halde diğeri ise yaş halde test edilmiştir. Birleştirme, tutkallama ve presleme aşamalarına ait görüntüler Şekil 1’de verilmiştir.



Şekil 1. CLT’nin (A) Birleştirme (B) Tutkallama ve (C) Presleme Aşamalarına Ait Görüntüler

### Yöntem

CLT test örneklerinin rutubeti TS EN 322’e göre ve yoğunluk değeri ise TS EN 323’e göre ölçülmüştür. Yoğunluk ölçümleri anma ölçüleri 50 x 50 x 50 mm olarak hazırlanan test örnekleri üzerinde yapılmıştır. CLT test örneklerinin hava kurusu yoğunluklarının belirlenmesinde TS EN 323 numaralı standartta belirtilen esaslara uyulmuştur. Bu

standarda göre; deney parçaları küp biçiminde hazırlanmıştır. Deney parçalarının hava kuruğu yoğunluk değeri aşağıdaki formülle (1) hesaplanmıştır.

$$D_{12} = \frac{W_{12}}{V_{12}} \text{ (kg/m}^3\text{)} \quad (1)$$

Burada;  $W_{12}$ : deney parçası hava kuruğu ağırlığı (kg),  $V_{12}$ : deney parçasının hava kuruğu hacmidir ( $m^3$ )

CLT test örnekleri TS EN 310 standardına uygun olarak 3 nokta eğilme direnci testine tabi tutulmuştur. Eğilme direnci için test hızı 10 mm/dk, ön yük 0.02 kN, mesnet arası mesafe 480 mm olarak ayarlanmıştır. CLT'nin eğilme direnci testi için 48 adet 48x48x500 mm ebatlarında numune hazırlanmış ve bu 2 gruba ayrılmıştır. Eğilme direnci testi Şekil 2-A'da görüldüğü şekilde uygulanmış ve aşağıdaki formülle (2) hesaplanmıştır.

$$\sigma_{SF} = \frac{3.P_{max}.L}{2.b.h^2} \text{ (N/mm}^2\text{)} \quad (2)$$

Burada;  $P_{max}$ : Kırılma anında uygulanan maksimum yük (N),  $b$ : Deney parçasının eni (mm),  $h$ : Deney parçasının kalınlığı (mm),  $L$ : Mesnetler arası açıklıktır (mm).

Her deney parçasının elastisite modülü ( $\sigma_{EM}$ ) aşağıda verilen formülle (3) hesaplanmıştır;

$$D_{12} = \frac{\Delta F.L^3}{\Delta f.4.b.h^3} \text{ (N/mm}^2\text{)} \quad (3)$$

Burada;  $\Delta F$ : Elastik deformasyon bölgesinde uygulanan kuvvet farkı (N),  $\Delta f$ : Örnekteki eğilme miktarı (sehim) farkı (mm),  $L$ : Mesnetler arası açıklıktır (mm).

CLT örnekleri üzerinde çivi tutma testi TS EN 13446 standardına uygun olarak yapılmıştır. Test örnekleri anma ölçüsü 50 x 50 x 50 mm ebatlarında kesilmiştir. Toplam 48 adet test örneği hazırlanmıştır. Çivi tutma direnci testi Şekil 2-B'de görüldüğü şekilde uygulanmış ve aşağıda verilen formülle (4) hesaplanmıştır.

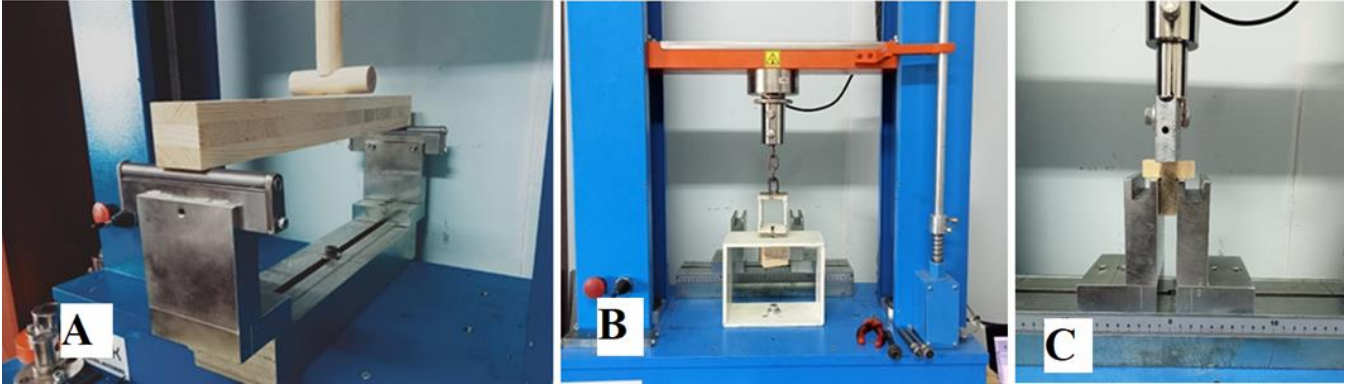
$$f = \frac{F_{max}}{d.l_p} \text{ (N/mm}^2\text{)} \quad (4)$$

Burada,  $f$  vida tutma direncini ( $N/mm^2$ ),  $F_{max}$  test sonunda belirlenen maksimum yükü (N),  $d$  vida anma çapını (mm),  $l_p$  ise malzemeye saplanan vida boyunu (mm) göstermektedir.

CLT malzemenin yapışma performansının ölçülmesi için ASTM D 905 standardı veya EN 16351 numaralı standartlarda belirtilen blok makaslama testi kullanılmaktadır. Bu standartlarda tutkal hattındaki yapışma performansı, test örneğinin yerleştirildiği bir metal aparat içerisinde basınç kuvveti uygulayarak yapışan yüzeylerin ayrılmaya zorlanması ile ölçülmektedir. Ancak, bu test için gereken metal aparatın mevcut olmaması nedeniyle, bu teste benzer olan bir test düzeneği oluşturularak bu test TS 3459 standardında belirtilen basınç kuvvetiyle makaslama direncinin ölçülmesi şeklinde yapılmıştır. Bu test içinde 48 adet test örneği olmak üzere 2 grup hazırlanmıştır. Bu gruplardan birisi hava kuruğu halde, diğeri ise yaş halde test edilmiştir. Yaş halde test edilecek test örnekleri 48 saat suda bekletilmiş ardından bir bez yardımı ile fazla suyu alınmış ve sonra teste tabi tutulmuştur. Makaslama direnci Şekil 2-C'de gösterildiği gibi uygulanmış ve aşağıdaki formülle(5) hesaplanmıştır.

$$\sigma_m = \frac{F_{max}}{A} \text{ (N/mm}^2\text{)} \quad (5)$$

Burada;  $\sigma_m$  makaslama direncini ( $N/mm^2$ ),  $F_{max}$  test esnasında ölçülen maksimum kuvvet (N) ve  $A$  birbirinden ayrılan yüzeylerin toplam alanını ( $mm^2$ ) göstermektedir.



Şekil 2. Eğilme Direnci Testi (A) Çivi Tutma Direnci Testi (B) Makaslama Direnci Testi (C) Görüntüleri

## BULGULAR VE TARTIŞMA

### Bulgular

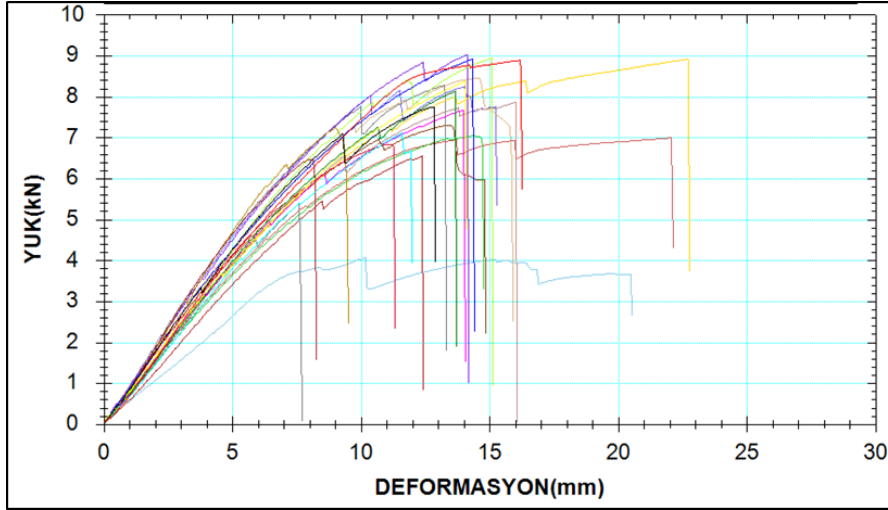
Denemeler için üretilen CLT malzemenin hava kuru yoğunluk değeri  $513 \text{ kg/m}^3$  olarak belirlenmiştir. Malzemenin, testleri yapılan mekanik özelliklerinden eğilme direnci, eğilmede elastisite modülü ve eğilmede deformasyon miktarı, çivi tutma direnci ve yapışma performansını gösteren makaslama direnci testlerine ait hava kuru ve yaş haldeki veriler Çizelge 1’de verilmiştir. Çizelge incelendiğinde, hava kuru test örneklerinin rutubet yüzdesinin %9.7, yaş haldeki test örneklerinin %57.74 olduğu belirlenmiştir. Yaş örneklerin rutubet yüzdesinin %30 lif doyunluk noktasının üzerinde olması yapılan mekanik testler bakımından önemlidir. Ahşap malzemenin lif doyunluk noktası altındaki rutubet yüzdesinde azalma veya artma olması durumunda masif ahşap malzemenin mekanik özellikleri de artış veya azalış gösterir. Eğilme direnci hava kuru haldeki test örneklerinde  $49.81 \text{ N/mm}^2$  ve yaş test örneklerinde  $22.23 \text{ N/mm}^2$ ’dir. Eğilmede elastisite modülü değeri, hava kuru test örneklerinde  $4510 \text{ N/mm}^2$  ve yaş test örneklerde ise  $2066 \text{ N/mm}^2$ ’dir. Çivi tutma direnci hava kuru test örneklerinde  $4.6 \text{ N/mm}^2$  ve yaş haldeki test örneklerinde ise  $3.43 \text{ N/mm}^2$ ’dir. Makaslama direnci ise hava kuru test örneklerinde  $3.03 \text{ N/mm}^2$  ve yaş haldeki test örneklerinde ise  $1.61 \text{ N/mm}^2$ ’dir. Eğilme direnci, eğilmede elastisite modülü, çivi tutma direnci ve makaslama direnci değerleri yaş örneklerde, hava kuru örneklere göre önemli derecede azalmıştır. Ancak, bu sonucun tersi olarak, eğilmede deformasyon ve çivi tutmada deformasyon miktarları hava kuru test örneklerine göre yaş haldeki test örneklerinde artış göstermiştir.

Çizelge 1. Mekanik Özelliklere Ait Veriler (Mahşereci, 2023)

		Rutubet (%)	Eğilme Direnci ( $\text{N/mm}^2$ )	Elastisite Modülü ( $\text{N/mm}^2$ )	Eğilmede Deformasyon (mm)	Çivi Tutma Direnci ( $\text{N/mm}^2$ )	Çivi Tutmada Deformasyon (mm)	Makasla ma Direnci ( $\text{N/mm}^2$ )
Hava kuru örnekler	x*	9,7	49,81	4510	13,94	4,6	0,74	3,03
	ss**	0,5	8,30	538	3,95	1,19	0,71	0,59
Yaş örnekler	x	57,74	22,23	2066	29,33	3,43	4,05	1,61
	ss	12,06	5,94	412	13,84	0,59	2,12	0,42

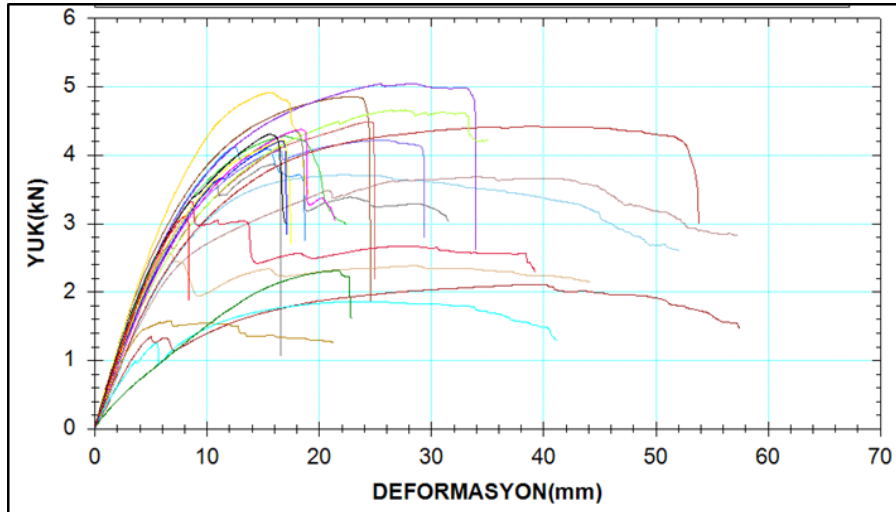
\*x: aritmetik ortalama değerleri, \*\*ss: standart sapma değerleri

Hava kuru test örneklerine ait eğilme direnci testi yük-deformasyon grafiği Şekil 3’de verilmiştir. Grafik incelendiğinde, CLT malzemenin eğilme direnci esnasında 6-9 kN yüklere kadar kırılmadan dayandığı ancak bu yükten sonra ani kırılma olduğu görülmektedir. Grafikteki yük-deformasyon eğrileri incelendiğinde lineer elastik bölgenin bittiği nokta veya elastiklik sınırının, çoğu test örneği için belirgin olmadığı açık bir şekilde görülmektedir. Kırılmalar anidir ve bazı örneklerde kademelidir. Bu durumun en önemli nedeni, hava kuru haldeki ahşap malzemenin, gevrek bir karaktere sahip olmasıdır. Hava kuru rutubet seviyesinden itibaren lif doyunluk rutubet seviyesine doğru rutubet alan ahşap malzemenin gevrekliği azalır ve daha esnek bir malzemeye dönüşür. Deformasyon değeri 7 mm ile 23 mm arasında değişmektedir. Ortalama deformasyon miktarı ise 13.94 mm dir ve Çizelge 1’de verilmiştir.



Şekil 3. Hava kuru CLT Örneklerine Ait Eğilme Direnci Yük Deformasyon Grafiği

Yaş test örneklerine ait eğilme direnci testi yük-deformasyon grafiği Şekil 4'de verilmiştir. Şekildeki grafik incelendiğinde, yük-deformasyon grafiğinde lineer elastik bölge çoğu test örneği için belirgindir. Bazı örneklerde maksimum yük değerlerine göre düşüktür. Genel olarak maksimum yük yaklaşık 5 kN olarak belirlenmiştir. Eğilmeye deformasyon miktarı ise 8 mm ile 58 mm arasında değişmiştir. Ortalama deformasyon miktarı 29 mm olarak gerçekleşmiştir. Bu durumda, yaş örneklerin kuru örneklerle göre çok daha esnek bir kırılma sergilediği söylenebilir. Bu durumun yük altındaki ahşap malzemelerin ani yüklemelere maruz kalması durumunda esnek bir kırılma göstermesi açısından avantaj ancak daha az yük taşıması bakımından ise dezavantaj olduğu açıktır.



Şekil 4. Yaş CLT Örneklerine Ait Eğilme Direnci Yük Deformasyon Grafiği

### Tartışma

CLT üretimi ve özellikleri üzerine yapılan önceki çalışmalarda, farklı ağaç türü ve farklı tutkallar kullanılarak CLT üretilmiş ve bazı teknolojik özellikleri araştırılmıştır. Örneğin; Hekimoğlu (2014) çalışmasında göknar ve sarıçam odunlarından nanokil takviyeli çapraz lamine kereste üretim olanaklarını incelemiştir. Çalışmada PVAc D3 tutkalı ile yapılan CLT'ye %1, %2 ve %4 oranlarında nanokil ilave edilmiş ve epoksi tutkalı kullanılmıştır. Farklı boyutlarda deney numunesi hazırlanmış ve bu numunelerden 2x3x44 cm boyutlarındaki örneklerin eğilmeye kayma değerleri sarıçam odununda daha yüksek iken %1 ve %2 nanokil ilave edildiğinde göknar odununun daha yüksek değerleri olduğu gözlemlenmiştir. Kontrol grubunda kullanılan epoksi tutkalında ise sarıçam ve göknar odununun aynı değerleri verdiği sonucuna ulaşılmıştır. 2 x 2.5 x 44 cm ebatlarındaki PVAc D-3 tutkalı kullanılan numunelerin yarısı 24 saat suda bekletilmiş ve bunun sonucunda tutkal hattından yarılarak kullanılamaz hale gelmiştir. Geri kalan numunelerde eğilmeye kayma direncinin nanokil takviyesi ile doğru orantılı olarak arttığı belirlenmiştir. Epoksi tutkalı ile yapılandırılan numuneler 24 saat suda bekletildikten sonra eğilmeye kayma değerlerinin sarıçam odununda



daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Ancak suda bekletilen numunelerin direnç değerlerinin normale göre %40-%50 oranında daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. Benzer sonuçlar, bizim yaptığımız çalışmada da yaş haldeki test örnekleri üzerinde elde edilmiştir. Ancak, sunulan bu çalışmada, kullanılan tutkal türünün suya karşı dayanımının son derece yüksek olması nedeniyle (D4 sınıfı), yaş test örneklerinde tutkal hattında ayrılma sadece birkaç test örneğinde gözlemlenmiştir.

CLT üretiminde farklı ağaç türleri ile PU tutkalı kullanılarak yapılan önceki çalışmalarda, PU tutkalı ile CLT'nin başarılı bir şekilde üretilip üretilmediği rapor edilmiştir. Örneğin; Gülcemal (2019) tarafından yapılan çalışmada, üretilen tabakalı kereste ve tabakalanmış ağaç malzemenin bazı teknolojik özellikleri araştırılmıştır. Kereste olarak Uludağ göknarı, sarıçam ve ısıtılmış görmüş çam türleri kullanılmıştır. Tutkal olarak poliüretan ve melamin formaldehit kullanırken bazı örneklerde yapıştırıcıya ek olarak üst tabakalarda silan muamelesinde bulunmuştur. Poliüretan tutkalı kullanılan CLT ve Tabakalı Ağaç Malzeme (TAM) kirşilerinin kereste türü fark etmeden melamin formaldehit kullanılanlardan daha iyi olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Silan muamelesi yapılan poliüretan tutkallı örneklerde direncin arttığı gözlemlenmiştir. Isıl işlem görmüş kerestelerde mekanik özelliklerde azalmalar tespit edilmiştir.

CLT üzerine yapılan bir diğer çalışmada ise, ısıtılmış işlem ile modifiye edilmiş kereste parçalarından üretilen CLT'nin bazı teknolojik özellikleri Özcan (2017) tarafından araştırılmıştır. Araştırmada, sarıçam (*Pinus Sylvestris* Lipsky) ve Uludağ göknarından üretilen CLT'nin, masif (ısıtılmış işlem görmeyen) çapraz tabakalı kereste ile ısıtılmış işlem gören kerestenin çekmede makaslama direnci, eğilmeye makaslama direnci, eğilmeye elastisite modülü ve yüzeylere dik çekme direnci özelliklerini incelenmiştir. Üç tabakalı çapraz tabakalı keresteler poliüretan tutkalı ile birleştirilirken deney numunelerinden bazılarında tutkala ek olarak üst tabakalarda silanla ön muamele yapılmıştır. Silan astar muamelesi yapılan masif CLT malzemelerin ısıtılmış işlem görmüş CLT malzemedeki daha sağlam olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Yine bu çalışmada ısıtılmış işlem gören çapraz tabakalı kerestede silan ile ön muamele yapılan numunelerin mekanik özelliklerinde azalmalar olduğunu gözlemlenmiştir.

Ahşap esaslı yapısal kompozit malzemelerin su ile temas etmesi sonrası hızlı bir şekilde su almaya başladıkları ve bunun bir sonucu olarak mekanik performansında azalmaların meydana geldiği, yapılan önceki çalışmalarla ortaya konmaya çalışılmıştır. Juciene vd. (2023) tarafından yapılan bir çalışmada, ladin odunundan üretilen yapısal kompozit kerestenin (LVL) su ile temas etmesi sonrası hızlı bir şekilde su almaya başladığı ve 48 saatlik bir temas sonrası test örneğinin %34 oranında su aldığı ve bu rutubet seviyesinde yapılan eğilme direnci testinde LVL malzemenin eğilme direncinin kontrol grubu test örneklerine göre %45 oranında azalma gösterdiği belirlenmiştir. Ancak, bu yapılan çalışmada, test örnekleri suya kısmı olarak ve sadece bir yüzeyleri suya değecek şekilde temas ettirilmiştir. Bizim yaptığımız çalışmada ise test örnekleri tamamen suya daldırılmıştır. Bir başka çalışmada ise, Bal vd. (2013) tarafından; masif ağaç malzeme ve tabakalı kaplama kerestenin vida tutma direnci üzerine kuvvet uygulanan yüzeyin ve rutubetin etkisi araştırılmıştır. Çalışma sonunda elde edilen verilere göre; rutubetin vida tutma direncini önemli derecede etkilediği belirlenmiştir. Yapılan bir diğer çalışmada ise; Bal (2016) tarafından huş ve çam kontrplak malzemenin vida tutma direnci üzerine rutubetin etkisi tespit edilmeye çalışılmıştır. Elde edilen verilere göre; %0, %10, %20, %30 ve %40 rutubet seviyelerinde vida tutma dirençleri arasında önemli farklılıklar olduğu, ancak, %40 rutubet seviyesi ile %60 rutubet seviyesindeki kontrplak test örneklerinin vida tutma dirençleri arasında fark olmadığı belirlenmiştir. Rutubetin ahşap malzemenin mekanik özellikleri üzerine etkisi konusunda Hıdır vd. (2022) tarafından yapılan çalışmada da benzer sonuçlar rapor edilmiştir. Bu çalışmalar arasında; rutubet yüzdeleri arasındaki farklılık, test metodundaki farklılık, ağaç türündeki farklılık ve üretilen malzemedeki farklılık olduğu ve bunun bir sonucu olarak, yapılan önceki çalışmalar ile bu sunulan çalışma arasında bazı farklılıkların meydana geldiği söylenebilir.

CLT malzemenin mekanik performansını etkileyen önemli faktörlerden biriside yapıştırıcıda kullanılan tutkal türü ve uygulanan tutkal miktarıdır. Tutkal miktarının artması ile yapışma performansı iyileşmekte ve tutkal hattında meydana gelebilecek delaminasyon azalmaktadır. Bu konuda yapılan bir çalışmada Amin vd. (2023) bu iki faktörün etkisini kesin bir şekilde ortaya koymuştur. Yapılan bir diğer çalışmada ise, Yang vd. (2022), Çin göknar odunu ve bambu ile üretilen CLT malzemenin yapışma performansı üzerine 2 farklı tutkalın (PU ve FRF) etkisini araştırmışlardır. Çalışma sonunda elde edilen verilere göre; PU tutkalı ile üretilen CLT test örneklerinin yapışma performansı (blok makaslama testi) FRF tutkalı ile yapıştırılanlara göre daha yüksek elde edilmiştir. Ayrıca, tutkal hattındaki yapışma performansının bir göstergesi olan odun kırılması yüzdesi (wood failure pertengate) PU ile yapıştırılan test örneklerinde daha yüksek ölçülmüştür.



## SONUÇLAR ve ÖNERİLER

Bu çalışmada, karaçam kerestesinden 3 tabakalı CLT, poliüretan tutkalı kullanılarak üretilmiştir. Elde edilen malzemenin eğilme direnci, elastisite modülü, çivi tutma direnci, yapışma direnci araştırılmıştır. Yaş halde ve hava kurusu halde teste tabi tutulan CLT örneklerinin literatürdeki diğer çalışmalar ile uyumlu olduğu görülmüştür. Yaş halde test edilen CLT örneklerinin mekanik performansı azalırken, tutkal hattında delaminasyona uğramamış ve iyi bir yapışma direnci göstermiştir. Hava kurusu haldeki test örneklerinin eğilme direnci, elastisite modülü, çivi tutma direnci ve makaslama direnci yaş haldeki test örneklerinininkinden, sırasıyla %127, %118, %35 ve %87 daha yüksek olduğu tespit edilmiştir. Yaş haldeki test örneklerinin eğilmede deformasyon miktarı kuru haldeki test örneklerinin eğilmede deformasyon miktarından %52 daha fazla olduğu tespit edilmiştir. Suyu dayanıklı poliüretan tutkalının yaş halde teste tabi tutulan örneklerde iyi performans gösterdiği tespit edilmiştir. Kırılan ve ayrılan test örneklerinin sadece iki tanesinde tutkal hattından ayrılma saptanmış olup bu ayrılma sınırlıdır.

### Teşekkür

Bu çalışma Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi Başkanlığı tarafından 2021/6-11 YLS numaralı proje ile desteklenmiştir. Bu desteğinden dolayı KSÜ BAP birimine teşekkür ederiz. Bu çalışmada sunulan veriler, Aydanur Hıdır MAHSERECİ isimli yazarın yüksek lisans tezinden alınmıştır.

### KAYNAKLAR

Amin, Y., Adji, R. P., Lubis, M. A. R., Nugroho, N., Bahtiar, E. T., Dwianto, W., & Karlinasari, L. (2023). Effect of Glue Spread on Bonding Strength, Delamination, and Wood Failure of Jabon Wood-Based Cross-Laminated Timber Using Cold-Setting Melamine-Based Adhesive. *Polymers*, 15(10), 2349. DOI: 10.3390/polym15102349.

Artun, H. (2021). Çapraz Lamine Ahşap (CLT) Malzemenin Bina Enerji Performansına Etkisi: Trabzon İli Örneği. Yüksek Lisans Tezi. Avrasya Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü. İstanbul, 156s.

Bal, B. C., Özdemir, F., & Altuntaş, E. (2013). Masif ağaç malzeme ve tabakalı kaplama kerestenin vida tutma direnci üzerine karşılaştırmalı bir çalışma. *Düzce Üniversitesi Orman Fakültesi Ormancılık Dergisi*, 9(2), 14-22.

Bal, B. C. & Kılavuz, M. (2015). İlk Mobilya, Selçuk Üniversitesi Teknik Online Dergisi, (özel sayı): 56-69. ISSN:1302-6178

Bal, B. C. (2016). The effect of moisture content on the screw holding capacity of birch and pine plywood. In International Forestry Symposium (pp. 1020-1025) Kastamonu, Türkiye.

Barutçu, N. (2020). Çapraz Lamine ahşap Ve Betonarme Taşıyıcı Sistemli Tekil Konut Yapılarının Çevresel Etkilerinin Karşılaştırılması Değerlendirmesi. Yüksek Lisans Tezi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 229s.

Ceylan, A. (2021) Çapraz Lamine Ahşap Panel Yapı Sistemleri ve Birleşim Özelliklerinin Deneysel İncelenmesi. Doktora Tezi. Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Çavuş, V. (2019). Mühendislik Ürünü Ağaç Malzemelerde Yükselen Trend; Çapraz Tabakalanmış Kereste. *Bartın Orman Fakültesi Dergisi*, 21 (2), 560-569. DOI: 10.24011/barofd.518169.

Gülcemal, (2019) Sarıçam Ve Gökmar Odunlarından Elde Edilen Lamine ve Çapraz Lamine Kirişlerin Mukavemetinin Karşılaştırılması Ve İyileştirilmesi. Yüksek Lisans Tezi. Bartın Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü. Bartın.

Hekimoğlu, V. (2014). Gökmar Ve Sarıçam Odunlarından Nanokil İlaveli Çapraz Lamine Kereste Üretim Olanaklarının İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi. Bartın Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bartın, 75s. <https://acikbilim.yok.gov.tr/handle/20.500.12812/594289>.

Hıdır, A. , Bal, B. C. & Aşşaroğlu, E. (2022). Film kaplı kontrplağın bazı mekanik özellikleri üzerine rutubet içeriğinin etkisi, *Mobilya ve Ahşap Malzeme Araştırmaları Dergisi*, 5(2),102-109.DOI: 10.33725/mamad.1186623

Hu, C., Dengyun, T., Liao, Y., & Zhang, W. (2016). Feasibility of Manufacturing Cross-laminated Timber Using Fast-grown Small Diameter Eucalyptus lumbers. *Construction and Building Materials Journal*, 132, 508-515. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.027>.

Karacabeyli E. and Douglas B., (2013) CLT: handbook cross-laminated timber, FPInnovations.

Knorz, M., Torno, S., & van de Kuilen, J. W. (2017), Bonding quality of industrially produced cross-laminated timber (CLT) as determined in delamination tests. *Construction and Building Materials*, 133, 219-225. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.057>.

Jucienė, M., Dobilaitė, V., & Albrektas, D. (2023). An Investigation of the Impact of Water on Certain of the Mechanical and Physical Properties of Laminated Veneer Lumber (LVL) as Used in Construction. *Applied Sciences*, 13(2), 925. <https://doi.org/10.3390/app13020925>.

Mahşereci A.H. (2023), Karaçam odunundan üretilen çapraz tabakalı kereste (ÇTK) malzemenin farklı koşullardaki mekanik dayanımı üzerine bir araştırma. Yüksek Lisans Tezi. Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kahramanmaraş, 79s.

Mengeloğlu, F. & Kurt, R. (2004). Mühendislik ürünü ağaç malzemeler 1 tabakalanmış kaplama kereste (TAK) ve tabakalanmış ağaç malzeme (TAM). *KSÜ Fen ve Mühendislik Dergisi*, 7(1), 39-44.

Oran, B. (2012). Hindistan Cevizi (*Cocos nucifera* L.) Odunu İle Üretilen Çapraz Yapıştırılmış Lamine Kerestelerin Bazı Teknolojik Özellikleri. Yüksek Lisans Tezi. Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon, 89s. <https://acikbilim.yok.gov.tr/handle/20.500.12812/480008>.

Özan, Z. E. (2017) Isıl İşlem Görmüş Ahşap Malzemenin Çapraz Lamine Kereste Üretiminde Kullanım Olanaklarının Araştırılması. Yüksek Lisans Tezi. Bartın Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bartın, 61s. <http://hdl.handle.net/11772/405>,

Şanlı, E. (2020) Çapraz Lamine Ahşabın Strüktürel Kullanımının Ve Performans Özelliklerinin İncelenmesi. Yüksek Lisans Tezi. Karadeniz Teknik Üniversitesi. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 437s.

TS 3459, (1980), Odunda Liflere Paralel doğrultuda Makaslama Dayanımının Tayini, TSE, Ankara.

TS EN 310, (1999), Ahşap esaslı levhalar- Eğilme dayanımı ve eğilme elastikiyet modülünün tayini, TSE, Ankara.

TS EN 322, (1999), Ahşap Esaslı Levhalar-Rutubet Miktarının Tayini, TSE, Ankara.

TS EN 323, (1999), Ahşap esaslı levhalar-Birim hacim ağırlığının tayini, TSE, Ankara.

TS EN 13446, (2005), Ahşap esaslı levhalar-bağlayıcıların geri çıkma kapasitesinin tayini, TSE, Ankara.

URL 1 (2023) Cross-Laminated Timber (CLT): Feature and Benefits <https://theconstructor.org/building/cross-laminated-timber-clt-features-and-benefits/565439/>

Yang, S., Li, H., Fei, B., Zhang, X., & Wang, X. (2022). Bond quality and durability of cross-laminated flattened bamboo and timber (CLBT). *Forests*, 13(8), 1271. <https://doi.org/10.3390/f13081271>.

Wang, J. B., Wei, P., Gao, Z., & Dai, C. (2018). The evaluation of panel bond quality and durability of hem-fir cross-laminated timber (CLT). *European Journal of Wood and Wood Products*, 76, 833-841. <https://doi.org/10.1007/s00107-017-1283-7>.



# Kahramanmaraş Sütçü İmam University

## Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 01.12.2023  
Kabul Tarihi : 26.03.2024

Received Date : 01.12.2023  
Accepted Date : 26.03.2024

### A DEEP LEARNING-BASED DEMAND FORECASTING SYSTEM FOR PLANNING ELECTRICITY GENERATION

### ELEKTRİK ÜRETİMİNİN PLANLANMASI İÇİN DERİN ÖĞRENME TABANLI TALEP TAHMİN SİSTEMİ

Muhammet Mustafa GÖKÇE<sup>1\*</sup> (ORCID: 0000-0003-1214-1698)  
Erkan DUMAN<sup>2</sup> (ORCID: 0000-0003-2439-7244)

<sup>1</sup> Turkish Electricity Transmission Corporation, Ankara, Türkiye  
<sup>2</sup> Firat University, Department of Computer Engineering, Elazığ, Türkiye

\*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Muhammet Mustafa GÖKÇE, gokcemustafa@gmail.com.tr

#### ABSTRACT

In today's world, where economic and industrial development continues, the importance of electrical energy is constantly increasing. Energy demand should be forecast as precisely as possible to reduce lost energy costs in the system, to plan generation expenditures appropriately, to ensure that market players are not economically harmed, and to deliver quality and uninterrupted energy to system consumers. Balancing the electric energy supply and demand of the system is possible with a forecasting plan. Our research aims to generate hourly electricity consumption load forecasts for the period 2018-2021 using Turkish Electricity Consumption Data and meteorological data, with the addition of time and public holiday features. The forecasting performance of the models is evaluated by training multiple machine learning models and deep neural network-based time series models with the data. When the prediction results of our load demand forecasting problem were evaluated, it was seen that deep learning methods gave higher results in prediction success compared to machine learning models. It has been observed that the prediction success of the LSTM model, one of the deep learning methods we use, is higher than the RNN and GRU models. The analysis envisages the elimination of mismatches between energy supply and demand.

**Keywords:** Electricity demand forecasting, deep learning, LSTM, GRU, RNN

#### ÖZET

Ekonomik ve endüstriyel gelişimin devam ettiği günümüz dünyasında elektrik enerjisinin önemi sürekli artmaktadır. Sistemdeki kayıp enerji maliyetlerini azaltmak, üretim harcamalarını uygun şekilde planlamak, piyasa oyuncularının ekonomik olarak zarar görmemesini sağlamak ve sistem tüketicilerine kaliteli ve kesintisiz enerji ulaştırmak için enerji talebinin mümkün olduğunca hassas bir şekilde tahmin edilmesi gerekmektedir. Sistemin elektrik enerjisi arz ve talebinin dengelenmesi bir tahmin planı ile mümkündür. Araştırmamız, Türkiye Elektrik Tüketim Verileri ve meteorolojik veriler kullanılarak, zaman ve resmi tatil özellikleri de eklenerek 2018-2021 dönemi için saatlik elektrik tüketim yük tahminleri üretmeyi amaçlamaktadır. Modellerin tahmin performansı, çoklu makine öğrenimi modelleri ve derin sinir ağı tabanlı zaman serisi modelleri verilerle eğitilerek değerlendirilmektedir. Yük talep tahmin problemimizin tahmin sonuçları değerlendirildiğinde derin öğrenme yöntemlerinin makine öğrenmesi modellerine kıyasla tahmin başarısında daha yüksek sonuçlar verdiği görülmüştür. Kullandığımız derin öğrenme yöntemlerinden LSTM modelinin tahmin başarısının RNN ve GRU modellerinden daha yüksek olduğu gözlemlenmiştir. Analiz, enerji arzı ve talebi arasındaki uyumsuzlukların giderilmesini öngörmektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Elektrik talebi tahmini, derin öğrenme, LSTM, GRU, RNN

#### INTRODUCTION

ToCite: GÖKÇE, M. M., & DUMAN, E., (2024). A DEEP LEARNING-BASED DEMAND FORECASTING SYSTEM FOR PLANNING ELECTRICITY GENERATION. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 27(2), 511-522.

Countries' social and economic developments are closely related to energy. Electrical energy has taken the most prominent place in human life due to its flexibility and ease of conversion (Nisanci, 2005). Today, electrical load forecasting is essential for energy exchange, transmission and distribution planning, operation and maintenance service, energy demand management, and financial planning of all industry areas (Hong, 2010). Predicting the electricity load demand correctly is necessary for planning energy infrastructure investments and for maximum economic savings (Singh et al., 2012). Technological developments in intelligent grids concern system operators but also industrial and commercial enterprises and end users regarding energy demand forecasting. Big data collected using intelligent grids are used more frequently in demand forecasting (Kim et al., 2019). Climate changes, special days and public holidays, technological developments, and changes in energy policies can affect electricity demand. Estimating this demand accurately is essential to avoid energy losses because forecasting less than the actual consumption value will create an energy supply problem and cause power outages. Making forecasting, on the contrary, causes excess electricity production and creates a disadvantage in terms of system and cost (Amjady, 2001).

This study focuses on Turkey's hourly total electricity consumption demand forecasting using deep learning algorithms. In the dataset we used in the study, the country's consumed electricity load data and the temperature values of the 16 regions where the maximum consumption is reached are available. Finally, the attributes derived from the time variable were added to the dataset. In the study, prediction models were made with several deep learning algorithms using these data. In our study, Turkey's hourly energy demand was modeled by using deep learning methods, Recursive Neural Network (RNN), Long-Short-Term Memory (LSTM), and Gated Recurrent Unit (GRU) algorithms for our time series forecasting problem with the dataset, and the forecasting performance between these models was compared. This study is critical in forecasting the amount of electrical load Turkey needs hourly and correctly planning the electricity grid operation.

## RELATED WORKS

Chan et al., in their work, combined a Convolutional Neural Network (CNN) with an artificial intelligence tuned Support Vector Machine and made an electricity consumption forecasting within the scope of smart grid studies. For short-term electrical load forecasting, CNN is fed from transfer learning (TL) and combined with the SVM method. In the study, due to the difficulty of training the CNN method from scratch, it was fine-tuned with a Deep Learning or Transfer Learning method beforehand. Thus, the importance of adjustments made with Transfer Learning in CNN and SVM applications has been understood (Chan et al., 2019).

Yildiz et al. made the electrical load forecasting for commercial buildings. Their work aimed to create an economic and environmental contribution by correctly predicting electricity usage demand and reducing greenhouse gas emissions. The study used electrical load data from two critical commercial buildings for day-ahead hourly consumption forecasting. When the model results were examined, it was seen that the model trained with Bayesian Regulated Backpropagation Artificial Neural Networks showed the highest performance when evaluated with error metrics in MAPE and RMSE (Yildiz et al., 2017).

Madrid et al., have worked to increase the forecast accuracy weekly with several machine learning methods to overcome the planning problems in renewable energy sources and to minimize electricity generation costs in short-term load forecasting. In their study, they trained five machine learning methods using previous electrical load data, weather, and holiday data. Among these methods, it has been observed that the Extreme Gradient Boosting Regressor (XGBoost) algorithm outperforms the methods based on neural networks in estimation (Madrid and Antonio, 2021).

Cunkas et al. made long-term forecasting studies with models on Turkey's electricity demand. Their studies observed the effects of weather conditions and economic indicators on electrical load demand using the Recursive Neural Networks (RNN) model and Back Propagation (BP) architecture. Among the factors affecting the market, economic factors were influential in short-term forecasts. On the other hand, economic conditions impacted forecasts. When the results of the two models are compared, it has been revealed that the RNN model gives better results than BP in long-term predictions (Cunkas and Altun, 2010).

Biskin et al. worked on Turkey's prospective electricity consumption forecast using Long Short-Term Memory (LSTM) and another deep learning method, Gated Repetitive Unit (GRU). Their study used electrical data from previous years and made hourly and three-hour forecasts. Considering the forecasting performances, the GRU method performed better than LSTM (Biskin and Cifci, 2021).

Banik et al. developed a prediction model using factors such as temperature, humidity, pressure, and air density that are likely to directly affect an electric load in the Indian state of Tripura. Random Forest Algorithm and XGBoost are used together in the model. The model they used in their work has been compared with different machine learning methods such as SVR, NN, and AdaBoost. It has been shown that the model is suitable for short, medium, and long-term electrical load estimation and has achieved successful results with high accuracy values (Banik et al., 2021).

Yan et al. trained their model by combining LSTM and CNN networks with household power consumption data. They used the model to increase the power consumption estimation accuracy and shorten the estimation time. Training, the model they developed, made performance comparisons with LSTM, ARIMA, and SVR. They have proven that their proposed model outperforms most other approaches (Yan et al., 2018).

## MATERIALS AND METHODS

### Recurrent Neural Network (RNN)

RNN, also called Recurrent Neural Networks, was founded by Jeff Elman in 1990 as a Simple Recurrent Network (SRN). The purpose of using RNN networks is to analyze, process, and classify sequential data. Iterative Neural Networks differ from feedforward networks in that they have feedback connections from the previous layer and the current layer. In this way, the RNN architecture has a structure that processes information continuously and consists of many loops. Training of RNNs takes place with the help of the backpropagation algorithm (Elmas, 2018).

Sequential data that vary depending on time are processed with recurrent neural networks. Having a sequential flow of data expands the usage area of RNN and enables it to be used in fields such as speech and natural language processing (Aydoğan, 2019). The RNN structure is given in Figure 1.

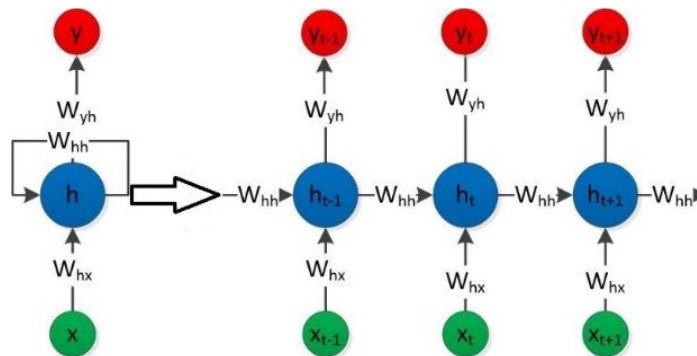


Figure 1. RNN Cell Structure (Zheng et al., 2017)

As shown in equations (1), (2), and (3), fw represents a function with w parameter,  $x_t$  layer input,  $y_t$  layer output,  $W_{hx}$  weight matrix in input nerve,  $W_{hh}$  weight matrix in recurrent nerve,  $W_{yh}$  weight matrix in output nerve (Elmas, 2018).

$$h_t = fw(h_{t-1}, x_t) \quad (1)$$

$$h_t = fw(W_{hx}x_t + W_{hh}x_{t-1}) \quad (2)$$

$$y_t = W_{yh}h_t \quad (3)$$

In an iterative neural network algorithm, input ( $x_t$ ) is given to the network in a single time step. Next, the current state ( $h_t$ ) is calculated using the current and previous state of the input. The current  $h_t$ , becomes  $h_{t-1}$  for the next step. As needed by the deep learning problem, steps are taken, and all previous state information is brought together. After the completed time steps, the output ( $y_t$ ) is calculated using the final state of the current state. Then, error detection is made by comparing the actual output with the output value. The error value is used in updating the weights by giving it back to the network. With the update process, the network is trained (Elmas, 2018).

RNN architecture has some disadvantages. Gradient value is used to determine all weight values in architecture. However, when this process is used in long networks, the loss effect may decrease excessively, and the gradient value may be lost. Since all the layers in the architecture are related to each other by the multiplication process, their



derivatives can be lost, called vanishing gradients. In the case of the opposite situation, the gradients increase excessively, and the gradient explosion (exploding gradients) event may occur (Aydoğan, 2019).

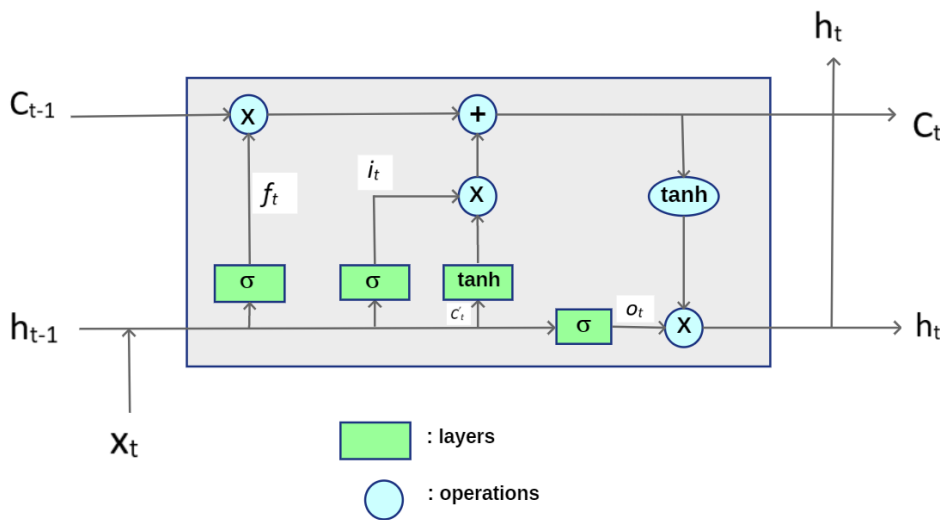
Recursive neural networks store information with a hidden state structure corresponding to each time step they contain. The information held is the memory of the network. It is impossible to go back very far in the RNN architecture in this memory, which stores information about what operations are performed at all stages of learning. To overcome this disadvantage, LSTM architecture, a more advanced type of RNN, is used (Pervan & Keles, 2019).

**Long Short-Term Memory (LSTM)**

Long Short-Term Memory is based on memory cell structure rather than neural-based architecture. The memory cell, which can preserve its value in the short or long term, can also keep the previous values in its memory thanks to this feature. Thus, he learns about long-term dependencies.

LSTM networks were proposed by Hochreiter and Schmidhubr in 1997. The architecture of the network consists of memory cells. The Long Short Term Memory cell has three gates. At the entrance gate, the first of these gates, the time to enter new information into memory is controlled. The forgetting gate, another gate in the cell, performs its control task by ensuring that existing information is forgotten and new data is remembered. The exit door, the last door in the cell, controls the usage time of the information at the exit. However, there are also weights in the cell that control these gates. These weights are generally optimized by training with the Back Propagation learning algorithm (Elmas, 2018).

LSTM structures were developed to overcome the vanishing gradient problem in RNN architecture. In the RNN architecture, the problem of forgetting the first input arises as the information is lost at every stage. The longer the time series, the greater the complexity of the forgetting problem. To solve these problems, the network needs some long-term memory. However, as the complexity of the problems increases, the number of layers must also increase. In complex problems, the learning speed increases from the first layer to the next layer. Conversely, the first layers tend to learn fast, and the next layers tend to learn slowly. This explains the concept of exploding gradient. LSTM architecture has been developed to eliminate such situations that cause insufficient performance from the models (Durgun, 2018). Figure 2 shows the internal structure of the LSTM cell.



**Figure 2.** LSTM Cell Structure (Aydoğan, 2019)

**C<sub>t</sub> (Cell State):** This channel continuously transfers information from one cell to another.

**f<sub>t</sub> (Forget Gate):** With cell states, LSTM acts as a filter in the transfer of information to other cells and decides which information will be forgotten with the help of this forget gate.

**i<sub>t</sub> (Input Gate):** With this gate, it is decided to record the information with cell states and transfer it to other cells. Then the cell state is updated and ready to transmit information to the adjacent cell.

**$o_t$  (Output Gate):** While determining the output value, it is decided by this gate. The value from the cell state is not directly output but filtered by  $\tanh$  processing (Aydoğan, 2019).

In the LSTM cell, the *sigmoid* function produces a value between 0-1. This generated value decides the part of the information that should be forgotten or transferred. 0 is used when this information will not be transmitted, and one is used if it is to be transmitted. Storing information is the next step. The *sigmoid* function used at the input gate decides what information will be stored. After this stage, the *tanh* function combines these two stages using  $\tilde{C}_t$  values. Next, the new state information is calculated in the memory cell to calculate the system output. Operations are expressed mathematically as in equations (4), (5), (6), (7), (8), (9) (Tan et al., 2015).

$$i_t = \sigma(w_i \cdot [h_{t-1}, x_t] + b_i) \tag{4}$$

$$\tilde{C}_t = \tanh(W_c \cdot [h_{t-1}, x_t] + b_i) \tag{5}$$

$$\tilde{C}_t = \tanh(W_c \cdot [h_{t-1}, x_t] + b_c) \tag{6}$$

$$\tilde{C}_t = f_t * C_{t-1} + i_t * \tilde{C}_t \tag{7}$$

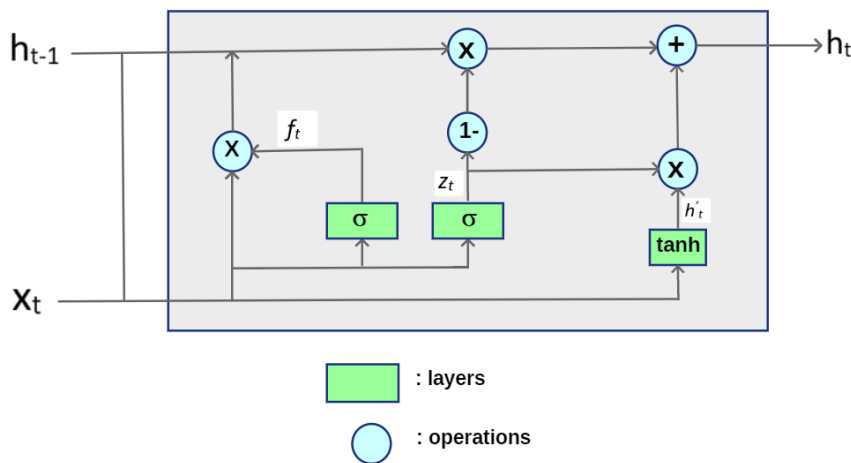
$$o_t = \sigma(W_o \cdot [h_{t-1}, x_t] + b_o) \tag{8}$$

$$h_t = o_t * \tanh(C_t) \tag{9}$$

### Gated Recurrent Unit (GRU)

The Gated Recurrent Unit (GRU), known for its similarity to the LSTM cell, has gate cells that modulate the information flow within the unit but do not contain a different memory cell. The purpose of designing a GRU is to detect adaptively different time-scale dependencies of each repeating unit (Chung et al., 2014).

The difference between the GRU structure, which is used as a kind of LSTM, from LSTM is that there is no cell state. Apart from that, the forget gate and input gate have been removed, and these two gate functions have been combined in the update gate. The structure of the GRU cell shown in Figure 3 is simpler than the LSTM (Aydoğan, 2019).



**Figure 3.** GRU Cell Structure (Aydoğan, 2019)

The mathematical operations of the GRU model are given in equations (10), (11), (12), and (13).

$$z_t = (W_z \cdot [h_{t-1}, x_t]) \tag{10}$$

$$r_t = (W_r \cdot [h_{t-1}, x_t]) \tag{11}$$

$$h'_t = \tanh(W[r_t * h_{t-1}, x_t]) \tag{12}$$

$$h_t = (1 - z_t) * h_{t-1} + z_t * h_t \quad (13)$$

Although the internal structure of GRU is similar to LSTM, it is simpler, and less computation is needed to update the hidden state due to this simplicity. The low computational cost facilitates the training of the model. It exhibits the same approach as LSTM to the gradient disappearance problem (Kumar et al., 2018).

### Performance Evaluation

$R^2$  score, MAE, MSE, and RMSE metrics were used to measure the performance of deep learning approaches used in the models. Equation (14) shows the mathematical formulas of MAE, MSE, and RMSE metrics.  $R^2$  score, another performance metric we use in forecasting models, is stated in Equation (15) (Li,2017; Lin et al.,2020).

$$\begin{aligned} RMSE &= \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (Y_i - \hat{Y}_i)^2} \\ MSE &= \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m (Y_i - \hat{Y}_i)^2 \\ MAE &= \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m |Y_i - \hat{Y}_i| \\ SS_{tot} &= \sum (p_i - \bar{s})^2 \\ SS_{res} &= \sum (s_i - p_i)^2 \\ R^2 &= 1 - \frac{SS_{res}}{SS_{tot}} \end{aligned} \quad (14)$$

$$(15)$$

### Data Set and Modeling

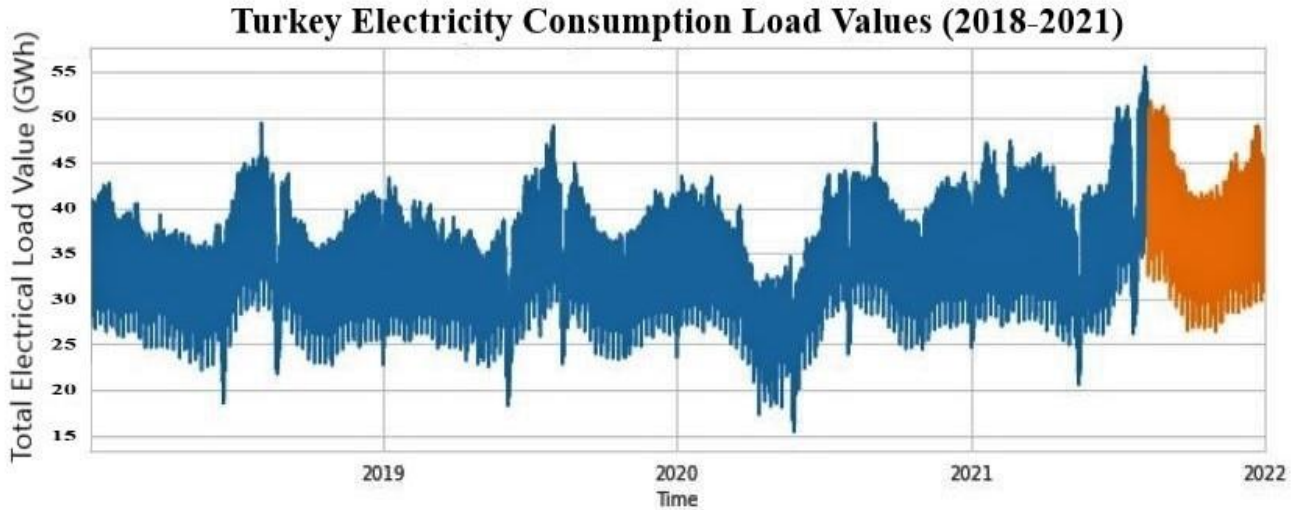
In this study, Turkey's electricity consumption forecasting application has been developed by using various deep learning algorithms. The data used in our time series forecasting application are temperature and electricity consumption data of 16 regions based on 24 hours. In the dataset, EXIST Transparency Platform (EXIST, 2022) was used in terms of electrical load, and the POWER Data Access Viewer application (NASA, 2022) was used in terms of temperature data. Four years of data were used in the study, and the time range is between 01.01.2018 and 31.12.2021. The dataset consists of 35064 rows and 18 columns.

Before applying deep learning techniques to our multivariate forecasting problem, the variables of the month, day of the month, day of the week, hour, and public holiday were derived from the time variable, which is the index variable of the dataset, and added to the dataset as new features. Missing and outlier values in the dataset were checked, and it was observed that there was no such value. 90% of the dataset is training data, and 10% is test data. Figure 4 shows the split datasets.

Since functions such as *tanh* and *sigmoid* can be used in the deep learning algorithm, the data has been normalized in the range of 0-1 according to the Robust Scaling class of the Python sci-kit-learn library, taking into account the necessity of scaling in the input data.

In the dataset, the features indicating the temperature suitable for scaling (temp\_area1, temp\_area2, etc.) were normalized separately as independent variables, and the feature indicating the total electrical load value (load\_MW) as the dependent variable.

After scaling the data, the time series data was divided into time steps, and before being given to the models, it was converted into a Numpy array in three-dimensional (3D) form (examples, time steps, features) and reshaped.



**Figure 4.** Display of Deep Learning Application Training and Test Data

For all the deep learning models we used in our electrical load estimation, a sequential model was created to give the data to the model in time steps. The models are 128 neurons in the first hidden layer and one neuron in the output layer. During the compilation of the models, mse (mean squared error) was used as the loss function. Adam optimization algorithm was preferred in the models. The batch size value is set as 32 to process the input data in parts of the model. The epoch value was applied as 30 in all models.

The Early Stopping function is used to stop the overfitting of the model when the validation loss (val\_loss) value stops decreasing and increases during the model fitting phase. The function ensures that the training is stopped before the model reaches the optimum. The early stopping function parameter is set to patience=5.

When the variable dependencies in the data set are examined, it is observed in Figure 5. how the electrical load variable changes according to the temporal variables.

## EXPERIMENTAL WORKS AND RESULTS

After the deep learning models were created and made suitable, the fitting process was applied. The parameters that occur after the model is compiled and the fitting to the data is completed are shown in Table 1.

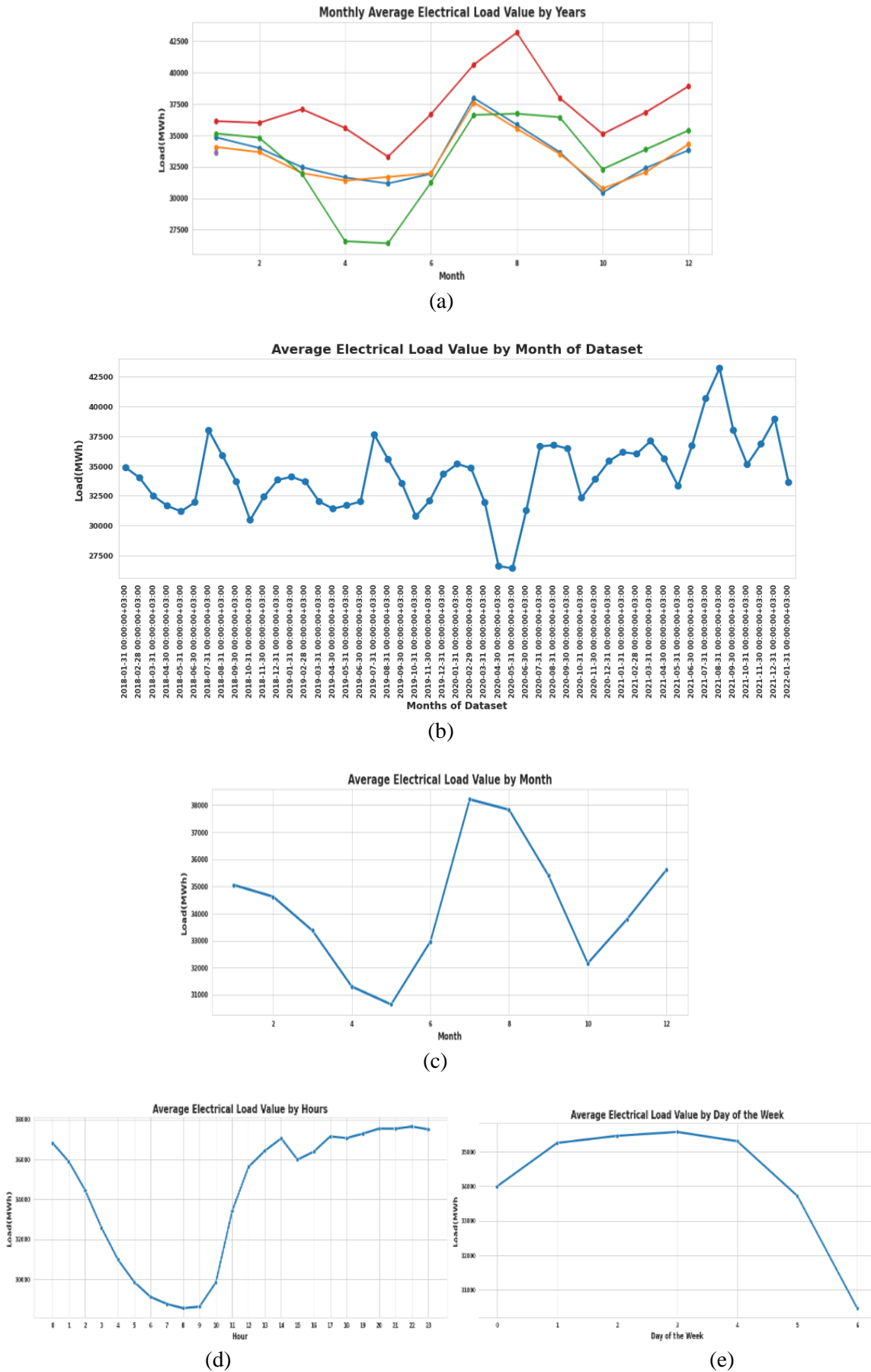
**Table 1.** Number of Parameters Calculated as a Result of Application of Models

Model	Number of Parameters
Recurrent Neural Network (RNN)	19.457
Long-Short Term Memory (LSTM)	77.441
Gated Recurrent Unit (GRU)	58.497

Learning curves were drawn to determine the learning and generalization situations of the deep learning models we designed in our application. From the learning curves of the models (mse/epochs); Considering the training loss representation of the model curves, it was observed that the RNN model had more training loss than the other two models in the first round, and the training loss decreased as the number of rounds increased. Based on the validation loss, it was observed that the loss value of the LSTM model was lower than that of the RNN and GRU models. The training and validation loss data during model training for the RNN, LSTM, and GRU methods were calculated in mse and shown in Figure 6.

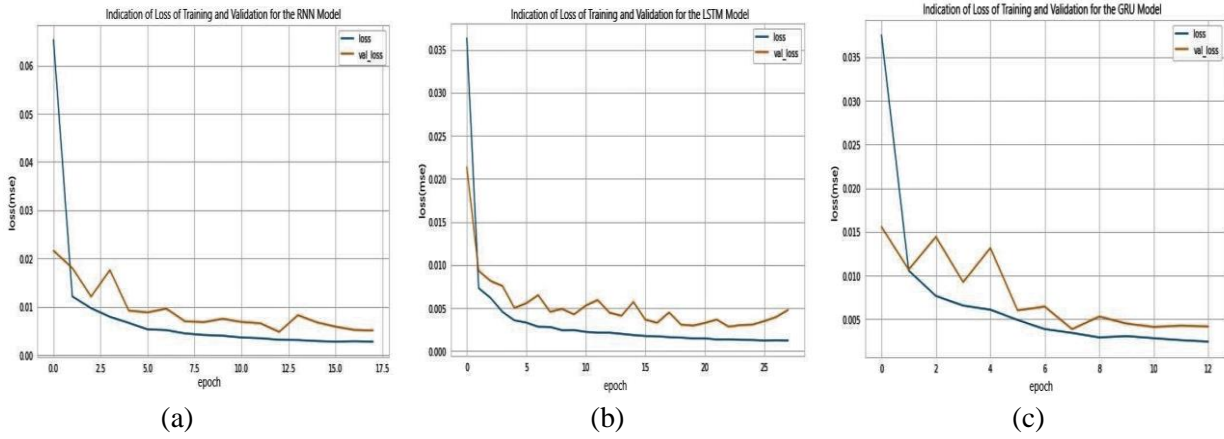
At this stage, the test data was evaluated and the prediction success of the deep learning models was measured. Actual test data values and estimated values were compared. Comparisons were first made over scaled values. In order to make a more accurate comparison, the normalized data was inversely transformed and compared with the actual test values.

Table 2 and Table 3 show the performance values of the models with different metrics.



**Figure 5.** a. Monthly Average Electrical Load Value by Years b. Average Electrical Load Value by Month of Dataset c. Average Electrical Load Value by Month d. Average Electrical Load Value by Hours e. Average Electrical Load Value by Day of the Week





**Figure 6. a.** Learning Curve of RNN Model **b.** Learning Curve of LSTM Model **c.** Learning Curve of GRU Model

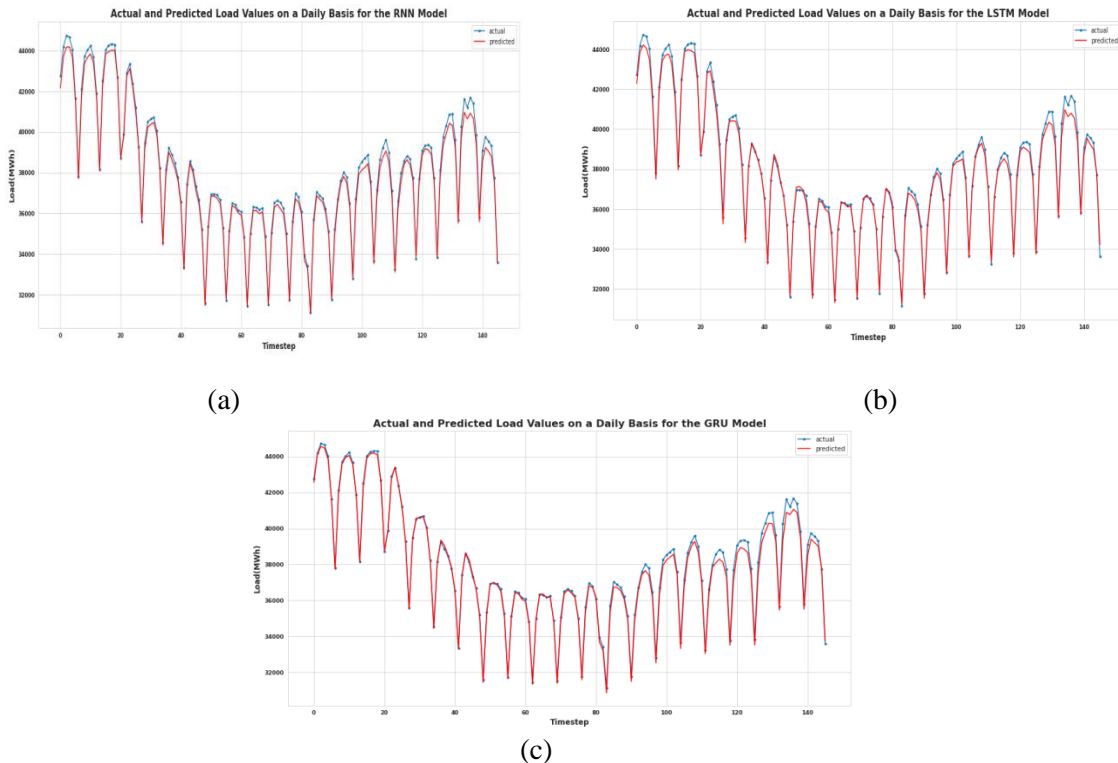
**Table 2.** Performance Evaluations with Normalized Data

Model Name/Metrics	R2 SCORE	MAE	MSE
RNN	0.9862	0.06274	0.00667
LSTM	0.9935	0.04081	0.00314
GRU	0.9908	0.05008	0.00446

**Table 3.** Performance Evaluations with Inverse Transformed Data

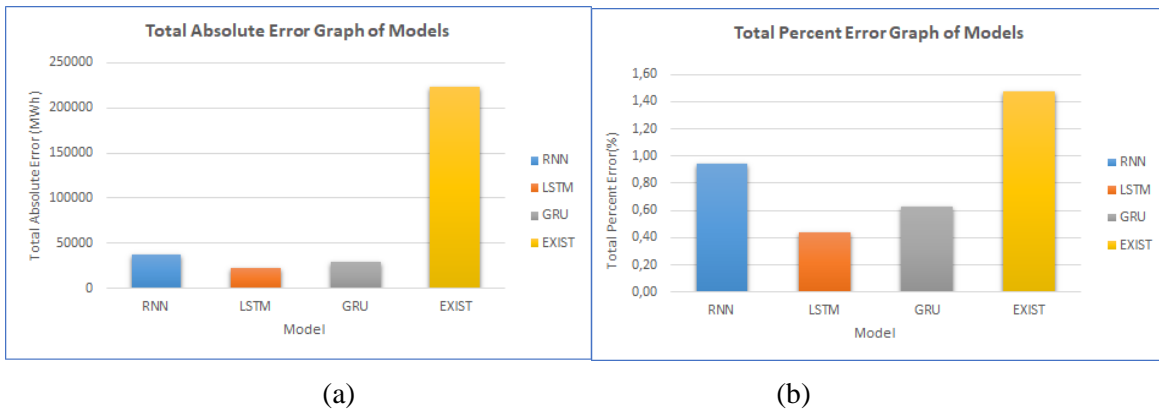
Model Name/Metrics	R2 SCORE	MAE	MSE
RNN	0.9910	256.95	89637.70
LSTM	0.9946	155.37	53995.14
GRU	0.9925	202.48	74297.94

As a result of the evaluation of the model performances, the estimation results of the RNN, LSTM, and GRU models on the test data set and the actual data are shown in Figure 7.



**Figure 7. a.** Daily Actual and Predicted Load Values Graph for RNN Model **b.** Daily Actual and Predicted Load Values Graph for LSTM Model **c.** Daily Actual and Predicted Load Values Graph for GRU Model

RNN, LSTM, and GRU models were evaluated in their original scale in terms of electrical load value, which is our target variable, and were evaluated with the RMSE evaluation metric, which gave an error in the same unit as itself. Total Absolute Error Amount and Total Percent Error Amount of the models are compared with Energy Exchange Istanbul (EXIST) demand forecasting values in MWh and are shown in Figure 8.



**Figure 8. a.** Display of RNN, LSTM, and GRU Models and EXIST Load Prediction in Total Absolute Error **b.** Display of RNN, LSTM, and GRU Models and EXIST Load Prediction in Total Percent Error

In our previous forecasting study, the Linear Model, Random Forest Model, and XGBoost models, which are classical machine learning models, were tested and the values of the models in terms of RMSE were compared (Gokce & Duman, 2022). The performances of all deep learning and machine learning techniques used for our time series electrical load estimation problem were measured in MWh using the RMSE metric and the values found are shown in Table 4.

**Table 4.** Prediction Performances of all Machine Learning and Deep Learning Techniques

Model	RMSE (MWh)
Linear Regression	2348.35
Random Forest	2075.32
XGBoost	2038.54
<b>Recurrent Neural Network (RNN)</b>	<b>299.39</b>
<b>Long-Short Term Memory(LSTM)</b>	<b>232.36</b>
<b>Gated Recurrent Unit (GRU)</b>	<b>272.57</b>

## CONCLUSION

Deep learning models perform well on time series prediction problems. This study focuses on using deep learning methods to predict Turkey's hourly electricity demand in a way that is closest to the actual consumption values. In the dataset we used to train the models, EXIST and POWER Data Access Viewer applications were used as the source. The data consists of real-time electricity consumption data and climatological (temperature) data.

Python programming language and related libraries were used in all analyzes and evaluations for electrical load forecasting. The deep learning methods used for multivariate time series forecasting problems are RNN, LSTM, and GRU methods. Forecasting methods were applied to related dataset separately and their performances on the test data were compared. When the performances in terms of Absolute Error, Squared Error, and Percentage Error were compared, the success order was LSTM, GRU, and RNN. This work to find a solution to the same forecasting problem with classical machine learning approaches has not been as successful as deep learning methods.

Among the machine learning techniques we used, the most successful machine learning technique is XGBoost with an RMSE of 2038.54 MWh. The success of the XGBoost model was followed by Linear Regression with 2075.32 MWh RMSE and Random Forest Model with 2348.35 MWh RMSE.

When the results of all deep learning models applied for the time series forecasting problem are evaluated, LSTM is determined as the most successful technique among the deep learning models with an error value of 232.36 MWh

according to the RMSE values of the predicted electricity load in its unit (MWh). The LSTM model was followed by the GRU model with 272.57 MWh RMSE and the RNN model with 299.39 MWh RMSE.

The performance comparisons of the deep learning methods used in this study were compared with the load demand forecast data made by EXIST. It has been observed that all deep learning models used gave better results than EXIST's load prediction results. Reasons such as irregular energy demand and temperature changes were effective in the partial times when forecast performances could be considered low. It was understood that diversifying the number of features and increasing the number of observations in the dataset used in the study can improve the accuracy of load demand forecasting in future studies.

## REFERENCES

- Aguilar Madrid, E. & Antonio, N.(2021). Short-term electricity load forecasting with machine learning. *Information*, 12(2), 50. <https://doi.org/10.3390/info12020050>.
- Amjady, N. (2001). Short-term hourly load forecasting using time-series modeling with peak load estimation capability. *IEEE Transactions on power systems*, 16(3), 498-505. <https://doi.org/10.1109/59.932287>.
- Aydogan, M. (2019). Performing Text Analysis Using Deep Learning Algorithms in Big Data. Doctoral Thesis. Inonu University Institute of Science and Technology, Malatya.
- Banik, R., Das, P., Ray, S. & Biswas, A. (2021). Prediction of electrical energy consumption based on machine learning technique. *Electrical Engineering*, 103(2) , 909-920. <https://doi.org/10.1007/s00202-020-01126-z>.
- Biskin, O.T. & Çifci, A. (2021). Forecasting of Turkey's Electrical Energy Consumption using LSTM and GRU Networks. *Bilecik Şeyh Edebali University Journal of Science and Technology*, 8(2), 656-667. <https://doi.org/10.35193/bseufbd.935824>.
- Chan, S., Oktavianti, I. & Puspita, V. (2019). A deep learning cnn and ai-tuned svm for electricity consumption forecasting: Multivariate time series data. In 2019 IEEE 10th Annual Information Technology, Electronics and Mobile Communication Conference (IEMCON) 0488-0494. IEEE. <https://doi.org/10.1109/IEMCON.2019.8936260>.
- Cunkas, M. & Altun, A.A. (2010). Long term electricity demand forecasting in Turkey using artificial neural networks. *Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy*, 5(3) , 279-289. <https://doi.org/10.1080/15567240802533542>.
- Chung, J., Gulcehre, C., Cho, K. & Bengio, Y. (2014). Empirical evaluation of gated recurrent neural networks on sequence modeling. arXiv preprint arXiv:1412.3555.
- Durgun, S. (2018). Long-term forecasting of Turkey's energy demand with artificial intelligence techniques, Master's Thesis. Necmettin Erbakan University Institute of Science and Technology, Konya.
- Elmas, C. (2018). Artificial intelligence applications. Seçkin Publishing.
- EXIST, Real Time Consumption Data. (2022). <https://seffaflik.epias.com.tr/electricity/electricity-consumption/ex-post-consumption/real-time-consumption>
- Gokce, M.M. & Duman, E. (2022). Performance Comparison of Simple Regression, Random Forest and XGBoost Algorithms for Forecasting Electricity Demand. In 2022 3rd International Informatics and Software Engineering Conference (IISEC) 1-6. IEEE. <https://doi.org/10.1109/IISEC56263.2022.9998213>
- Hong, T. (2010). Short term electric load forecasting. North Carolina State University.
- Kim, Y., Son, H.G., & Kim, S. (2019). Short term electricity load forecasting for institutional buildings. *Energy Reports*, 5, 1270–1280. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2019.08.086>.
- Kumar, S., Hussain, L., Banarjee, S. & Reza, M. (2018). Energy load forecasting using deep learning approach-LSTM and GRU in spark cluster. In 2018 fifth international conference on emerging applications of information technology (EAIT) 1-4. IEEE. <https://doi.org/10.1109/EAIT.2018.8470406>.
- Li, J. (2017). Assessing the accuracy of predictive models for numerical data: Not r nor r2, why not? Then what?. *PloS one*, 12(8), e0183250. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0183250>.

- Lin, Z., Cheng, L. & Huang, G. (2020). Electricity consumption prediction based on LSTM with attention mechanism. *IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering*, 15(4), 556-562. <https://doi.org/10.1002/tee.23088>
- NASA, Power Data Access Viewer. (2022). <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>.
- Nisanci, M. (2005). Electricity demand and the relationship between electricity consumption and economic growth in Turkey. *Journal of Social Economic Research*, 5(9), 107-121.
- Pervan, N., Keles, Y. (2019). Making semantic inference from Turkish texts using deep learning approaches. Doctoral Thesis. Ankara University Institute of Science and Technology, Ankara.
- Singh, A.K., Khatoon, S., Muazzam, M. & Chaturvedi, D.K. (2012) Load forecasting techniques and methodologies: A review. In 2012 2nd International Conference on Power, Control and Embedded Systems, 1-10. IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICPCES.2012.6508132>.
- Tan, M., Santos, C.D., Xiang, B. & Zhou, B. (2015). Lstm-based deep learning models for non-factoid answer selection. arXiv preprint arXiv:1511.04108.
- Yan, K., Wang, X., Du, Y., Jin, N., Huang, H. & Zhou, H. (2018). Multi-step short-term power consumption forecasting with a hybrid deep learning strategy. *Energies*, 11(11), 3089. <https://doi.org/10.3390/en11113089>.
- Yildiz, B., Bilbao, J.I. & Sproul, A.B. (2017). A review and analysis of regression and machine learning models on commercial building electricity load forecasting. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 73, 1104-1122. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.02.023>.
- Zheng, J., Xu, C., Zhang, Z. & Li, X. (2017). Electric load forecasting in smart grids using long-short-term-memory based recurrent neural network. In 2017 51st Annual conference on information sciences and systems (CISS) 1-6. IEEE.



# Kahramanmaraş Sütçü İmam University

## Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 12.12.2023  
Kabul Tarihi : 10.01.2024

Received Date : 12.12.2023  
Accepted Date : 10.01.2024

### SENTEZLENEN METAL OKSİT NANOKOMPOZİT YARDIMIYLA SUCUL ÇÖZELTİLERDEN REAKTİF AZO BOYA GİDERİMİ

### REACTIVE AZO DYE REMOVAL FROM AQUATIC SOLUTIONS USING SYNTHESIZED METAL OXIDE NANOCOMPOSITE

İlknur ŞENTÜRK<sup>1</sup> (ORCID: 0000-0002-8217-2281)

<sup>1</sup> Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, Sivas, Türkiye

\*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: İlknur ŞENTÜRK, ilknursenturk@cumhuriyet.edu.tr

#### ÖZET

Bu çalışma, kesikli adsorpsiyon prosesi ile Reaktif Orange 16 boyasının (RO 16) adsorpsiyonu için manyetik nanokompozit materyal olarak  $Fe_3O_4@ZnO@TiO_2$ 'nin kullanılma olasılığını araştırmaktadır. Adsorban dozajının, temas süresinin, boya başlangıç konsantrasyonunun ve sıcaklığın RO 16 giderim performansı üzerindeki etkilerini araştırmak için kesikli adsorpsiyon sistemi kullanılmıştır. Sentezlenen  $Fe_3O_4@ZnO@TiO_2$  nanokompozitin yüzey özellikleri ve elementel analizi için SEM ve EDS analizleri yapılmıştır. Denge izoterm verileri, 40°C'de 38,61 mg/g maksimum adsorpsiyon kapasitesi ile Langmuir modeli kullanılarak en iyi şekilde ilişkilendirilmiştir. Sözde ikinci dereceden model adsorpsiyon kinetiğini iyi bir şekilde temsil etmiş ve kemisorpsiyonu takip etmiştir. Hazırlanan  $Fe_3O_4@ZnO@TiO_2$ , reaktif boyaların atık sulardan uzaklaştırılmasında kullanılabilir etkili bir adsorbent adaydır.

**Anahtar Kelimeler:** Adsorpsiyon, Reaktif Orange 16, kompozit materyal, manyetik nanopartikül,  $Fe_3O_4@ZnO@TiO_2$

#### ABSTRACT

This work investigates the possibility of utilizing  $Fe_3O_4@ZnO@TiO_2$  as magnetic nanocomposite materials for the adsorption of reactive orange 16 dye (RO 16) through batch adsorption processing. A batch system was used to investigate the effects of adsorbent dosage, contact time, dye initial concentration, and temperature on the removal performance of RO 16. SEM and EDS analyses were performed for surface properties and elemental analysis of the synthesized  $Fe_3O_4@ZnO@TiO_2$  nanocomposite. The equilibrium isotherm data were best correlated using the Langmuir model with a maximum adsorption capacity of 38.61 mg/g at 40°C. The pseudo-second-order model well represented the adsorption kinetics and followed chemisorption. The prepared  $Fe_3O_4@ZnO@TiO_2$  is an effective adsorbent candidate for the removal of reactive dyes from wastewater.

**Keywords:** Adsorption, Reactive Orange 16, composite material, magnetic nanoparticle,  $Fe_3O_4@ZnO@TiO_2$



## GİRİŞ

Boya bazlı çevresel kirleticiler sucul organizma ve ürünlere ciddi zararlar vermektedir. Ayrıca boyalar insan sağlığını da etkilediği için alerji, cilt hastalıkları, kanser ve genetik mutasyonlara sebep olmaktadır. Bu nedenle sucul ortamlardan uzaklaştırılması oldukça önemlidir (Yıldırım, 2021). Farklı boya gruplarından birisi olan Reaktif azo boyalar selüloz materyali boyamak için kullanılır ve geniş renk aralığına sahiptir. Değerlendirmelere göre boyama endüstrisinde kullanılan boyaların yaklaşık %30'u reaktif boyadır (Ravindiran vd., 2022). Reaktif boyalar ile ilgili esas problem yüksek pH, tuz konsantrasyonu, ışığa direnç, stabilite vb. temel özellikleri nedeniyle tipik atıksu arıtma prosesleri aracılığı ile hızlıca giderilememesidir. Çevreye azo bileşiklerin salınımı tehlikelidir. Bu tehlikelilik durumu sadece onların renginden dolayı değildir aynı zamanda onların degradasyon ürünlerinin yaşam için toksik ve mutajenik olmasındandır (Obulapuram vd., 2021; Yıldırım, 2021). Bu yüzden alıcı sulara, nehirlere ve diğer su yapılarına deşarjdan önce atıksu akımlarından azo boyaları gidermek oldukça önemlidir.

Membran filtrasyon, iyon değiştirme, sedimantasyon, elektrokoagülasyon, ters osmoz ve fitoremediasyon çok sıklıkla kullanılan arıtım metotlarından bazılarıdır (Ravindiran vd., 2022). Fakat bu arıtım seçeneklerinin en büyük dezavantajı arıtım maliyeti ve gerekli olan zamandır. Koagülasyon, çöktürme, flokülasyon gibi geleneksel yaklaşımlar da seyreltik çözeltilerden boyaların çoğunu gidermede kesinlikle verimsizdir. Adsorpsiyonla arıtma tekstil endüstrisinden üretilen atıksuyun renksizleştirilmesi için yaygın olarak kullanılan bir yaklaşımdır. Diğer tekniklere göre üstünlükleri daha önce defalarca yapılan çalışmalarda gösterilmiştir (Şentürk, 2023; Şentürk & Alzein, 2020a, 2020b; Şentürk & Yıldız, 2020). Maliyet, özgünlük, kolaylık, işletme basitliği, yüksek konsantrasyonlarda bile boyalı atıksuyu arıtma yeteneği bu teknik ile ilgili avantajdır. Bu amaçla kullanılan adsorbentlerin en bilineni aktif karbondur ancak hala çok pahalı olmasından ötürü farklı alternatifler araştırılmaktadır (Obulapuram vd., 2021).

Son zamanlarda çevresel kirleticilerin giderimi amacıyla yapılan adsorpsiyon çalışmalarında metal ya da metal oksit nanomateriyaller çok sık tercih edilmektedir. Bu amaçla kullanılan metal oksitlerden birisi olan çinko oksit (ZnO) nanopartiküller, düşük maliyetle büyük ölçekte kolaylıkla üretilerek pek çok alanda uygulanabilir (F. Zhang vd., 2016). ZnO, çevre dostu olması ve sahip olduğu yüzey fonksiyonel grupları nedeniyle gelecek vaat eden malzemeler arasında yer almaktadır. Literatürde, boyaların metal oksitler, özellikle de ZnO nanopartiküller tarafından foto-bozunması üzerine çeşitli çalışmalar rapor edilmiştir (Kansal vd., 2013; Mousavi vd., 2015). Ancak boya giderimi için adsorbent olarak ZnO nanopartikülleri üzerine çok az çalışma mevcuttur (Kataria & Garg, 2017). Diğer bir metal oksit olan titanyum dioksit (TiO<sub>2</sub>) kararlı, düşük maliyetli, çevreye dost toksik olmayan bir malzemedir ancak sucul çözeltilerden ayırmak zordur (Canbaz vd., 2019a; Keklikcioğlu Çakmak & Topal Canbaz, 2020). Bu nedenle TiO<sub>2</sub>'in verimliliğini artırmak için farklı metal oksitlerle bağlanması gerekir. Bu amaçla tercih edilen metal oksitlerden birisi de demir (II, III) oksittir (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>). Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanopartiküller sahip olduğu eşsiz manyetik özelliği sayesinde sudan kolaylıkla ayrıştırılabilir (Fauzian vd., 2016; Taufik & Saleh, 2017). Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanopartiküller, basit üretim teknikleri, kararlı özellikleri, düşük toksisiteleri ve düşük maliyetleri nedeniyle manyetik bir bileşen olarak yaygın şekilde kullanılmaktadır (Fang vd., 2021). ZnO ve TiO<sub>2</sub> nanopartiküller (NPs) çok kolay bir şekilde Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> üzerine yüklenebilmektedir (Nemati vd., 2017). Bu bilgilerden yola çıkarak Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>@ZnO@TiO<sub>2</sub> kompozit nanoyapılı adsorbent sentezlenmiştir.

Bu çalışma için seçilen Reaktif Orange 16 (RO 16) biodegrade olmayan, anyonik, sülfonatlı ve reaktif azo boyadır. RO 16 boyanın gideriminde sentezlenen Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>@ZnO@TiO<sub>2</sub> kompozit nanopartikülün adsorpsiyon davranışını incelemek için bu çalışma gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamında adsorpsiyon üzerine etkili olduğu bilinen adsorbent dozu, temas süresi, kirletici konsantrasyonu ve sıcaklık gibi parametreler incelenerek deneylerden elde edilen sonuçlar kinetik ve izoterm modeller yardımıyla irdelenerek adsorpsiyon mekanizması araştırılmıştır.

## MATERYAL ve METOT

### Adsorbent

Adsorbent sentezi için birkaç aşamalı yol takip edilmiştir. Bu aşamaların her biri aşağıda açıklanmıştır.

**Birinci aşama:** 0.2 mol/L FeCl<sub>3</sub>.6H<sub>2</sub>O ve 0.1 mol/L FeSO<sub>4</sub>.7H<sub>2</sub>O 100 mL deiyonize su içerisinde ayrı ayrı hazırlandı. Ardından iki çözelti ayrı bir beherde birleştirilerek 200 mL'lik karışım 15 dakika boyunca 50°C'de karıştırıldı. Ardından pH 10-11 ayarlamak için %25'lik NH<sub>4</sub>OH çözeltisinden karışıma damla damla eklendi. Bu işlemin

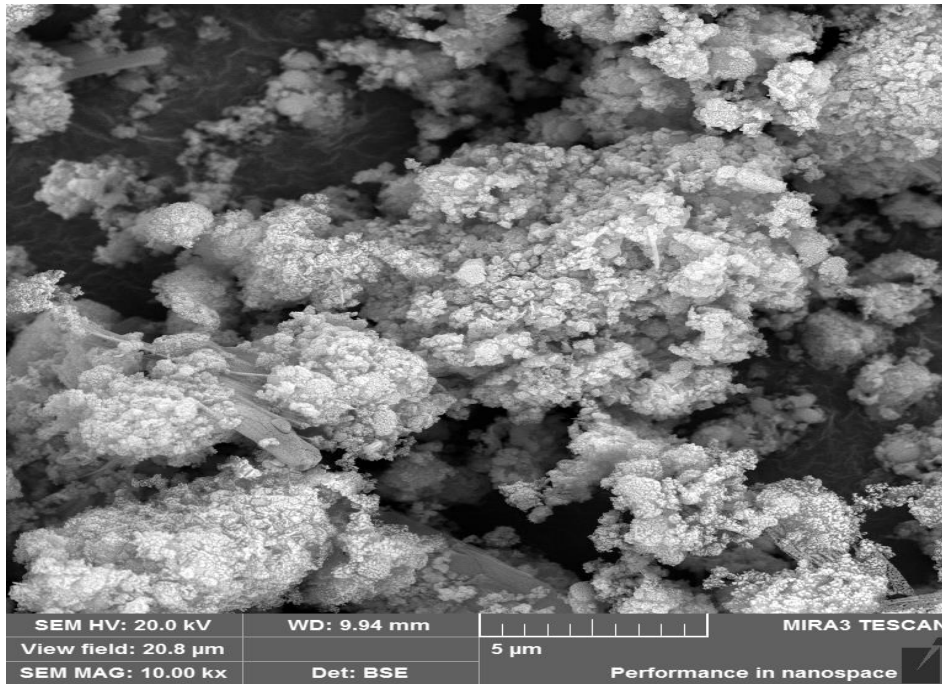
ardından 2 saat 80°C'de karıştırma işlemine devam edildi. Bu süre sonunda oluşan siyah çökelti oda ısısında karıştırmadan çökmesi için bekletildi. Oluşan çökelti mıknaatısla ayrıldıktan sonra fazla NH<sub>4</sub>OH'ın uzaklaştırılması için yıkama suyu pH'ı nötr olana kadar saf su ile yıkandı. En sonunda elde edilen manyetik Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> nanopartikülleri 60°C'de gece boyunca kurutularak kullanıma hazır hale getirildi (Zhang vd., 2014).

**İkinci aşama:** 11 g Zn(CH<sub>3</sub>COO)<sub>2</sub> 100 mL saf su içinde çözüldü. Ardından ağzı kapalı cam şişe içine yerleştirilen çözeltiye kapak üzerinde açılan küçük bir delikten 2 M NaOH çözelti pH'ı 12 olacak şekilde damla damla ilave edilerek 2 saat boyunca karıştırıldı. İyi bir karışım ve çözünme sağlayabilmek için tüm işlemler 70-80°C'de yapıldı. İşlem sonunda oluşan çökelti safsızlıkların giderilmesi için su ile birkaç kez yıkandı ve santrifüjlendi. En son aşamada oluşan ZnO nanopartiküller etüvde 60°C'de 12 saat boyunca kurutularak kullanıma hazır hale getirildi (Canbaz, Açıkel, & Açıkel, 2023; Topal Canbaz, Açıkel, & Sağ Açıkel, 2022).

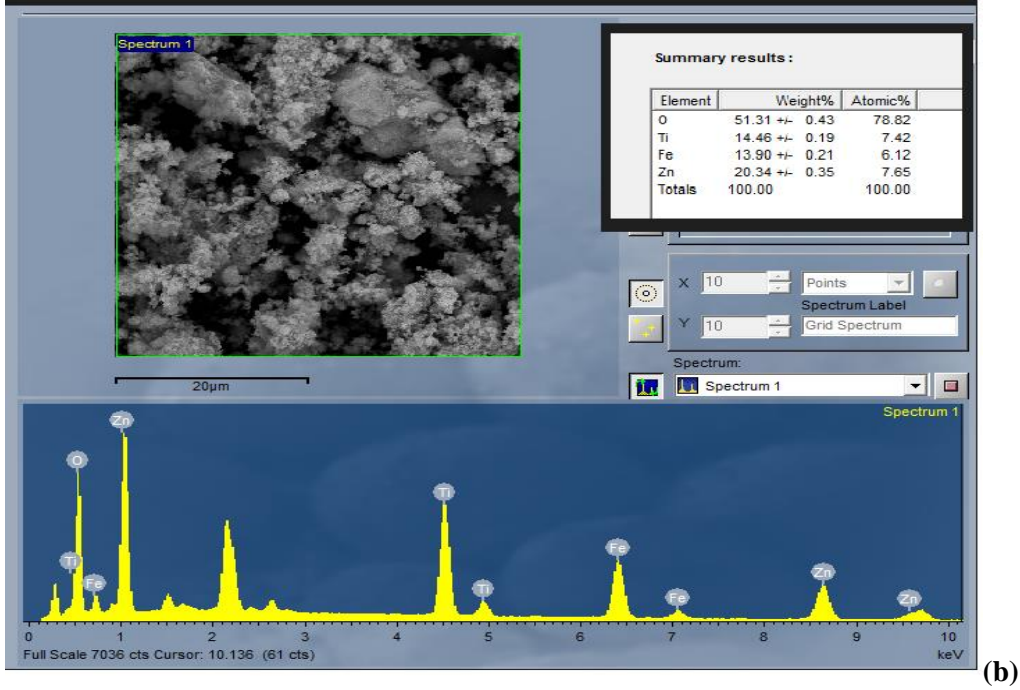
**Üçüncü aşama:** 5 mL Titanium (IV) butoxide (TBT), 40 mL ethanol ve 5 mL iso-propanol manyetik karıştırıcıda karıştırıldı. Ardından deiyonize su ile karışım 100 mL'ye tamamlandı ve beyaz bir çökelti hazırlamak için 2 g cetyltrimethyl ammonium bromide (CTAB) çözeltiye eklendi. Karışım 4 saat 80°C'de tutuldu. Karışımındaki fazla su, su banyosu içinde sabit karıştırma altında buharlaştırmayla giderildi. Bu aşamada sentezlenen materyal 12 saat 110°C'de kurutuldu. İşlem sonunda TiO<sub>2</sub> NP elde edildi (Canbaz, Çakmak, Eroğlu, & Açıkel, 2019).

**Dördüncü aşama:** Sol-gel metodu ile sentezlenen Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, ZnO ve TiO<sub>2</sub> nanopartiküller sırasıyla 1:2:1 ağırlık oranında tartılarak cam şişeye alındı ve üzerine 20 mL ethanol eklenerek ağzı kapalı bir şekilde 40°C'de 9 saat boyunca karıştırıldı. Karışımın ardından süzülüp saf su ile birkaç kez yıkanan partiküller 50°C'de kurutulduktan sonra tam kristalizasyon için 2 saat 500°C'de kül fırınında kalsine edildi (Winatapura, Dewi, Wardiyati, & Fisli, 2015). Elde edilen Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>@ZnO@TiO<sub>2</sub> kompozit nanopartikül adsorbent olarak çalışmalarda kullanıldı.

Çalışmalarda kullanılacak Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>@ZnO@TiO<sub>2</sub> nanopartikülün yüzey özelliklerini belirlemek için SEM görüntüleme ve EDS element analizleri gerçekleştirilmiştir (Şekil 1a-b). Şekil 1(a)'da görüldüğü gibi Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>@ZnO@TiO<sub>2</sub> NP düzenli, poroz ve tam karışmış bir yüzey yapısına sahiptir. Gözlemlenen yüzey yapısı adsorbent olarak kullanıma uygun olduğunu göstermektedir. Şekil 1(b)'de verilen EDS analiz sonuçlarından NP içerisindeki Fe, Zn ve Ti elementleri ve kompozit içerisindeki % ağırlık oranları görülmektedir. SEM-EDS sonuçları kompozit nanoyapılı adsorbentin başarılı bir şekilde sentezlendiğini göstermektedir.



(a)

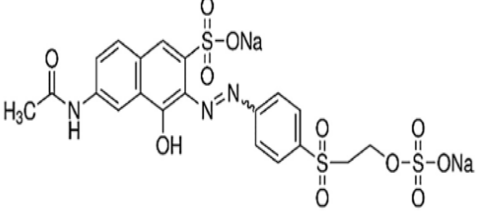


Şekil 1. Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>@ZnO@TiO<sub>2</sub> NP için a. SEM b. EDS Analiz Sonuçları

### Adsorbat

Reaktif orange 16 (RO 16) farklı boyalar arasında en çok üretilen ve kullanılan reaktif azo boyalardan biridir. Stok boya çözeltisi 1 g boyanın tartılarak 1 litre safsu içinde çözülmesiyle hazırlandıktan sonra istenilen konsantrasyona buradan seyreltmeler yapılarak deneylerde kullanılmıştır. Tablo 1’de RO 16 boyanın yapısı ve karakteristikleri verilmiştir.

Tablo 1. RO 16 Boyanın Yapısı ve Karakteristiği (Marrakchi, Ahmed, Khanday, Asif, & Hameed, 2017)

Yapı	Kimyasal formül	Molekül ağırlığı (g/mol)	$\lambda_{max}$ (nm)
	C <sub>20</sub> H <sub>17</sub> N <sub>3</sub> Na <sub>2</sub> O <sub>11</sub> S <sub>3</sub>	617,54	492

### Kesikli Adsorpsiyon Çalışmaları

Çalışma kapsamında Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>@ZnO@TiO<sub>2</sub> nanopartikülün sulu çözeltilerden RO 16 boya maddesi gideriminde temas süresi, adsorbent miktarı, başlangıç konsantrasyonu ve sıcaklık parametrelerinin etkisi araştırılmıştır. Ayrıca çalışma için gerekli uygun pH aralığını belirlemek için pH<sub>pzc</sub> değeri belirlenmiştir.

Adsorpsiyon denemeleri 125 mg/L sentetik boya çözeltisi ile 30°C sıcaklık ve 125 rpm karıştırma hızında çalışan orbital çalkalayıcıda gerçekleştirilmiştir. Çözelti içindeki adsorbent maddenin ayrımı için 4000 rpm’de 5 dakika santrifüjleme işlemi yapılmış, ardından süzöntü 492 nm maksimum dalga boyunda spektrofotometrik olarak analiz edilerek artılmadan kalan RO 16 miktarı belirlenmiştir. Bunun için çalışma öncesi elde edilen kalibrasyon doğru denkleminde ( $y=0,0291x-0,0287$   $R^2=0,9997$ ) yararlanılarak deney sonrası okunan absorban değerlerinin

konsantrasyon eşdeğerleri hesaplanmıştır. Adsorpsiyon verimi ve gram adsorbent başına adsorbe edilen RO 16 boyar madde miktarı sırasıyla Eşitlik (1) ve (2) kullanılarak hesaplanmıştır.

$$Verim (\%) = \frac{C_i - C_t}{C_i} \times 100 \quad (1)$$

$$q = \frac{(C_i - C_t)V}{m} \quad (2)$$

Burada,  $C_i$  başlangıç RO 16 konsantrasyonu (mg/L),  $C_t$  t süresinde okunan RO 16 konsantrasyonu,  $m$  adsorbent miktarı (g),  $V$  Çözelti hacmi (L) ve  $q$  ise adsorbent birim kütlesi başına adsorplanan RO 16 miktarıdır (mg/g).

### Adsorpsiyon Kinetik ve İzoterm Modelleri

Adsorpsiyon sistemi için ideal çalışma koşullarını seçmek, adsorbent malzemenin davranışını ve adsorpsiyon prosesinin kontrol mekanizmasını anlamak için adsorpsiyon kinetikleri araştırılmaktadır. Dengede adsorbent yüzeyi üzerine adsorbe olan boyanın miktarı ve dengede sıvı içinde çözünen boyanın konsantrasyonu arasındaki ilişki adsorpsiyon izotermi ile açıklanmaktadır. Adsorbent maksimum adsorpsiyon kapasitesi ve adsorbent yüzey mekanizması adsorpsiyon izotermi ile tanımlanır. Endüstriyel ölçekli adsorpsiyon prosesi tasarlayıp kurmak için gerekli bilgi izotermilerden sağlanmaktadır. Bu amaçla farklı kinetik ve izoterm modelleri deney sonuçlarına uyarlanmıştır. Reaktif Orange 16 boyar maddesinin adsorpsiyonunu araştırmak için bilinen kinetik modellerden birinci derece reaksiyon kinetiği modeli (pseudo first-order reaction), ikinci derece reaksiyon kinetiği modeli (pseudo second-order reaction), partikülüçi difüzyon modeli (intra-particle diffusion) ve Elovich modelleri ile Langmuir, Freundlich, Temkin ve Dubinin-Radushkevich adsorpsiyon izoterm modelleri kullanılmıştır.

### Kinetik Modeller

Birinci derece reaksiyon kinetiği modeli (Eşitlik 3), sıvı safhadan uzaklaştırılmak istenen kirleticinin adsorpsiyonunu tanımlamak için en yaygın olarak kullanılan hız eşitliklerinden biridir (Farouq & Yousef, 2015). Modele göre adsorban üzerindeki adsorplama bölgelerinin doluluk oranı ile boş sorpsiyon bölgelerinin sayısı arasında orantı olduğu kabul edilmektedir.

$$\ln(q_e - q_t) = \ln q_e - k_1 t \quad (3)$$

Sözde ikinci dereceden kinetik modelde (Eşitlik 4), hız sınırlayıcı aşama, adsorbent ve boya molekülleri arasında elektron alışverişi veya paylaşımı da dahil olmak üzere kimyasal adsorpsiyonu içeren yüzey adsorpsiyonudur.

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 \cdot q_e^2} + \frac{t}{q_e} \quad (4)$$

Weber & Morris, (1963) tarafından ileri sürülen partikülüçi difüzyon modeli (Eşitlik 5) adsorpsiyon prosesinde hız sınırlayıcı prosesi araştırmak için kullanılır. Modele göre elde edilen doğru denklemi sıfırdan geçer ve düz bir çizgi oluşturursa içsel difüzyon hız kontrol prosesini tek başına kontrol eder. Fakat eğri multiliner ya da sıfır noktasından geçmiyorsa birçok difüzyon mekanizması adsorpsiyon prosesini kontrol edebilir.

$$q_t = k_{id} t^{1/2} + C \quad (5)$$

Elovich kinetik model (Eşitlik 6), katı sistemler ve heterojen yüzeyler üzerine gazların kemisorpsiyonu için kullanılmıştır ve sucul çözümlerden kirleticilerin giderim çalışmasında da uygulamaları vardır. Modele göre katı yüzey heterojen enerjiye sahiptir ancak adsorpsiyon için herhangi bir mekanizma önermemektedir (Edet & Ifelebuegu, 2020).

$$q_t = \frac{1}{\beta} \ln(\alpha\beta) + \frac{1}{\beta} \ln t \quad (6)$$

3-6 nolu eşitliklerde geçen,

$q_t$ : t anında adsorbe olan boya konsantrasyonu (mg/g),



$q_e$ : Denge anında adsorbe olan boya konsantrasyonu (mg/g),  
 $k_1$ : Birinci derece hız sabiti (1/min),  
 $k_2$ : İkinci derece hız sabiti (g/mg min),  
 $K_{id}$ : Partikülüçi hız sabiti (mg/g min<sup>1/2</sup>),  
 $C$ : Film tabaka kalınlığı,  
 $\alpha$ : Adsorpsiyon hız sabiti (mg/g min),  
 $\beta$ : Desorpsiyon hız sabitidir (g/mg).

### İzoterm Modeller

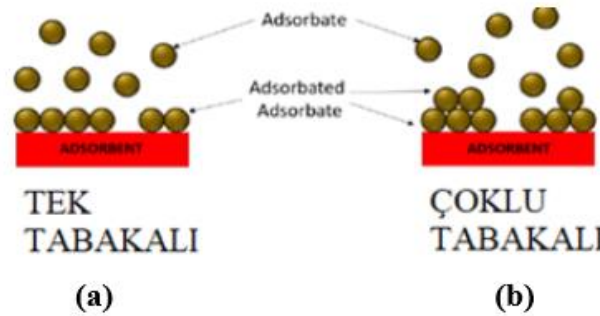
Langmuir izotermi (Eşitlik 7), adsorbent yüzeyindeki bir nokta bir kez dolduğunda o noktada daha fazla sorpsiyon gerçekleşmediğini savunan homojen yüzeylerde katı ve sıvı arasındaki denge dağılımını belirlemek için kullanılan teorik tek katmanlı kimyasal adsorpsiyon modelidir (Şekil 2(a)) (Langmuir, 1918). Langmuir eşitliğinin boyutsuz bir sabiti olan ayırma faktörü ( $R_L$ ) izotermi hakkında fikir edinmek için hesaplanır (Eşitlik 8).

$$\frac{1}{q_e} = \frac{1}{K_L q_{max}} C_e + \frac{1}{q_{max}} \quad (7)$$

$$R_L = \frac{1}{(1+K_L C_0)} \quad (8)$$

Freundlich izotermi (Eşitlik 9), heterojen yüzeye sahip adsorbantın her molekülünün farklı adsorpsiyon potansiyeline sahip olduğunu ve böylece adsorbant yüzeyinde adsorbe edilen moleküller arasındaki etkileşime izin veren çok katmanlı bir yapı oluştuğu varsayımına dayanmaktadır. Çoklu tabaka oluşturan adsorbe moleküller arasındaki etkileşim, bağların güçlü olmadığını varsayar. Şekil 2(b) adsorpsiyonda çok katmanlı oluşumu göstermektedir (Ragadhita & Nandiyanto, 2022).

$$\ln q_e = \ln K_F + \frac{1}{n} C_e \quad (9)$$



**Şekil 2.** Tek Tabaka ve Çok Tabaka Oluşumunun Gösterimi **a.** Langmuir, **b.** Freundlich izotermi (Ragadhita & Nandiyanto, 2022)

Temkin izoterm modeli (Eşitlik 10), adsorpsiyon ısısının artan adsorbant yüzeyi ile ters orantılı olduğu ve adsorpsiyonun maksimum bağlanma enerjisine kadar enerji dağılımının düzgün bir şekilde olduğunu varsaymaktadır (Balarak & McKay, 2021). Bu modele göre, adsorbantın yüzeyi arttıkça, tabaka içindeki tüm moleküllerin adsorpsiyon ısısı ( $\Delta H$ , sıcaklığın bir fonksiyonu) logaritmik olarak değil lineer olarak azalır (Edet & Ifelebuegu, 2020).

$$q_e = B \ln(A C_e) \quad (10)$$

Dubinin–Radushkevich modeli (D-R) (Eşitlik 11), adsorbentın gözenek yapısının adsorpsiyon prosesine etkisini incelemektedir. Genellikle heterojen bir yüzey üzerinde Gauss enerji dağılımı ve adsorpsiyon mekanizmasını ifade etmek için uygulanır. D-R izoterm modeli, homojen bir yüzeyi veya sabit adsorpsiyon potansiyelini dikkate almadığı



için Langmuir izoterminden daha üstündür (Hu & Zhang, 2019). Adsorbentler için adsorpsiyon denge ilişkisi adsorpsiyon potansiyeli ( $\epsilon$ ) kullanılarak sıcaklıktan bağımsız olarak ifade edilir (Eşitlik 12).

$$\ln q_e = \ln q_s - \beta \epsilon^2 \quad (11)$$

$$\epsilon = RT \ln \left( 1 + \frac{1}{C_e} \right) \quad (12)$$

$$E = \frac{1}{\sqrt{2\beta}} \quad (13)$$

Adsorbat molekülde adsorpsiyon serbest enerjisi ( $E$ = kJ/mol) Eşitlik 13 ile hesaplanır.

Eşitliklerde geçen,

$q_e$ : Denge anında birim adsorban ağırlığı başına adsorplanan kirletici miktarı (mg/g),

$K_L$ : Adsorpsiyon enerjisi ile ilgili sabit (L/mg),

$q_m$ : Maksimum adsorpsiyon kapasitesi (mg/g),

$C_e$ : Denge anından sonra çözeltideki kirletici konsantrasyonu (mg/L),

$K_F$ : Adsorbanın adsorpsiyon kapasitesini gösteren sabit ( $\text{mg}^{1-(1/n)}\text{L}^{1/n} \text{g}^{-1}$ ),

$n$ : Adsorpsiyon yoğunluğunu gösteren sabit,

$B$ : Adsorpsiyon ısı sabiti ve  $B = RT/b$  ile ifade edilir.

$b$ : Adsorpsiyon ısı ile ilgili Temkin sabiti (J/mol),  $T$ : Mutlak sıcaklık (K),  $R$ : Gaz sabiti (8.314 J/molK),

$A$ : Temkin denge sabiti (L/g),

$q_s$ : Teorik izoterm doygunluk kapasitesi (mg/g),

$\beta$ : D-R izoterm sabiti ( $\text{mol}^2/\text{kJ}^2$ )

$\epsilon$ : Polanyi potansiyelidir.

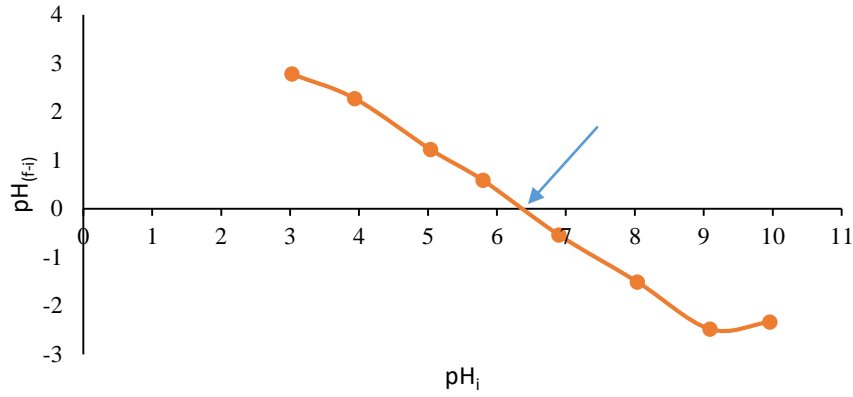
## BULGULAR VE TARTIŞMA

### *pH Etkisi*

pH ve  $\text{pH}_{\text{pzc}}$  değerleri adsorpsiyon çalışmalarında oldukça önemlidir. Çözeltinin pH değeri, adsorbent materyal ve boyanın yüzey yükünü etkiler. Sıfır yük noktası ( $\text{pH}_{\text{pzc}}$ ), adsorbentlerin yüzey yükünü gösterir ve yüzeyin net yükünün sıfır olduğu pH değeridir.  $\text{pH}_{\text{pzc}}$ , adsorpsiyon mekanizmasını daha iyi anlamak için kullanılan bir kavramdır. Bu nedenle  $\text{pH}_{\text{pzc}}$  çalışması yapılmasının daha uygun olduğuna karar verilmiş ve Sadaf & Bhatti, (2014)'e göre  $\text{pH}_{\text{pzc}}$  değeri belirlenmiştir.

pH değeri sıfır yük noktasını aştığında yani  $\text{pH} > \text{pH}_{\text{pzc}}$  olduğunda net bir negatif ya da anyonik yük adsorbent yüzeyini kaplar. Bu durumda yüzey, kation değişim reaksiyonuna göre pozitif yükleri çeker. Fakat pH değeri sıfır yük noktasının altında kalıyorsa yani  $\text{pH} < \text{pH}_{\text{pzc}}$  ise yüzey pozitif yüke sahip olacağından anyon değişim reaksiyonuna göre anyonları yani negatif yükleri yüzeyine çeker. Adsorbent yüzeyi ve yüzeye tutulması istenen adsorbent molekülleri arasındaki etkileşim aslında tamamen kullanılan adsorbent  $\text{pH}_{\text{pzc}}$  değerine bağlıdır.  $\text{pH}_{\text{pzc}}$  değeri Şekil 3'de verilen grafikte eğrinin x eksenini kesim noktası okunarak belirlenmiştir. Bu değer sucul çözülden RO 16 giderimi için optimum pH değeri aralığını vermektedir.

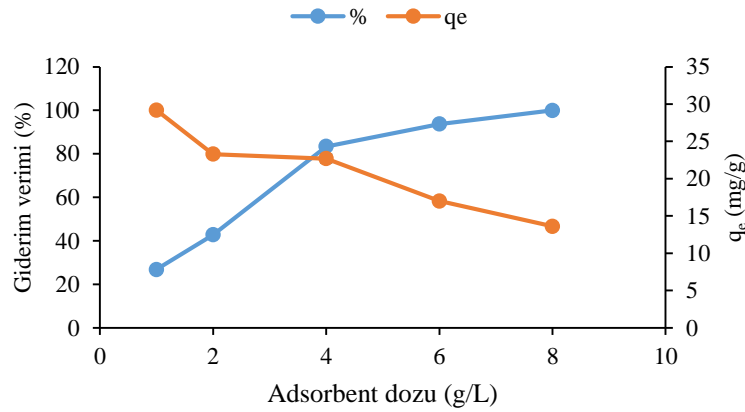
Bu çalışma için seçilen boya çözeltisinin doğal pH değeri 6,03'dür. RO 16 sucul çözelti içinde negatif yükler taşıdığından etkili bir boya giderimi için adsorbent pozitif yüzey yüküne sahip olmalıdır (Calvete vd., 2010). Adsorbent  $\text{pH}_{\text{pzc}}$  değeri ( $\text{pH}_{\text{pzc}}$ ) 6,4 olarak bulunmuştur yani çözelti pH değeri ( $6,03 < \text{pH}_{\text{pzc}}$  (6,4)). Bu sonuç adsorbent yüzeyindeki pozitif yük yoğunluğunun arttığını bunun sonucunda negatif yüklü RO 16 bileşiklerinin adsorpsiyonunun da arttığını göstermektedir. Bu nedenle işletme kolaylığı ve maliyet parametresi de göz önüne alınarak çözeltinin kendi pH değerinde çalışılmasına karar verilmiştir. Aksi durumda pH 6'dan daha küçük pH değerlerinde adsorpsiyon denemelerinin yapılması gerekirdi ki bu durumda asidik koşulların sağlanması için ilave bir maliyet kalemi demektir.



Şekil 3. Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>@ZnO@TiO<sub>2</sub> Nanopartikülün pH<sub>pzc</sub> Değeri

### Adsorbent Dozunun Etkisi

Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>@ZnO@TiO<sub>2</sub> nanokompozit partikülün RO 16 boyar maddesini adsorplama yeteneği üzerine adsorbent dozunun etkisi Şekil 4’de görüldüğü şekilde gerçekleşmiştir. En iyi verimin alındığı adsorbent madde dozunu belirlemek için 1-2-4-6 ve 8 g/L adsorbent dozlarında 125 rpm karıştırma hızı ve 30°C sıcaklıkta, pH ayarlaması olmadan 125 mg/L RO 16 boya çözeltisi ile 4 saat boyunca adsorpsiyon çalışması yapılmıştır.



Şekil 4. Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>@ZnO@TiO<sub>2</sub> NC Dozunun RO 16 Boyar Maddesi Giderimine Etkisi (C<sub>0</sub>: 125 mg/L RO 16, 125 rpm, 30°C, pH 6,03, süre 4 saat)

Adsorpsiyon için elde edilebilir bölgelerin miktarındaki artışla ilişkili olarak artan adsorbent dozu ile giderim veriminin arttığı bilinmektedir. Ancak belli bir noktadan sonra adsorbent dozundaki daha fazla artışta adsorbent yüzeyi üzerindeki adsorpsiyon bölgelerinin agregasyonu nedeniyle adsorpsiyon kapasitesinde gözle görülür bir düşüş yada azalma olmaktadır (Jun vd., 2019). Şekil 4’de görüldüğü üzere adsorbent dozundaki artışla birlikte RO 16 boyar maddesinin giderim verimi de artmıştır. Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>@ZnO@TiO<sub>2</sub> NC üzerine RO 16 adsorpsiyonunda belirgin hızlı artış 1-6 g/L adsorbent doz aralığında olmuştur. 6 ve 8 g/L adsorbent dozlarında sırasıyla %93,70 ve %99,95 giderim verimleri elde edilmiştir. 1 g/L adsorbent dozajında bu değer %26,81’dir.

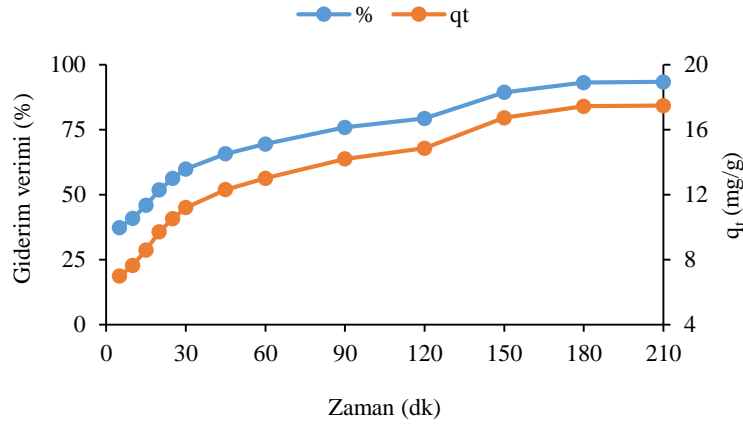
Adsorpsiyon kapasitesi ise artan adsorbent dozu ile birlikte azalmıştır. 1 g/L adsorbent dozajında adsorpsiyon kapasitesi 29,19 mg/g iken 8 g/L adsorbent dozajında bu değer 13,60 mg/g’dır. Adsorbent konsantrasyonundaki artış ile boya molekülleri için daha fazla aktif bölge oluşmaktadır. Ancak aynı koşullarda boya konsantrasyonu sabit kaldığı için adsorpsiyon kapasitesi azalır çünkü bütün bu bölgeleri doldurmak için boya moleküllerinin sayısı yetersiz olduğundan doygun olmayan sorpsiyon bölgelerinin sayısından dolayı adsorpsiyon kapasitesi azalacaktır (Gamal, Rizk, & El-Hefny, 2021).

Elde edilen sonuçlar ve daha yüksek boya konsantrasyonları ile çalışılması durumunda hedeflenen yüksek arıtım verimleri nedeniyle 6 g/L adsorbent dozajı daha sonraki çalışmalar için seçilmiştir.

### Temas Süresinin Etkisi

Sabit bir başlangıç boya konsantrasyonunda adsorpsiyon zamanını optimize etmek, adsorpsiyon denge süresini belirlemek için deneyler gerçekleştirilmiştir. Önceden belirlenen zaman aralıklarında alınan örnekler analiz edilerek çözültide kalan RO 16 boya konsantrasyonu belirlenmiş, bu değerlere göre hesaplanan giderim verimleri ve adsorpsiyon kapasiteleri Şekil 5’de sunulmuştur. Görselden ilk 30 dakikada yaklaşık %60 arıtım sağlandığı dolayısıyla reaksiyonun ilk aşamalarında arıtımın hızlı olduğu ilerleyen süreçte 150 dakikadan sonra denge durumunun olduğu 180. dakikada %93,13 arıtım sağlandığı görülmüştür. Adsorpsiyonun ilk dakikalarında adsorbent yüzeyinde bulunan bol miktardaki boş alanın süre ilerledikçe dolmasından dolayı giderim veriminde azalma hatta sabitlenme görülmesi son derece normal bir süreçtir (Köklü & Özer, 2018).

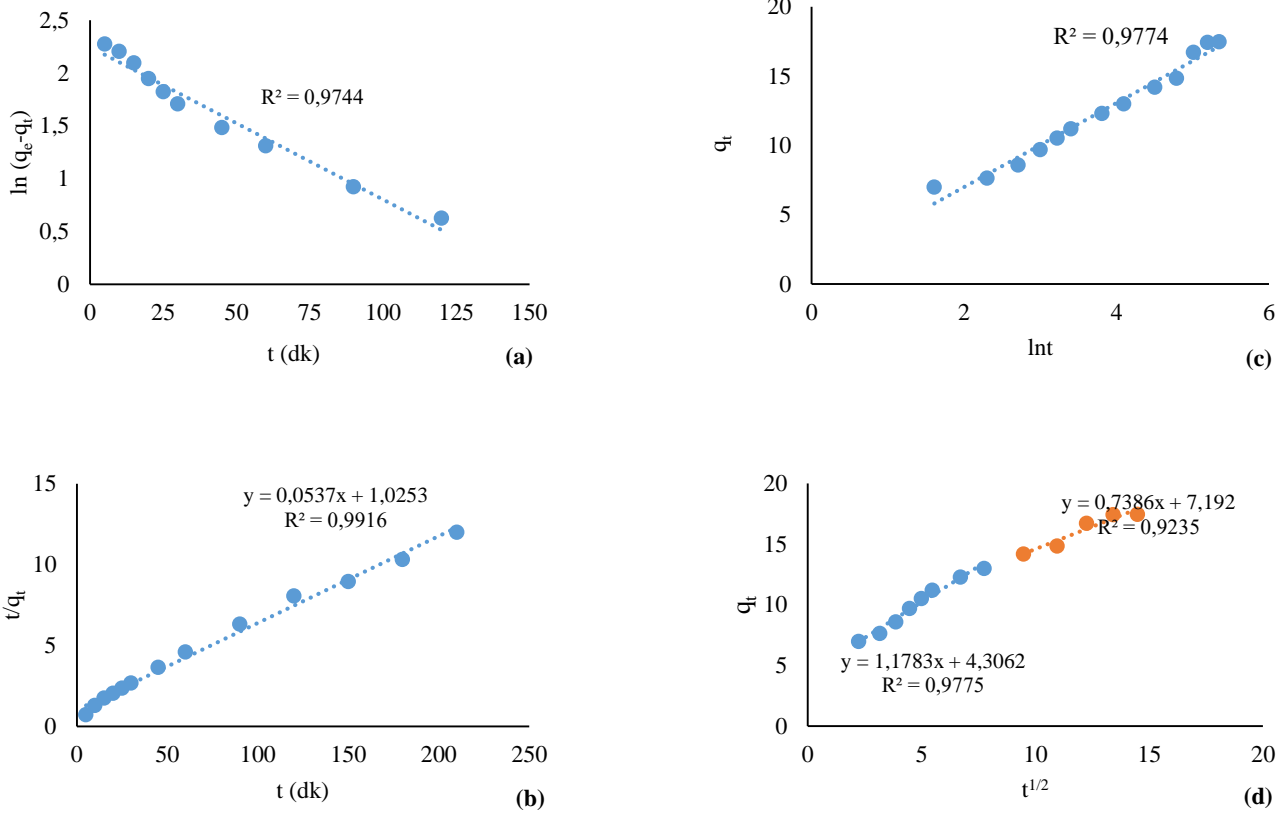
Aynı zaman diliminde yani 30-180 dk aralığında birim adsorbent başına adsorplanan madde miktarı 11,21 mg/g’dan 17,44 mg/g’a yükselmiştir. 150. dakikadan sonra temas süresinin devam etmesiyle RO 16 giderim veriminde çok fazla bir değişim olmamakla birlikte 180. dakikadaki giderim ve  $q_t$  değerleri denge değerleri olarak kabul edilmiştir. Çalışmanın bu bölümünden elde edilen deneysel sonuçlar kinetik model hesaplamalarında kullanılmıştır.



Şekil 5.  $Fe_3O_4@ZnO@TiO_2$  NC ile RO 16 Boyar Maddesinin Giderim Verimi Üzerine Temas Süresinin Etkisi ( $C_0$ : 125 mg/L RO 16, 125 rpm, 30°C, pH 6,03, adsorbent dozu 6 g/L)

### Adsorpsiyon Kinetik Modelleri

$Fe_3O_4@ZnO@TiO_2$  nanokompozit üzerine RO 16 boya maddesinin sorpsiyon mekanizmasını anlamak ve reaksiyonun hız kontrol eden aşamasını tanımlamak için sorpsiyon kinetik modeller çalışılmıştır. Araştırma yalancı birinci derece reaksiyon kinetiği modeli (Lagergren's pseudo-first order equation), yalancı ikinci derece reaksiyon kinetiği modeli (Ho's pseudo-second-order), Elovich modeli ve partikülüçi difüzyon modeli (intraparticle diffusion model) ile temas süresi çalışmalarından elde edilen deneysel kinetik verinin modellenmesiyle gerçekleştirilmiştir. Kinetik parametreler söz konusu kinetik modellerin doğrusal grafiklerinden hesaplanmış ve bu modellere ait grafikler Şekil 6'da sunulmuştur.



Şekil 6. RO 16 Boyar Maddesinin Adsorpsiyonunda a. Birinci Derece b. İkinci Derece c. Elovich ve d. Partikül İçi Difüzyon Modeli

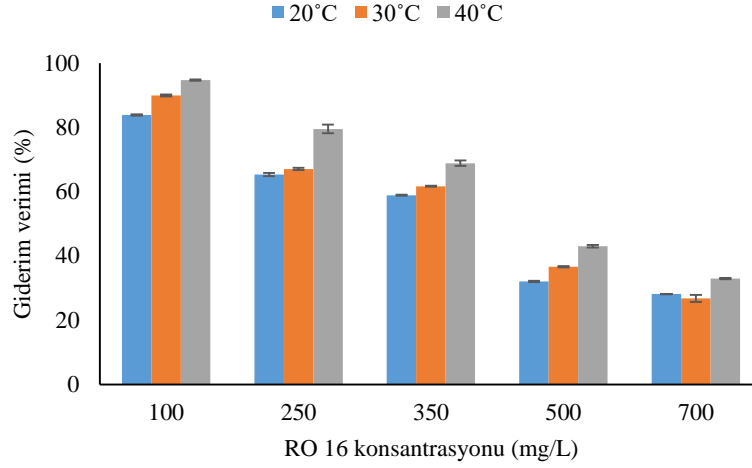
Şekil 6'dan elde edilen korelasyon katsayı değerleri incelendiğinde 0,9916 gibi yüksek bir  $R^2$  değeri ile deneysel sonuçların yalancı ikinci derece reaksiyon kinetiği modeli ile uyumlu olduğu görülmüştür. Ayrıca deneysel olarak belirlenen sorpsiyon miktarı ( $q_{e,den.}$ , 17,44 mg/g) ile hesaplanan sorpsiyon miktarı ( $q_{e,hes.}$ , 18,62 mg/g) birbirine oldukça yakındır. Bu sonuç giderim hızının yüzey bağlanma bölgelerinin sayısı ile ilişkili olduğunu ortaya çıkarmıştır. Hız belirleyici aşama, adsorbent ve adsorbat molekülleri arasındaki elektronların değişimi ya da paylaşımıyla olan kemisorpsiyon prosesiyle tanımlanabilir.

Aşamalı adsorpsiyon sürecini araştırmak ve difüzyon mekanizmasını analiz etmek için partiküli difüzyon modeli uygulanmıştır (Şekil 6d). Şekilden  $q_t$  ve  $t^{1/2}$  arasındaki düz çizginin orijinden itibaren temelde doğrusal olmadığı ve  $Fe_3O_4@ZnO@TiO_2$  NC ile RO 16 adsorpsiyonunun iki aşamalı prosten oluştuğu görülmektedir. İlk aşamadaki hızlı artış, en dış yüzeydeki adsorpsiyon aşamasıdır ve anlık bir difüzyondur. İkinci aşama kademeli adsorpsiyon aşamasıdır ve burada hız partiküli difüzyon prosesi ile kontrol edilir (Balarak & McKay, 2021). Bu yüzden, adsorpsiyon hızı iki aşama tarafından ortaklaşa kontrol edilmiş ve partiküli difüzyon tek hız sınırlayıcı adım değildir. İlk basamağın eğimi ile karşılaştırıldığında, ikinci basamağın eğimi daha düşüktür. Bu durum boya moleküllerinin difüzyon süresi arttıkça  $Fe_3O_4@ZnO@TiO_2$  NC üzerindeki aktif bölgelerin azalmasıyla ilişkili olabilir (Song vd., 2022).

### Boya Konsantrasyonunun Etkisi

$Fe_3O_4@ZnO@TiO_2$  NC kullanarak RO 16 boyar maddesinin potansiyel giderimi farklı sıcaklıklarda (20-30-40°C) başlangıç boya konsantrasyonunun 100-250-350-500 ve 700 mg/L şeklinde değiştirilmesiyle çalışılmıştır (Şekil 7). Tüm sıcaklık değerlerinde konsantrasyon artışı ile birlikte giderim verimlerinin azaldığı görülmektedir. 100 mg/L başlangıç RO 16 boyar madde konsantrasyonunda %94,65 arıtım verimine ulaşılırken aynı sıcaklıkta (40°C) 700 mg/L RO 16 konsantrasyonunda verim %32,89'dur. Bu sonuç, boya molekülleri ile etkileşim için  $Fe_3O_4@ZnO@TiO_2$  nanokompozit yüzeyinin açıkta kalan bağlanma bölgelerinin kullanılabilirliği ile ilişkilendirilebilir. Yine tüm konsantrasyonlarda sıcaklık artışı ile giderim verimlerinin çok fazla değişmediği tüm

sıcaklık değerlerinde en yüksek giderimin 100 mg/L başlangıç RO 16 konsantrasyonunda olduğu görülmektedir. Elde edilen sonuçlar, adsorpsiyon ünitesinin performansı açısından bir ön arıtım ile RO 16 boyar madde konsantrasyonunun düşürülmesi gerekliliği ve sıcaklık kontrolüne ihtiyaç duyulmadığı şeklinde yorumlanabilir.

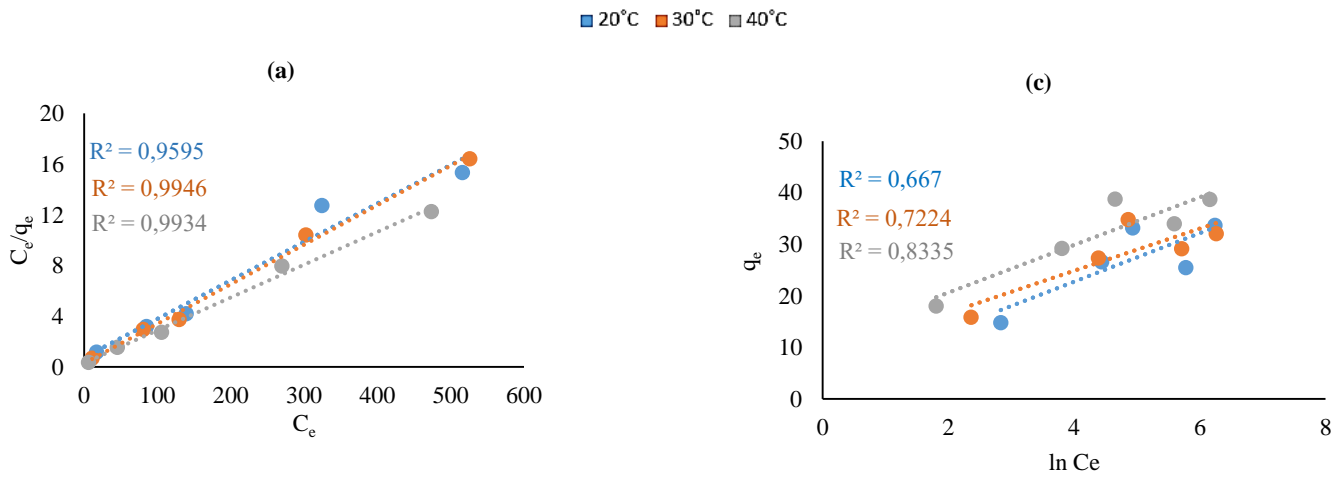


Şekil 7. Farklı Sıcaklıklarda  $Fe_3O_4@ZnO@TiO_2$  Nanokompozitin Sorpsiyon Kapasitesi Üzerine RO 16 Konsantrasyonunun Etkisi (125 rpm, pH 6,03, adsorbent dozu 6 g/L, süre 3 saat)

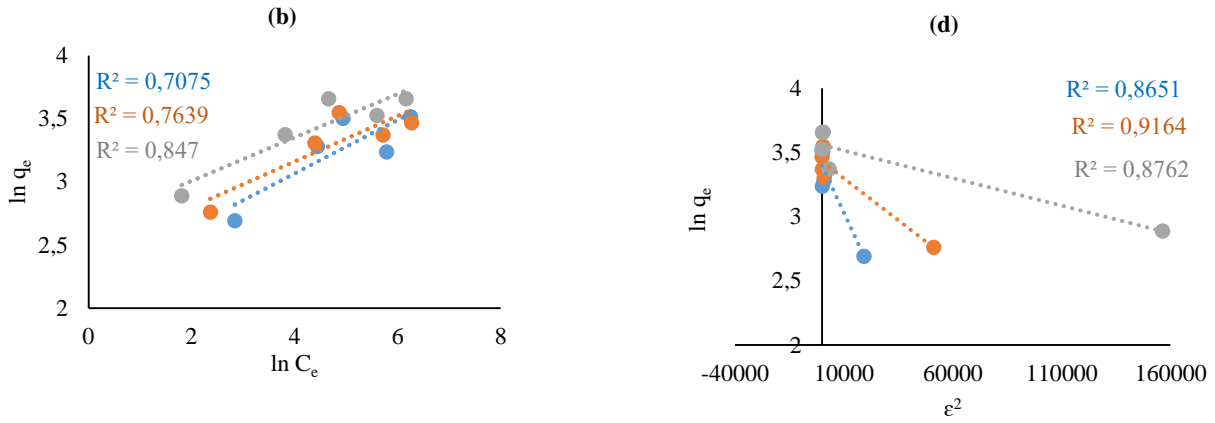
### Adsorpsiyon İzoterm Modelleri

Denge verisinin izoterm modellemesi adsorbent yüzeyi ile adsorbat iyonlarının etkileşim tarzını açıkladığı için büyük öneme sahiptir. Adsorpsiyon izotermi dengede çözelti içinde adsorplanmadan kalan boya konsantrasyonuna karşı adsorplanan miktarın grafiğe geçirilmesi ile grafiksel olarak ifade edilebilmektedir.

$Fe_3O_4@ZnO@TiO_2$  NC üzerine RO 16 boyar maddesinin adsorpsiyonundan elde edilen deneysel veriler Langmuir, Freundlich, Temkin ve Dubinin-Radushkevich adsorpsiyon izoterm modellerine farklı sıcaklıklarda uygulanmıştır. İzoterm modellerine ait denklemler (Eşitlik 7-13) ile elde edilen izoterm grafikleri ve sabitler sırasıyla Şekil 8 ve Tablo 2’de verilmiştir.







**Şekil 8.** Farklı Sıcaklıklarda Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>@ZnO@TiO<sub>2</sub> NC Üzerine RO 16 Boyar Maddesinin Adsorpsiyonu İçin İzoterm Modeller **a.** Langmuir **b.** Freundlich **c.** Temkin ve **d.** Dubinin–Radushkevich Modeli

Langmuir model, adsorbent üzerindeki yüzey bölgelerinin homojen dağıldığını ve adsorbe olan moleküllerin sadece tek bir tabaka ile kaplandığını varsayar. Moleküller yüzey üzerindeki tüm bu bölgeleri doldurduğunda daha fazla adsorpsiyon meydana gelmez ve adsorbent ile adsorbe olan moleküller arasında etkileşim olmaz. Langmuir eşitliğinin boyutsuz bir sabiti olan ayırma faktörü ( $R_L$ ) değeri izotermin tipi hakkında fikir verir.  $R_L$  değerinin azalması adsorpsiyon prosesinin cazip olduğunu gösterir.  $0 < R_L < 1$  ise tercih edilebilir adsorpsiyon (normal adsorpsiyon),  $R_L > 1$  ise adsorpsiyon tercih edilmez (desorpsiyon prosesi baskındır),  $R_L = 0$  ise tek yönlü/tersinemez (kuvvetli adsorpsiyon) ve  $R_L = 1$  ise lineerdir (Ragadhita & Nandiyanto, 2022). Tablo 2’de gösterildiği gibi  $R_L$  bütün çalışılan sıcaklıklarda 0 ile 1 arasındadır ve artan sıcaklık ile azalmaktadır. Bu sonuç gösteriyor ki Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>@ZnO@TiO<sub>2</sub> NC tarafından RO 16 boyasının giderimi tercih edilebilir ve adsorpsiyon için yüksek sıcaklık şart değildir.

Freundlich izoterminden elde edilen n değeri adsorbat çözelti ve adsorpsiyon arasındaki lineerlik derecesini gösterir. n=1 lineer adsorpsiyon, n<1 kemisorpsiyon prosesi, n>1 fizikosorpsiyon prosesi,  $0 < 1/n < 1$  tercih edilebilir adsorpsiyon,  $1/n > 1$  işbirlikçi adsorpsiyon baskındır (Ragadhita & Nandiyanto, 2022). Tablo 2’deki n değerlerine bakıldığında her üç sıcaklıkta da n>1 olduğu bu nedenle burada fizikosorpsiyon mekanizmasının aktif olduğu görülmüştür.

Temkin izoterminden elde edilen B sabiti adsorpsiyon enerjisinin varyasyonu olarak tanımlanır. B>1 ise adsorpsiyon prosesi ekzotermik, tersi durumda ise endotermiktir (B<1). Tablodaki B değerleri tüm sıcaklık değerlerinde B>1 J/mol olduğu için bu durum elektrostatik etkileşim mekanizması ile ekzotermik adsorpsiyon reaksiyonunu gösterir (Asadi, Abdollahi, Gharabaghi, & Boroumand, 2020).

Dubinin-Radushkevich izoterm ile hesaplanan E değeri >16 kJ/mol ise adsorpsiyonda kimyasal iyon değişim mekanizması etkindir fakat bu değer 1-16 kJ/mol ise fiziksel adsorpsiyon etkindir (Şentürk, 2023). Bu çalışmada üç sıcaklık değeri için de E değeri 16 kJ/mol den azdır ve bu adsorbent yüzeyi üzerindeki fizikosorpsiyon prosesini doğrular.

**Tablo 2.** Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>@ZnO@TiO<sub>2</sub> NC ile RO 16 Boyar Maddesinin Giderimi İçin İzoterm Parametreleri

Model parametresi		Sıcaklık °C		
		20	30	40
Langmuir	q <sub>max</sub> (mg/g)	32,89	32,05	38,61
	K <sub>L</sub> (L/mg)	0,041	0,106	0,086
	R <sub>L</sub>	0,197	0,086	0,104
	R <sup>2</sup>	0,9595	0,9946	0,9934
Freundlich	K <sub>F</sub> (mg/g)	9,185	11,488	14,338
	n	4,717	5,555	5,817
	R <sup>2</sup>	0,7075	0,7639	0,847
Temkin	A (L/g)	2,273	7,744	11,7
	B (J/mol)	4,7135	4,1084	4,619
	R <sup>2</sup>	0,667	0,7224	0,8335
Dubinin-Radushkevich (D-R)	q <sub>s</sub> (mg/g)	29,82	30,815	35,093
	β (mol <sup>2</sup> /kJ <sup>2</sup> )	4E-05	1E-05	4E-06
	E (kJ/mol)	0,112	0,224	0,354
	R <sup>2</sup>	0,8651	0,9164	0,8762

Sentezlemiş olduğumuz Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>@ZnO@TiO<sub>2</sub> kompozit nano yapılı adsorbentın sucul çözeltiden RO 16 giderimi için adsorbent olarak kullanım verimliliği literatürde kullanılan diğer adsorbent materyaller ile adsorpsiyon kapasitesinin karşılaştırılması yoluyla değerlendirildi (Tablo 3). Diğer rapor edilen adsorbent materyaller ile karşılaştırıldığında kullanmış olduğumuz kompozit materyalin RO 16 boyasının adsorpsiyonu için nispeten makul bir kapasiteye sahip olduğu anlaşılmaktadır. Bu yüzden Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>@ZnO@TiO<sub>2</sub> nanokompozit materyal sucul çözeltiden RO 16 boyasını ayırmak için yapılacak işlemlerde faydalı bir adsorbent olarak kullanılabilir.

**Tablo 3.** Farklı Adsorbentler Tarafından Adsorplanan RO 16 Boyar Maddesi İçin Sorpsiyon Kapasitesi, q<sub>max</sub> (mg/g) Değerlerinin Karşılaştırılması

Adsorbent	Max. Langmuir adsorpsiyon kapasitesi (mg/g)	Referans
Ct-AhP.	72,17	(Chandarana, Subburaj, Kumar, & Kumar, 2021)
CS50SP50 composite adsorbent	190,96	(Marrakchi, Khanday, Asif, & Hameed, 2016)
Activated alumina	263	
m-Cs-PVA/FA	123,8	(Malek, Jawad, Ismail, Razuan, & ALothman, 2021)
Magnetic chitosan-fly ash/Fe3O4	66,9	(Jawad, Malek, Abdulhameed, & Razuan, 2020)
Carbonized fish ( <i>Labeo rohita</i> ) scales (CFS)	105,8	(Marrakchi vd., 2017)
Chitosan cross-linked (beads)	30	(Kimura, Laranjeira, De Fávère, & Furlan, 2002)
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> @ZnO@TiO <sub>2</sub> NC	38,61	<b>Bu çalışma</b>

## SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Çalışmadan elde edilen sonuçlar sentezlenen Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>@ZnO@TiO<sub>2</sub> nano yapılı kompozit materyalin RO 16 boyar madde gideriminde adsorbent materyal olarak etkili bir şekilde kullanılabileceğini göstermektedir. Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>@ZnO@TiO<sub>2</sub> NC ile RO 16 boyasının hız sınırlayıcı basamağı ikinci derece kinetik model ile uyumlu bulunmuştur. Bu sonuç her boya molekülünün kemisorpsiyonunun adsorbent yüzeyinde meydana geldiğini gösterir. Adsorpsiyonu en iyi tanımlayan izoterm modeli Langmuir adsorpsiyon modeli olmuştur. Buradan boya moleküllerinin homojen olarak dağılan adsorpsiyon enerjisi ile yüzeyde bir tekli tabaka oluşturduğu anlaşılmaktadır. Adsorbent için pH<sub>pzc</sub> değeri 6,4 olarak belirlenmiştir. Ayrıca düşük boya konsantrasyonlarında adsorpsiyon işleminin daha etkin olduğu ve sıcaklık kontrolüne çok da ihtiyaç duyulmadığı belirlenmiştir.

## KAYNAKLAR

Asadi, R., Abdollahi, H., Gharabaghi, M., & Boroumand, Z. (2020). Effective removal of Zn (II) ions from aqueous solution by the magnetic MnFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> and CoFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> spinel ferrite nanoparticles with focuses on synthesis, characterization, adsorption, and desorption. *Advanced Powder Technology*, 31(4), 1480-1489. <https://doi.org/10.1016/j.appt.2020.01.028>

- Balarak, D., & McKay, G. (2021). Utilization of MWCNTs/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> as adsorbent for ciprofloxacin removal: Equilibrium, kinetics and thermodynamic studies. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, 56(3), 324-333. <https://doi.org/10.1080/10934529.2021.1873674>
- Calvete, T., Lima, E. C., Cardoso, N. F., Vaghetti, J. C. P., Dias, S. L. P., & Pavan, F. A. (2010). Application of carbon adsorbents prepared from Brazilian-pine fruit shell for the removal of reactive orange 16 from aqueous solution: Kinetic, equilibrium, and thermodynamic studies. *Journal of Environmental Management*, 91(8), 1695-1706. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2010.03.013>
- Canbaz, G. T., Açıklık, Ü., & Açıklık, Y. S. (2023). Removal of heavy metal by using green synthesis ZnO NPs and ZnO-HNT composite. *Biomass Conversion and Biorefinery*. <https://doi.org/10.1007/s13399-023-04393-5>
- Canbaz, G. T., Çakmak, N. K., Eroğlu, A., & Açıklık, Ü. (2019). Removal of Acid Orange 74 from wastewater with TiO<sub>2</sub> nanoparticle. *International Advanced Researches and Engineering Journal* 03(01): 075-080.
- Chandarana, H., Subburaj, S., Kumar, P. S., & Kumar, M. A. (2021). Evaluation of phase transfer kinetics and thermodynamic equilibria of Reactive Orange 16 sorption onto chemically improved Arachis hypogaea pod powder. *Chemosphere*, 276, 130136. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.130136>
- Edet, U. A., & Ifelebuegu, A. O. (2020). Kinetics, Isotherms, and Thermodynamic Modeling of the Adsorption of Phosphates from Model Wastewater Using Recycled Brick Waste. *Processes*, 8(6), 665. <https://doi.org/10.3390/pr8060665>
- Fang, L., Wu, H., Shi, Y., Tao, Y., & Yong, Q. (2021). Preparation of Lignin-Based Magnetic Adsorbent from Kraft Lignin for Adsorbing the Congo Red. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology*, 9, 691528. <https://doi.org/10.3389/fbioe.2021.691528>
- Farouq, R., & Yousef, N. S. (2015). Equilibrium and Kinetics Studies of adsorption of Copper (II) Ions on Natural Biosorbent. *International Journal of Chemical Engineering and Applications*, 6(5), 319-324. <https://doi.org/10.7763/IJCEA.2015.V6.503>
- Fauzian, M., Jalaludin, S., Taufik, A., & Saleh, R. (2016). Sonocatalytic Methylene Blue in The Presence of Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>-CuO-TiO<sub>2</sub> Nanocomposites Heterostructure. *Journal of Physics: Conference Series*, 710, 012006. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/710/1/012006>
- Gamal, R., Rizk, S. E., & El-Hefny, N. E. (2021). The adsorptive removal of Mo(VI) from aqueous solution by a synthetic magnetic chromium ferrite nanocomposite using a nonionic surfactant. *Journal of Alloys and Compounds*, 853, 157039. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.157039>
- Hu, Q., & Zhang, Z. (2019). Application of Dubinin–Radushkevich isotherm model at the solid/solution interface: A theoretical analysis. *Journal of Molecular Liquids*, 277, 646-648. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2019.01.005>
- Jawad, A. H., Malek, N. N. A., Abdulhameed, A. S., & Razuan, R. (2020). Synthesis of Magnetic Chitosan-Fly Ash/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> Composite for Adsorption of Reactive Orange 16 Dye: Optimization by Box–Behnken Design. *Journal of Polymers and the Environment*, 28(3), 1068-1082. <https://doi.org/10.1007/s10924-020-01669-z>
- Jun, B.-M., Kim, S., Kim, Y., Her, N., Heo, J., Han, J., Yoon, Y. (2019). Comprehensive evaluation on removal of lead by graphene oxide and metal organic framework. *Chemosphere*, 231, 82-92. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.05.076>
- Kansal, S. K., Lamba, R., Mehta, S. K., & Umar, A. (2013). Photocatalytic degradation of Alizarin Red S using simply synthesized ZnO nanoparticles. *Materials Letters*, 106, 385-389. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2013.05.074>
- Kataria, N., & Garg, V. K. (2017). Removal of Congo red and Brilliant green dyes from aqueous solution using flower shaped ZnO nanoparticles. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 5(6), 5420-5428. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2017.10.035>
- Keklikcioğlu Çakmak, N., & Topal Canbaz, G. (2020). TiO<sub>2</sub> Nanopartikülü ve TiO<sub>2</sub>/Aktif Çamur Sentezi ile Sulu Çözümlerden Cu (II) İyonlarının Adsorpsiyonu. *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*. 10 (1), 86-98. <https://doi.org/10.17714/gumusfenbil.514285>
- Kimura, I. Y., Laranjeira, M. C. M., De Fávère, V. T., & Furlan, L. (2002). The interaction between reactive dye containing vinylsulfone group and chitosan microspheres. *International Journal of Polymeric Materials*, 51(8), 759-768. <https://doi.org/10.1080/714975829>

- Köklü, R., & Özer, Ç. (2018). Maliyetsiz bir adsorban olan sigara külü kullanılarak boyarmadde giderimi. *SAÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 22(2), 174-180. <https://doi.org/10.16984/saufenbilder.329234>
- Langmuir, I. (1918). The Adsorption of Gases On Plane Surfaces of Glass, Mica and Platinum. *Journal of the American Chemical Society*, 40(9), 1361-1403. <https://doi.org/10.1021/ja02242a004>
- Malek, N. N. A., Jawad, A. H., Ismail, K., Razuan, R., & ALOthman, Z. A. (2021). Fly ash modified magnetic chitosan-polyvinyl alcohol blend for reactive orange 16 dye removal: Adsorption parametric optimization. *International Journal of Biological Macromolecules*, 189, 464-476. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.08.160>
- Marrakchi, F., Ahmed, M. J., Khanday, W. A., Asif, M., & Hameed, B. H. (2017). Mesoporous carbonaceous material from fish scales as low-cost adsorbent for reactive orange 16 adsorption. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 71, 47-54. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2016.12.026>
- Marrakchi, F., Khanday, W. A., Asif, M., & Hameed, B. H. (2016). Cross-linked chitosan/sepiolite composite for the adsorption of methylene blue and reactive orange 16. *International Journal of Biological Macromolecules*, 93, 1231-1239. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2016.09.069>
- Mousavi, S. M., Mahjoub, A. R., & Abazari, R. (2015). Green synthesis of ZnO hollow sphere nanostructures by a facile route at room temperature with efficient photocatalytic dye degradation properties. *RSC Advances*, 5(130), 107378-107388. <https://doi.org/10.1039/C5RA19507A>
- Nemati, A., Haider, W., Ghanbarnezhad, S., Rahman, Z. U., & Ahmed, S. N. (2017). *Synthesis and Characterization of Nanocomposite of Functionalized Graphene Oxide with Multi Core-Shell Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>-ZnO-TiO<sub>2</sub> Nanoparticles*. Program adı: International Conference of Theoretical and Applied Nanoscience and Nanotechnology. <https://doi.org/10.11159/tann17.111>
- Obulapuram, P. K., Arfin, T., Mohammad, F., Khiste, S. K., Chavali, M., Albalawi, A. N., & Al-Lohedan, H. A. (2021). Adsorption, Equilibrium Isotherm, and Thermodynamic Studies towards the Removal of Reactive Orange 16 Dye Using Cu(I)-Polyaniline Composite. *Polymers*, 13(20), 3490. <https://doi.org/10.3390/polym13203490>
- Ragadhita, R., & Nandiyanto, A. B. D. (2022). Curcumin Adsorption On Zinc Imidazole Framework-8 Particles: Isotherm Adsorption Using Langmuir, Freundlich, Temkin, And Dubinin-Radushkevich Models. *Journal of Engineering Science and Technology* 17(2), 1078 - 1089.
- Ravindiran, G., Gaddam, K., & Sunil, K. (2022). Experimental Investigation on Reactive Orange 16 Removal Using Waste Biomass of *Ulva prolifera*. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2022, 1-8. <https://doi.org/10.1155/2022/7323588>
- Sadaf, S., & Bhatti, H. N. (2014). Batch and fixed bed column studies for the removal of Indosol Yellow BG dye by peanut husk. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 45(2), 541-553. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2013.05.004>
- Song, G., Shi, Y., Wang, H., Li, A., Li, W., Sun, Y., & Ding, G. (2022). Effective sorptive removal of five cationic dyes from aqueous solutions by using magnetic multi-walled carbon nanotubes. *Water Science and Technology*, 85(7), 1999-2014. <https://doi.org/10.2166/wst.2022.090>
- Şentürk, İ. (2023). Effective adsorption of Congo red by eco-friendly granite-modified magnetic chitosan nanocomposite (G@Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>@CS). *Biomass Conversion and Biorefinery*. <https://doi.org/10.1007/s13399-023-04826-1>
- Şentürk, İ., & Alzein, M. (2020a). Adsorption of Acid Violet 17 onto Acid-Activated Pistachio Shell: Isotherm, Kinetic and Thermodynamic Studies. *Acta Chim Slov* 67(1), 55–69. <https://doi.org/10.17344/acsi.2019.5195>
- Şentürk, İ., & Alzein, M. (2020b). Adsorptive removal of basic blue 41 using pistachio shell adsorbent—Performance in batch and column system. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 16, 100254. <https://doi.org/10.1016/j.scp.2020.100254>
- Şentürk, İ., & Yıldız, M. R. (2020). Highly efficient removal from aqueous solution by adsorption of Maxilon Red GRL dye using activated pine sawdust. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 37(6), 985-999. <https://doi.org/10.1007/s11814-020-0526-1>
- Taufik, A., & Saleh, R. (2017). *Combination of ternary Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/TiO<sub>2</sub>/CuO nanocomposites and nanographene platelets: High performance photo and sonocatalysis*. 030037. Solo, Indonesia. <https://doi.org/10.1063/1.4968290>

Topal Canbaz, G., Açikel, U., & Sağ Açikel, Y. (2022). ZnO-Kitosan Kompoziti ile Ağır Metal Giderimi. *European Journal of Science and Technology*, 35, 603-609. <https://doi.org/10.31590/ejosat.1094734>

Weber, W. J., & Morris, J. C. (1963). Kinetics of Adsorption on Carbon from Solution. *Journal of the Sanitary Engineering Division*, 89(2), 31-60.

Winatapura, D. S., Dewi, S. H., Wardiyati, S., & Fisli, A. (2015). *Photocatalytic Activity of Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>/SiO<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub> Composite by Mechanochemical Preparation*. Indonesian Journal of Materials Science, 16(2), 54-58. <https://doi.org/10.17146/jsmi.2015.16.2.4015>

Yildirim, A. (2021). Removal of the Anionic Dye Reactive Orange 16 by Chitosan/Tripolyphosphate/Mushroom. *Chemical Engineering & Technology*, 44(8), 1371-1381. <https://doi.org/10.1002/ceat.202100077>

Zhang, F., Chen, X., Wu, F., & Ji, Y. (2016). High adsorption capability and selectivity of ZnO nanoparticles for dye removal. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 509, 474-483. <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2016.09.059>

Zhang, P., Mo, Z., Han, L., Zhu, X., Wang, B., & Zhang, C. (2014). Preparation and Photocatalytic Performance of Magnetic TiO<sub>2</sub>/Montmorillonite/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> Nanocomposites. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 53(19), 8057-8061. <https://doi.org/10.1021/ie5001696>





# Kahramanmaraş Sütçü İmam University Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 22.12.2023  
Kabul Tarihi : 15.03.2024

Received Date : 22.12.2023  
Accepted Date : 15.03.2024

## KENEVİR TOHUMU YAĞI VE NAOH-KOH KULLANILARAK ÜRETİLEN METİL ESTERLERİN MOTORİNLE HARMANLANMASI İLE ELDE EDİLEN BİYOYAKITLARIN KİNEMATİK VİSKOZİTE DEĞERLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

### COMPARISON OF KINEMATIC VISCOSITY VALUES OF BIOFUELS PRODUCED BY BLENDING METHYL ESTERS PRODUCED USING HEMP SEED OIL AND NAOH-KOH WITH DIESEL FUEL

*Fatmanur DEMİRBAŞ<sup>1</sup>* (ORCID: 0009-0007-9649-8681)

*Volkan ASLAN<sup>1\*</sup>* (ORCID: 0000-0002-5354-2474)

<sup>1</sup> Yozgat Bozok Üniversitesi, Makina Mühendisliği Bölümü, Yozgat, Türkiye

\*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Volkan ASLAN, volkan.aslan@bozok.edu.tr

#### ÖZET

Fosil yakıtların tükenme tehlikesi, bu yakıtlardan enerji üretimi ile havaya salınan sera gazlarının küresel iklim değişikliğine olumsuz etkileri ve ekolojik dengenin sarsılması nedenlerinden dolayı alternatif yakıtların kullanımı hayati önem kazanmıştır. Alternatif yakıtlardan biri olan biyodizel; uygun emisyon ve yanma profili, karbon nötr özelliği, yüksek parlama noktası, çok yönlü kullanımı nedeniyle son zamanlarda büyük ilgi görmektedir. Bu çalışmada, kenevir yağının, sodyum hidroksit ve potasyum hidroksit varlığında, metanol ile reaksiyonu sonucunda biyodizel üretimi gerçekleştirilmiştir. Her iki katalizörün en uygun biyodizel sentezi için katalizör ağırlığı (0,4–1,0 %ağ.), alkol:yağ molar oranı (3:1–9:1), reaksiyon sıcaklığı (30–60°C) ve reaksiyon süresi (30–75 dk.) parametreleri klasik metot kullanılarak optimize edilmiştir. Sodyum hidroksit ile yapılan denemelerde %94,89 biyodizel verimi elde edilirken, potasyum hidroksit kullanılarak gerçekleştirilen çalışmada %95,91 biyodizel verimi sağlanmıştır. Optimum sonuçlarda üretilen yakıtlar dizel yakıtı ile hacimsel olarak %10, %20, %30, %40, %50, %60, %70, %80 ve %90 oranlarında harmanlanmış ve karışım yakıtların 40°C’de kinematik viskozite değerleri belirlenmiştir. Sonuç olarak, karışım yakıtların ASTM D6751 ve EN 14214 standartlarına uygun olduğu ve sodyum hidroksit ile üretilen yakıtların potasyum hidroksitle elde edilen yakıtlara göre daha düşük kinematik viskoziteye sahip olduğu tespit edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Biyodizel, kinematik viskozite, kenevir tohumu, sodyum hidroksit, potasyum hidroksit

#### ABSTRACT

The use of alternative fuels has become vitally important due to the danger of depletion of fossil fuels, the negative effects of greenhouse gases released into the air through energy production from these fuels on global climate change, and the disruption of ecological balance. Biodiesel, one of the alternative fuels; has recently attracted great attention due to its suitable emission and combustion profile, carbon neutral feature, high flash point, and versatile use. In this study, biodiesel was produced as a result of the reaction of hemp oil with methanol in the presence of sodium hydroxide and potassium hydroxide. For the most suitable biodiesel synthesis of both catalysts, catalyst weight (0.4–1.0 wt%), alcohol: oil molar ratio (3:1–9:1), reaction temperature (30–60 °C), and reaction time (30–75 min.) were determined. min.) parameters were optimized using the classical method. While 94,89% biodiesel yield was obtained in the trials conducted with sodium hydroxide, 95.91% biodiesel yield was achieved in the study using potassium hydroxide. The fuels produced with optimum results were blended with diesel fuel at 10%, 20%, 30%, 40%, 50%, 60%, 70%, 80% and 90% by volume, and the kinematic viscosity values of the blended fuels at 40°C were determined. As a result, it was determined that the blended fuels comply with ASTM D6751 and EN 14214 standards

ToCite: DEMİRBAŞ, F., & ASLAN, V., (2024). KENEVİR TOHUMU YAĞI VE NAOH-KOH KULLANILARAK ÜRETİLEN METİL ESTERLERİN MOTORİNLE HARMANLANMASI İLE EDİLEN BİYOYAKITLARIN KİNEMATİK VİSKOZİTE DEĞERLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 27(2), 539-553.

and that fuels produced with sodium hydroxide have lower kinematic viscosity than fuels obtained with potassium hydroxide.

**Keywords:** Biodiesel, kinematic viscosity, hemp seed, sodium hydroxide, potassium hydroxide

## GİRİŞ

Enerji, birçok üretim ve tüketim faaliyetinin temel girdisi, ekonomik büyümenin ana kaynağı ve sosyal kalkınmanın en önemli parametrelerinden biridir. Fiziksel bir bakış açısından enerji kullanımı, ekonomik üretkenliği ve endüstriyel büyümeyi yönlendirir (Önder & Ağır, 2023; Pablo-Romero & Sánchez-Braza, 2015). Bilim ve teknolojinin gelişmesi ve nüfusun sürekli büyümesiyle birlikte, kaynaklara olan toplam talep de önemli ölçüde artmaktadır. Hem yenilenme hızı günümüzdeki tüketim hızını karşılayacak düzeyde olmaması hem de çevreye verdiği zararların çok olmasına rağmen insanoğlunun bağımlı olduğu birçok kaynak yenilenemeyen kaynaklardan oluşmaktadır (Liu & Ren, 2021). Fosil kaynaklar bakımından zengin olmayan ülkelerde enerjide dışa bağımlılık ve enerji arz problemleri ortaya çıkmaktadır (Yıldırım, 2019). Yenilenebilir yakıtlar, bu dezavantajların en aza indirgenmesinde ve yerli kaynakların kullanılmasıyla dışa bağımlılığın azaltılmasında son derece önemlidir (Anani, 2020). Biyodizel, yeşil bir enerji olarak fosil yakıtlara uygun bir alternatif olabilir. Bu enerji kaynağı, dünyanın enerji talebini kısa sürede karşılayabilecek en potansiyel sürdürülebilir güç kaynaklarından biridir. Biyodizel, uygun emisyon ve yanma profili, karbon nötr özelliği, yüksek parlama noktası, çok yönlü kullanımı nedeniyle son zamanlarda büyük ilgi görmektedir (Shrivastava vd., 2021; Wang, 2019).

Ham yağda viskoziteyi azaltmak için birçok yöntem olmasına rağmen, dizel yakıtı yakın ürün oluşumu, ticarileştirme potansiyeli, hafif reaksiyon koşulları, yenilenebilirlik, ucuz ve yüksek dönüşüm vb. avantajları ile transesterifikasyon metodu en çok tercih edilen yöntemdir (Zahan & Kano, 2018; Ahmad vd., 2012). Transesterifikasyon, trigliserit içeren yağların, bir katalizör eşliğinde, kısa zincirli alkollerle bir dizi ardışık, geri dönüşümlü reaksiyondan oluşur. Bu reaksiyonda, trigliseritler adım adım digliseritlere, monogliseritlere ve en sonunda dibe çöken gliserole ve üstte estere dönüştürülür (Long vd., 2021). Biyodizel prosesinde transesterifikasyon metodu, üretim maliyeti ve verimliliği açısından önemli bir rol oynamaktadır. Transesterifikasyon reaksiyonunun etkinliği ve bütünlüğü üzerinde alkol:yağ molar oranı, katalizör tipi ve konsantrasyonu, reaksiyon süresi, reaksiyon sıcaklığı gibi parametreler farklı etki derecelerine sahiptir. Bu parametrelerin birbirleriyle olan bağıntılarını analiz etmek ve ideal optimizasyon metodolojisini belirlemek maliyet ve ürün verimliliği açısından önem arz etmektedir (Elango vd., 2019; Abbah vd., 2016).

Viskozite, yoğunluk, setan sayısı ve ısıl değer yakıt özellikleri, motor performansı ve egzoz emisyon değerlerini direkt etkileyen önemli parametrelerdir (Ramírez-Verduzco, 2012). Kinematik viskozite özelliği; yakıt atomizasyonu, yağlama, püskürtme özellikleri, çarpma mesafesi ve yanma kalitesini önemli ölçüde etkiler (Sáez-Bastante vd., 2016; Lin & Lin, 2012). Yüksek viskozite değeri, enjeksiyonda daha büyük damlacıklar oluşturma eğilimindedir ve bu da zayıf atomizasyona neden olur. Bu durum motor tortu oluşumu, enjektörlerin ve yakıt pompalarının aşınması, fazla yakıt tüketimi, egzoz dumanı ve emisyon artışına neden olmaktadır (Folayan vd., 2019; Martínez vd., 2014). Diğer yandan düşük yakıt viskozite, sızıntıya ve yetersiz yağlamaya neden olabilir (Ghazali vd., 2015). Buradan anlaşılabilceği gibi kinematik viskozite değeri belirli bir aralık içinde olmalıdır. Bu aralık, 40 °C'de sırasıyla Avrupa ve Amerikan standartlarına göre 3,5–5,0 mm<sup>2</sup>/s ve 1,9–6,0 mm<sup>2</sup>/s arasında belirlenmiştir (Bhuiya vd., 2016).

Biyodizel üretmek için bitkisel yağlar, hayvansal yağlar ve atık yemeklik yağlar gibi çeşitli hammaddeler kullanılmaktadır. Biyodizel üretimi için yenilenebilir hammadde kaynaklarının seçimi ülkeler veya bölgeler için ortak bir standart değildir. Hammadde seçiminde maliyet ve yerel bulunabilirlik gibi temel faktörler önemli bir rol oynayabilmektedir (Anwar, 2021). Kenevir (*Cannabis sativa* L.) insanlarla ilgili uzun ve karmaşık bir tarihe sahiptir. Endüstriyel kenevir, yiyecek ve içecek, kozmetik ve kişisel bakım ürünleri, besin takviyeleri, kumaş ve tekstil, iplik ve eğrilmiş elyaflar, kağıt, inşaat ve yalıtım malzemeleri, reçine, kağıt hamuru, yakıt gibi çok çeşitli ürünlerin üretiminde tercih edilen bir tarım ürünüdür (Johnson, 2018; Wirtshafter, 2004). Bu bitki en hızlı büyüyen biyokütlelerden biridir ve hükümetlerin 21. yüzyılda ulaşmayı hedeflediği yeşil gelecek hedefleriyle uyumludur. Ayrıca geniş bir adaptasyon kabiliyetine sahiptir ve çok az pestisit veya herbisit gerektirir (Alcheikh, 2015). Kenevir çevresel, sosyal ve ekonomik açıdan sürdürülebilir tarımsal üretim sistemleri için fırsatlar sağlamaktadır. Her kenevir çeşidi hava, toprak ve su sağlığına belirgin bir şekilde katkıda bulunmaktadır (Phipps & Schluttenhofer, 2022). Yıllık bir bitki olan kenevirin iç kısmı odunsudur ve yaprakları alt gövdede kavisli olma eğilimindedir. Tohumları yumurta

şeklinde ve 3 ile 4 mm arası büyüklüktedir. Tohum kabuğunun rengi mozaiktir ve kahverengiden koyu griye kadar değişir (Strzelczyk vd., 2022; Small, 2015). Kenevir, anavatanı Orta Asya olan ve buradan tüm dünyaya yayılan otsu bir bitkidir. Asya ve Avrupa’da doğal olarak yetiştiği gibi Amerika, Afrika ve Avustralya’da da bulmak mümkündür (Iriondo-DeHond, 2023). Dünyanın kenevir üreticilerinden biri olan Türkiye, son dönemde kenevir yatırımını ve desteğini artırmıştır. Türkiye'nin son dönemde uyguladığı kenevir politikasının amacı, birçok farklı alanın ihtiyacını karşılayacak şekilde kenevir üretmek ve üretimini yaygınlaştırmaktır. Bu kapsamda, Yozgat Bozok Üniversitesi 2020 yılında “Endüstriyel Kenevir” alanında uzmanlaşmış bir üniversite olarak hükümetten onay almış ve araştırma-geliştirme çalışmalarına başlamıştır.

Sınırlı deneylerle maksimum biyodizel verimine ulaşmak için optimizasyon teknikleri popülerdir. Klasik metot, yanıt yüzeyi metodolojisi (Sharma vd., 2022), Taguchi (Jain vd., 2023), yapay sinir ağı (Said vd., 2023) ve Box-Behnken (Nguyen vd., 2023) en çok tercih edilen yöntemler arasındadır. Stamenković vd. (2015), katalizör miktarı (yağdaki ağırlıkça %0,58–1,42), metanol: yağ molar oranı (3,5:1–8,5:1) ve reaksiyon sıcaklığı (23,2–56,8°C) ve reaksiyon süresi (180 dakikaya kadar) parametrelerini kullanarak kenevir yağı metil ester üretiminin optimizasyonunu incelemişlerdir. Biyodizel üretim süreci parametreleri, genetik algoritma (GA) ile birleştirilmiş yanıt yüzeyi metodolojisi (YYM) ve yapay sinir ağı (YSA) kullanılarak optimize edilmiştir. En yüksek verimlilik YYM yöntemiyle %98,5 (tahmin edilen içerik: %99,8) iken, YSA-GA yöntemiyle %97,5 (tahmin edilen içerik: %97,1) olarak belirlenmiştir. Gupta vd. (2018), Fresnel lens güneş yoğunlaştırıcı yaklaşımını ve geleneksel ısıtma yöntemi yaklaşımını kullanarak kenevir (*Cannabis sativa* L.) yağının transesterifikasyon değişkenlerinin optimizasyonunu değerlendirmişlerdir. Kullanılan reaksiyon değişkenleri, katalizör konsantrasyonu (%0,3–1,2), alkol:yağ molar oranı (3:1–6:1), reaksiyon süresi (geleneksel için 10–80 dakika) ve karıştırma hızıdır (0–400 rpm). Optimum kenevir yağı metil ester verimi, 4 dakikalık reaksiyon süresi, 4,5:1 metanol:yağ molar oranı, 200 rpm karıştırma hızı ve %0,90 katalizör konsantrasyonunda %97,37 olarak elde edilmiştir. Coniwanti vd. (2019) çalışmalarında, sodyum hidroksit (NaOH) ve magnezyum oksit (MgO) katalizörlerinin, alkol: yağ molar oranının ve transesterifikasyon reaksiyon süresinin 65 C’de ve %1,5 ağırlığında sığır donyağından üretilen biyodizelin verimine ve özelliklerine etkisini incelemişlerdir. Sonuçlar değerlendirildiğinde en büyük ortalama viskozite değerinin NaOH kullanıldığında elde edilmiştir. Bunun nedeni olarak, NaOH ile metanol arasındaki reaksiyonun bir sodyum metoksit bileşiği oluşturması ve böylece MgO katalizöründen daha güçlü bir metil ester oluşturmak üzere karbonil grubu trigliseritlerine tutunması nedeniyle meydana geldiği ifade edilmiştir.

Biyodizel ile ilgili literatür taraması gerçekleştirildiğinde, kenevir yağı kullanılarak iki farklı katalizörün aynı çalışma içerisinde optimizasyon işleminin yapılmadığı görülmektedir. Bu çalışmada sodyum hidroksit (NaOH) ve potasyum hidroksit (KOH) katalizörleri varlığında, metil alkol (metanol) ile kenevir tohumu yağının transesterifikasyonundan klasik optimizasyon metodu kullanılarak kenevir tohumu yağı biyodizeli elde edilmiştir. Ayrıca, NaOH ve KOH katalizörlerin kinematik viskoziteye etkisi belirlenerek motor performansı için en uygun transesterifikasyon işlem parametrelerini belirlemek ve böylece daha yüksek performanslı ve daha verimli bir yakıt üretilmesi hedeflenmiştir. Bu bağlamda, üretilen biyodizellerin farklı oranlarda dizel yakıt (motorin) ile harmanlaması yapılarak elde edilen yakıtların kinematik viskozite değerleri ölçülüp her iki katalizörün kinematik viskoziteye etkisi tartışılmıştır.

## MATERYAL VE YÖNTEM

### Materyal

Bu çalışmada, kenevir tohumu Narlıdere türü olarak Kayseri’nin Yahyalı ilçesinden temin edilmiştir. Optimizasyon çalışmalarında kullanılan alkoller (saflığı %99,8 olan metanol) ve katalizörler (NaOH ve KOH) (saf peletler) Merck firmasından satın alınmıştır. Soğuk presleme sonrasında ham petrolün filtrasyonunda kullanılan kantitatif filtre kağıdı Machery-Nagel’den temin edilmiştir. SYA (%) ve asit sayısı (AN- mg KOH/g) tayini için; fenolftalein indikatörü (%1) ve KOH çözeltisi (0,1 N) Norateks Chemical Company’den, dietil eter ise Tekkim’den alınmıştır. Deneylerde kullanılan diğer deney ekipmanları (cam malzemeler, manyetik balık, metal kaşık vb.) EN ISO 17025 akreditasyon ve ISO 9001 Kalite Yönetimi belgelerine sahip yerel bir firmadan temin edilmiştir.

Çalışmanın ana cihazlarından biri olan ısıtıcılı manyetik karıştırıcı, çalışma hızı 100–1500 rpm arasında değişebilen, çalışma sıcaklığı 20–500°C değişme aralığında ve 0,1°C sıcaklık adımlı IKA marka C-MAG HS 7 model kullanılmıştır. Numunelerin ağırlık ölçümleri, 0,001 gr hassasiyetli Weightlab marka LB.WL-603 model hassas terazi ile yapılmıştır. Kenevir yağının ortalama molekül ağırlığı ve elde edilen kenevir biyodizellerinin yakıt özelliklerinin belirlenmesinde gerekli olan yağ asidi kompozisyonları tespiti QP2010 model Shimadzu marka gaz kromatografisi-kütle spektrometresinde (GC-MS) cihazı ile gerçekleştirilmiştir.

## Yöntem

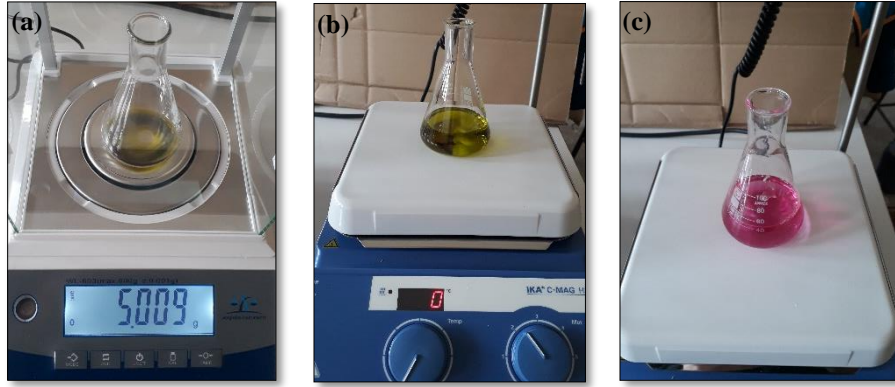
### Serbest yağ asidi ve asit sayısı tayini

Yaklaşık 5 g kenevir yağı 250 mL'lik Erlenmeyer şişesi içinde tartılmıştır ve 50 mL çözücü karışım (etanol-dietil eter (50:50, v/v)) içinde çözülmesi sağlanmıştır. Sonraki aşamada, yağ ve yağ asitlerini çözmek için karışım 1 dakika titre edilmiştir. Çözünme işleminden sonra üç damla fenolftalein indikatörü damlatılmıştır. Son aşamada, çözeltinin rengi pembeye dönüşene kadar içerisine 0,1 N KOH solüsyonu karışıma damlatılmıştır. Dönüşüm sonrası elde edilen değerler kaydedilmiştir. Serbest yağ asidi ölçümüne ait görseller Şekil 1'de verilmiştir. Serbest yağ asidi (SYA) ve asit sayısı (AS) değeri denklem (1) ve (2) kullanarak hesaplanmıştır (Aslan & Eryılmaz, 2020):

$$\text{SYA (\%)} = \frac{(v-b) \times N \times 28,2}{w} \quad (1)$$

$$\text{AS (mg KOH/g oil)} = \frac{(v-b) \times N \times 56,1}{w} \quad (2)$$

Burada b titrasyon öncesi değer, v numune için titrasyon sonrası değer, N KOH çözeltisinin normalliği ve w numunelik yağın kütlesidir.



Şekil 1. a. Numunenin Tartılması b. Titrasyon İşlemi c. Solüsyonun Renk Değişirmesi

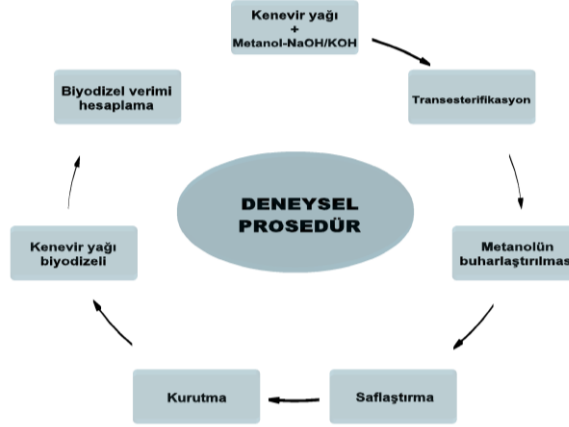
Hesaplamalar sonucunda kenevir yağının ortalama SYA değeri % 0,374, AS değeri ise 0,748 mg KOH/g yağ olarak belirlenmiştir. FFA değeri %1'den düşük olması nedeniyle optimizasyon çalışmalarında tek aşamalı homojen katalizörlü transesterifikasyon işlemi uygulanmıştır.

### Transesterifikasyon

Transesterifikasyon prosesinde kenevir yağı (100 g ±0,01) 250 mL behere dökülerek istenilen reaksiyon sıcaklığına kadar ısıtılmıştır. Aynı zamanda metanol ve katalizör (NaOH veya KOH) başka bir cam şişe içerisine belirtilen miktarlarda eklenmiş ve sonrasında bu solüsyon diğer manyetik karıştırıcıda ortam sıcaklığında karıştırılmıştır. Kenevir yağı istenilen sıcaklığa ulaştığında kronometre çalıştırılmış ve çözelti yavaş yavaş işlem kabına ilave edilmiştir. Proses belirlenen reaksiyon süresine ulaştığında, cihazın ısıtılması ve karıştırılması durdurulmuştur. Daha sonra reaksiyona giren karışım bir ayırma hunisine alınmış, ester ve gliserolün farklı yoğunluklara sahip olması nedeniyle ayrılma gözlemlenmeye başlanmıştır. Ayrılmanın ilk ve belirgin aşaması 5 dakikadan daha az sürede meydana gelmiştir (Leung vd., 2010). Yaklaşık bir gün sonra, çöken gliserol alınmış ve reaksiyona girmemiş alkolü uzaklaştırmak için esterın sıcaklığı 70°C'de (metanolün kaynama noktasından dolayı) bir saat sabit sıcaklıkta karıştırılmadan bekletilmiştir. Ester içerisinde bulunan artık katalizör, serbest gliserol vb. istenilmeyen maddelerden arındırmak için damıtılmış su (ester ürününün miktarının ağırlıkça %25'i) kullanılarak duşlama yöntemiyle saflaştırma işlemi yapılmıştır. Tam bir arınma için en az 8 saat dinlendirilmiştir. Son işlem olarak, ester içerisindeki suyu tamamen buharlaştırmak için yaklaşık 120°C'de 2 saat kurutma işlemi gerçekleştirilmiştir. Deneysel prosedür Şekil 2'de gösterilmiştir. Elde edilen biyodizelin kütlesi belirlenerek denklem (3) yardımıyla biyodizel verimi hesaplanmıştır (Yesilyurt & Cesur, 2020).

$$\text{Biyodizel verimi (\%)} = \frac{\text{Elde edilen biyodizel kütlesi (g)}}{\text{Harcanan yağ kütlesi (g)}} * 100 \quad (3)$$





Şekil 2. Kenevir Yağı Biyodizeli Elde Etme ve Verim Hesaplama Prosedürü

### Üretim parametrelerinin optimizasyonu

Bu çalışmada, kenevir tohumundan elde edilen kenevir tohumu yağının iki farklı alkali katalizör (NaOH ve KOH) ve metanol ile reaksiyonundan klasik optimizasyon metodu kullanılarak kenevir tohumu yağı biyodizeli elde edilmiştir. Transesterifikasyon metodu kullanılarak incelenen parametreler; katalizör miktarı, alkol:yağ molar oranı, reaksiyon sıcaklığı ve reaksiyon süresidir. Klasik optimizasyon işlemine ait örnekleme Şekil 3’de gösterilmiştir.

Katalizör çeşidi: NaOH		Alkol çeşidi: Metanol		
Sabit optimizasyon parametrelerinin sayısal değerleri				
Metanol:Yağ molar oranı: 5:1	Reaksiyon sıcaklığı (°C): 60	Reaksiyon süresi (dk.): 60		
İlgili değişken optimizasyon parametresi: Katalizör miktarı (g)				
Sayısal değişkenler:	0,4	0,6	0,8	1,0
	↓	↓	↓	↓
Belirlenen biyodizel verimi:	93,28	94,89	91,05	87,05
Katalizör miktarı- En yüksek biyodizel verimi:	Katalizör miktarı (g)		Biyodizel verimi (%)	
	↓		↓	
	0,6		94,89	
Bir sonraki optimizasyon parametresi				
↓				
Sabit optimizasyon parametrelerinin sayısal değerleri				
Katalizör miktarı (g): 0,6	Reaksiyon sıcaklığı (°C): 60	Reaksiyon süresi (dk.): 60		
İlgili değişken optimizasyon parametresi: Metanol:Yağ molar oranı				
Sayısal değişkenler:	3:1	5:1	7:1	9:1
	↓	↓	↓	↓
Belirlenen biyodizel verimi:	90,85	94,89	93,85	91,95
Metanol:Yağ molar oranı- En yüksek biyodizel verimi:	Metanol:Yağ molar oranı		Biyodizel verimi (%)	
	↓		↓	
	5:1		94,89	
Bir sonraki optimizasyon parametresi				
⋮				

Şekil 3. Klasik Optimizasyon İşlemine Ait Bir Örnekleme

Optimizasyon işlemine ilk katalizör miktarının değişimi ile başlanmıştır. Diğer parametreler için başlangıç değerleri metanol:yağ molar oranı 5:1 (18,42 g), reaksiyon sıcaklığı 60 °C ve reaksiyon süresi 60 dk. olarak belirlenmiştir. Optimizasyon çalışmalarında kullanılan parametre verileri Şekil 4’de sunulmuştur.



		KATALİZÖR ÇEŞİDİ	KATALİZÖR AĞIRLIĞI (% ağı.)		ALKOL:YAĞ MOLAR ORANI		REAKSİYON SICAKLIĞI (°C)		REAKSİYON SÜRESİ (dk.)	
ALKOL ÇEŞİDİ	METANOL	SODYUM HİDROKSİT ve POTASYUM HİDROKSİT	0,4	0,6	3:1	5:1	30	40	30	45
			0,8	1,0	7:1	9:1	50	60	60	75

Şekil 4. Optimizasyon İşlemlerinde Kullanılan Parametreler ve Sayısal Değerler

### Yakıtların hazırlanması

Kenevir yağının metil alkol ile sodyum hidroksit ve potasyum hidroksit varlığında klasik optimizasyon metodu kullanılarak optimal veriler doğrultusunda iki farklı çeşit (NaOH/KOH) kenevir biyodizeli elde edilmiştir. Üretilen biyodizeller BP ultimate motorin ile %10-%20-%30-%40-%50-%60-%70-%80-%90 oranlarında harmanlanmıştır. Sonrasında %100 biyodizeller, harmanlanmış yakıtlar ve saf motorinin 40°C’de kinematik viskoziteleri ölçülmüştür. Kinematik viskozite tayini Yozgat Bozok Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Uygulama ve Araştırma Merkezi (YOBÜ BİLTEM) laboratuvarında bulunan hassasiyeti  $\pm 0,05^\circ\text{C}$  ve 15 L/dk hacimsel debiye sahip iki pompanın bulunduğu 7306A12E model Polyscience marka cihaz ile belirlenmiştir. Cihaz, ASTM D 445 standardına uygun olarak kinematik viskozite ölçümü yapabilmektedir. Numune ölçümünden önce cihaz ölçülecek sıcaklığa ayarlanmış ve ardından ısıtılmıştır. Cihaz içine batırılan cam ölçüm tüpünün içindeki kalıntıları temizlemek amacıyla etanol-aseton-toluen karışımları hazırlanmıştır. Çözücünün kalıntılarını ortadan kaldırmak için temiz, kuru bir hava akışı uygulanmıştır. Viskozitesi ölçülecek yakıt, cam ölçüm tüpüne konulmuş ve yakıtın sıcaklığının ölçülecek sıcaklığa ulaşması için 10 dakika ısıtılmıştır. Cam ölçüm tüpü ters akış prensibiyle çalışmaktadır. Cam ölçüm tüpünün üzerinde geniş bir balon bulunmaktadır. Kinematik viskoziteleri belirlemek için balon askılı anahtar yardımı ile doldurularak ters akışa bırakılmış ve ölçüm çizgisi aralıklarından kronometre ile akış süresi ölçülerek cam ölçüm tüpünün belirli sıcaklıklarının katsayıları ile çarpılmıştır. Ölçüm sonrası elde edilen veriler raporlanmıştır. Kinematik viskozite ölçümünün yapıldığı yakıtların adlandırılması Tablo 1’de ve ölçüm işleminin gerçekleştirildiği cihaz Şekil 5’de verilmiştir.

**Tablo 1.** Kinematik Viskozite Tayini Yapılan Yakıtların Adlandırılması

	Motorin (%)											
	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	
NaOH (%)	N100	N90D10	N80D20	N70D30	N60D40	N50D50	N40D60	N30D70	N20D80	N90D10	D100	
KOH (%)	K100	K90D10	K80D20	K70D30	K60D40	K50D50	K40D60	K30D70	K20D80	K90D10	D100	

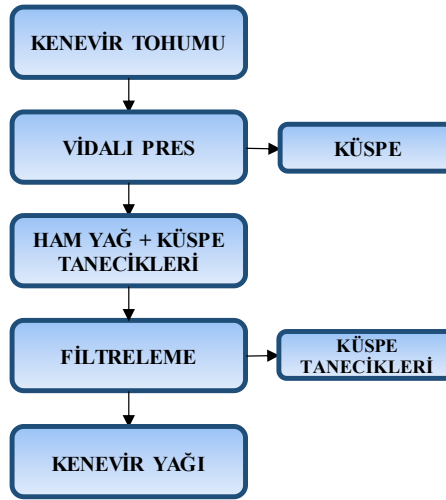


Şekil 5. Kinematik Viskozite Ölçüm Cihazı

## BULGULAR VE TARTIŞMA

### *Kenevir tohumundan ham yağ elde edilmesi*

Kayseri’de ticari bir firmadan satın alınan kenevir tohumları YOBÜ BİLTEM laboratuvarında bulunan vidalı yağ çıkarma presinde hizmet alımı ile sıkılarak kenevir yağı elde edilmiştir. Tohumdan en iyi verimde yağı çıkarmak için tohum sıcaklığı, tohum nem içeriği ve küspe çıkış ağız çap ölçüsü önem arz etmektedir. Yağ çıkarma işleminde Ø 10 mm ölçüsünde küspe çıkış ağız kullanılmıştır. Optimizasyon çalışmalarında kullanılmak üzere 100 kg kenevir tohumu sıkılmıştır. Sıkma işlemi sonrası elde edilen filtreleme öncesi ham yağ oranı %28,19 olarak tespit edilmiştir. Vidalı pres kullanılarak tohumdan yağ çıkarma akış şeması Şekil 6’da verilmiştir.



Şekil 6. Kenevir Tohumundan Yağ Çıkarma Akış Şeması

### *Yağ Asidi Kompozisyonu*

Hammadde olarak kullanılan kenevir yağına ait yağ asidi kompozisyonu YOBÜ BİLTEM laboratuvarında bulunan gaz kromatografisi-kütle spektrometresi (GC-MS) cihazında hizmet alımı ile analiz edilmiştir. Kenevir yağına ait yağ asidi bileşimi Tablo 2’de gösterilmiştir.

Tablo 2. Kenevir Yağının Yağ Asidi Kompozisyonu

No	Yağ asidi	Molekül ağırlığı	Yapı	Formül	Kenevir yağı
1	Palmitik	256	16:0	C <sub>16</sub> H <sub>32</sub> O <sub>2</sub>	7,18
2	Palmitoleik	254	16:1	C <sub>16</sub> H <sub>30</sub> O <sub>2</sub>	0,06
3	Heptadekanoik	270	17:0	C <sub>17</sub> H <sub>34</sub> O <sub>2</sub>	0,04
4	Stearik	284	18:0	C <sub>18</sub> H <sub>36</sub> O <sub>2</sub>	3,21
5	Oleik	282	18:1	C <sub>18</sub> H <sub>34</sub> O <sub>2</sub>	18,23
6	Linoleik	280	18:2	C <sub>18</sub> H <sub>32</sub> O <sub>2</sub>	53,74
7	Linolenik	278	18:3	C <sub>18</sub> H <sub>30</sub> O <sub>2</sub>	16,55
8	Araşidik	312	20:0	C <sub>20</sub> H <sub>40</sub> O <sub>2</sub>	0,41
9	Gondoik	312	20:1	C <sub>20</sub> H <sub>38</sub> O <sub>2</sub>	0,25
10	Behenik	340	22:0	C <sub>22</sub> H <sub>44</sub> O <sub>2</sub>	0,33
	ΣDoymuş				11,17
	ΣTDYA				18,54
	ΣÇDYA				70,29

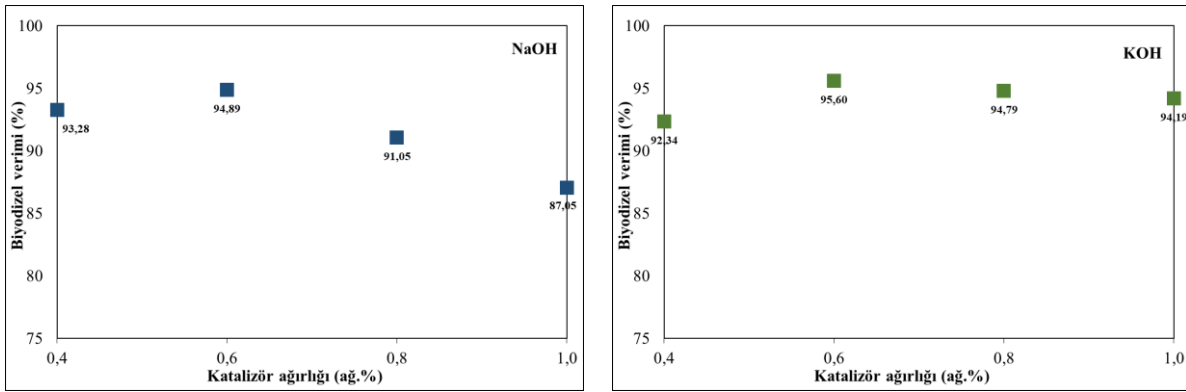
Tablo 2 incelendiğinde, kenevir yağındaki en baskın yağ asitleri sırasıyla linoleik asit (C18:2; ağırlıkça %53,74), oleik asit (C18:1; ağırlıkça %18,23), linolenik asit (C18:3; ağırlıkça %16,55) ve palmitik asit (C16:0; ağırlıkça %7,18) olduğu tespit edilmiştir. Minör yağ asitlerin ise stearik asit (C18:0; ağırlıkça %3,21), araşidik (C20:0; ağırlıkça %0,41) ve diğer asitler (ağırlıkça %1’in altında) olacak şekilde bulunmuştur. Tekli doymamış yağ asitleri (TDYA) ve çoklu doymamış yağ asitleri (ÇDYA) toplamının, doymuş yağ asitlerinden oldukça yüksek olduğu görülmektedir. Bu çalışmadaki kenevir tohumu yağının %88,83 oranında doymamış yağ asitlerinden oluşması bu yağın doymamış yağlar grubunda olduğunu göstermektedir. Bunun yanı sıra, doymamışlık düzeyindeki artışın ester dönüşüm verimliliğini arttırdığı bilinmektedir (Oguz & Tolu, 2023). Kenevir biyodizeli; linoleik, linolenik ve oleik asitler gibi yüksek karbon zincir uzunluğuna sahip yağ asitlerine sahiptir. Karbon zinciri uzunluğu kinematik

viskozite artışını önemli ölçüde etkilemektedir (Folayan vd., 2019). Yağ asidi kompozisyonuna göre kenevir yağının ortalama moleküler ağırlığı 869,79 g/mol olarak belirlenmiştir.

### **Kenevir yağı biyodizeli üretiminin optimizasyonu**

#### **a. Katalizör çeşidi ve ağırlığının etkisi**

Trigliserit içeren yağların biyodizele dönüşümü sırasında kullanılan katalizörün varlığı önemli bir rol oynamaktadır. Benzer olarak katalizör biyodizel üretim sürecinde biyodizelin oranını ve verimini belirleyen temel faktörler arasında yer almaktadır (Atadashi vd., 2013). Biyodizel verimi reaksiyonlarda kullanılan katalizör türlerinden etkilenebilir. Bu çalışmada NaOH ve KOH olmak üzere iki çeşit alkali katalizör kullanılmıştır. Katalizör miktarı, %0,2'lik aralıklarla ağırlıkça 0,4 ile 1,0 g arasında seçilmiştir. Başlangıç parametreleri, 5:1 metanol-yağ molar oranı, 600 rpm karıştırma hızı, 60°C reaksiyon sıcaklığı ve 60 dakikalık reaksiyon süresinde sabit tutulmuştur. Bu çalışmada kullanılan farklı katalizör türlerinin ve miktarlarının biyodizel verimi üzerindeki etkileri Şekil 7'de verilmiştir..



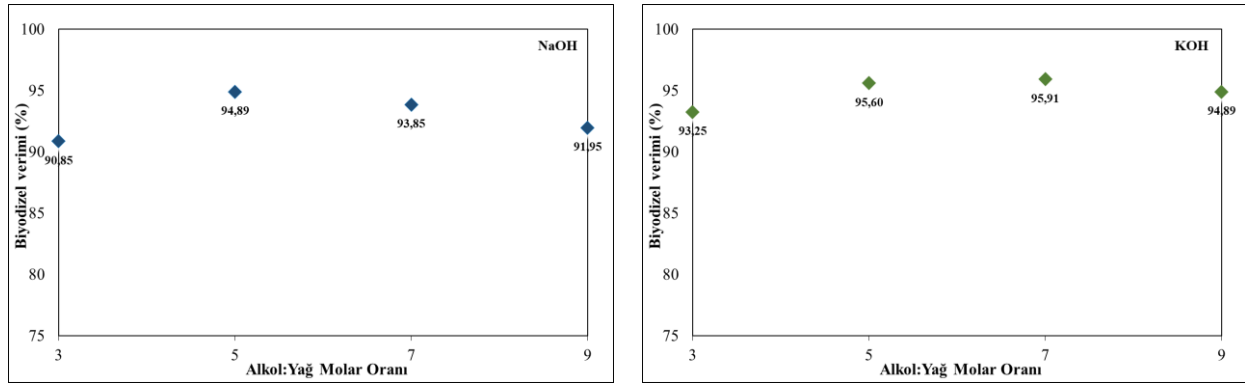
**Şekil 7.** Katalizör Çeşidinin ve Miktarının Biyodizel Verimi Üzerine Etkisi

Hem yüksek hem de düşük oranlarda kullanılan katalizörlerin verimi düşürdüğü ancak ikisi arasında optimal bir nokta olduğu tespit edilmiştir. Yüksek miktarda katalizör kullanıldığında yağdaki serbest yağ asitleri katalizörler ile tepkimeye girerek sabunlaşma meydana getirmektedir. Düşük miktarda katalizör kullanıldığında ise reaksiyon tamamlanamamakta ve ester elde edilememektedir (Sultana vd., 2014). Şekil 7 incelendiğinde, NaOH ve KOH kullanılarak yapılan çalışmalarda katalizör miktarı değişimi sonucu elde edilen en yüksek verim sırasıyla %94,89 (0,6g) ve %95,60 (0,6g) olarak tespit edilmiştir. Singh vd. (2006) ve Al-Sakkari vd. (2018) iki farklı çalışmada, NaOH ve KOH içeren farklı alkali katalizörleri kullanarak biyodizel üretimini araştırmışlardır. KOH'un NaOH'dan daha verimli bir katalizör olduğunu belirtmişlerdir. Denemelerde metanol içerisinde KOH'un çözünmesinin NaOH'dan daha iyi olduğu gözlemlenmiştir. Çözünmenin tam olarak gerçekleşmemesi durumunda trigliseritin fazla miktardaki NaOH katalizörü ile reaksiyona girmesi nedeniyle sabunlaşma meydana gelebilir (Efavi vd., 2018). Bu durum dikkate alındığında NaOH'un biyodizel verimi azalmış olabilir.

#### **b. Alkol:Yağ molar oranının etkisi**

Alkol:Yağ molar oranının biyodizel üretiminin dinamikleri açısından en kritik oran olduğu söylenebilir (Musa, 2016). Transesterifikasyonun stokiyometrik denklemine göre, 3 mol alkol 1 mol trigliserit ile reaksiyona girerek 3 mol yağ asidi esteri ve 1 mol gliserin vermektedir. Başka bir ifadeyle reaksiyonun tamamlanması için alkol:yağ molar oranının en az 3:1 olması gerekmektedir, ancak karışılabilirliği arttırmak ve alkol molekülü ile trigliserit arasındaki teması güçlendirmek için daha yüksek molar oranlar gerekmektedir (Hossain vd., 2010). Bu çalışma için alkol:yağ molar oranı; 3:1, 5:1, 7:1 ve 9:1 oranlarında seçilmiştir. Alkol:yağ molar oranının biyodizel verimi üzerindeki etkileri Şekil 8'de gösterilmiştir. Diğer işlem parametreleri 0,6 g katalizör ağırlığı (her iki katalizör için), 600 rpm karıştırma hızı, 60°C reaksiyon sıcaklığı ve 60 dakikalık reaksiyon süresinde sabit tutulmuştur. Şekil 8 incelendiğinde, NaOH ve KOH kullanılarak yapılan çalışmalarda alkol:yağ molar oranı değişimi sonucu elde edilen en yüksek verim sırasıyla %94,89 (5:1) ve %95,91 (7:1) olarak tespit edilmiştir. Trigliseritlerin transesterifikasyonu sırasında gliserin-yağ asidi bağlarını kırmak için fazla metanol gerekmektedir. Bu nedenle, daha yüksek alkol-yağ molar oranları, daha kısa sürede daha fazla ester dönüşümüne yol açmaktadır. Ayrıca yağdaki alkol miktarının artması biyodizel verimini ve biyodizel saflığını arttırmaktadır (Kavalli vd., 2022). Çok yüksek bir molar oran ise alkolün, gliserolün bir kısmının bozulmasına neden olan bir emülsifiye edici madde olarak görev yapması nedeniyle biyodizel veriminde bir

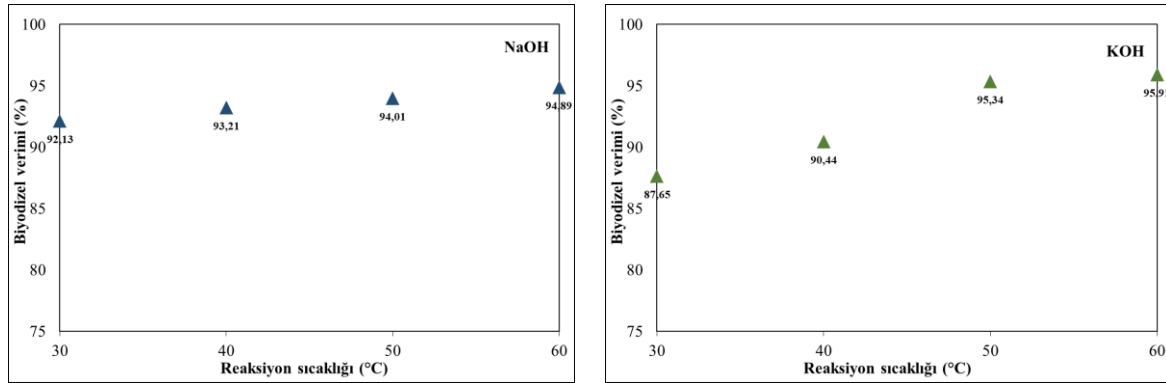
azalmaya yol açabilir. Bunun yanı sıra yüksek miktarda alkol kullanımı yüksek maliyetlere yol açmaktadır (Carlucci, 2022).



Şekil 8. Alkol:Yağ Molar Oranının Biyodizel Verimi Üzerine Etkisi

### c. Reaksiyon sıcaklığının etkisi

Transesterifikasyon farklı sıcaklıklarda gerçekleşebilir. Reaksiyon sıcaklığı, reaksiyon hızını ve biyodizel verimini etkilemektedir (Demirbaş, 2016). Bu çalışma için reaksiyon sıcaklığı 30, 40, 50 ve 60°C olarak seçilmiştir. Reaksiyon sıcaklığının biyodizel verimi üzerindeki etkileri Şekil 9'da gösterilmiştir. Diğer işlem parametreleri 0,6 g katalizör ağırlığı (her iki katalizör için), molar oran 5:1 (NaOH) ve 7:1 (KOH) ve 60 dk. reaksiyon süresinde sabit tutulmuştur.



Şekil 9. Reaksiyon Sıcaklığının Biyodizel Verimi Üzerine Etkisi

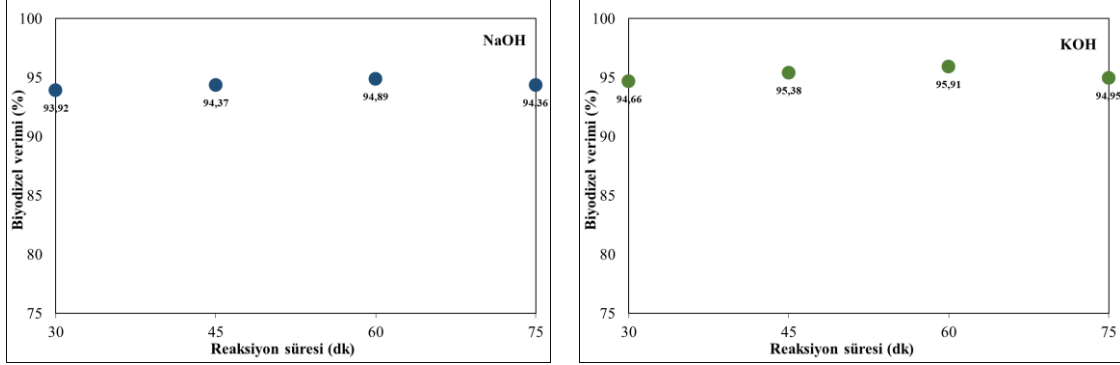
Şekil 9 incelendiğinde, NaOH ve KOH kullanılarak yapılan çalışmalarda reaksiyon sıcaklığının değişimi sonucu elde edilen en yüksek verim sırasıyla %94,89 (60°C) ve %95,91 (60°C) olarak tespit edilmiştir. Her iki katalizör ile yapılan denemelerde metanolün kaynama noktası sıcaklığına yakın bir sıcaklıkta en yüksek verim elde edilmiştir. Sıcaklıktaki artış reaksiyon hızının artmasına neden olabilir. Sıcaklık arttıkça yağın viskozitesinin azalması nedeniyle daha fazla verim elde edilebilir. Bu durum yağın alkolle daha iyi karışması ve gliserolün biyodizelden daha hızlı ayrılmasına neden olmaktadır. Bunun yanı sıra, sıcaklığın aşırı artması biyodizel veriminin düşmesine neden olur. Yüksek sıcaklıklarda birincil reaksiyonun ardından meydana gelen termal bir reaksiyon olan ikincil reaksiyonlar transesterifikasyona göre daha hızlı meydana gelir ve bunun sonucunda biyodizel veriminde azalma sağlanır (Chozhavendhan vd., 2020; Verma & Sharma, 2016).

### d. Reaksiyon süresinin etkisi

Reaksiyon süresi, trigliserit içeren yağların biyodizele dönüştürülmesinde transesterifikasyon işleminin dönüşüm verimliliğini etkiler. Reaksiyon süresi, üretilen biyodizelin verimi ile doğru orantılıdır ve reaksiyon süresi arttıkça dönüşüm oranı da artar (Abba vd., 2017). Bu çalışma için reaksiyon süresi 30, 45, 60 ve 75 dk. olarak belirlenmiştir. Reaksiyon süresinin biyodizel verimi üzerindeki etkileri Şekil 10'da verilmiştir. Diğer işlem parametreleri 0,6 g katalizör ağırlığı (her iki katalizör için), molar oran 5:1 (NaOH) ve 7:1 (KOH) ve 60°C reaksiyon sıcaklığı (her iki katalizör için) sabit tutulmuştur.

Şekil 10 incelendiğinde, NaOH ve KOH kullanılarak yapılan çalışmalarda reaksiyon süresinin değişimi sonucu elde edilen en yüksek verim sırasıyla %94,89 (60 dk.) ve %95,91 (60 dk.) olarak tespit edilmiştir. Yağ asidi esterlerinin

dönüşüm oranının reaksiyon süresiyle arttığı ifade edilebilir. Başlangıçta alkolün yağa karışıp dağılmasından dolayı reaksiyon yavaştır. Bir süre sonra reaksiyon giderek hızlı bir şekilde ilerlemeye başlar ve optimum sürede en yüksek verime ulaşır. Aşırı reaksiyon süresi, transesterifikasyon işleminin geriye doğru reaksiyonu sebebiyle ürün veriminde bir düşüşe yol açar, bu durum ester kaybına yol açarak daha fazla yağ asidinin sabun oluşturmaya neden olmaktadır (Efavi vd., 2018; Mashkour vd., 2017). Aslan & Eryılmaz (2020) ester dönüşümü için optimal reaksiyon süresinin bir saat uygun olabileceğini belirtmişlerdir.



Şekil 10. Reaksiyon Süresinin Biyodizel Verimi Üzerine Etkisi

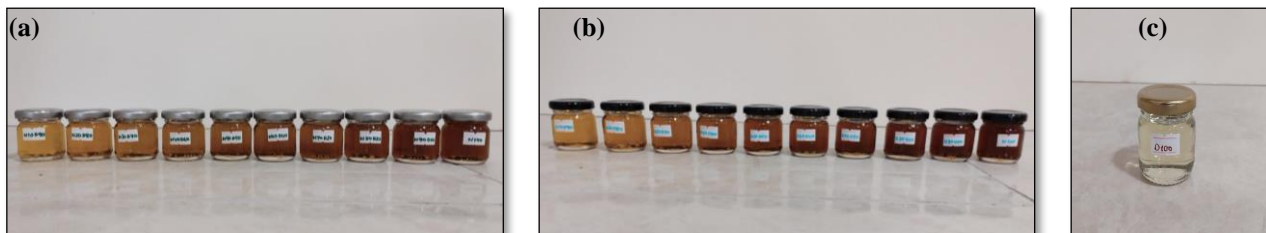
### Optimum koşullar ve karışım yakıtların hazırlanması

Kenevir yağının metil alkol kullanılarak NaOH ve KOH olmak üzere iki farklı katalizör eşliğinde katalizör miktarı, alkol:yağ molar oranı, reaksiyon sıcaklığı ve reaksiyon süresi reaksiyon koşullarında klasik optimizasyon işlemi uygulanmıştır. Çalışmalar sonucunda her iki katalizör için optimum reaksiyon koşulları Tablo 3’de verilmiştir.

Tablo 3. N100 ve K100 Biyodizel Yakıtların Optimum Reaksiyon Koşulları

Biyodizeller	Optimum reaksiyon koşulları				Verim (%)
	Katalizör miktarı (% ağı.)	Alkol:Yağ molar oranı	Reaksiyon Sıcaklığı (°C)	Reaksiyon Süresi (dk.)	
NaOH-Metanol Biyodizel (N100)	0,6	5:1	60	60	94,89
KOH-Metanol Biyodizel (K100)	0,6	7:1	60	60	95,91

Tablo 3 incelendiğinde, her iki katalizör için alkol yağ molar oranı dışındaki parametrelerde aynı sonuçlar çıkmıştır. KOH kullanılarak elde edilen biyodizelin verimi NaOH ile üretilen biyodizelin veriminden daha yüksek olduğu görülmektedir. Literatür taraması yapıldığında çıkan sonuçların ilgili çalışmalarla uyumlu olduğu söylenebilir. Rashid ve Anwar (2008) yaptıkları çalışmada; NaOH, KOH, CH<sub>3</sub>OK ve CH<sub>3</sub>ONa eşliğinde, metil alkol kullanarak transesterifikasyon işlemi ile kolza biyodizeli elde etmek için optimizasyon işlemi gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalarında en iyi katalizörün yüksek verimde KOH olduğu sonucuna varmışlardır. Al-Sakkari vd. (2018) ve Singh vd. (2006) çalışmalarında, metanol eşliğinde KOH ve NaOH bazik katalizörleri kullanımının biyodizel verimine etkilerini araştırmışlardır. KOH katalizörünün biyodizel veriminde daha etkili olduğu sonucuna varmışlardır. KOH’un metanol içerisinde çözünmesi NaOH katalizörüne göre daha iyidir. Katalizörün alkol içerisinde tam veya yeterli çözünmesinin gerçekleşmemesi trigliseridin fazla miktarda katalizör ile reaksiyona girerek sabunlaşma meydana gelmesine neden olabilmektedir (Hassan vd., 2023; Chanakaewsonboon vd., 2020). Optimizasyon işlemleri sonucu elde edilen optimal veriler ile N100 ve K100 için 250 mL olacak şekilde biyodizel üretimi gerçekleştirilmiştir. Sonrasında K100 ve N100 saf biyodizeller, motorin ile %10’dan %90’a kadar harmanlanmıştır. Karışım yakıtlar 40 mL cam kavanoz içerisinde kinematik viskozite tayininin yapılması için muhafaza edilmiştir. Karışım yakıtlar ve saf motorin (D100) Şekil 11’de verilmiştir.



Şekil 11. a. N100 ve Karışım Yakıtlar b. K100 ve Karışım Yakıtlar c. Saf Dizel Yakıt (D100)

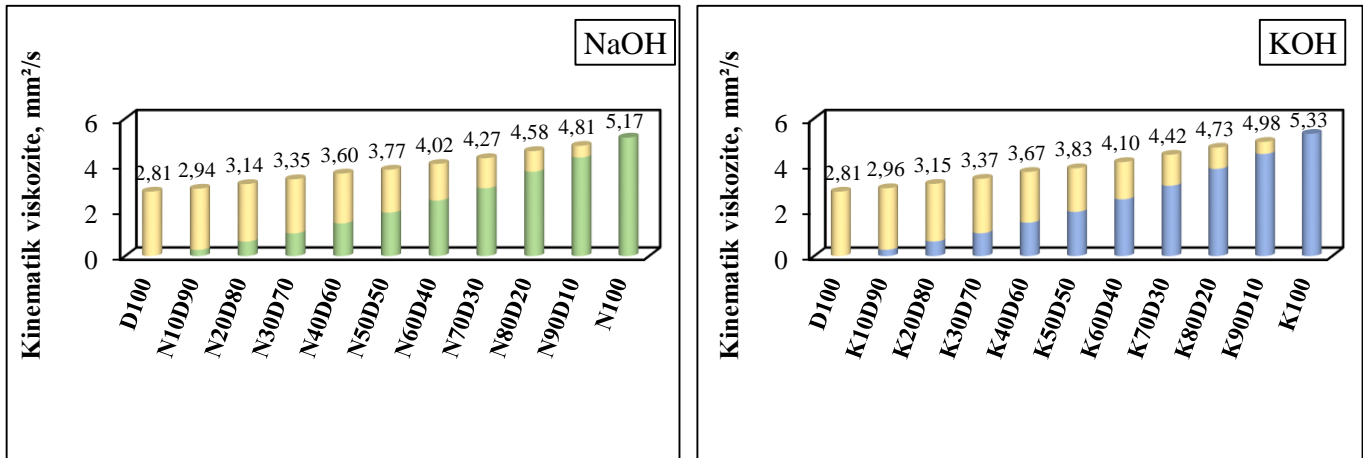


**Yakıtların kinematik viskozite değerinin belirlenmesi**

Kinematik viskozite, biyodizelin karakteristik ve temel bir fiziksel özelliğidir. Yakıtın atomizasyonu, yağlayıcılık, püskürtme özellikleri, çarpma mesafesi ve yanma kalitesini önemli ölçüde etkiler (Sáez-Bastante vd., 2016; Phankosol & Krisnangkura, 2015). Biyodizelin kalitesini belirleyen parametrelerden biri 40 °C sıcaklıktaki viskozitenin ölçülmesidir. Üretilen yakıtların kinematik viskozite değerleri YOBÜ BİLTEM laboratuvarında bulunan kinematik viskozite ölçüm cihaz ile belirlenmiştir. Elde edilen yakıtların 40 °C'de kinematik viskozite değerleri Tablo 4'te, grafiksel gösterimi Şekil 12'de verilmiştir.

**Tablo 4.** Yakıtların 40 °C'de Kinematik Viskozite Değerleri

Yakıtlar	Kinematik Viskozite (mm <sup>2</sup> /s)	Yakıtlar	Kinematik Viskozite (mm <sup>2</sup> /s)
D100	2,81	D100	2,81
N10D90	2,94	K10D90	2,96
N20D80	3,14	K20D80	3,15
N30D70	3,35	K30D70	3,37
N40D60	3,60	K40D60	3,67
N50D50	3,77	K50D50	3,83
N60D40	4,02	K60D40	4,10
N70D30	4,27	K70D30	4,42
N80D20	4,58	K80D20	4,73
N90D10	4,81	K90D10	4,98
N100	5,17	K100	5,33

**Şekil 12.** Yakıtların 40 °C'de Kinematik Viskozite Değerlerinin Grafiksel Gösterimi

Şekil 12 görüldüğü gibi en düşük kinematik viskozite değeri 2,81 mm<sup>2</sup>/s ile D100 yakıtına ait olurken, en yüksek kinematik viskozite değeri 5,33 mm<sup>2</sup>/s ile K100 değerine aittir. Yakıtlarda biyodizel oranı arttıkça kinematik viskozite değeri de artmaktadır. Ayrıca, NaOH ile üretilen saf biyodizel yakıtın kinematik viskozite değeri KOH ile üretilen saf biyodizel yakıtın kinematik viskozite değerine göre yaklaşık %3 oranında daha düşük çıkmıştır. NaOH ve KOH eşliğinde, bazı farklı hammaddelerden üretilen metil esterlerin kinematik viskozite değerleri ve bu çalışmaya ait iki farklı katalizör kullanımı ile elde edilen en yüksek kinematik viskozite değerleri Tablo 5'de özetlenmiştir.

**Tablo 5.** Farklı Hammaddelerden Üretilen Metil Esterlerin 40 °C'de Kinematik Viskozite Değerleri

Metil ester	Bu çalışma	Kenevir		Soya Fasulyesi	Don yağı	Siyah hardal	
<b>Kinematik Viskozite (mm<sup>2</sup>/s)</b>	5,17 (N100)	6,09 (NaOH)	4,9 (KOH)	4,82 (NaOH)	5,17 (NaOH)	5,63	
	5,33 (K100)			3,2 (NaOH)		5,13 (NaOH)	
				3,3 (KOH)		5,86 (KOH)	
		Oguz & Tolu, 2023	Khan vd., 2019	Afif & Biradar, 2020	Rashid vd., 2016	Saydut vd., 2022	Kuppili vd., 2020

## SONUÇLAR

Bu çalışmada öncelikli olarak, endüstriyel kenevir (*Cannabis sativa* L.) tohumlarından vidalı yağ çıkarma presindeki ekstraksiyonu sonucu elde edilen kenevir ham yağı metanol ve NaOH-KOH katalizörlerini kullanarak transesterifikasyon prosesi ile farklı optimizasyon parametreleri (katalizör ağırlığı, alkol:yağ molar oranı, reaksiyon sıcaklığı ve reaksiyon süresi) ışığında klasik optimizasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Optimizasyon çalışmaları neticesinde, maksimum biyodizel üretim verimi, 7:1 metanol:yağ molar oranı, 0,6 g KOH ağırlığında, 60°C reaksiyon sıcaklığı ve 60 dk. reaksiyon süresinde % 95,91 olarak elde edilirken, minimum biyodizel üretim verimi; 5:1 metanol:yağ molar oranı, 0,6 g NaOH ağırlığında, 60°C reaksiyon sıcaklığı ve 60 dk. reaksiyon süresinde % 94,89 olarak belirlenmiştir. Sonraki aşamada elde edilen biyodizeller motorin ile belirli oranlarda harmanlanarak kinematik viskozite değerleri incelenmiştir. Çıkan sonuçlarda K100 yakıtının 5,33 mm<sup>2</sup>/s ile en yüksek kinematik viskozite değerine, D100 yakıtının 2,81 ile en düşük kinematik viskozite değerine sahip olduğu tespit edilmiştir.

Biyodizel verimi tespitinde katalizör ağırlığı, alkol:yağ molar oranı ve reaksiyon sıcaklığı işlem parametrelerinin etkili olduğu görülmektedir. Belirlenen değerlere karşılık gelen en yüksek ve en düşük biyodizel verimlerinde kayda değer artışlar gözlemlenmiştir. Reaksiyon sürelerinde ise biyodizel verimleri arasında yatay bir seyir izlenmiş ve önemli bir değişim görülmemiştir. Ayrıca üretilen yakıtların kinematik viskozite değerlerinin ASTM D6751 standartlarına uygun olduğu belirlenmiştir. Kenevir yağından üretilen biyodizelin fosil yakıtlara uygun bir alternatif olduğu sonucunu çıkarmak mümkündür. Ancak bu yakıtların motor performansını ve ürettiği emisyonları analiz etmek için daha fazla çalışma yapılması gerekmektedir.

## TEŞEKKÜR

TÜBİTAK 2209-A Üniversite Öğrencileri Araştırma Projeleri Destekleme Programı kapsamında verilen proje desteğine teşekkür ederiz (Proje No: 1919B012205988).

## KAYNAKÇA

- Abba, E.C., Nwakuba, N.R., Obasi, S.N., & Enem, J.I. (2017). Effect of reaction time on the yield of biodiesel from Neem seed oil. *American Journal of Energy Science*, 4(2), 5-9.
- Abbah, E.C., Nwandikom, G.I., Egwuonwu, C.C., & Nwakuba, N.R. (2016). Effect of reaction temperature on the yield of biodiesel from neem seed oil. *American Journal of Energy Science*, 3(3), 16-20.
- Afif, M.K., & Biradar, C.H. (2019). Production of biodiesel from Cannabis sativa (Hemp) seed oil and its performance and emission characteristics on DI engine fueled with biodiesel blends. *International Journal of Engineering Research & Technology*, 6(8), 246-253.
- Ahmad, M., Khan, M.A., Zafar, M., & Sultana, S. (2012). Practical handbook on biodiesel production and properties. CRC Press.
- Al-Sakkari, E.G., El-Sheltawy, S.T., Soliman, A., & Ismail, I. (2018). Transesterification of low FFA waste vegetable oil using homogeneous base catalyst for biodiesel production: optimization, kinetics and product stability. *Journal of Advanced Chemical Sciences*, 586-592. <https://doi.org/10.30799/jacs.195.18040305>.
- Alcheikh, A. (2015). Advantages and challenges of hemp biodiesel production. Faculty of Engineering and Sustainable Development, Master's thesis. Gavle University: Gävle, Sweden.
- Anani, N. (2020). Renewable energy technologies and resources. Artech House, Norwood.
- Anwar, M. (2021). Biodiesel feedstocks selection strategies based on economic, technical, and sustainable aspects. *Fuel*, 283, 119204. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.119204>.
- Aslan, V., & Eryilmaz, T. (2020). Polynomial regression method for optimization of biodiesel production from black mustard (*Brassica nigra* L.) seed oil using methanol, ethanol, NaOH, and KOH. *Energy*, 209, 118386. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118386>.
- Atadashi, I.M., Aroua, M.K., Aziz, A.A., & Sulaiman, N.M.N. (2013). The effects of catalysts in biodiesel production: A review. *Journal of industrial and engineering chemistry*, 19(1), 14-26. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jiec.2012.07.009>.

- Bhuiya, M.M.K., Rasul, M.G., Khan, M.M.K., Ashwath, N., Azad, A.K., & Hazrat, M.A. (2016). Prospects of 2nd generation biodiesel as a sustainable fuel—Part 2: Properties, performance and emission characteristics. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 55, 1129–1146. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.09.086>.
- Carlucci, C. (2022). An overview on the production of biodiesel enabled by continuous flow methodologies. *Catalysts*, 12(7), 717. <https://doi.org/10.3390/catal12070717>.
- Chanakaewsomboon, I., Tongurai, C., Photaworn, S., Kungsanant, S., & Nikhom, R. (2020). Investigation of saponification mechanisms in biodiesel production: Microscopic visualization of the effects of FFA, water and the amount of alkaline catalyst. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 8(2), 103538. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2019.103538>.
- Chozhavendhan, S., Singh, M.V.P., Fransila, B., Kumar, R.P., & Devi, G.K. (2020). A review on influencing parameters of biodiesel production and purification processes. *Current Research in Green and Sustainable Chemistry*, 1, 1-6. <https://doi.org/10.1016/j.crgsc.2020.04.002>.
- Coniwanti, P., Surliadji, L., & Triandini, D. (2019, September). The effects of catalysts type, molar ratio, and transesterification time in producing biodiesel from beef tallow. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 620, No. 1, p. 012019). IOP Publishing. <http://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/620/1/012019>.
- Demirbas, A. (2016). Biodiesel from corn germ oil catalytic and non-catalytic supercritical methanol transesterification. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 38(13), 1890-1897. <https://doi.org/10.1080/15567036.2015.1004388>.
- Efavi, J. K., Dodoo-Arhin, D., Kanbogah, D., Apalangya, V., Nyankson, E., Tiburu, E. K., Dodoo-Arhin, D., Onwona-Agyeman, B., & Yaya, A. (2018). The effect of NaOH catalyst concentration and extraction time on the yield and properties of Citrullus vulgaris seed oil as a potential biodiesel feed stock. *South African Journal of Chemical Engineering*, 25(1), 98-102. <https://doi.org/10.1016/j.sajce.2018.03.002>.
- Elango, R.K., Sathiasivan, K., Muthukumaran, C., Thangavelu, V., Rajesh, M., & Tamilarasan, K. (2019). Transesterification of castor oil for biodiesel production: Process optimization and characterization. *Microchemical Journal*, 145, 1162–1168. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2018.12.039>.
- Folayan, A.J., Anawe, P.A.L., Aladejare, A.E., & Ayeni, A.O. (2019). Experimental investigation of the effect of fatty acids configuration, chain length, branching and degree of unsaturation on biodiesel fuel properties obtained from lauric oils, high-oleic and high-linoleic vegetable oil biomass. *Energy Reports*, 5, 793–806. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2019.06.013>.
- Ghazali, W.N.M.W., Mamat, R., Masjuki, H.H., & Najafi, G. (2015). Effects of biodiesel from different feedstocks on engine performance and emissions: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 51, 585–602. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2015.06.031>.
- Gupta, A.R., Jalan, A.P., Rathod, V.K. (2018). Solar energy as a process intensification tool for the biodiesel production from hempseed oil. *Energy Conversion and Management*, 171, 126-132. <https://doi.org/10.1201/b18947-7>.
- Hassan, A.A., Erwa, I.Y., Salim, R.A., Ishag, O.A.O., & Ahmed, M.A. (2023) Production of Biodiesel from Waste Cooking Oil Using KOH/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> as a Heterogeneous Catalyst. <https://doi.org/10.18596/jotcsa.1163670>.
- Hossain, A.B.M.S., Boyce, A.N., Salleh, A., & Chandran, S. (2010). Impacts of alcohol type, ratio and stirring time on the biodiesel production from waste canola oil. *African Journal of Agricultural Research*, 5(14), 1851-1859. <https://doi.org/10.5897/AJAR09.135>.
- Iriondo-DeHond, A., Alonso-Esteban, J.I., Gallego-Barceló, P., García, P., Abalo, R., & Castillo, M. (2023). Nutrition security of hemp for human consumption. In P. Ferranti (Ed.), *Sustainable food science - A comprehensive approach* (pp. 60–88). Netherlands: Elsevier.
- Jain, A., Bora, B. J., Kumar, R., Sharma, P., Deepanraj, B., Irshad, K., & Ravikiran, C. (2023). Application of hybrid Taguchi L16 and desirability for model prediction and optimization in assessment of the performance of a novel Water Hyacinth biodiesel run diesel engine. *Fuel*, 339, 127377. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.127377>.
- Johnson, R. (2018). *Hemp as an agricultural commodity* (pp. 1–29). Washington, DC, USA: Congressional Research Service.

- Kavalli, K., Hebbar, G.S., Shubha, J.P., Adil, S.F., Khan, M., Hatshan, M.R., Almutairi, A.M., & Shaik, B. (2022). Green Synthesized ZnO Nanoparticles as Biodiesel Blends and Their Effect on the Performance and Emission of Greenhouse Gases. *Molecules*, 27(9), 2845. <https://doi.org/10.3390/molecules27092845>.
- Khan, I. A., Prasad, N., Pal, A., & Yadav, A.K. (2020). Efficient production of biodiesel from Cannabis sativa oil using intensified transesterification (hydrodynamic cavitation) method. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 42(20), 2461-2470. <https://doi.org/10.1080/15567036.2019.1607946>.
- Kuppili, S.K., Kumar, A., & Kim, D. S. (2020). Biodiesel Properties Depending on Blends and Feedstocks: 155Cloud Point, Kinematic Viscosity, and Flash Point. In H. Joo, A. Kumar (Eds.), *World Biodiesel Policies and Production* (pp. 155-174). CRC Press.
- Leung, D.Y., Wu,X., & Leung, M.K.H. (2010). A review on biodiesel production using catalyzed transesterification. *Applied energy*, 87(4), 1083-1095. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.10.006>.
- Lin, C.Y., & Lin, Y.W. (2012). Fuel characteristics of biodiesel produced from a high-acid oil from soybean soapstock by supercritical-methanol transesterification. *Energies*, 5(7), 2370–2380. <https://doi.org/10.3390/en5072370>.
- Liu, Y., & Ren, J. (2021). Overview of sustainability, sustainable development and sustainability assessment: Concepts and methods. In *Energy Systems Evaluation (Volume 1)* (pp. 1–29). Springer, Cham.
- Long, F., Liu, W., Jiang, X., Zhai, Q., Cao, X., Jiang, J., & Xu, J. (2021). State-of-the-art technologies for biofuel production from triglycerides: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 148, 111269. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111269>.
- Martínez, G., Sánchez, N., Encinar, J.M., & González, J.F. (2014). Fuel properties of biodiesel from vegetable oils and oil mixtures. Influence of methyl esters distribution. *Biomass and Bioenergy*, 63, 22–32. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2014.01.034>.
- Mashkour, A.P.D.M.A., & Mohammed, L.A.A. (2017). Impact of mixing speed & reaction time on the biodiesel production from sunflower oil. *Association of Arab Universities Journal of Engineering Sciences*, 24(3), 101-134.
- Musa, I.A. (2016). The effects of alcohol to oil molar ratios and the type of alcohol on biodiesel production using transesterification process. *Egyptian Journal of Petroleum*, 25(1), 21-31. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ejpe.2015.06.007>.
- Nguyen, V.N., Sharma, P., Kumar, A., Pham, M.T., Le, H.C., Truong, T.H., & Cao, D.N. (2023). Optimization of biodiesel production from Nahar oil using Box-Behnken design, ANOVA and grey wolf optimizer. *International Journal of Renewable Energy Development*, 12(4). <https://doi.org/10.14710/ijred.2023.54941>.
- Oguz, H., & Tolu, M.C. (2023). Investigation of fuel properties of biodiesel produced from hemp seed oil. *International Journal of Automotive Engineering and Technologies*, 12(1), 1-8.
- Önder, F., Ağır, H. (2023). Panel Econometric Analysis of the Relationship between Energy Consumption and Economic Growth: The Case of the Bric Countries. *Türk Tarım ve Doğa Bilimleri Dergisi*, 10(4), 922–932. <https://doi.org/10.30910/turkjans.1355868>.
- Pablo-Romero, M.D.P., & Sánchez-Braza, A. (2015). Productive energy use and economic growth: Energy, physical and human capital relationships. *Energy Economics*, 49, 420–429. <http://dx.doi.org/10.1016/j.eneco.2015.03.010>.
- Phankosol, S., & Krisnangkura, K. (2015). Estimation kinematic viscosity of biodiesel produced by ethanolysis. *Engineering Transactions: A Research Publication of Mahanakorn University of Technology*, 18(2), 96-99.
- Phipps, B., & Schluttenhofer, C. (2022). Perspectives of industrial hemp cultivation. In M. Pojić, B.K. Tiwari (Eds.), *Industrial hemp: Food and nutraceutical applications* (pp. 1–36). Academic Press.
- Ramírez-Verduzco, L.F., Rodríguez-Rodríguez, J.E., & del Rayo Jaramillo-Jacob, A. (2012). Predicting cetane number, kinematic viscosity, density and higher heating value of biodiesel from its fatty acid methyl ester composition. *Fuel*, 91(1), 102–111. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2011.06.070>.



- Rashid, U., Bhatti, S.G., Ansari, T.M., Yunus, R., & Ibrahim, M. (2016). Biodiesel production from Cannabis sativa oil from Pakistan. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 38(6), 865-875. <https://doi.org/10.1080/15567036.2013.803179>.
- Rashid, U., & Anwar, F. (2008). Production of biodiesel through optimized alkaline-catalyzed transesterification of rapeseed oil. *Fuel*, 87(3), 265-273. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2007.05.00>.
- Sáez-Bastante, J., Fernández-García, P., Saavedra, M., López-Bellido, L., Dorado, M.P., & Pinzi, S. (2016). Evaluation of Sinapis alba as feedstock for biodiesel production in Mediterranean climate. *Fuel*, 184, 656-664. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2016.07.022>.
- Said, Z., Sharma, P., Nhung, Q.T.B., Bora, B.J., Lichtfouse, E., Khalid, H.M., Luque, R., Nguyen, X.P., & Hoang, A. T. (2023). Intelligent approaches for sustainable management and valorisation of food waste. *Bioresourcetechnology*, 128952. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2023.128952>.
- Saydut, A., Kafadar, A.B., Aydin, F., Erdogan, S., Kaya, C., & Hamamci, C. (2016). Effect of homogeneous alkaline catalyst type on biodiesel production from soybean [Glycine max (L.) Merrill] oil. *Indian Journal of Biotechnology*, 15(4), 596-600.
- Sharma, P., Sivaramakrishnaiah, M., Deepanraj, B., Saravanan, R., & Reddy, M. V. (2022). A novel optimization approach for biohydrogen production using algal biomass. *International Journal of Hydrogen Energy*. Article in press. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.09.274>.
- Shrivastava, P., Rajak, U., Nashine, P., & Verma, T.N. (2021). Performance and emission characteristics of a compression ignition engine fueled with roselle and karanja biodiesel. In S.M. Sapuan, R. Nadlene, A.M. Radzi, & R.A. Ilyas (Eds.), *Roselle: Production, processing, products and biocomposites* (pp. 165-176). Academic Press.
- Singh, A., He, B., Thompson, J., & Van Gerpen, J. (2006). Process optimization of biodiesel production using alkaline catalysts. *Applied Engineering in Agriculture*, 22(4), 597-600.
- Small, E. (2015). Evolution and classification of Cannabis sativa (marijuana, hemp) in relation to human utilization. *The botanical review*, 81, 189-294. <https://doi.org/10.1007/s12229-015-9157-3>.
- Stamenković, O.S., Veličković, A.V., Kostić, M.D., Joković, N.M., Rajković, K.M., Milić, P.S., & Veljković, V.B. (2015). Optimization of KOH-catalyzed methanolysis of hempseed oil. *Energy Conversion and Management*, 103, 235-243. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2015.06.054>.
- Strzelczyk, M., Lochyńska, M., & Chudy, M. (2022). Systematics and botanical characteristics of industrial hemp Cannabis sativa L. *Journal of Natural Fibers*, 19(13), 5804-5826. <https://doi.org/10.1080/15440478.2021.1889443>.
- Sultana, S., Khalid, A., Ahmad, M., Zuhairi, A.A., Teong, L.K., Zafar, M., & Hassan, F.U. (2014). The production, optimization, and characterization of biodiesel from a novel source: Sinapis alba L. *International Journal of Green Energy*, 11(3), 280-291. <https://doi.org/10.1080/15435075.2013.772520>.
- Verma, P., & Sharma, M.P. (2016). Review of process parameters for biodiesel production from different feedstocks. *Renewable and sustainable energy reviews*, 62, 1063-1071. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2016.04.054>.
- Wang, Y. (2019). Applications of rice bran oil. In L.Z. Cheong, X. Xu (Eds.), *Rice bran and rice bran oil* (pp. 159-168). AOCS Press.
- Wirtshafter, D.E. (2004). Ten years of a modern hemp industry. *Journal of Industrial Hemp*, 9(1), 9-14. [https://doi.org/10.1300/J237v09n01\\_03](https://doi.org/10.1300/J237v09n01_03).
- Yesilyurt, M.K., & Cesur, C. (2020). Biodiesel synthesis from Styra officinalis L. seed oil as a novel and potential non-edible feedstock: A parametric optimization study through the Taguchi technique. *Fuel*, 265, 117025. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117025>.
- Yıldırım, H.H. (2019). Yenilenebilir enerji yatırımlarındaki teşviklerin yatırım performansları üzerine etkisi. *Finans Ekonomi ve Sosyal Araştırmalar Dergisi*, 4(3), 330-345. <https://doi.org/10.29106/fesa.605785>.
- Zahan, K.A., & Kano, M. (2018). Biodiesel production from palm oil, its by-products, and mill effluent: A review. *Energies*, 11(8), 2132. <https://doi.org/10.3390/en11082132>.





# Kahramanmaraş Sutcu Imam University

## Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 22.12.2023  
Kabul Tarihi : 20.02.2024

Received Date : 22.12.2023  
Accepted Date : 20.02.2024

### MANYETİK KONTROLLÜ ŞÖNT REAKTÖR FEM ANALİZİ VE UYGULAMASI

### MAGNETIC CONTROLLED SHUNT REACTOR FEM ANALYSIS AND APPLICATION

İsmet KAYMAZ<sup>1\*</sup> (ORCID: 0009-0005-3782-7196)  
Mehmet BAYRAK<sup>2\*</sup> (ORCID:0000-0001-5225-0640)  
Semih TURSUN<sup>3\*</sup> (ORCID: 0009-0008-0818-7638)

<sup>1,2</sup> Sakarya Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Sakarya, Türkiye  
<sup>1,3</sup> Astor Enerji, Ankara, Türkiye

<sup>1\*</sup>Sorumlu Yazar / Corresponding Author: İsmet KAYMAZ, ismet.kaymaz1@ogr.sakarya / ismet.kaymaz@astoras.com.tr

#### ÖZET

Enerji ihtiyacı insanlığın teknolojik ürünleri kullanması ve gelişimine yönelmesiyle günümüze kadar artarak devam etmiştir. Bu enerji talebindeki artış hatlardan iletilen güç miktarında da artışa neden olmuştur. Bu güç artışı iletim ve dağıtım hatlarına olumsuz bir etki olarak yansımıştır. Bu artışı telafi etmek için üretim artmakla kalmayıp aynı zamanda iletim hatlarının da bu enerji akışı için kordine edilmesi gerekmektedir. İletim hatlarında düzenleme yapılmadığı takdirde artan enerji ihtiyacına karşılık iletilen enerji yeterli gelmeyecek, hatlarda gerilim düşümü ve kayıplar ciddi derecede artacaktır. İletim hatlarından aktarılan güç her zaman sabit değildir, belirli zamanlarda düşüş veya artış göstermektedir. Bu düşüş veya artış iletim sistemi endüktansında ve kapasitesinde farklılıklar meydana getirir. Düşük yük durumlarında kapasitif etkiler meydana gelmektedir ve bunun sonucunda hattın akan kapasitif akım değerinde artış olmaktadır. Bu artış reaktif güç üretimini de beraberinde getirmektedir. Üretilen reaktif gücün tüketilmesi ve hattın iletilen akımın büyüklüğünün azaltılması gerekmektedir. Bu sorunun çözümü için birden fazla yöntem mevcut olmasına rağmen ayarlanabilir reaktif güç kapasitesiyle manyetik kontrollü reaktör en uygun çözümlerden biridir. Manyetik kontrollü şönt reaktörler son yıllarda yaygınlaşan, güç elektroniği ve transformatör sektörünün birleşmesiyle ortaya çıkan efektif bir üründür. Yapılan bu çalışmada, teorik olarak tasarlanan manyetik kontrollü şönt reaktörün elektromanyetik analizleri yapılmış, ürün üretilmiş ve sonuçlar tartışılmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Manyetik kontrollü reaktör, sonlu elemanlar yöntemi, manyetik alan, reaktif güç, ayarlı endüktans.

#### ABSTRACT

Throughout history, the human race has made significant strides in technological advancements, leading to an increase in energy demand. As a result, there has been an escalation of power transmitted through transmission and distribution lines, which has negatively impacted these systems. To address this issue, it is essential to coordinate the transmission lines to handle this energy flow as the growing energy demand will exceed the capacity of the transmitted energy if the transmission lines are not adjusted. The power transmitted through these lines is not always constant; it can fluctuate, causing variations in the transmission system's inductance and capacitance. Capacitive effects can occur during low-load conditions, resulting in an increase in capacitive current flowing through the lines, leading to the production of reactive power. To address this issue, it is crucial to consume the generated reactive power and reduce the magnitude of current transmitted through the lines. There are various methods available to address this problem, but one of the most effective solutions is to use magnetically controlled shunt reactors to adjust the reactive power capacity. This product has become increasingly popular in recent years, resulting from the fusion of power electronics and the transformer sector. In this study, electromagnetic analyses of the theoretically designed magnetic-controlled shunt reactor were conducted. A product was manufactured, and the results were discussed.

**Keywords:** Magnetically controlled reactor, finite element method, magnetic field, reactive power, tuned inductor.

ToCite: KAYMAZ, İ., & BAYRAK, M., & TURSUN, S., (2024). MANYETİK KONTROLLÜ ŞÖNT REAKTÖR FEM ANALİZİ VE UYGULAMASI. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 27(2), 554-566.

## GİRİŞ

Teknolojide meydana gelen gelişmeler sonucunda teknolojik ürünlerin gelişimi ve kullanımı artmıştır. Bu artış güç sistemlerinde kirliliği de beraberinde getirmiştir. Kirlilik basit bir şekilde özetlenecek olursa akım ve gerilim dalga şeklinde meydana gelen bozulmaları ifade eder. Kirlilik teknolojik cihazların ömrü üzerinde de ciddi etkiye sahiptir. Etkiyi hafifletmek için reaktörler kullanılmaktadır.

Manyetik kontrollü şönt reaktörler (MCSR, Magnetically Controlled Shunt Reactor) sistem ihtiyacına göre sürekli ayarlanabildiği için diğer reaktif güç cihazlarını donatmaya gerek kalmadan reaktif güç ve gerilim kontrolünü sağlarlar. İletim hattının stabilizasyonu için yük atma ve alma anında istenilen reaktif güç değerine hızla uyum sağlayabilir. MCSR kapasitif reaktif gücü dinamik olarak dengeler ve sistem kararlılığı üzerinde etkin rol oynar.

Statik VAR Kompanzator gibi geleneksel reaktif güç kompanzasyon cihazları genellikle hem reaktif güç hem de aşırı gerilimi bastırmaya yeterli değildir. MCSR bu sorunu ortadan kaldırır, reaktif güç sorununun yanında aynı anda aşırı gerilim sorununu da çözer.

MCSR'ler düşük harmonik seviyesiyle ön plana çıkmaktadır. 36 kV gerilim seviyesine kadar yapılan MCSR tasarımında sargı yapısı olarak üçgen bağlantı tercih edilmektedir. Bu tercihin sonucunda üçüncü harmonikler sargı içerisinde kalır. Harmonikler üzerinde sargı bağlantı şeklinin yanı sıra nüve yapısı da etki eder. Nüve yapısındaki hava aralıklarının kordinasyonu ile istenilen harmonik değeri üzerinde optimizasyon yapılabilir. Literatür araştırmalarının sonucunda nüve şekillerine göre reaktör harmonikleri üzerinde çalışmalar yapıldığı da görülmüştür (Yang vd. , 2023 ; Chen vd., 2011) .

Manyetik kontrollü reaktörler tristör kontrollü reaktörlere kıyasla maliyet açısından daha ucuz olmasının yanında yüksek gerilim hatlarına da arada transformatör olmadan doğrudan bağlanabilmektedirler. MCSR'lerde kullanılan tristör boyutları TCR'lere kıyasla daha küçük ve buna bağlı olarak daha ucuzdur (Karymov & Ebadian ,2007) .

Nüve tasarımı bu ürün için ciddi önem arz eder. Tasarım yapısına göre reaktörün endüktansı ve güç kayıpları değişmektedir. Araştırmalarda, bacak yapısının tek aşamalı, çok aşamalı ve dağıtılmış şekilde boşluklar yapılarak oluşturulduğu görülmektedir. Güç kaybı ve endüktans dengesi tarafından bakılınca dağıtılmış yapının kullanılmasının diğer yapılara kıyasla daha avantajlı olduğu görülmüştür (Tong vd., 2019).

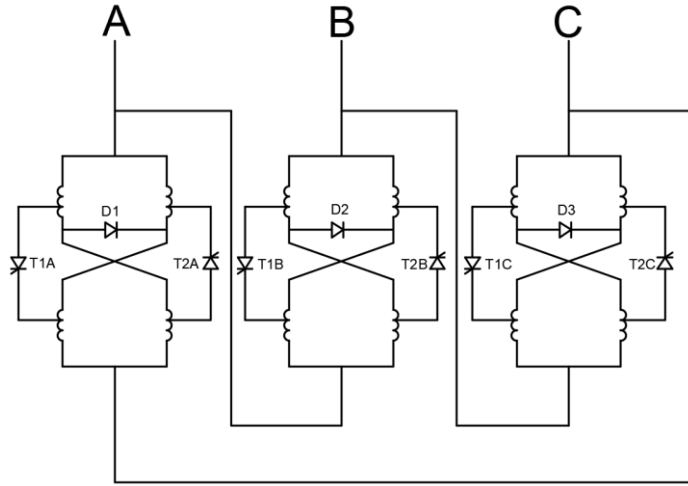
Bu çalışmada, manyetik kontrollü reaktörün çalışma yapısı açıklanacak, elektromanyetik analizleri Ansys-Maxwell programıyla gerçekleştirilecek ve üretimi yapılan reaktörün test verileri yorumlanacaktır.

## MANYETİK KONTROLLÜ REAKTÖR

Modern MCSR'lerin altında yatan çalışma prensibi olan elektrik çeliğin manyetik doyumunun kullanımına ilişkin ilk fikirler 1940'larda ortaya çıkmıştır. İlk yapılan MCSR'lerin teknik ve ekonomik performansı optimal olmaktan uzaktı, maliyeti yüksek, cevap hızı düşük olup, sınırlı kontrol aralığı mevcuttu. Bu olumsuz nedenlerden dolayı bir süre üretimi durmuştur. Zamanla bu sorunların ortadan kalkmasıyla MCSR kullanımı özellikle son yıllarda ciddi bir artış göstermiştir (Xu , 2009).

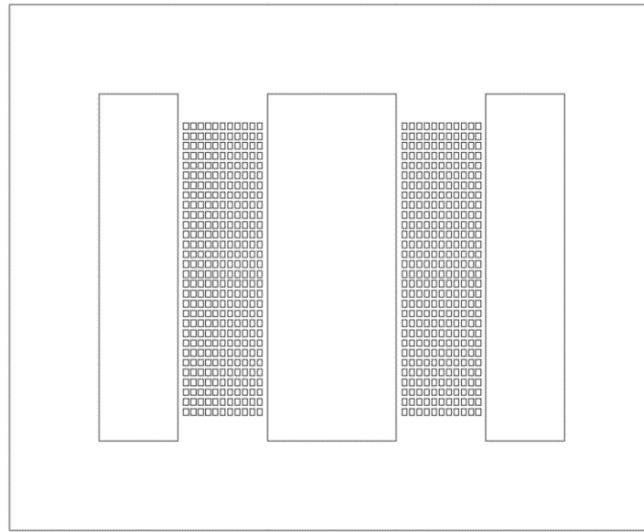
MCSR'lerin yapısı normal transformatör yapısına çok benzerdir ve aktif kısım iki adet üç fazlı transformatörden oluşur. MCSR bacaklarında hat sargısının yanı sıra kontrol sargısı da bulunur. Kontrol sargısı hat sargılarının belirli bir yüzdesini kapsayacak şekilde tasarlanır. Üç fazlı üçgen bağlı MCSR'nin bağlantı şekli Şekil 1'de gösterilmiştir.

MCSR iki simetrik ve paralel bağlı reaktöre benzemektedir. Bu simetri hat sargıları ve kontrol sargıları için de geçerlidir. Çalışma esnasında hem kontrol hem de hat sargıları devrededir. Dağıtım sistemlerde kullanılan Manyetik Kontrollü Reaktörde kontrol sargısı ve hat sargısı seri bağlıdır.

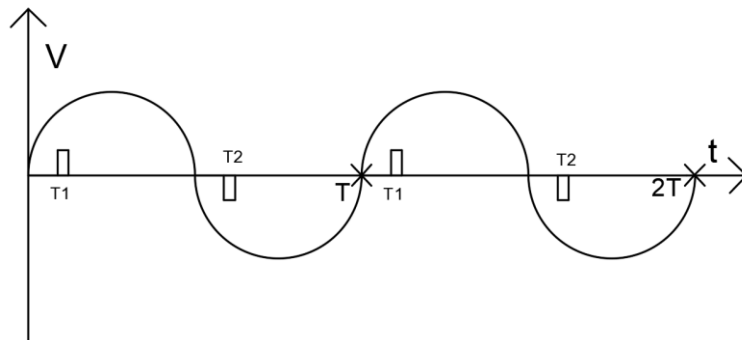


Şekil 1. MCSR Üç Fazlı Eşdeğer Modeli

Manyetik olarak incelendiğinde, hat sargısı AC endüksiyon kaynağı olarak görev yaparken DC sargılar ise nüvenin doyuma gitmesini sağlayan doğru gerilimi oluşturan sargılar olarak görev yapar. Şekil 1'den görüleceği üzere üç fazlı bir MCSR'de 6 adet tristör ve 3 adet diyot bulunur. Bu tristörlerin tetikleme açıları fazlar arası 120 derecedir. Şekil 2'de reaktör için basit tek fazlı eşdeğer elektromanyetik modeli görülmektedir.



Şekil 2. MCSR Nüve Yapısı



Şekil 3. Tristör Tetikleme Açısı

MCSR'de referans alınan bir faz için iki periyottaki tetikleme zamanı örnek olarak Şekil 3'de gösterilmiştir. İlk yarı periyotta bir bacadaki tristör devredeyken diğer yarı periyotta diğer bacakta bulunan tristör devrededir. Bu tristörlerin tetikleme açıları istenilen güç seviyesine göre değişmekte olup, aralarında bir faz için 180 derece faz farkı vardır. Tristörler tetiklenmemişken reaktör nüvesindeki AC akıdan kaynaklanan sadece AC endüktans mevcuttur. Tristörlerin tetikleme açıları 180 dereceden 90 dereceye doğru gittikçe DC gerilim bileşenin değeri artacak, endüktans düşecek ve reaktif edüktif güç artacaktır. Bu artışı sınırlayan bazı parametreler mevcuttur ve bunlar; ayar sargısının gerilim değeri, reaktörün termal sınırı ve endüktans değeridir.

MCSR'ün bacaklarında akı oluşturmak için sargılar tarafından oluşturulan amper sarım aşağıdaki eşitliklerde verilmiştir.

$$NI_l(t) = NI_{DC} + NI_m * \sin(\omega t) \quad (1)$$

$$NI_r(t) = -NI_{DC} + NI_m * \sin(\omega t) \quad (2)$$

Yukarıdaki eşitliklerden de görüldüğü gibi, bir bacak için maksimum endükleme verilirken diğer bacak için minimum endükleme verilmektedir. Bu sayede bir bacak tasarıma bağlı olarak doğrusal bölgede çalışmakta iken diğer bacak doyma bölgesinde çalışabilmektedir. DC endükleme sargıda akan DC akımdan kaynaklanmaktadır (Mehmood vd., 2021).

Aşağıda sol ve sağ bacakta endüklenen akı için bağıntılar verilmiştir.

$$Q_L(t) = Q_0 + Q_1 * \sin(\omega t - Z_1) + Q_2 * \sin(2\omega t - Z_2) + Q_3 * \sin(3\omega t - Z_3) + \dots + Q_n * \sin(n\omega t - Z_n) \quad (3)$$

Nüve bacakları arasında yarım dalga simetrisi sağlanmaktadır ve  $Q_R$  ifadesi şu şekildedir [3]:

$$Q_R(t) = -Q_0 + Q_1 * \sin(\omega t - Z_1) - Q_2 * \sin(2\omega t - Z_2) + Q_3 * \sin(3\omega t - Z_3) + \dots + Q_n * \sin(n\omega t - Z_n) \quad (4)$$

$NI_l$ : Sol bacadaki amper-sarım

$NI_r$ : Sağ bacadaki amper-sarım

$NI_{DC}$ : Bacakta oluşan DC amper-sarım

$NI_m$ : Bacaktaki AC amper-sarım maksimum değeri

$Q_L$ : Sol bacadaki akı

$Q_R$ : Sağ bacadaki akı

$Q_0$ : Bacaktaki DC akı

$Q_n$ : Bacaktaki akının n.harmonik değeri

$Z_n$ : Bacaktaki akının faz kayması

Yukarıda verilen bağıntılarda görüldüğü gibi, harmonikli endüksiyon bileşenleri reaktör akımına yansıtacaktır ve reaktörün harmonikli akım çekilmesine neden olacaktır. Bu harmonikler reaktör ömrü için zararlı olacaktır ve reaktörün daha kısa sürede arızalanmasıyla sonuçlanacaktır. Bu gibi sorunlar için harmonikleri filtreleme işlemleri yapılmaktadır. Bu filtreleme işlemleri sadece sisteme R-C-L elemanlarını bağlamaktan ziyade nüve yapısında yapılan değişikliklerle de yapılabilmektedir. Yukarıda da belirtildiği gibi, reaktörün üçgen bağlantı yapılması durumunda üçüncü harmonikler sargı içerisine kalacaktır. Dağıtım sistemlerinde kullanılan MCSR'de 5. ve 7. harmoniklerin önemli ölçüde gerilim bozulmasına neden olmadığı yaygın olarak bilinmekte ve yapılan kapsamlı araştırmalar sonucunda da aynı kanıya varılmıştır.

## SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİYLE MODELLEME

MCSR modelinin analizi için oluşturulan yaklaşık model sonlu elemanlar yöntemini kullanarak çözüm gerçekleştiren Ansoft Maxwell yazılımına aktarılmıştır. Maxwell elektromanyetik çözümlerin gerçekleştirilmesi için yaygın olarak kullanılan bir programdır. Karmaşık bir tasarım sürecinde ortaya çıkan modeli analitik çözümler yerine sonlu elemanlar yöntemini kullanarak çözmek diğer yöntemlere göre daha kolay ve hızlıdır.

Bilgisayar teknolojisinin gelişmesi ve bilgisayar yazılımlarına yönelimin artmasıyla sonlu elemanlar yöntemi ve benzer yöntemi kullanan yazılımlar üzerine ilgi artmış, tasarımcılar ve AR-GE mühendisleri için vazgeçilmez hale gelmiştir.

Ansys-Maxwell programı önce yapıyı belirli sayıda parçaya ayırıp sonrasında ise bu parçalarda çözüm yapmaktadır. Bu çözümlerin sonucunu birbirine entegre ederek nihai sonuca ulaşmaktadır (Kaymaz vd. , 2023) .

Çözümlenen model üzerinde enerji hesabıyla, temel alan ifadeleri elde edilir. Enerji hesabı için aşağıdaki bağıntı kullanılır.

$$W = \frac{1}{2} I^2 L \quad (5)$$

Elde edilen enerji endüktans hesabı için kullanılır ve denklem 6'da belirtilmiştir.

$$L = \frac{2W}{I^2} \quad (6)$$

Burada,  $W$  enerjii,  $I$  reaktör akımının etkin değerini,  $L$  reaktör endüktansını göstermektedir. MCSR'ün çekirdek yapısı Şekil 2'de verilmişti, Şekil 4'de ise demir çekirdek ve sargıları içeren model görülmektedir.



Şekil 4. MCSR Sonlu Elemanlar Modeli

Şekil 4'deki modelde görülen sargılar hem AC hem de DC sargılardan oluşmaktadır. DC sargılar AC sargı arasından doğrultma devresine alınır ve reaktörü doyuma götürerek endüktansının değişimi üzerinde doğrudan etkilidir. Tasarımı yapılan MCSR'nin tasarım parametreleri aşağıda verilmiştir.

Tablo 1. MCSR Etiket Değerleri

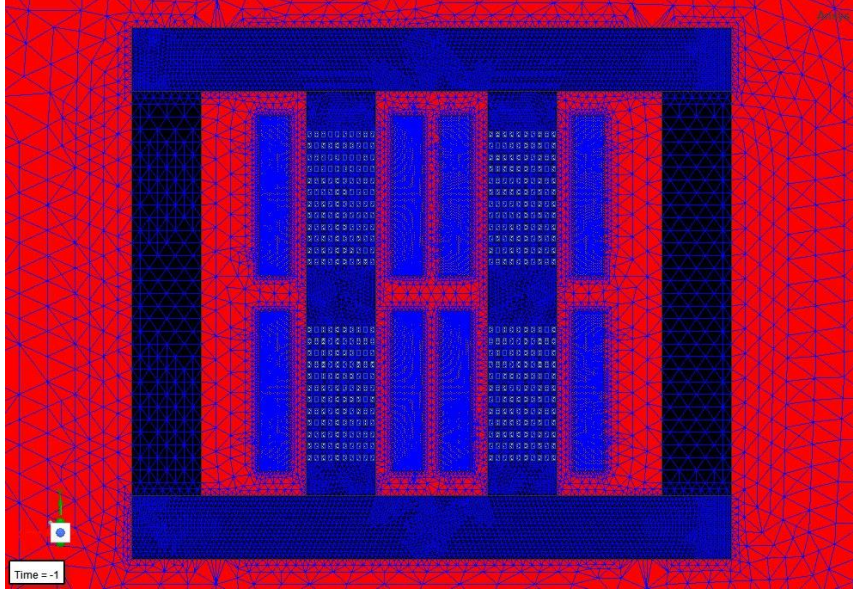
Güç (kVAr)	2000
Gerilim (kV)	31,5
Endüktans aralığı (H)	4,737-94,76
Frekans (Hz)	50

Şekil 4'te görülen kahverengi parçalar reaktör sargısını gösterirken, siyah kısım ise ana çekirdeği göstermektedir. Bu çalışmada, sargı malzemesi olarak alüminyum malzeme, nüve için ise silisli sac kullanılmıştır.

Nüvede gerekli akı yoğunluğunu sağlayarak enerjiyi toplamak için hava aralıkları kullanılmış olup, bu aralıklar modele eklenmiştir.



Program içerisinde model parçalara ayrılmıştır ve bu parçalanmış şekil Şekil 6'da verilmiştir. Bu olaya literatürde parçalama denilmektedir ve bu çalışma için model 84714 parçaya bölünmüştür. Bu sayı uygun enerji değişimi yakalanana kadar artan parça sayısıdır. Ağ oluşturma sırasında kaba ağ ayarları dikkatli bir şekilde yapılmış ve modelin ana yapısı dikkate alınarak parçalama metodolojisi tercih edilmiştir. İki boyutlu model kullanılması sayesinde analiz süresinde ciddi kısalma meydana gelmiştir.

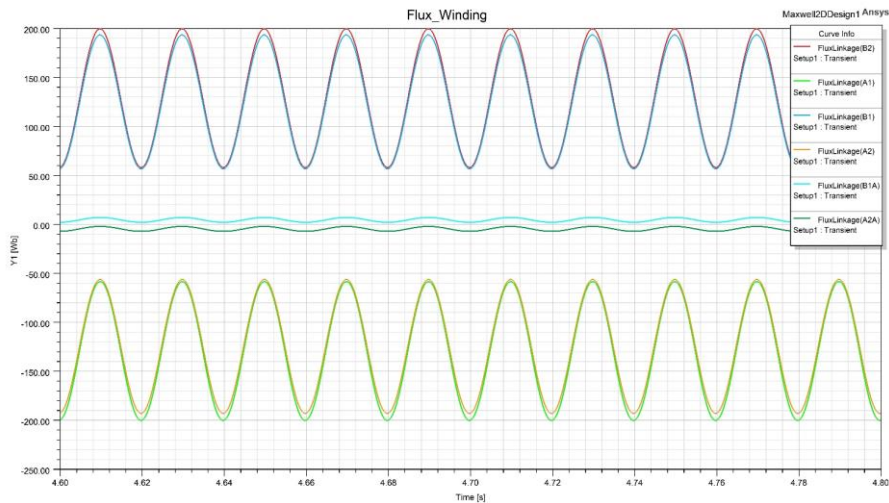


Şekil 5. Modeldeki Ağ Yapısı

Manyetik Kontrollü Reaktör sargıları, harici devre ile beslenmiş olup reaktörün çalışması için istenilen DC gerilim değeri tristör uyarma devresiyle sağlanmıştır.

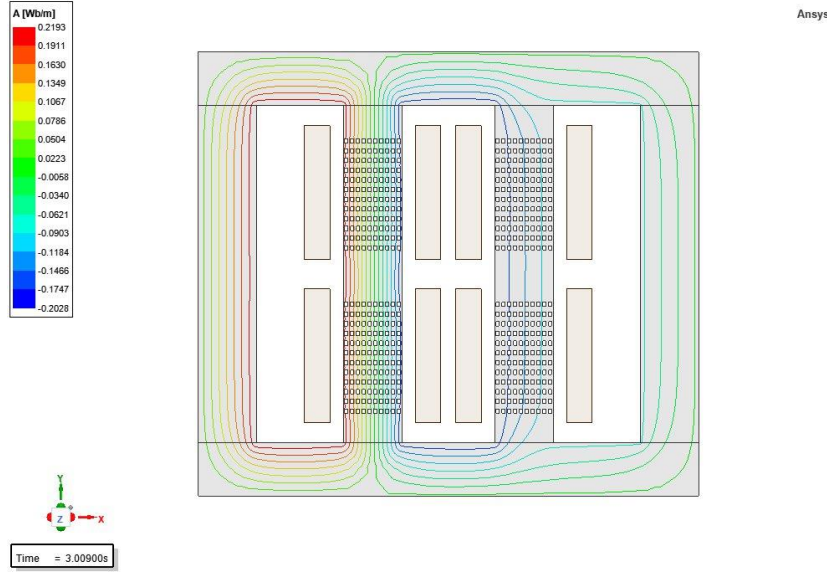
## SİMÜLASYON SONUÇLARI

MCSR'ün DC sargılarına bağlanan tristörlere tetikleme işareti verilmediğinde reaktörün nüvesinde herhangi bir DC bileşen bulunmaz yani reaktör en düşük kapisteyle, B-H eğrisinin linner bölgesinde çalışır. Tristör tetikleme açıları 180°'den 90°'ye doğru gittikçe reaktör nüvesinde DC bileşen oluşmaya başlar ve artar. Bu artışla beraber nüve doyuma doğru gitmektedir. Belirli bir süre sonra nüvede DC gerilimden dolayı akı salınım merkezi eksenenden kaymıştır. Bu kaymanın bir örneği Şekil 6'da gösterilmiştir.

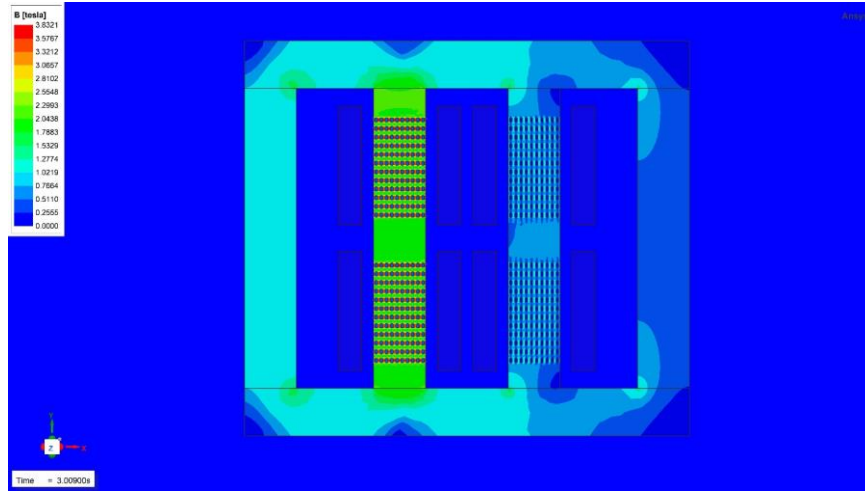


Şekil 6. Sargılardaki Akı Salınımı

Nüvede bulunan hava aralıklarında ve nüvede enerji birikir, bu enerji miktarı tristör tetikleme açılarında bağlı olarak değişir. Şekil 7’de nüvede ilk yarı periyotta oluşan maksimum akı için, Şekil 8’de ise maksimum akı yoğunluğu için dağılım gösterilmiştir.

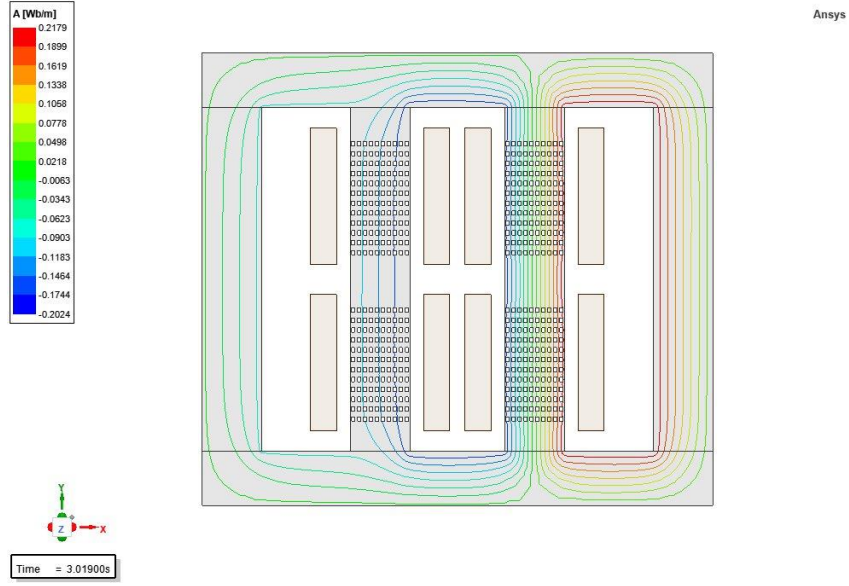


Şekil 7. İlk Yarı Periyottaki Maksimum Akı Dağılımı

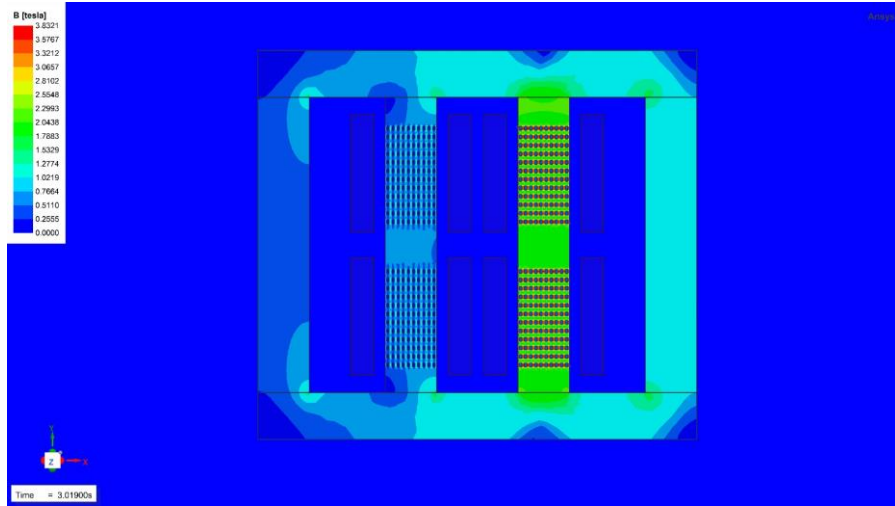


Şekil 8. İlk Yarı Periyottaki Maksimum Akı Yoğunluğu Dağılımı

Şekil 7 ve Şekil 8’de bacaklardaki boşluklu yapı görülmektedir. Bu boşluklu yapıdan dolayı bacaktaki akının kullanabileceği aktif kesit azalmıştır ve bunun sonucunda bölgesel doymalar oluşmuştur. Şekil 9’da ikinci yarı periyotta nüve bacağına meydana gelen maksimum akı dağılımı, Şekil 10’da da akı yoğunluğunun dağılımı verilmiştir.

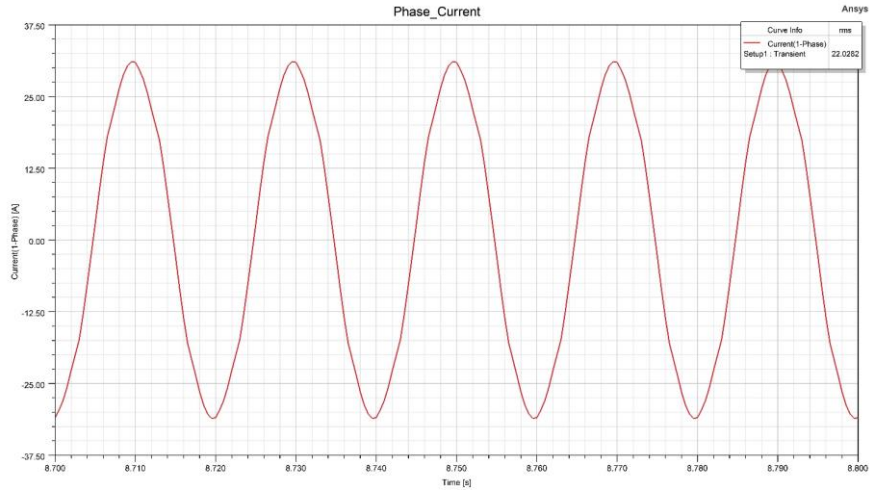


Şekil 9. İkinci Yarı Periyotta Maksimum Akı Dağılımı



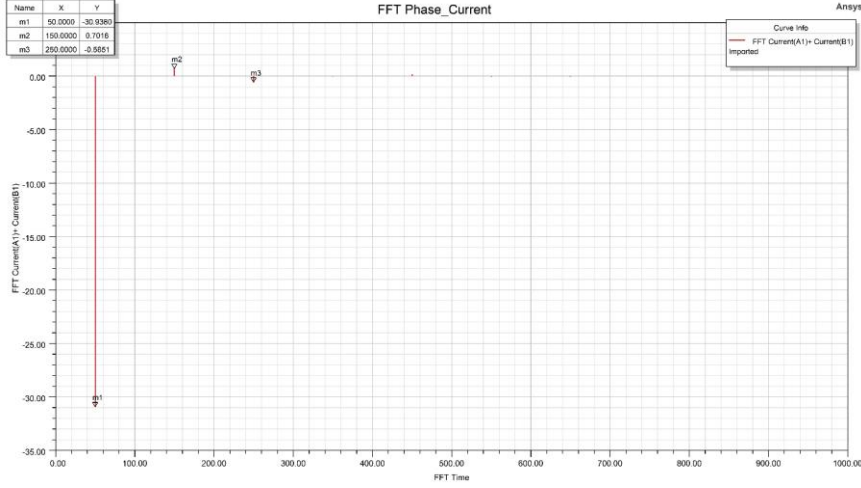
Şekil 10. İkinci Yarı Periyotta Maksimum Akı Yoğunluğu Dağılımı

Bir periyodun yarısında bir bacak doyuma girerken bir bacak minimum endüksiyon seviyesinde çalışmakta, diğer yarısında ise aynı durum tersine gerçekleşmektedir.



Şekil 11. Hat Sargısı Tek Faz Akımı

Sargı akımının dalga şekli Şekil 11’de tek faz olarak gösterilmiştir. Bu akımın RMS değeri 22,03 A olarak elde edilmiştir. Bu akım değeri tristör tetikleme açılarına bağlıdır , güç elektroniği elemanları ve nüveden kaynaklı harmonik bileşenleri içermektedir. Ansys-Maxwell programında modelleme tek fazlı olduğu için 3.harmonik bileşenleri akım dalga şeklinde görülmektedir. Şekil 12’de harmonik analizi yapılmış ve gösterilmiştir.

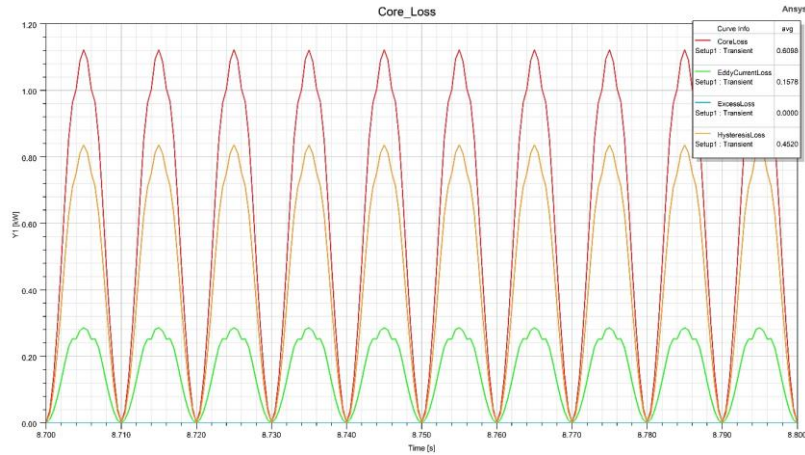


Şekil 12. Hat Sargısı Tek Faz Akımı İçin Harmonik Analizi

Üçüncü harmonikler ana harmonik bileşenin %2,26’sı olarak programda tespit edilmiş ve bu akım bileşeni üç fazlı üçgen bağlı reaktörlerde sargı içerisinde kalmakta, ana hatta yansımamaktadır. Üçgen bağlantı sargı şekillerinin yüksek gerilim seviyelerinde yapılması ekonomik olmayacaktır. Gerilim seviyesinin azaltılması için yıldız bağlantı tercih edilmekte, fakat böyle bir bağlantı durumunda harmonikler direkt olarak ana hatta yansiyacak ve ek kompanzasyon sistemlerine ihtiyaç duyulacaktır. Bu nedenle, ek harmonik bileşenleri dikkate alınmalı ve tasarım aşaması buna göre ilerlemelidir.

>

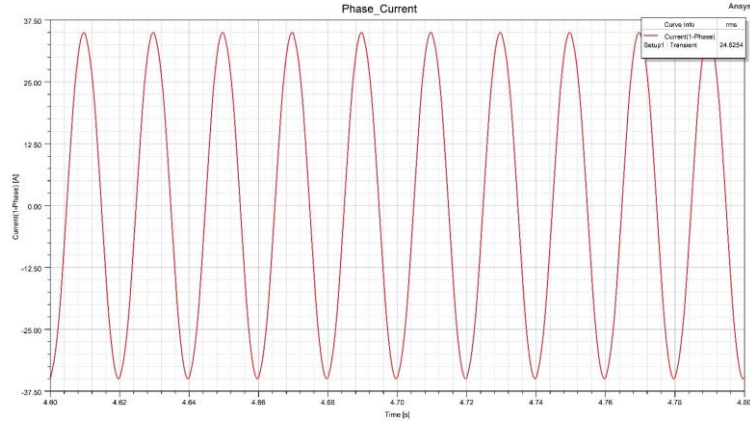
Beşinci harmonik değeri ana harmonik değerinin %1,891’i olarak analiz sonucunda elde edilmiştir. Yukarıdaki analiz sonuçlarında reaktör 2080 kVAr’lık (3 faz ) bir reaktif güçle yüklenmiştir. 2080 kVAr gücünde nüvede meydana gelen demir kayıpları ise Şekil 13’de verilmiştir.



Şekil 13. Nüve Kayıplarının Zamanla Değişimi

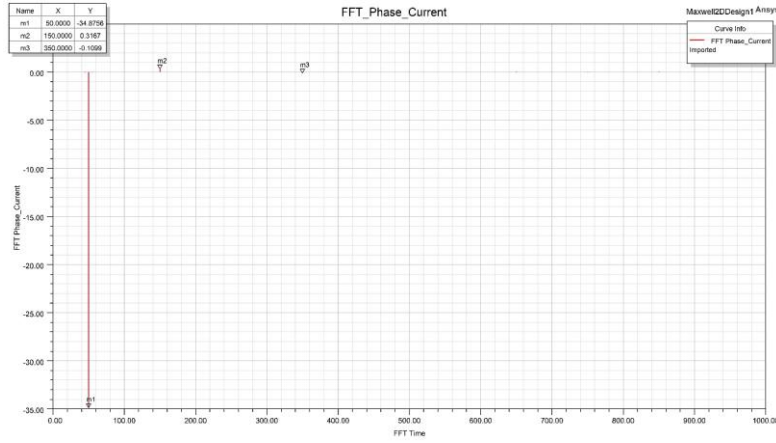
Nüvede 609,8 W’lık (1 faz ) bir demir kaybı meydana gelmiş olup, bu kayıpların %25’i eddy kayıplarıdır. Kalan %75’lik kısım ise histeresiz kayıplarından oluşmaktadır.





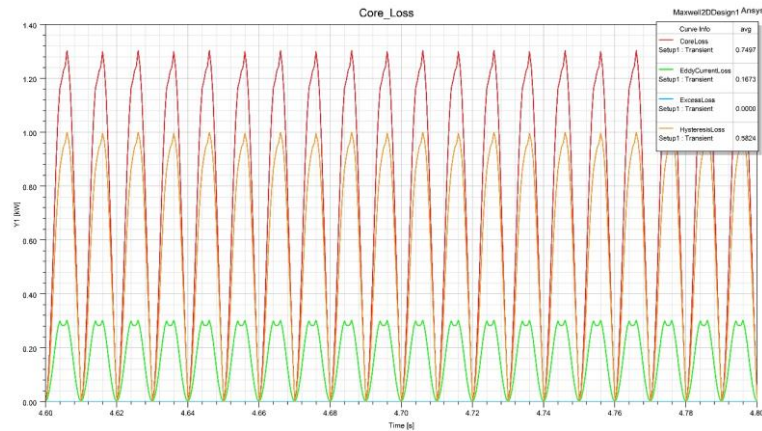
Şekil 14. Hat Sargısı Tek Faz Akımı

Şekil 14’de reaktörü kontrol eden tristörlerin tetik açılarının değişmesiyle reaktör akımında artış meydana gelmiştir. Reaktör akımı 24,82 A olmuştur ve yaklaşık nominal akımın %17 üzerindedir. Akım harmonik bileşenleri aşağıda verilmiştir.



Şekil 15. Hat Sargısı Tek Faz Akımı İçin Harmonik Analiz

Yukarıdaki şekilde sargı akımının harmonik bileşenleri gösterilmiştir. Üçüncü harmonik değeri ana harmonik bileşenin %0,9’u, beşinci harmonik değeri ise ana harmonik bileşenin %0,315’i olarak analiz sonuçlarında elde edilmiştir. Reaktör nüvesinde endüklenen akıdan kaynaklı demir kayıpları meydana gelmekte olup, ekstra yüklenme durumundaki demir kayıpları aşağıda verilmiştir.



Şekil 16. Aşırı Yüklü Durumda Nüve Kayıpları

Fazla endüktif yükle yüklenmesi durumunda nüvede 750 W’lık (1 faz) kayıp meydana gelmiştir. Bu kayıpların %22’si eddy kayıplarını, %78’i ise histeresiz kayıplarını oluşturmaktadır. Bu değerler reaktör yüklenme derecesine bağlı olarak değişmekte ve bu değişim doğal olarak reaktör akımının harmonik bileşenlerini doğrudan etkilemektedir.



**DENEYSEL ÇALIŞMA****Şekil 18. a. MCSR Üretim Sonu****b. MCSR Testi**

Yukarıda test edilen MCSR görülmektedir. Tristör ve diyotlar sargı uçlarından alınıp izalatörlere gelen burçlara bağlanmıştır. Devreye alma sırasında güç elektroniği elemanlarının uçlarında meydana gelecek ani gerilimlere karşı ek önlemler alınmaktadır. Gerilim yavaş yavaş artırılıp nominal seviyeye getirilmiş, sonrasında ise tristörlerin tetikleme açıları değiştirilmeye başlanmış 180°'den 90°'ye doğru yavaş yavaş azaltılmıştır. Bu açıların azalmasına paralel olarak doğrultulan gerilim değeri de artmaya devam etmiştir. Gerilime bağlı olarak reaktör linneer bölgeden çıkmış ve nominal güce ulaşmıştır.

**Tablo 2. MCSR Tetik Derecesi ve Güç Değeri (test)**

Tetik Açısı	Q(kVAr)	V(F-F)
164	121	31500
150	420	31500
145	570	31500
140	740	31500
130	1120	31500
125	1340	31500

Tetik Açısı	Q(kVAr)	V(F-F)
120	1570	31500
115	1820	31500
112	2000	31500
110	2070	31500
105	2350	31500

**Tablo 3. MCSR Kayıpları ( test )**

	75 C°
2000 kVAr	32329 W (Pk)

MCSR yükte test edilmiş ve tam yük için kayıplar, güç değeri cinsinden kaydedilmiştir. Bilindiği gibi, reaktörlerde tek sargı bulunmaktadır ve çıkış sargısı yoktur. Bu yüzden tam yüklenmesi durumunda nüve kayıpları ve sargı kayıpları beraber artacaktır. Bu artışın birlikte olması nedeni ile nüve kayıpları, sargı kayıpları ve ek kayıpları ayrı

ayrı tespit etmek zordur. Bunun için ilave yöntemler geliştirilmeli ya da nüve kayıpları endüksiyona bağlı olarak tahmin edilmelidir.

## SONUÇ

Bu çalışmada, Ansys-Maxwell programı kullanılarak Manyetik Kontrollü Şönt Reaktör tek fazlı eşdeğer devresi modellenmiş ve elektromanyetik analiz yapılmıştır. Analizde kullanılan model basit eşdeğer model olmasından dolayı çözüm daha basit ve gerçeğe daha yakındır. Elektromanyetik analiz sonucunda ve test sırasında reaktör nominal güce yakın bir güçte yüklenmiş, çektiği akım harmonikleri, nüvede meydana gelen akı dağılımı, nüve kayıpları, tristörde meydana gelen tetikleme açısı değişimine verdiği tepki incelenmiştir. Ardından reaktör nominal gücün üzerinde yüklenmiş, akım harmoniklerinde ve kayıplarda meydana gelen değişimler gözlenmiştir.

Testler ve analizler sonucunda akım harmoniklerinin reaktörün yüklenmesi ile de ilgili olduğu sonucuna varılmıştır. Reaktör nominal güç değerine yaklaştıkça reaktör akımındaki harmonik bileşenlerinin değeri azalmıştır. Reaktör nominal güç değerinde çalışırken çektiği akımın minimum harmonik içeriğine sahip olmasına dikkat edilmeli ve tasarım buna göre yapılmalıdır.

Reaktörün sargı bağlantı biçiminin harmonikler üzerinde ciddi bir etkiye sahip olduğu bilinmektedir. Tasarımı yapılan MCSR tek fazlı olarak incelendiği ve üç fazlı üçgen bağlı test edildiği için akım dalga şeklinde üçüncü harmonik bileşenleri oluşmuş ama test esnasında net bir şekilde gözlemlenememiştir. Böyle bir sonuç tasarım aşamasında öngörülmüş ve tasarım kayıp optimizasyonu buna göre yapılmıştır. Reaktörün nüvesinde meydana gelen kayıplar eddy ve histeresiz kayıplarıdır. Nüvede oluşan akı değeri arttıkça toplam nüve kayıplarının daha fazla olduğu test ve analiz ortamında görülmüştür.

Reaktör test ortamında tristörlerin 112 derecelik tetik açısıyla nominal güç değerine ulaşırken analiz ortamında ise reaktör 100 derecelik tetik açısıyla nominal güç değerine ulaşmıştır. Tasarım aşamasında bu değişimlere dikkat edilmiş ve reaktör tasarımı buna göre yapılmıştır.

Analiz ortamında nüve kayıpları nominal güç değerinde 1830 W hesaplanmıştır. Sargı kayıpları ise 75 derece sargı sıcaklıkları baz alınarak analiz ve hesap ortamında 25610 W olarak hesaplanmıştır. Kazan, kapak ve ek destek parçalarında meydana gelen kayıplar ise 3000-5000 W bandında beklenmektedir. İleriki çalışmalarda kazan, ek aksesuarlar ve sargıda meydana gelen AC kayıplar, nüve birleşme noktalarında meydana gelen kayıplar ve harmonikler üzerine çalışmalar yapılacaktır.

Test edilen MCSR de toplam kayıplar 75 derece sıcaklıkta 32329 W olarak elde edilmiştir. Kayıplar beklenen değere yakındır.

## TEŞEKKÜR

Gerçekleştirmiş olduğumuz çalışmada akademik destekleri için Sakarya Üniversitesine ve sağladığı imkanlar için ASTOR A.Ş.'ye teşekkürü borç bilirim.

## KAYNAKLAR

Yang, M., Chen, B., Tian, C., Wu, F., & Guo, Z. (2023). Minimizing the harmonics generated in magnetically controllable reactors by shaping the iron core using the variational method and Gauss–Legendre integral. *Energy Reports*, 9, 2618-2628.

Chen, X., Chen, B., Tian, C., Yuan, J., & Liu, Y. (2011). Modeling and harmonic optimization of a two-stage saturable magnetically controlled reactor for an arc suppression coil. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 59(7), 2824-2831.

Karymov, R. R., & Ebadian, M. (2007). Comparison of magnetically controlled reactor (MCR) and thyristor controlled reactor (TCR) from harmonics point of view. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 29(3), 191-198.

Tong, L., Hu, C., Li, X., Fan, X., & He, L. (2019, June). FEM analysis of iron core losses in magnetically controlled shunt reactor with distributed magnetic valves. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* (Vol. 486, No. 1, p. 012122). IOP Publishing.

Xu, X. (2009, December). The status and development of magnetically controlled reactor. In *2009 International Conference on Test and Measurement* (Vol. 2, pp. 375-377). IEEE.

Mehmood, K., Cheema, K. M., Tahir, M. F., Saleem, A., & Milyani, A. H. (2021). A comprehensive review on magnetically controllable reactor: Modelling, applications and future prospects. *Energy Reports*, 7, 2354-2378.

Kaymaz, İ., Bayrak, M., & Tursun, S. Manyetik Kontrollü Şönt Reaktörün Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Analizi.



# Kahramanmaraş Sütçü İmam University

## Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 04.01.2024  
Kabul Tarihi : 27.03.2024

Received Date : 04.01.2024  
Accepted Date : 27.03.2024

### DAHİLİ İÇ REFORMER İLE ÇALIŞAN ERİMİŞ KARBONAT YAKIT PİLİNİN (DIR-MCFC) PERFORMANS PARAMETRELERİNİN İNCELENMESİ, ENERJİ VE EKSERJİ ANALİZİ

#### INVESTIGATION OF PERFORMANCE PARAMETERS, ENERGY AND EXERGY ANALYSIS OF MOLTEN CARBONATE FUEL CELL (DIR-MCFC) WORKING WITH INTERNAL REFORMER

Elvan DEMİRYÜREK<sup>1</sup> (ORCID: 009-0002-9323-5206)  
Yıldız KOÇ<sup>2\*</sup> (ORCID: 0000-0002-2219-645X)  
Özkan KÖSE<sup>2</sup> (ORCID: 0000-0002-9069-1989)  
Hüseyin YAĞLI<sup>3</sup> (ORCID: 0000-0002-9777-0698)

<sup>1</sup>İskenderun Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Hatay, Türkiye  
<sup>2</sup>İskenderun Teknik Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Hatay, Türkiye  
<sup>3</sup>Gaziantep Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Hatay, Türkiye

\*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Yıldız KOÇ, yildiz.koc@iste.edu.tr

#### ÖZET

Doğrudan İç Reformlu Erimiş Karbonat Yakıt Pilleri (DIR-MCFC), enerji sektöründe oldukça çeşitli uygulamalara yönelik bir çözüm sunarak dikkat çekmektedir. Bu teknoloji, yüksek enerji verimliliği, çeşitli yakıtları kullanma yeteneği ve yüksek sıcaklıklarda kararlı çalışabilme kapasitesi gibi özellikleri ile farklı endüstri alanlarında geniş bir potansiyel sağlamaktadır. DIR-MCFC'lerin termodinamik performansını etkileyen faktörlerin ayrıntılı bir şekilde anlaşılması, bu teknolojinin etkili bir şekilde optimize edilmesi için hayati öneme sahiptir. Bu bağlamda, DIR-MCFC sisteminin kapsamlı modellemesi ve simülasyonu akım yoğunluğu, yakıt kullanım oranı, hücre sıcaklığı ve CO<sub>2</sub> kullanım oranı gibi kritik parametrelerin sistem performansına etkisini anlamak ve geliştirmek için kapsamlı bir çalışma yapılmaktadır. DIR-MCFC'nin analizinde 600°C, 625°C ve 650°C hücre sıcaklıklarında elde ettiği maksimum güç değerleri sırasıyla 18454,26338 kW, 21869,68782 kW ve 24847,2680 kW olarak ölçüldü. Bu çalışma, sabit akım yoğunluğunda hücre sıcaklığındaki artışın enerji ve ekserji verimini artırdığını, en yüksek performansın 625°C'de (%50,15 enerji verimi, %44,91 ekserji verimi) elde edildiğini gösterdi. Maksimum yakıt kullanım oranında (%96) gücü 23512,730 kW olarak enerji ve ekserji verimleri sırasıyla %34,569 ve %30,958 olarak ölçüldü.

**Anahtar Kelimeler:** MCFC, yakıt faydalanma oranı, CO<sub>2</sub> faydalanma oranı, enerji, ekserji

#### ABSTRACT

Direct Internal Reformed Molten Carbonate Fuel Cells (DIR-MCFC) stand out in the energy sector by offering a solution for a wide range of applications. This technology offers a wide potential in different industrial fields with its high energy efficiency, ability to utilize various fuels and stable operation at high temperatures. A detailed understanding of the factors affecting the thermodynamic performance of DIR-MCFCs is vital for effective optimization of this technology. In this context, extensive modeling and simulation of the DIR-MCFC system has been extensively studied to understand and improve the impact of critical parameters such as current density, fuel utilization rate, cell temperature and CO<sub>2</sub> utilization rate on the system performance. In the analysis of the DIR-MCFC, the maximum power values obtained at 600°C, 625°C and 650°C cell temperatures were measured as 18454.26338 kW, 21869.68782 kW and 24847.2680 kW, respectively. This study showed that increasing the cell temperature at constant current density increases the energy and exergy efficiency, with the highest performance

ToCite: DEMİRYÜREK, E., KOÇ, Y., KÖSE, Ö., & YAĞLI, H., (2024). DAHİLİ İÇ REFORMER İLE ÇALIŞAN ERİMİŞ KARBONAT YAKIT PİLİNİN (DIR-MCFC) PERFORMANS PARAMETRELERİNİN İNCELENMESİ, ENERJİ VE EKSERJİ ANALİZİ. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 27(2), 567-578.



achieved at 625°C (50.15% energy efficiency, 44.91% exergy efficiency). At maximum fuel utilization rate (96%), the power was 23512,730 kW with energy and exergy efficiencies of 34.569% and 30.958%, respectively.

**Keywords:** MCFC, fuel utilization rate, CO<sub>2</sub> utilization rate, energy, exergy

## GİRİŞ

Enerji, bir ülkenin ekonomisini, altyapısını, ulaşımını ve yaşam standartlarını şekillendirmede önemli bir rol oynamaktadır (Manoharan vd., 2019). Küresel enerji talebi, insanoğlunun varoluşundan itibaren sürekli artan bir ivmeyle hız kazanmaktadır. Günümüzde dünya enerji ihtiyacının %84'ü petrol, doğal gaz ve kömür gibi fosil enerji kaynaklarından karşılanmaktadır (Ivanova ve Wood, 2020a, 2020b). Dünya nüfusu artarken aynı zamanda fosil kaynak rezervleri de günbegün azalmaktadır. Dolayısıyla, dünyanın yakın gelecekte enerji ihtiyacının ve sürdürülebilir çevresel hedeflerinin karşılanamayacağı düşünülmektedir. Bu sebepten dolayı, gelecekteki enerji devamlılığını sağlamak ve sürdürülebilir çevreyi hayata geçirmek pek çok ülkenin artan bir ihtiyacıdır (Ivanova ve Wood, 2020b, 2020a; Karatekin vd., 2020; Wang vd., 2018). Fosil yakıtlar, sınırlı rezervlerinin yanı sıra çevresel zorluklar da doğurmaktadır. Fosil yanması sonucu atmosfere saldırdığı karbondioksit (CO<sub>2</sub>) küresel sera gazı emisyonlarının büyük bir oranına (%87) tekabül ederek küresel iklim değişikliğine ciddi etkileri bulunan en önemli faktörlerden biridir. Tüm bunların yanı sıra her yıl en az beş milyon insanın ölümü hava kirliliğinden dolayı olduğu tahmin edilmektedir (Ajanovic ve Haas, 2021; Ivanova ve Wood, 2020b, 2020a; Karatekin vd., 2020; "The State of the World's Forests 2020", 2020; Wang vd., 2018). Bu sorunların üstesinden gelmek için çevre dostu yenilenebilir enerji kaynaklarının kullanımı yaygınlaştırılmalıdır. Bu bağlamda, yakıt pilleri enerji dönüşümünde yüksek ısı verim ve düşük emisyon sunan, yenilenebilir enerji sistemlerinde öncü bir teknoloji olarak ortaya çıkmaktadır. Yakıt pilleri, kullanım alanlarının çok yönlülükleri sayesinde deniz, kara ve hava taşımacılığının yanı sıra savunma sanayi de dahil olmak üzere çeşitli sektörler için umut verici adaylar olarak konumlandırılmaktadır. Bu nedenle, yakıt hücreleri temiz ve yüksek verimli bir enerji dönüşüm sistemi olarak büyük umut vaat etmekte ve çeşitli alanlarda yoğun araştırma ve geliştirme çabalarına yol açmaktadır ("The State of the World's Forests 2020", 2020; Thounthong vd., 2009). Yakıt pillerinin birçok çeşidi bulunsa da, temel çalışma prensipleri benzerdir ve her türlü yakıt pilinde üç ana bileşen bulunur: anot, katot ve elektrolit (Manoharan vd., 2019). Elektrolit, anot ve katot elektrotları arasında yerleştirilir. Yakıt, anoda, oksitleyici ise katoda beslenir. Anotta indirgeme reaksiyonları, katotta ise oksidasyon reaksiyonları meydana gelir. Sağlanan yakıt, anotta elektronlara ve iyonlara ayrışır. İyonlar, elektrolitin içinden geçerek katoda ulaşırken, elektronlar bir iletken aracılığıyla katoda ulaşarak elektrik üretimi gerçekleşir. Yakıt pillerinde elektrokimyasal reaksiyonun başlaması için gerekli olan tek şey oksijen olduğu için termal ve mekanik bir işlem gerekmez. Yakıt pillerinin ürettiği elektrik düşük voltajlı doğru akım (DC) formundadır ve doğrudan çalışır (Olabi vd., 2021). Yakıt pillerinin çok farklı çeşitleri bulunmaktadır, ancak her birinin çalışma prensipleri birbirine benzerdir. Yakıt pilleri konusunda yapılan birçok makale bulunmaktadır: Sharaf ve Orhan, (2014), çalışmalarında yakıt pillerini detaylı bir şekilde incelediler. Yakıt pillerinin, diğer geleneksel enerji dönüştürme cihazlarında bulunmayan yüksek verimliliği ve çevreye zarar vermeyen sistemi ile istenilen kombinasyonu oluşturduklarını, aynı zamanda yakıt pillerinin geliştirilmesi ve ticarileşmesinin uzun bir süreç gerektirdiğini vurgularlar. Bu durumun sebebi, piller, ısı motorları ve benzeri cihazların ortaya çıkması, birçok enerji üretim ve dönüşüm teknolojisinin yüksek maliyeti, verimliliği ve güvenilirliği ile daha çok uğraşılması nedeniyle yakıt pillerinin daha geri planda bırakılmasından kaynaklandığını ileri sürmüşlerdir. Mekhilef vd., (2012) mevcut çeşitli yakıt pillerinin çalışma prensibini, uygulamalarını, çalışmalarını, avantajlarını ve dezavantajlarını karşılaştırarak detaylı bir inceleme yapmışlardır. Yakıt pilleri çeşitlerinin çalışma prensipleri birbirlerine benzer olmasına rağmen, alkali yakıt pili güç verimliliği açısından %60 verimle en verimli, polimer elektrolit membran yakıt pili %58 verimle ikinci sırada ve erimiş karbonatlı yakıt pili %47 verimle üçüncü sırada yer aldığını ileri sürmüşlerdir. Alkali yakıt pilleri (AFC) en verimli olsalar da ulaşım uygulamalarında proton değişim membranlı yakıt pillerinin (PEMFC) daha uygun olduğunu belirtmişlerdir. Direkt metanol yakıt pilleri (DMFC) ve polimer elektrolit yakıt pilleri (PAFC) düşük verimliliğe sahip olmalarına rağmen ekonomik olarak verimli olduklarını belirtmişlerdir. Katı oksit yakıt pili (SOFC) ve erimiş karbonat yakıt pillerinin (MCFC), yüksek CHP verimliliği sağladığını söylemişlerdir. Mevcut ve modern yakıt pilli teknolojilerinin seri üretimine geçilmesi için ekonomik özellikleri karşılamaları ve mevcut olan teknolojilerin avantajlarını geride bırakmaları gerektiği sonucuna varmışlardır. Wang (2015), çalışmasında gelişmekte olan yakıt pillerinin karşılaştığı engelleri ele almıştır. Yakıt pilleri teknolojisinin gelişmesinde karşılaşılan engel, ne bir hidrojen yakıtının altyapısının ve pazarının gelişmesi ne de hidrojenin depolanmaması, taşınmaması gibi sorunlardır. Gerçek engel yakıt pilinin dayanıklılığı, maliyeti ve güvenilirliği gibi kendisinden kaynaklanan engellerdir. Yakıt pillerinin ticarileşmesi için iki önemli adım olduğunu vurgulamıştır. Birinci adım, yakıt pillerinin dayanıklılığını, maliyetini ve güvenilirlik sorununu çözmek iken, ikinci adımın yeni bir iş alanı oluşturmak ve sektörün standartlarını geliştirmek olduğunu vurgulamıştır. Yakıt hücreleri, elektrokimyasal cihazlar olarak, eklenen yakıtın ve oksitleyicinin kimyasal



enerjisini bir elektrot-elektrolit sistemi aracılığıyla elektrik enerjisine dönüştürür. Yakıt hücreleri, temiz ve verimli elektrik üretimi sağlamak için hidrojenin ve diğer yakıtların kimyasal enerjisini kullanır. Hidrojen bir yakıt hücresinde yakıt olarak kullanılırsa üretilen tek ürün ısı ve suyun yanı sıra elektriktir. Yakıt hücreleri, uygulama çeşitliliği açısından benzersizdir; enerji santralleri kadar büyük veya bir dizüstü bilgisayar kadar küçük sistemlerde çok çeşitli yakıt ve hammadde kullanarak güç üretebilirler (*Fuel Cells / Department of Energy, t.y.*). Yakıt pilleriyle ilgili diğer çalışmalara bakıldığında, Duan vd., (2018), erimiş karbonat yakıt pili (MCFC) alt çevrim sistemiyle buhar türbini (ST) entegre ederek yeni bir hibrit güç sistemi önermiş ve analiz etmişlerdir. Önerilen sistemin ayrıntılı termodinamik modellerini oluşturmuşlar ve temel parametrelerin yeni sistemin performansına etkilerini detaylı olarak incelemişlerdir. Yeni MCFC/ST hibrit sistemi, 0,722 V çıkış voltajı, %64,21 genel sistem verimliliği ve 85969 kW ekserji kayıpları ile kıyaslanan sisteme göre iyileştirilmiştir. MCFC/ST hibrit sisteminin net verimi, akım yoğunluğu 1500 A/m<sup>2</sup>, buhar-karbon oranı 2,5, yakıt kullanım oranı %85 ve CO<sub>2</sub> kullanım oranı %75 olduğunda en yüksek değere ulaştığını tespit etmişlerdir. Ovrum ve Dimopoulos (2012), çalışmalarında bir ticaret gemisine yerleştirilmiş erimiş karbonat yakıt pilinin (MCFC) dinamik ve modüler matematiksel modelini geliştirmişlerdir. Mevcut MCFC ünitesinden alınan verilerle bir model oluşturmuşlar ve doğrulamışlardır. Oluşturdukları model, gemilerde yakıt pili kullanılması için gerekli olan performans, ısı verim, güvenilirlik ve dayanıklılık ile çalışılabilirlik konularını kapsayan geniş aralıktaki çalışmalar için uygun olduğu sonucuna varmışlardır. Brouwer vd. (2006), tarafından yapılan bir çalışmada ise bir erimiş karbonat yakıt pilini (MCFC) yöneten akışkan dinamiği, elektrokimyasal ve kimyasal mekanizmaları ve ısı transferi prensiplerini kullanarak MATLAB Simulink ile ayrıntılı bir model geliştirmişlerdir. Oluşturdukları modeli, değişen yük isteklerine cevap verince MCFC'nin dinamik voltajını, akımını ve güç değişimlerini tahmin etmek için de uygulamışlardır. Sonuç olarak, oluşturulan her iki modelin de MCFC'nin voltajı ve dinamik tepki özellikleri hakkında fikir edinilmesinde kullanılabileceğini söylemişlerdir. Wee (2014), çalışmasında erimiş karbonat yakıt pili sisteminin (MCFC) güç uygulamalarında CO<sub>2</sub> emisyonunun azaltılmasındaki etkilerini incelemiştir. MCFC'lerin tesisteki genel enerji verimliliğini düşürmeden geleneksel termik santrallerde oluşan CO<sub>2</sub>'yi ayırabileceğini ve konsantrasyon edebileceğini söylemiştir. Isı geri dönüşümünü ele aldığı, bağımsız MCFC'lerin verimlerinin %75'e yükseltilebileceğini ve CO<sub>2</sub> emisyonlarının en az 236 kg/MWh'nin altına düşürülebileceğini söylemiştir. Ancak, MCFC'lerin enerji santrallerinde CO<sub>2</sub> emisyonlarını azaltmada büyük bir rolü olmasına rağmen, maliyetinin yüksek olması ve küçük ölçekli işletmesinden dolayı çok sınırlı kaldığını belirtmiştir. Moradpoor ve Ebrahimi, (2019) çalışmalarında MCFC, stirling motoru (alfa tipi) ve kalina güç üretim çevrimi (KCS11)'inden oluşan yeni bir kombine soğutma, ısıtma ve güç çevriminin davranışını araştırmak için 7 tasarım parametresi seçerek parametrik çalışma ve duyarlılık analizi yapmışlar ve çevrimi termodinamik ve çevresel açıdan analizini yapmışlardır. Geleneksel çevrimlere göre %45'e kadar yakıt tasarrufu sağlandığını gözlemlemişlerdir. Çevrimin genel veriminin %70'ten, elektriksel veriminin ise %50'den fazla olduğunu ve 6000 saatlik bir işletme için yıllık CO<sub>2</sub>'nin 15 ton azaldığını, CO<sub>2</sub>'nin ise 225 ton azaldığını elde etmişlerdir. Souleymane vd. (2022), MCFC ve parabolik oluklu güneş kollektör santralleriyle elektrik ve hidrojen üretimini araştırmışlardır. Güneş kollektör sistemine paralel olarak eklenen HRGS, güneş alanını küçültmeye, kararlı güç üretimine ve hidrojen üretimine yardımcı olduğuna ayrıyeten MCFC'nin kullanılmasıyla da egzoz ısısının geri kazanılmasında, güneşin radyasyonunun değişiminin ortak üretim sistemindeki etkilerini azaltmasına ve verimliliğin artmasına yardımcı olduğu sonucunu elde etmişlerdir. Fichera vd. (2022) İtalya'daki doğal gazla çalışan bir enerji santralini, erimiş karbonat yakıt pili (MCFC) entegrasyonu ile yeniden güçlendirme önerisiyle iki farklı planın ekserji analizi yapmışlardır. Bu çalışmalarının sonucunda türbinin egzoz gazları, MCFC'ye besleme sağlar ve elektrik üretimiyle birlikte CO<sub>2</sub> yakalar. Güncellenen santralde, 435.29 MW gaz türbininden, 248.9 MW buhar döngüsünden ve 135.283 MW MCFC'den olmak üzere toplamda ise 787.454 MW enerji üretimi elde etmişlerdir. Vatani vd. (2013) dahili iç reformlama erimiş karbonat yakıt hücresinden (DIR-MCFC) atık ısı geri kazanımını ele alır. Önerilen sistem, katot çıkışından gelen ısıyı kullanarak ön-reformasyon işlemi için gereken ısıyı sağlar. Organik Rankine çevrimi (ORC) kullanılarak atık ısı geri kazanımı iki farklı konfigürasyonda incelemişlerdir. Birinci durumda, ORC buhar jeneratörüne giden ısıyı alırken, ikinci durumda, katot çıkışı iki farklı akışa ayrılarak ORC ve ön-reformlama işlemi için ısı sağlanır. Farklı çalışma sıvıları kullanılarak yapılan karşılaştırmalarda, sistemdeki enerji ve ekserji verimliliğinin arttığı ve katot çıkış akışını ikiye ayrılması ile ekserji kaybının azaldığını belirlemişlerdir.

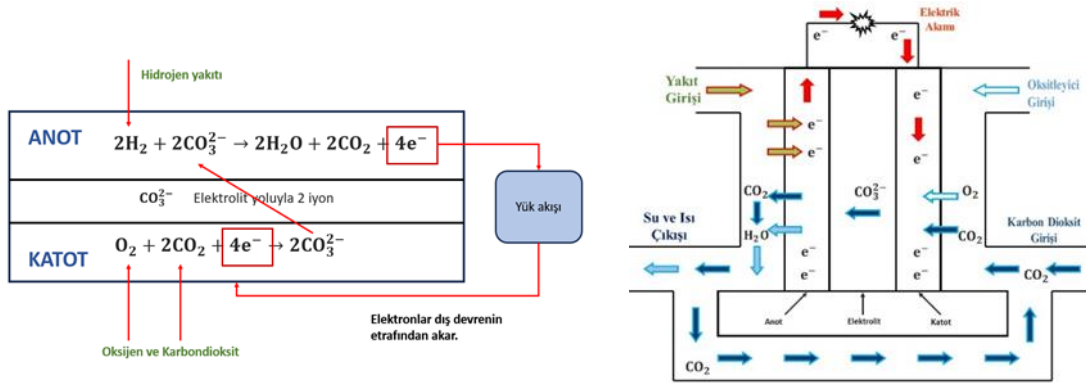
Yukarıdaki çalışmalara bakıldığında, MCFC yakıt pillerinin çalışmalara ne kadar dikkat çekici katkı yaptığı açık bir şekilde görülmektedir. Farklı sistemlere entegrasyon potansiyeli oldukça güçlü bir sistem olduğu da gözlerden kaçmamaktadır. Fakat, çalışmalar incelendiğinde farklı hücre sıcaklıklarında ve geniş akım yoğunluğunda MCFC'nin termodinamik performansının incelendiği çok fazla makale bulunmamaktadır. Ayrıca, yakıt kullanım oranının MCFC'nin güç yoğunluğu, enerji ve ekserji verimleri üzerindeki etkilerini inceleyen sayılı makale gerçekleştirilmiştir. Dahası, MCFC'de CO<sub>2</sub> kullanım oranı etkisinin incelendiği çok az makale vardır. Tüm bunların

yanı sıra MCFC'nin CycleTempo kullanılarak termodinamik performans analizi yapan sadece bir kaç çalışma bulunmamaktadır.

Bu çalışma kapsamında, DIR-MCFC'nin yapısal özellikleri anlatılmış ve termodinamik performansı CycleTempo programıyla simule edilerek hassas bir şekilde incelenmektedir. Çalışma kapsamında, ilk olarak, DIR-MCFC performansını değerlendirmek için değişen hücre sıcaklıklarında (600°C, 625°C, 650°C), 1200 A/m<sup>2</sup>'den 7000 A/m<sup>2</sup>'ye kadar değişen akım yoğunluğunun yakıt pili hücre voltaj değeri ve güç yoğunluğuna etkisi incelenmekte ve daha sonra yakıt pilinin enerji ve ekserji verimleri değerlendirilmektedir. Ardından, değişen hücre sıcaklıklarında (600°C, 625°C, 650°C) DIR-MCFC yakıt pili hücresinde aralığında CO<sub>2</sub> kullanım oranındaki değişimlerin akım yoğunluğu ve voltaj değerlerine etkisi gözlemlenmiştir. Son olarak, %78 ile %98 arasında değişen yakıt kullanım faktörlerinin güç yoğunluğu, hücre voltaj değeri, enerji ve ekserji verimleri üzerindeki etkileri değerlendirilmiş ve kullanılan programın doğruluğu karşılaştırılmıştır.

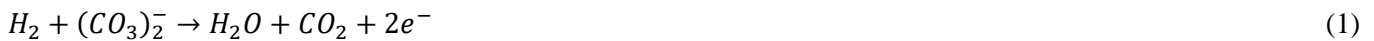
## SİSTEM TANITIMI

Erimiş karbonat yakıt pillerinde (MCFC), elektrolit olarak genellikle seramik bir matris içinde bulunan ergimiş alkali karbonatlar kullanılır. Bu karbonatlar genellikle lityum alüminat (LiAlO<sub>2</sub>) içinde lityum sodyum (LiNa) veya lityum potasyum (LiK) karışımlarıdır ve karbonat iyonları aracılığıyla iyon transferini sağlar. Alkali karbonatlar, karbonat (CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>) iyonlarıyla iletken bir tuz oluştururlar. Bu tuzlar 500 °C'de eridiğinden dolayı MCFC yakıt pilinin yeterli iyonik iletkenliğin sağlandığı 600 °C'nin üzerindeki daha etkin sıcaklıklarda çalışabilirler. MCFC yakıt pilinin yüksek çalışma sıcaklığı, karbonat elektrolitinin gerekli iletkenliği sağlamasına ve düşük maliyetli hücre elemanlarının kullanılmasına olanak tanır (Baranak, 2015; Larminie ve Dicks, 2013; Mehmet vd., 2008; "Molten Carbonate Fuel Cells", 2018). Erimiş karbonat yakıt pilleri (MCFC) elektrotlarında meydana gelen elektrokimyasal reaksiyonlar Şekil 1a ve Şekil 1b'de gösterilmektedir.



Şekil 1. Erimiş Karbonat Yakıt Pilinin Çalışma Sistemi [21,23]

Şekil 1'e bakıldığında MCFC yakıt pili diğer yakıt pili türlerinden farklı olduğu net bir şekilde görülmektedir. Çünkü yaygın yakıt pilli türlerinde erimiş karbonat bulunmamaktadır. Şekil 1'de incelendiğinde, anot üzerinde, hidrojen tarafından beslenen elektrolit üzerinden geçen karbonat iyonları (CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>) elektrokimyasal olarak oksitlenerek karbon dioksit (CO<sub>2</sub>), su (H<sub>2</sub>O) ve elektron üretir. Dış bir elektrik devresinden geçen elektronlar, katoda geri dönerek elektrik gücü sağlar. Anot reaksiyonu:



Katotta, havadan gelen oksijen ile anottan tekrar çevrime giren karbon dioksit, elektronlarla reaksiyona girerek elektroliti besleyen ve yakıt pili üzerinden elektrik akımını ileten karbonat iyonları (CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>) üretilir. Katot reaksiyonu



Erimiş karbonat yakıt pillerindeki toplam pil reaksiyonu, diğer yakıt pilleri ile aynıdır. Fakat, karbonat iyonlarının iletkenliğinin, anotta karbon dioksit (CO<sub>2</sub>) üretilirken katotta tüketilmesi, MCFC'ye özgü bir özelliktir. Toplam yakıt pili reaksiyonu:



Erimiş karbonat yakıt pillerinin bir diğer özelliği, yüksek çalışma sıcaklıkları nedeniyle iç reformun mümkün olmasıdır. Bu nedenle, sadece hidrojen değil, aynı zamanda doğrudan hidrokarbonlarla da çalışmalar gerçekleştirilebilir. Bu süreçte, hidrokarbonlar ve su buharı endotermik reaksiyonla hidrojen ve karbon monoksit oluşturmak üzere reaksiyona girer. Dahili reform reaksiyonu:



Eşitlik 4'te oluşan karbon monoksit veya ham yakıtla taşınan su, daha da oksitlenerek karbon dioksit dönüşür. Bu hafif ekzotermik reaksiyona "su-gaz kayması" veya kısaca "kayma" denir. Reaksiyona yakıt akışına ek olarak, hidrojen de oluşur. Su-gaz değişim reaksiyonu:



MCFC'ler gibi yüksek sıcaklıktaki yakıt hücreleri, dahili olarak iki şekilde yeniden düzenlenebilir: doğrudan (DIR) veya dolaylı (IIR). DIR, ham yakıtın eş zamanlı buhar reformasyonu, kayma reaksiyonu ve hidrojenin elektrokimyasal oksidasyonunu içerir. Dolaylı iç reformasyon (IIR), yakıtın çoğu anoda girmeden önce hidrojen ve karbon dioksit dönüşür. Geri kalan hidrokarbonlar anoda girdikten sonra yeniden oluşur (Muñoz De Escalona vd., 2011).

### DIR-MCFC Simülasyonu ve Parametre Analizi

DIR-MCFC'lerin termodinamik süreçlerini anlamak amacıyla gerçekleştirilen modelleme ve simülasyon çalışmaları, temel işletim parametreleri arasındaki etkileşimleri inceleyerek değişen koşullar altında yakıt hücresi davranışlarını anlamamıza olanak tanımaktadır. Bu modelleme çalışması, DIR-MCFC'lerin sürdürülebilir enerji çözümlerinde optimize edilmesinde önemli bir adım olarak kabul edilmektedir. Ayrıca, simülasyon sonuçları, mevcut verilerle kıyaslanarak modelin güvenilirliği ve gerçek dünyayla uygunluğu sıkı bir doğrulama sürecinden geçmiştir. Tasarım ve simülasyon parametreleri için belirlenen giriş değerleri, Tablo 1'de detaylı olarak sunulmaktadır.

**Tablo 1.** DIR-MCFC Yakıt Pili Tasarım ve Simülasyon için Gerekli Girdi Parametreleri

Parametre	Çalışmanın Değerleri	Birim
Hücre çalışma basıncı	1,05	bar
Hücre çalışma sıcaklığı	600-650	°C
Su/metan mol oranı (S/C)	3	%
Yakıt kullanım oranı ( $U_F$ )	0,78-0,96	-
Dönüşüm verimliliği ( $\eta_{DC/AC}$ )	94	%
Akım yoğunluğu ( $i_{MCFC}$ )	1200- 7000	A/m <sup>2</sup>
Hücre alanı ( $A_{MCFC}$ )	10131,7	m <sup>2</sup>

DIR-MCFC yakıt pili performansının akım yoğunluğu, yakıt kullanım oranı, hücre sıcaklığı,  $CO_2$  kullanım oranı, enerji ve ekserji verimlerinde değişikliklere duyarlılığı, CycleTempo programı aracılığıyla gerçekleştirilen bir dizi simülasyon ile araştırılmıştır.

### MATEMATİKSEL MODEL

Sisteme giren ve çıkan akışların kütleleri, kütle korunumu ilkesine göre sifira eşit olmalıdır. Bu da demektir ki, sistemde hiçbir kütle kaybı veya kazancı olmamalıdır. Aşağıdaki eşitlik 6, sistemin kütle bakımından dengede olduğunu gösterir:

$$\dot{m}_{a,gir} + \dot{m}_{k,gir} - \dot{m}_{a,çık} - \dot{m}_{k,çık} = 0 \quad (6)$$

Sistemde üretilen güç değeri bilinmiyorsa, yakıt hücresi tarafından üretilen güç, anottaki yakıtın kütle akışından hesaplanır. Bu güç hesaplaması, kütle dengesi eşitliği ile birlikte düşünülmelidir. Kütle eşitliği 7, katottan anoda doğru gerçekleşen  $O_2$  ve  $CO_2$  kütle transferini de içerir. Bu eşitlik, sistemin giren ve çıkan akışlarını dengeler, aynı zamanda katottan anoda doğru gerçekleşen kütle transferini göz önüne alır.

$$\dot{m}_{a,gir} - \dot{m}_{a,çık} = -\dot{m}_{k \rightarrow a} \quad (7)$$

Eşitlik 8, elektrokimyasal reaksiyonlar sonucunda katottan anoda doğru göç eden oksijenin kütleli debisini elektrik akımı ile ilişkilendirir.

$$\dot{m}_{O_2 k \rightarrow a} = M_{O_2} \times \frac{I}{4 \times F} = U_{O_2} \times \dot{m}_{O_2 k} \quad (8)$$

Eşitlik 9,  $CO_2$  'nin elektrokimyasal reaksiyonlarda katottan anoda doğru göç etmesinin kütleli debisini elektrik akımı ile bağlantılı olarak ifade eder.

$$\dot{m}_{CO_2 k \rightarrow a} = M_{CO_2} \times \frac{I}{2 \times F} = \varphi \times \dot{m}_{CO_2 k} \quad (9)$$

Yakıtın kütleli debisi ( $\dot{m}_{yakıt}$ ) biliniyorsa, üretilen elektrik gücü, yakıt kullanım oranı ve DC/AC dönüşüm verimliliğinden hesaplanır.

$$\dot{m}_{a,gir} = \dot{m}_{yakıt} \quad (10)$$

Oksidan kütleli debisi biliniyor ise üretilen elektrik gücü aşağıdaki iki yöntemden birisi seçilerek hesaplanabilir:

Yakıt pilinin çıkış sıcaklığı verilmişse:

Enerji dengesi sisteme eklenir;

$$\dot{m}_{a,gir} \times h_{a,gir} + \dot{m}_{k,gir} \times h_{k,gir} - \dot{m}_{a,çık} \times h_{a,çık} - \dot{m}_{k,çık} \times h_{k,çık} = P_{EL,DC} + \dot{Q}_{kayıp} \quad (11)$$

Oksidan kullanım oranı verilmişse:

Sistemde oksidan/yakıt oranı  $[X_{OF} (kg/kg)]$  hesaplanır ve eşitlik 12 sisteme eklenir:

$$X_{OF} \times \dot{m}_{a,gir} - \dot{m}_{a,çık} \quad (12)$$

Oksidan kullanımı verilmişse ya da oksidanın kütleli debisi başka bir yerde hesaplanmış ise çıkış sıcaklığını hesaplamak için enerji dengesi kullanılır, bu yüzden de anot ve katot çıkış sıcaklıkları aynı olduğu varsayılır. Tüm süreçlerin sabit sıcaklık ve basınçta ( $P_{MCFC}$  ve  $T_{MCFC}$ ) gerçekleştiği varsayılır. Yakıt hücresindeki tüm yakıt bileşenlerinin tam dönüşümü için, hücreden geçen akım aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$I_F = \frac{\dot{m}_{a,gir}}{M_{mol,a}} \times 2 \times F \times (y_{H_2}^0 + y_{CO}^0 + y_{CH_4}^0) \quad (13)$$

Eşitlikte  $y_i^0$  girişteki i bileşeninin mol oranı,  $M_{mol,a}$  da anot gazının mol külesidir. Fakat gerçekte yakıt hücresinde, yakıtın tamamı dönüşmez. Gerçekte yakıt hücresinde, yakıtın tamamı dönüşmez. Gerçek dönüşüm ve maksimum dönüşüm arasındaki oranı  $U_F$  (yakıt kullanım oranı) olarak tanımlarsak, hücreden geçen gerçek akım aşağıdaki gibidir:

$$I = I_F \times U_F \quad (14)$$

Yakıt hücresi yığınının elektrikselsel çıkış gücü;

$$P_{EL,DC} = V_{MCFC} \times i_{MCFC} \times A_{MCFC} = V_{MCFC} \times I \quad (15)$$

$$P_{EL,AC} = V_{MCFC} \times i_{MCFC} \times A_{MCFC} \times \frac{\eta_{DC}}{AC} = V_{MCFC} \times I \times \frac{\eta_{DC}}{AC} \quad (16)$$

Burada  $i_{MCFC}$  akım yoğunluğu ve  $A_{MCFC}$  aktif MCFC alanıdır.

Güç yoğunluğu;

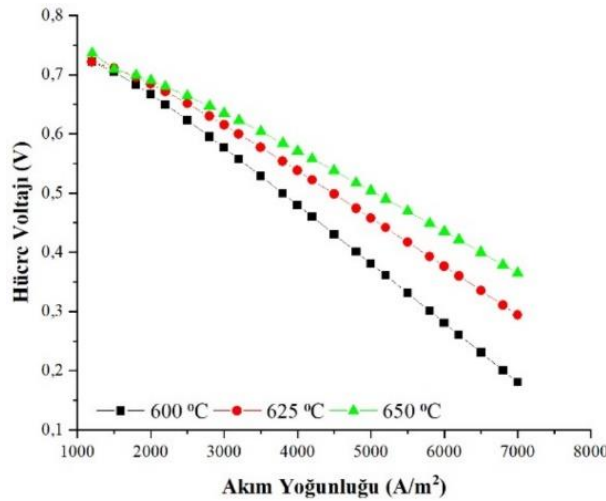
$$\phi = V_{MCFC} \times i_{MCFC} \quad (17)$$

Buhar/Karbon oranı (S/C), hücrede karbon birikmesini önlemek için tanımlanan bir parametredir.

$$\frac{S}{C} = \frac{\dot{n}_{H_2O}}{\dot{n}_{CH_4}} \quad (18)$$

## ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

DIR-MCFC yakıt pili diğer yakıt pillerine göre farklı bir çalışma mantığı bulunmaktadır. Bu nedenle farklı parametrelerin birbirine etkilerini araştırmak oldukça önemlidir. Herhangi bir parametredeki değişiklikliğin diğer çıktıları nasıl etkileyebileceği, sistem davranışının nasıl olacağı kayda değer bir araştırma alanıdır. Bu bölümde, DIR-MCFC yakıt pilinin akım yoğunluğu değerinin voltaj, güç yoğunluğu, enerji ve ekserji verimi değerlerine etkisi üzerinde durulmaktadır. Ayrıca, DIR-MCFC yakıt pilinin  $CO_2$  kullanımının, akım yoğunluğu ve voltaj üzerindeki etkileri incelenmektedir. Daha sonra yakıt kullanım oranının güç yoğunluğu, enerji ve ekserji verimi üzerindeki etkileri irdelenmektedir. Değişen hücre sıcaklığında, akım Yoğunluğunun hücre voltajına etkisi Şekil 2'de gösterilmektedir.

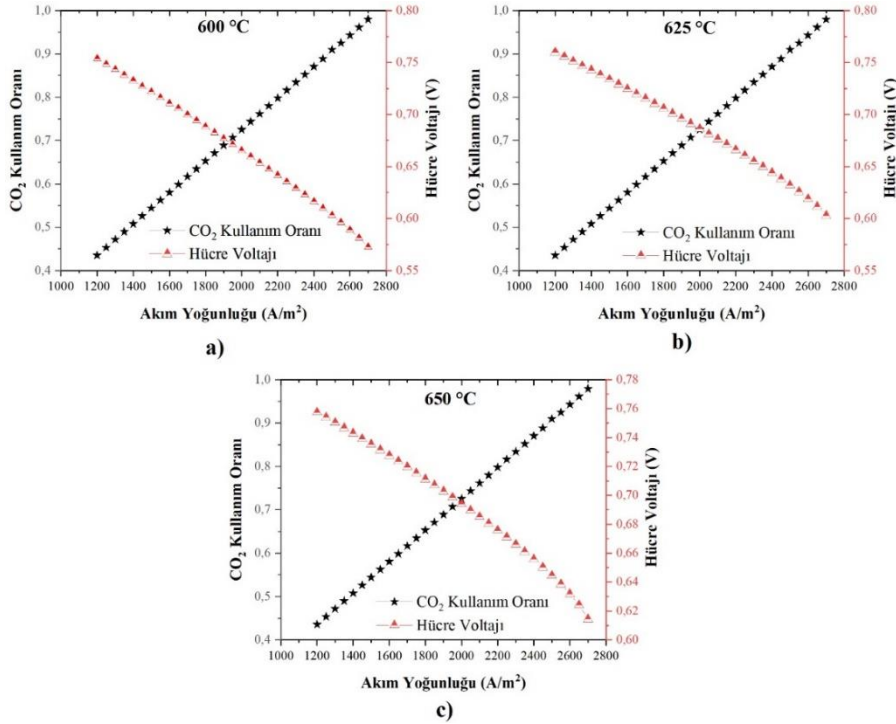


Şekil 2. Değişen Hücre Sıcaklığında, Akım Yoğunluğunun Hücre Voltajına Etkisi

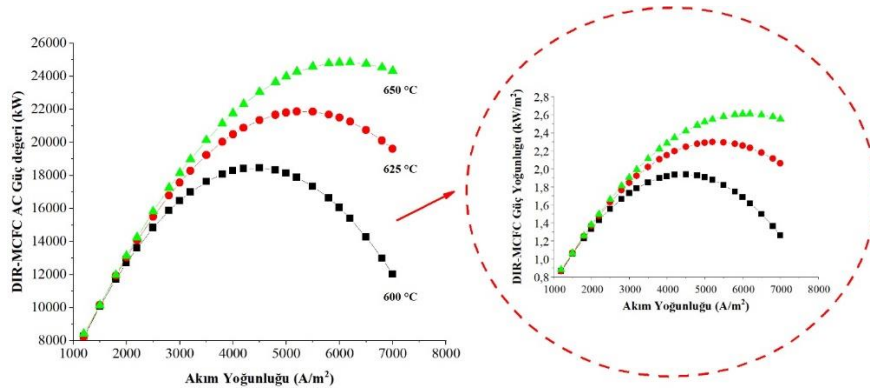
Şekil 2'de görüldüğü gibi, üç farklı hücre sıcaklığında (600°C, 625°C, 650°C), 1200 ile 7000 A/m<sup>2</sup> arasında değişen akım yoğunluğunun hücre voltajına olan etkisi incelenmiştir. Sabit hücre sıcaklığında, akım yoğunluğu arttıkça hücre voltajının düştüğü gözlemlenmektedir. Akım yoğunluğu düşürülerek hücre voltajı yükseltilebileceği gibi, aksine akım yoğunluğu artırılarak hücre voltajı düşürülebilir. Minimum akım yoğunluğunda iken (1200 A/m<sup>2</sup>) iken hücre voltajı 0,7215 V ölçülmüştür. Maksimum akım yoğunluğunda (7000 A/m<sup>2</sup>) ise hücre voltajı 0,2941 V olarak ölçülmüştür. Bu negatif eğilim, yüksek akım yoğunluğunun hücre performansını olumsuz etkilediğini göstermektedir. Sabit akım yoğunluğunda, 1500 A/m<sup>2</sup>'den sonraki değerlerde, hücre sıcaklığındaki artışın voltaj değerini arttırdığı net bir şekilde görülmüştür. Farklı DIR-MCFC hücre sıcaklıklarında,  $CO_2$  kullanım oranının ve hücre voltajının akım yoğunluğuna göre değişimleri Şekil 3'te verilmektedir.

Şekil 3'de görüldüğü gibi, üç farklı hücre sıcaklığında (600°C, 625°C, 650°C),  $CO_2$  kullanım oranının ve hücre voltajının akım yoğunluğuna göre değişimleri incelenmiştir.  $CO_2$  kullanım oranının artması ile elektrokimyasal reaksiyon için yakıt ve  $CO_2$  girişi artacak, bu da Şekil 3'de gösterildiği gibi hücre voltajının düşmesine ve akım yoğunluğunun artmasına neden olacaktır. Bu, artan yakıt kullanımının hücre voltajında bir azalmaya yol açma eğiliminde olduğu yakıt hücrelerinde tipik bir davranıştır. Minimum  $CO_2$  kullanım oranında (%43), akım yoğunluğu 1200 A/m<sup>2</sup> iken hücre voltajı 0,7538 V (600°C), 0,7597 V (625°C), 0,7574 V (650°C) olarak ölçülmüştür. Maksimum  $CO_2$  kullanım oranında (%98) ise akım yoğunluğu 2700 A/m<sup>2</sup> iken hücre voltajı değeri 0,5727 V (600°C), 0,6027 V (625°C), 0,6143 V (650°C) olarak ölçülmüştür. Bu, parametrelerin DIR-MCFC'lerin performansını olumsuz yönde etkilediğini göstermektedir. Akım yoğunluğunun ve hücre sıcaklığının DIR-MCFC' nin AC güç değerine etkisi Şekil 4'te gösterilmektedir.



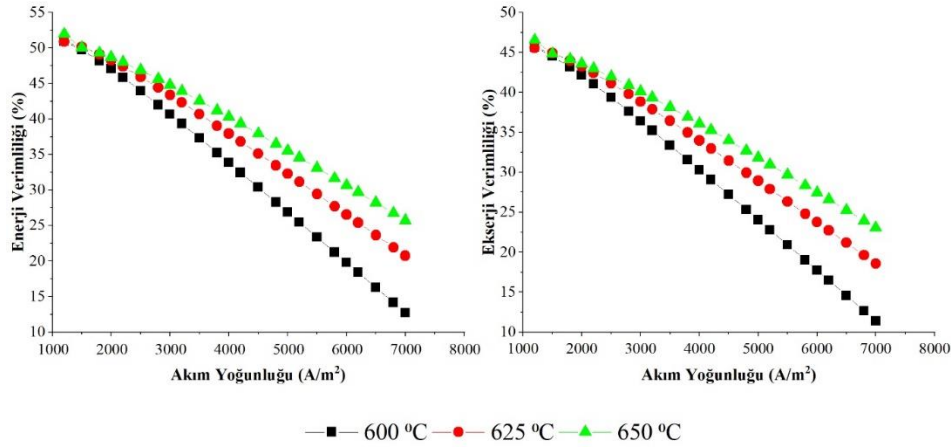


Şekil 3. Farklı DIR-MCFC Hücre Sıcaklıklarında, CO<sub>2</sub> Kullanım Oranının ve Hücre Voltajının Akım Yoğunluğuna Göre Değişimleri



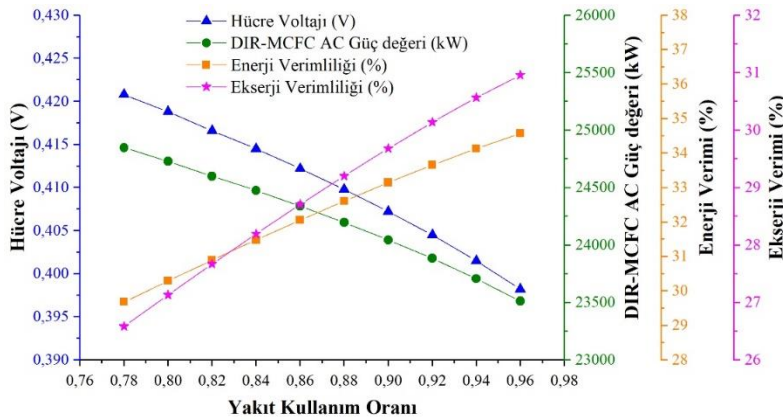
Şekil 4. Akım Yoğunluğunun ve Hücre Sıcaklığının DIR-MCFC' nin AC Güç Değerine Etkisi

Şekil 4'te, üç farklı hücre sıcaklığında (600°C, 625°C, 650°C) 1200 A/m<sup>2</sup> ila 7000 A/m<sup>2</sup> arasında akım yoğunluğunun ve hücre sıcaklığının DIR-MCFC'nin AC güç değerine etkisi incelenmiştir. DIR-MCFC'nin AC güç çıkışı, güç yoğunluğunun ve yakıt hücresinin aktif alanının ürünüdür. Yakıt hücresinin aktif alanı bu durumda sabit olduğu için güç yoğunluğu eğilimiyle tutarlıdır. Yakıt hücresinin harici yüke ne kadar elektrik enerjisi sağlayabileceğini gösterir. Sabit hücre sıcaklığında, AC gücünün belirli bir noktaya kadar arttığını daha sonra azaldığını gözlemlenmektedir. Hücre sıcaklığı 600 °C de sabit tutulduğunda 4500 A/m<sup>2</sup> akım yoğunluğunda maksimum güç 18454,26 kW hesaplanmıştır. Hücre sıcaklığı 625 °C de sabit tutulduğunda 5200 A/m<sup>2</sup> akım yoğunluğunda maksimum güç 21869,69 kW olarak hesaplanmıştır. Hücre sıcaklığı 650 °C de sabit tutulduğunda 6200 A/m<sup>2</sup> akım yoğunluğunda maksimum güç 24847,2680 kW olarak hesaplanmıştır. Sabit akım yoğunluğunda, 2000 A/m<sup>2</sup>'den sonraki değerlerde, hücre sıcaklığındaki artışın güç değerini arttırdığı net bir şekilde görülmüştür. Bu nedenle, DIR-MCFC'nin AC güç çıkışı da hücre sıcaklığına ve diğer çalışma parametrelerine bağlı olan optimum bir değere sahiptir. Farklı hücre çalışma sıcaklıklarının ve akım yoğunluğunun DIR-MCFC'nin enerji ve ekserji verimine etkisi Şekil 5'te verilmektedir.



**Şekil 5.** Farklı Hücre Çalışma Sıcaklıklarının ve Akım Yoğunluğunun DIR-MCFC'nin Enerji ve Ekserji Verimine Etkisi

Şekil 5'de, üç farklı hücre sıcaklığında (600°C, 625°C, 650°C) sırasıyla akım yoğunluğunu 1200 A/m<sup>2</sup> ile 7000 A/m<sup>2</sup> aralığında değiştirilerek hücre enerji ve ekserji verimine olan etkisi incelenmiştir. Sabit hücre sıcaklığında akım yoğunluğu arttıkça DIR-MCFC'nin hem enerji hem de ekserji verimliliğinin azaldığını görülmektedir. Sırasıyla %50,89 ve %45,58 olarak hesaplanan en yüksek enerji ve ekserji verimleri en düşük akım yoğunluğunda (1200 A/m<sup>2</sup>) hesaplanmıştır. En düşük enerji ve ekserji verimleri, sırasıyla %20,75 ve %18,58 olan en yüksek akım yoğunluğu olan (7000 A/m<sup>2</sup>) de hesaplanmıştır. Sabit akım yoğunluğunda DIR-MCFC'nin enerji verimliliğinin ve ekserji verimliliğinin hücre sıcaklığının artmasıyla arttığını göstermektedir. Enerji verimliliği 625 °C'de maksimum %50,15 değerine ulaşırken, ekserji verimliliği aynı sıcaklıkta maksimum %44,91 değerine ulaşmaktadır. Bu da DIR-MCFC'nin hem enerji hem de ekserji verimliliği açısından 625 °C'de en iyi şekilde çalıştığını göstermektedir. Son olarak, Şekil 6'da yakıt kullanım oranının, hücre voltajı, DIR-MCFC AC gücü, enerji verimliliği ve ekserji verimliliğine etkisi değerlendirilmektedir.



**Şekil 6.** Yakıt Kullanım Oranının, Hücre Voltajı, DIR-MCFC AC Gücü, Enerji Verimliliği ve Ekserji Verimliliğine Etkisi

Şekil 6'da görüldüğü gibi, sabit hücre sıcaklığında ve sabit akım yoğunluğunda yakıt kullanım oranı sistematik olarak %78 ile %96 arasında değiştirilmektedir. Yakıt kullanım oranı, yakıt hücresine giren yakıtın ne kadarının elektrokimyasal reaksiyona katıldığını ifade eder. Yakıt kullanım oranı arttıkça, daha fazla yakıt reaksiyona girer ve daha az yakıt atık olarak çıkar. Bu da yakıt hücresinin enerji ve ekserji verimliliğini artırır. En yüksek enerji ve ekserji verimleri, sırasıyla %34,57 ve %30,96 olan en yüksek yakıt kullanım oranında (%96) elde edilmiştir. En düşük enerji ve ekserji verimleri, sırasıyla %29,68 ve %26,58 olan düşük yakıt kullanım oranında (%78) elde edilmiştir. Yakıt kullanım oranının artması, aynı zamanda yakıt hücresinin elektriksel gücünü de etkiler. Yakıt hücresinin AC gücü, hücre voltajı ile doğru orantılıdır. Yakıt kullanım oranı arttıkça hücre voltajı dolayısıyla da AC gücü azalır. Minimum yakıt kullanım oranında (%78) hücre voltajı 0,4208 V ve elektriksel AC gücünü 24847,21 kW olarak hesaplanmıştır. Maksimum yakıt kullanım oranında (%96) AC gücü olarak hücre voltajı 0,3982 V hesaplanırken AC gücü 23512,73 kW olarak hesaplanmıştır.

## SONUÇ

Bu çalışma, yüksek sıcaklıklı yakıt pilleri kategorisinde yer alan ve dahili reformasyon yetenekleriyle tanımlanan Doğrudan Dahili Reformer eklenmiş Erimiş Karbonat Yakıt Pillerinin (DIR-MCFC'ler) performansını akım yoğunluğu, yakıt kullanım oranı ve hücre sıcaklığındaki değişikliklere duyarlılığını incelemektedir. Her bir parametre için belirlenen aralıklardaki çalışma koşullarını analiz ederek, bu faktörlerin hücre voltajını, güç yoğunluğunu, AC gücünü, CO<sub>2</sub> kullanım oranını ve enerji/ekserji verimliliğini önemli ölçüde etkileyebileceği sonucuna varılmıştır:

- Akım yoğunluğu arttıkça, hücre voltajında azalma olduğu gözlemlenmiştir. Bu durum, yüksek akım yoğunluğunun hücre performansını olumsuz etkilediğini göstermektedir.
- Akım yoğunluğu ve hücre voltajı üzerinden hesaplanan güç yoğunluğu ile hücrenin AC gücü arasındaki ilişki, akım yoğunluğunun artmasıyla birlikte bir süre artış gösterir daha sonra bu artış yerine düşüşe bürünür. Bu düşüşün sebebi geri dönüşü olmayan kayıpların artmasıdır; MCFC'de güç üretimi artarken ısı ve diğer yan ürünlerin üretimi de artırmasından dolayı üretilen ısı normalden daha düşük bir kısmı elektrığe dönüştürülür. Böylece yakıt hücresinin verimini düşürerek yakıt pilinin performansı olumsuz etkiler. Akım yoğunluğu arttırıldığında ise yakıt piline giren yakıt akış hızı ve hava akış hızı artarak ekserji verimini düşürür.
- CO<sub>2</sub> kullanım oranının yükselmesi, elektrokimyasal reaksiyona katılımı azaltarak hücre voltajını düşürmüştür. Bu durum, yüksek akım yoğunluğunun hücre performansını olumsuz etkilediğini göstermektedir.
- Yakıt kullanım oranı arttıkça, yakıt hücresinin enerji ve ekserji verimliliğini artırırken hücre voltajı dolayısıyla da AC gücü azalır.

Bu bulgular, MCFC'lerin tasarımını ve çalışmasını optimize etmek adına gelişmiş verimlilik ve güç çıkışı elde etme amacıyla değerli bilgiler sağlamaktadır. Optimal işletme koşullarının belirlenmesi, enerji dönüşüm süreçlerini daha etkin hale getirerek çevresel sürdürülebilirlik ve endüstriyel uygulanabilirlik açısından önemli bir adım olabilir. Gelecekteki çalışmalar, bu bulguların pratik uygulamalara nasıl entegre edilebileceğini ve endüstriyel ölçekte nasıl optimize edilebileceğini daha da anlamak için odaklanabilir.

### Kısaltmalar

<i>DIR-MCFC</i>	= Doğrudan iç reformer ile çalışan erimiş karbonat yakıt pili
$P_{MCFC}$	= Hücre çalışma basıncı (bar)
$T_{MCFC}$	= Hücre çalışma sıcaklığı (°C)
S/C	= Su/metan mol oranı
$X_{OF}$	= oksidan/yakıt oranı (kg/kg)
$U_F$	= Yakıt kullanım oranı (%)
$U_{O_2}$	= O <sub>2</sub> kullanım faktörü (%)
$\eta_{DC/AC}$	= Dönüşüm verimliliği (%)
$i_{MCFC}$	= Akım yoğunluğu (A/m <sup>2</sup> )
$A_{MCFC}$	= Hücre alanı (m <sup>2</sup> )
$\dot{m}$	= Kütle akışı (kg/s)
$M_{mol}$	= Mol kütlesi (kg/mol)
P	= Güç (kW)
$\dot{Q}_{kayıp}$	= Isı kaybı (kW)
I	= Akım (A)
$\emptyset$	= Güç yoğunluğu (kW/m <sup>2</sup> )
$V_{MCFC}$	= Hücre voltajı (V)

### Alt İndisler

<i>gir</i>	= giriş
<i>çık</i>	= çıkış
<i>k</i>	= katot
<i>a</i>	= anot
<i>k→a</i>	= Katottan anota doğru

## KAYNAKÇA

- Ajanovic, A., & Haas, R. (2021). Prospects and impediments for hydrogen and fuel cell vehicles in the transport sector. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(16), 10049-10058. <https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2020.03.122>
- Baranak, M. (2015). Ergimiş Karbonatlı Yakıt Pili Modellenmesi. <http://hdl.handle.net/11527/10742>
- Brouwer, J., Jabbari, F., Leal, E. M., & Orr, T. (2006). Analysis of a molten carbonate fuel cell: Numerical modeling and experimental validation. *Journal of Power Sources*, 158(1), 213-224. <https://doi.org/10.1016/J.JPOWSOUR.2005.07.093>
- Duan, L., Lu, H., Yuan, M., & Lv, Z. (2018). Optimization and part-load performance analysis of MCFC/ST hybrid power system. *Energy*, 152, 682-693. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2018.03.178>
- Fuel Cells | Department of Energy. (t.y.). Geliş tarihi 03 Kasım 2022, gönderen <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/fuel-cells>
- Ivanova, D., & Wood, R. (2020a). The unequal distribution of household carbon footprints in Europe and its link to sustainability. *Global Sustainability*, 3. <https://doi.org/10.1017/SUS.2020.12>
- Ivanova, D., & Wood, R. (2020b). The unequal distribution of household carbon footprints in Europe and its link to sustainability. *Global Sustainability*, 3. <https://doi.org/10.1017/SUS.2020.12>
- Karatekin, C., İktisadi, U., Bilimler, İ., Tarihi, G., Erdoğan, S., Ve Tabii, E., Bakanlığı, K., İşleri, E., & Müdürlüğü, E. G. (2020). Enerji, Çevre ve Sera Gazları. *Çankırı Karatekin Üniversitesi İktisadi ve İdari Bilimler Fakültesi Dergisi*, 10(1), 277-303. <https://doi.org/10.18074/CKUIIBFD.670673>
- Larminie, J., & Dicks, A. (2013). Medium and High Temperature Fuel Cells. *Fuel Cell Systems Explained*, 163-228. <https://doi.org/10.1002/9781118878330.CH7>
- Manoharan, Y., Hosseini, S. E., Butler, B., Alzahrani, H., Senior, B. T. F., Ashuri, T., & Krohn, J. (2019). Hydrogen Fuel Cell Vehicles; Current Status and Future Prospect. *Applied Sciences*, 9(11), 2296. <https://doi.org/10.3390/APP9112296>
- Mehmet, M. M., Fbe, Ç., Mühendislii, M., Dalında, A., Hazırlanan, E. P., Danımanı, T., Ükrü Bekdemr, D., & Üniversitesi, Y. T. (2008). Elektrik enerjisi üretimi amacıyla kullanılan değişik tipteki yakıt pillerinin teknik ve ekonomik etüdü. <http://dspace.yildiz.edu.tr/xmlui/handle/1/11585>
- Mekhilef, S., Saidur, R., & Safari, A. (2012). Comparative study of different fuel cell technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(1), 981-989. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2011.09.020>
- Molten Carbonate Fuel Cells. (2018). *Fuel Cell Systems Explained*, 207-234. <https://doi.org/10.1002/9781118706992.CH8>
- Moradpoor, I., & Ebrahimi, M. (2019). Thermo-environ analyses of a novel trigeneration cycle based on clean technologies of molten carbonate fuel cell, stirling engine and Kalina cycle. *Energy*, 185, 1005-1016. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2019.07.112>
- Muñoz De Escalona, J. M., Sánchez, D., Chacartegui, R., & Sánchez, T. (2011). A step-by-step methodology to construct a model of performance of molten carbonate fuel cells with internal reforming. *International Journal of Hydrogen Energy*, 36(24), 15739-15751. <https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2011.08.094>
- Olabi, A. G., Wilberforce, T., & Abdelkareem, M. A. (2021). Fuel cell application in the automotive industry and future perspective. *Energy*, 214, 118955. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2020.118955>
- Ovrum, E., & Dimopoulos, G. (2012). A validated dynamic model of the first marine molten carbonate fuel cell. *Applied Thermal Engineering*, 35(1), 15-28. <https://doi.org/10.1016/J.APPLTHERMALENG.2011.09.023>
- Sharaf, O. Z., & Orhan, M. F. (2014). An overview of fuel cell technology: Fundamentals and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 32, 810-853. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2014.01.012>
- Souleymane, C., Zhao, J., & Li, W. (2022). Efficient utilization of waste heat from molten carbonate fuel cell in parabolic trough power plant for electricity and hydrogen coproduction. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(1), 81-91. <https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2021.09.210>
- The State of the World's Forests 2020. (2020). The State of the World's Forests 2020. <https://doi.org/10.4060/CA8642EN>

- Thounthong, P., Davat, B., Raël, S., & Sethakul, P. (2009). Fuel cell high-power applications. *IEEE Industrial Electronics Magazine*, 3(1), 32-46. <https://doi.org/10.1109/MIE.2008.930365>
- Wang, J. (2015). Barriers of scaling-up fuel cells: Cost, durability and reliability. *Energy*, 80, 509-521. <https://doi.org/10.1016/J.ENERGY.2014.12.007>
- Wang, J., Wang, H., & Fan, Y. (2018). Techno-Economic Challenges of Fuel Cell Commercialization. *Engineering*, 4(3), 352-360. <https://doi.org/10.1016/J.ENG.2018.05.007>
- Wee, J. H. (2014). Carbon dioxide emission reduction using molten carbonate fuel cell systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 32, 178-191. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2014.01.034>
- Fichera, A., Samanta, S., & Volpe, R. (2022). Exergetic analysis of a natural gas combined-cycle power plant with a molten carbonate fuel cell for carbon capture. *Sustainability*, 14(1), 533.
- Vatani, A., Khazaeli, A., Roshandel, R., & Panjeshahi, M. H. (2013). Thermodynamic analysis of application of organic Rankine cycle for heat recovery from an integrated DIR-MCFC with pre-reformer. *Energy Conversion and Management*, 67, 197-207.





# Kahramanmaraş Sütçü İmam University

## Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 05.01.2024  
Kabul Tarihi : 15.02.2024

Received Date : 05.01.2024  
Accepted Date : 15.02.2024

### 3B YAZICIDA ABS VE PLA MALZEME İLE ÜRETİLMİŞ LEVHALARLA OLUŞTURULAN TEK TESİRLİ YAPIŞTIRMA BAĞLANTILARININ ARAŞTIRILMASI

#### INVESTIGATION OF SINGLE LAP JOINTS CREATED WITH PLATES PRODUCED IN 3D PRINTER WITH ABS AND PLA MATERIAL

Muhammed Safa KAMER<sup>1\*</sup> (ORCID: 0000-0003-3852-1031)  
Şemsettin TEMİZ<sup>2</sup> (ORCID: 0000-0002-6737-3720)

<sup>1</sup> Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Kahramanmaraş, Türkiye  
<sup>2</sup> İnönü Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Malatya, Türkiye

\*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Muhammed Safa KAMER, msafakamer@ksu.edu.tr

#### ÖZET

3 boyutlu (3B) yazdırılmış malzemelerin yapıştırma davranışlarının araştırılması, bu ürünlerin kullanım alanlarının genişletilebilmesi açısından önemlidir. Yapıştırma davranışlarının araştırılmasında kullanılan yöntemlerden biri tek tesirli yapıştırma bağlantılı test yöntemidir. Bu çalışmada, 3B yazıcı ile ABS ve PLA filamentler kullanılarak 3,2 mm kalınlığında, 100x25 mm boyutlarında polimer levhalar üretilmiştir. Üretilen levhaların 25x25 mm'lik kısımları üst üste gelecek şekilde yerleştirilmiş olup, aralarına iki farklı yapıştırıcı (Araldite 2011, Araldite 2015-1) uygulanarak tek tesirli yapıştırma bağlantıları oluşturulmuştur. Bu şekilde hazırlanan tek tesirli yapıştırma bağlantılı test numunelerinin kütle, sertlik ve yüzey pürüzlülüğü değerleri ölçülmüştür. Test numunelerine 1 mm/dk hızla çekme testi uygulanmıştır. 3B yazdırılmış ABS ve PLA levhaların farklı epoksi yapıştırıcılar kullanılarak yapıştırılmasıyla oluşturulan tek tesirli yapıştırma bağlantılarının çekme testi davranışları araştırılmıştır. Çalışma sonucunda PLA malzeme ile üretilen test numunelerinde fırınlama işlemi sırasında polimer test levhasının kalınlığında yaklaşık olarak % 1,8'lik bir artış olduğu belirlenmiştir. Araldite 2011 epoksi yapıştırıcı ile yapıştırılan ABS test numunelerinde adeziv tip kopmanın meydana geldiği tespit edilmiştir. Araldite 2011 epoksi yapıştırıcı ile yapıştırılan ABS test numunelerinin en düşük çekme dayanımına sahip numune olduğu, Araldite 2015-1 epoksi yapıştırıcı ile yapıştırılan ABS test numunelerinin ise en yüksek kopma uzamasına sahip numune olduğu belirlenmiştir. Tüm parametreler arasında en yüksek çekme dayanımının PLA test numunelerinde olduğu tespit edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** ABS, PLA, Araldite 2011, Araldite 2015-1, tek tesirli yapıştırma bağlantısı

#### ABSTRACT

Investigating the bonding behavior of 3 dimensional (3D) printed materials is important to expand the usage areas of these products. One of the methods used to investigate adhesion behavior is the single lap joint test method. In this study, polymer plates with a thickness of 3.2 mm and dimensions of 100x25 mm were produced using ABS and PLA filaments with a 3D printer. 25x25 mm sections of the produced boards were placed overlapping each other, and single lap joint connections were created by applying two different adhesives (Araldite 2011, Araldite 2015-1) between them. The mass, hardness and surface roughness values of the single lap joint test samples prepared in this way were measured. A tensile test was applied to the test samples at a speed of 1 mm/min. Tensile test behaviors of single lap joints formed by bonding 3D printed ABS and PLA plates using different epoxy adhesives were investigated. As a result of the study, it was determined that there was an approximately 1.8 % increase in the thickness of the polymer test plate during the firing process in the test samples produced with PLA material. It was determined that adhesive type failure occurred in ABS test samples bonded with Araldite 2011 epoxy adhesive. It

ToCite: KAMER, M. S., & TEMİZ, Ş., (2024). 3B YAZICIDA ABS VE PLA MALZEME İLE ÜRETİLMİŞ LEVHALARLA OLUŞTURULAN TEK TESİRLİ YAPIŞTIRMA BAĞLANTILARININ ARAŞTIRILMASI. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 27(2), 579-588.

was determined that the ABS test samples bonded with Araldite 2011 epoxy adhesive had the lowest tensile strength, while the ABS test samples bonded with Araldite 2015-1 epoxy adhesive had the highest elongation at break. It was determined that the highest tensile strength among all parameters was in PLA test samples.

**Keywords:** ABS, PLA, Araldite 2011, Araldite 2015-1, single lap joint

## GİRİŞ

Erimiş yığın modelleme (EYM) yöntemiyle çalışan 3B yazıcılarda ABS ve PLA filamentler yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu filamentlerle üretilen malzemelerin mekanik özelliklerinin belirlenmesi ve iyileştirilmesi amacıyla birçok çalışma yapılmıştır (Doğan ve Kamer, 2023; Kopar ve Yıldız, 2023; Tunçel ve Tutar, 2023; Kamer vd., 2022a; Kamer vd., 2022b; Aydın vd., 2019). 3B yazdırılmış malzemelerin yapıştırma davranışlarının araştırılması, bu ürünlerin kullanım alanlarının daha da genişletilebilmesi açısından önemlidir. Yapıştırma davranışlarının araştırılmasında kullanılan yöntemlerden biri tek tesirli yapıştırma bağlantılı test yöntemidir. Literatürde tek tesirli yapıştırma bağlantılı test yöntemiyle birçok çalışma yapılmış olup, bunlardan bir kısmı aşağıda verilmiştir.

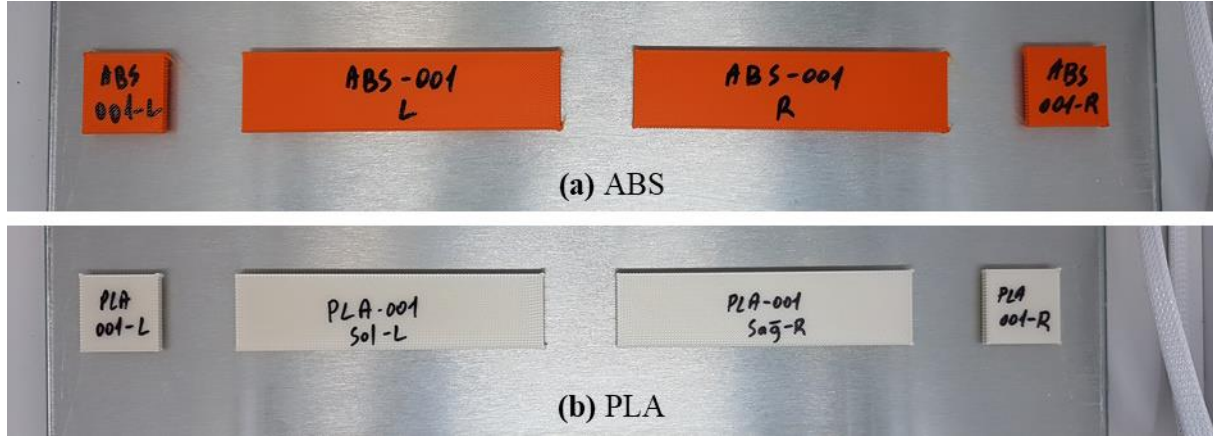
Aydın vd. (2007), yapıştırıcının kurlenmesi sırasında uyguladıkları farklı basınçların, basınca duyarlı esnek bir yapıştırıcı ile hazırladıkları tek tesirli yapıştırma bağlantılarının çekme dayanımı üzerindeki etkilerini deneysel olarak araştırmışlardır. Deneysel olarak elde ettikleri sonuçları, sayısal analiz sonuçlarıyla kıyaslamışlardır. Çalışmaları sonucunda, yüksek sıcaklıkta kürlenme işlemi sırasında uygulanan basıncın bir sonucu olarak meydana gelen artık termal gerilimlerin, yapıştırıcıyla birleştirilmiş bağlantıların mekanik davranışını doğru bir şekilde simüle etmek için dikkate alınması gerektiğini ortaya koymuşlardır. Çalık ve Akpınar (2019), AA2024-T3 alüminyum levhaları, Araldite 2015 iki bileşenli epoksi yapıştırıcı ile yapıştırarak tek tesirli yapıştırma bağlantılı test numuneleri üretmişlerdir. Ürettikleri test numunelerine iki farklı çekme test cihazında çekme testlerine tabi tutmuşlardır. Her iki çekme test cihazında çekme tablası ilerlemesi ve videolu ekstansometre kullanarak iki farklı yöntemle test etmişler ve toplamda dört farklı durum için kuvvet – yer değiştirme eğrileri elde etmişlerdir. Deneysel olarak elde ettikleri grafikleri, gerçekleştirdikleri sayısal analiz sonuçlarıyla karşılaştırmışlardır. Çalışmaları sonucunda her iki test cihazında da çekme tablası ilerlemesi ve videolu ekstansometre kullanarak elde edilen kuvvet – yer değiştirme grafiklerinde önemli farklılıklar olduğunu tespit etmişlerdir. Ayrıca her iki test cihazında videolu ekstansometre ile yapılan testlerden elde edilen grafiklerin hem birbiri arasında hem de sayısal analizlerden elde edilen grafiklerle uyumlu olduğunu belirlemişlerdir. Saraç vd. (2019), nano- $Al_2O_3$ , nano- $TiO_2$  ve nano- $Al_2O_3$  partikülleri çeşitli oranlarda epoksi yapıştırıcıya ilave ederek katkılı ve katkısız epoksi yapıştırıcı tek tesirli yapıştırma bağlantıları oluşturmuşlardır. Ayrıca farklı bindirme uzunluklarının (20, 25, 30, 50 ve 70 mm) tek tesirli yapıştırma bağlantılarının kesme dayanımı üzerindeki etkilerini deneysel olarak incelemişlerdir. Çalışmalarında AISI 304 paslanmaz çelik levhaları DP460 epoksi yapıştırıcı kullanarak katkılı ve katkısız halde test numuneleri üretmişlerdir. Çalışmaları sonucunda nanopartikül katkılı test numunelerinde ortalama hasar yükünün arttığını, nano- $Al_2O_3$  partiküllerinin yapıştırma bağlantılarının kopma mukavemetini arttırmada en etkili nanopartikül olduğunu ve maksimum kopma mukavemeti artış oranının 20 mm bindirme uzunluğunda olduğunu belirlemişlerdir. Turan ve Barut (2021), tek yön cam fiberlerle takviye edilmiş yapıştırıcılar kullanarak ürettikleri tek tesirli yapıştırma bağlantılarının hasar davranışlarını deneysel olarak araştırmışlardır. Kompozit levhaların tek tesirli bağlantılar ile birleştirilmesinde epoksi yapıştırıcı emdirilmiş fiberler kullanmışlardır. İki kompozit levha arasında yapıştırıcı emdirilmiş fiber tabakaların kullanılmasıyla bağlantının güçlendirilmesini amaçlamışlardır. Ayrıca fiber takviye açısının etkisini araştırmak için  $0^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $30^\circ$  ve  $45^\circ$  fiber takviye açıları kullanmışlardır. Çalışmaları sonucunda yapıştırıcıların takviye edilmesinin hasar yüklerini % 7'ye varan oranlarda arttırabildiğini ortaya koymuşlardır. Erklığ ve Abood Al-dulaimi (2022), tek tesirli yapıştırma bağlantılarında arıtma çamuru külü (AÇK) takviyesinin etkisini araştırmışlardır. Mikron boyutundaki AÇK partiküllerini ağırlıkça % 0, % 5, % 10, % 15, % 20 ve % 25 oranlarında epoksi yapıştırıcıya ekleyerek, 2 mm kalınlığındaki 10 katlı cam elyaf/epoksi levhaları birbirine yapıştırmışlardır. Ayrıca üç farklı yapıştırma kalınlığının (0,3; 0,5 ve 0,7 mm) yapıştırma bölgesi üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Çalışmaları sonucunda, optimum yapıştırma kalınlığının 0,5 mm olduğunu, ağırlıkça % 20 AÇK partikül katkılı test numunelerine ait kayma mukavemet değerlerinin saf epoksili numunelere göre % 35 artış gösterdiğini belirlemişlerdir. Gültekin ve Yazıcı (2022), hegzagonal bor nitrür (hBN) ve hegzagonal bor karbür (hB4C) nanopartiküllerinin yapıştırma bağlantıları üzerine etkisini araştırmışlardır. Nanopartikülleri farklı viskozite değerine sahip iki farklı epoksi yapıştırıcı içerisine (Araldite 2011 ve MGS-LR285), ağırlıkça % 0,5, % 1, % 2 ve % 3 oranlarında katarak yeni nanokompozit yapıştırıcılar üretmişlerdir. Geliştirdikleri nanokompozit yapıştırıcıları ve ürettikleri düz dokuma karbon fiber kompozitleri kullanarak tek tesirli yapıştırma bağlantıları üretmişlerdir. Yapıştırma bağlantılarının mekanik özelliklerini ASTM D1002 standardına göre yapılan çekme testi ile

belirlemişlerdir. Çalışmaları sonucunda, hBN ve hB4C nanopartikülleri ile birleştirilmiş bağlantıların hasar yükünde önemli artış sağlandığını belirlemişlerdir.

Bu çalışmada, 3B yazıcı ile ABS ve PLA filamentler kullanılarak 3,2 mm kalınlığında, 100x25 mm boyutlarında polimer levhalar üretilmiştir. Üretilen levhaların 25x25 mm'lik kısımları üst üste gelecek şekilde yerleştirilmiş olup, aralarına iki farklı yapıştırıcı uygulanarak tek tesirli yapıştırma bağlantıları oluşturulmuştur. Yapıştırma bağlantılarının oluşturulmasında Araldite 2011 ve Araldite 2015-1 iki bileşenli epoksi yapıştırıcılar kullanılmıştır. Test numuneleri yapıştırıcı uygulandıktan sonra 1 gün boyunca oda sıcaklığında 0,5 MPa basınç altında mekanik preste bekletilmiştir. Sonrasında 80 °C sıcaklıkta 1 saat süreyle fırınlanmıştır. Bu şekilde hazırlanan tek tesirli yapıştırma bağlantılı test numunelerinin kütle, sertlik ve yüzey pürüzlülüğü değerleri ölçülmüştür. Test numunelerine 1 mm/dk hızla çekme testi uygulanmıştır. 3B yazdırılmış ABS ve PLA levhaların farklı epoksi yapıştırıcılar kullanılarak yapıştırılmasıyla oluşturulan tek tesirli yapıştırma bağlantılarının çekme testi davranışları araştırılmıştır.

## MATERYAL VE METOT

Bu çalışmada, 2,85 mm çapında Ultimaker ABS Turuncu (Ultimaker-ABS-TDS-v5.00, 2022) ve Ultimaker PLA İnci Beyazı (Ultimaker-PLA-TDS-v5.00, 2022) filamentler kullanılarak Ultimaker S5 3B yazıcı (Ultimaker S5 Product data sheet, 2019) ile polimer levhalar üretilmiştir (Şekil 1). Her bir test numunesi için 3,2 mm kalınlığında, 25x25 mm boyutlarında iki adet ara levha ve 3,2 mm kalınlığında, 100x25 mm boyutlarında iki adet test levhası üretilmiştir. 3B yazıcı ile polimer levha üretiminde kullanılan parametreler Tablo 1'de verilmiştir.



Şekil 1. 3B Yazıcı İle Üretilmiş ABS Ve PLA Levha Görüntüleri

Tablo 1. 3B Yazıcı İle ABS Ve PLA Levha Üretiminde Kullanılan Parametreler

3B Yazıcı	Ultimaker S5	
CAM Programı	Cura v4.8.0	
Malzeme	Ultimaker ABS turuncu	Ultimaker PLA inci beyazı
Filament Çapı	2,85 mm	
Filament Yoğunluğu	1,10 g/cm <sup>3</sup>	1,24 g/cm <sup>3</sup>
Camsı Geçiş Sıcaklığı	100,5 °C	59,1 °C
Nozul Sıcaklığı	240 °C	210 °C
Tabla Sıcaklığı	85 °C	60 °C
Yazdırma Hızı	60 mm/s	
Boşta Gezme Hızı	120 mm/s	
Nozul Çapı	0,4 mm	
Katman Yüksekliği	0,2 mm	
Hat Genişliği	0,4 mm	
Duvar Kalınlığı	0 mm	
Dolgu Yoğunluğu	% 100	
Dolgu Deseni	Zig Zag	

Üretilen polimer levhaların boyutları, kütleleri, sertlikleri ve yüzey pürüzlülük değerleri ölçülmüştür. Polimer levhaların kütlelerinin ölçülmesinde 0,01 g hassasiyete sahip KERN PLS 6200-2A hassas terazi kullanılmıştır. Polimer levhaların sertlik değerlerinin ölçülmesinde MITECH MH210 portatif sertlik ölçüm cihazı kullanılmıştır. Sertlik ölçümleri polimer levhaların üst ve alt yüzeylerinden Shore D probu ile yapılmış olup, her levhanın beş farklı

bölgesinden ölçümler alınarak ortalama değerler belirlenmiştir. Polimer levhaların yüzey pürüzlülüğü değerleri JENOPTIK Hommel-Etamic W5 yüzey pürüzlülüğü ölçüm cihazı ile Tablo 2’de belirtilen parametreler kullanılarak ölçülmüştür. Yüzey pürüzlülüğü ölçümleri polimer levhaların üst ve alt yüzeylerinden çekme testi doğrultusuna paralel (Şekil 2) olarak yapılmış olup, her levhanın üç farklı bölgesinden ölçümler alınarak ortalama değerler belirlenmiştir. Yüzey pürüzlülüğü ölçümlerinde literatürde çoğunlukla kullanılan aritmetik ortalama pürüzlülük ( $R_a$ ) değerleri dikkate alınmıştır (Guo vd., 2021; Taufik ve Jain, 2020).

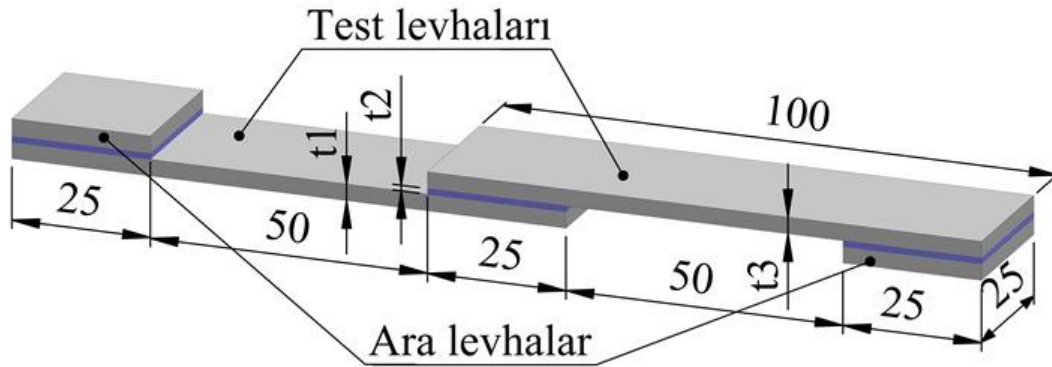
**Tablo 2.** Yüzey Pürüzlülüğü Ölçüm Parametreleri

Ölçüm uzunluğu (lt)	4,8 mm
Ölçüm hızı (vt)	0,5 mm/s
Dalga boyu (lc)	0,8 mm



**Şekil 2.** Yüzey Pürüzlülüğü Ölçümü

3B yazıcıda ABS ve PLA filamentlerle üretilen test levhaları ve ara levhalar kullanılarak tek tesirli yapıştırma bağlantısı test numuneleri üretilmiştir. Üretilen test numunelerinin boyutları Şekil 3’de gösterilmiştir (Çalık ve Akpınar, 2019). Ara levhalar ve test levhalarının tümünün üst yüzeyleri üste gelecek şekilde yapıştırma işlemi gerçekleştirilmiştir. Böylece test levhalarının birbirine yapıştırıldığı tek tesirli yapıştırma bölgesinde alttaki test levhasının üst yüzeyi, üstteki test levhasının alt yüzeyine yapıştırılmıştır. Ara levhaların test levhalarına yapıştırılmasında Henkel Pattex marka çift taraflı bant kullanılmıştır. Test levhalarının birbirine yapıştırılmasında Araldite 2011 (Araldite 2011, 2021) ve Araldite 2015-1 (Araldite 2015-1, 2021) olmak üzere iki farklı iki bileşenli epoksi yapıştırıcı kullanılmıştır. Test levhalarının birbirine yapıştırılmasında kullanılan iki bileşenli epoksi yapıştırıcıların özellikleri Tablo 3’de verilmiştir.

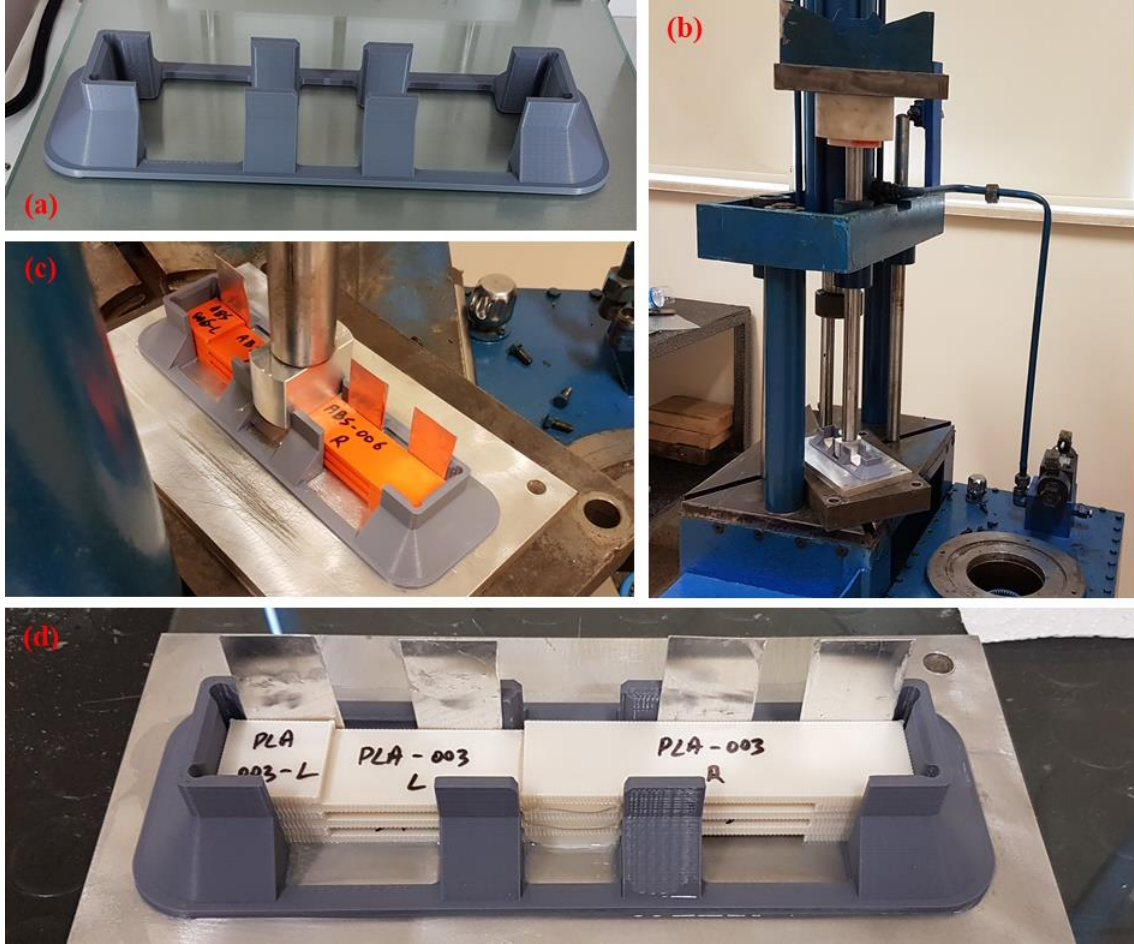


**Şekil 3.** Test Numunesi Boyutları



**Tablo 3.** Tek Tesirli Yapıştırma Bağlantılarında Kullanılan Yapıştırıcı Özellikleri

Yapıştırıcı Özellikleri	Araldite 2011	Araldite 2015-1
	İki Bileşenli Epoksi Yapıştırıcı	İki Bileşenli Epoksi Yapıştırıcı
Çekme Dayanımı	24 MPa	31 MPa
Elastisite Modülü	1,9 GPa	1,6 GPa
Kopmadaki Uzama	% 9	% 4
Uygulama Süresi (Oda sıcaklığında)	100 dk	45 dk
Kürleşme Süresi	7 sa	4 sa
Sürekli Çalışma Sıcaklığı	Maks. 90 °C	Maks. 100 °C

**Şekil 4.** Test Numunesi Hazırlama Görüntüleri **a.** Kalıp **b.** Pres **c.** Test Numunelerinin Presleme Sırasındaki Görüntüsü **d.** Test Numunelerinin Presleme Sonrasındaki Görüntüsü

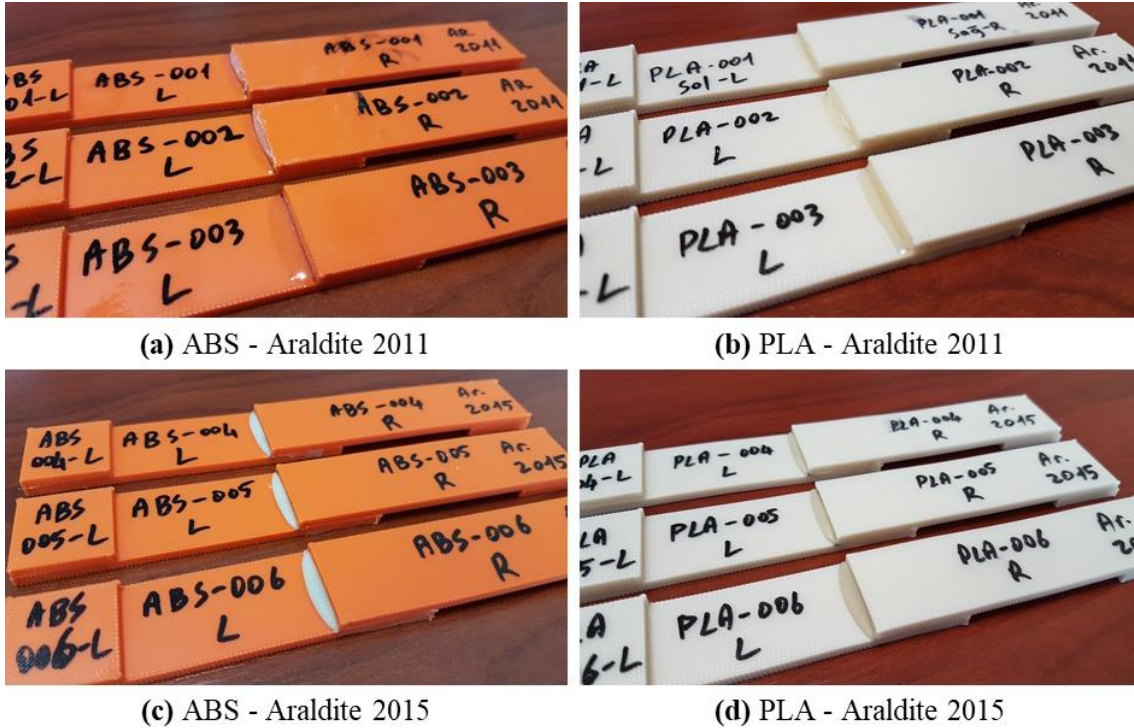
Tek tesirli yapıştırma bağlantılı test numunelerinin kolayca yapıştırılarak, test numunesi ölçülerine getirilebilmesi amacıyla bir kalıp tasarımı yapılmış olup, 3B yazıcı ile PLA malzeme kullanılarak üretilmiştir (Şekil 4a). Epoksi yapıştırıcı ile yapıştırılacak olan test levhaları yapıştırma öncesinde üzerindeki yapıştırmayı engelleyebilecek parmak izi, toz, kir vb. kalıntılardan arındırılması amacıyla deterjanlı su ile yıkanarak durulanmış ve kurumaya bırakılmıştır. Yıkama işleminden yapıştırma işlemi sonrasına kadar test levhalarına çıplak elle dokunulmamıştır. Hazırlanan kalıp, 15 mm kalınlığındaki bir alüminyum levha üzerine yerleştirilmiş olup, kalıp içerisindeki enine boşlukların giderilmesi için dört adet 1 mm kalınlığında alüminyum levha kullanılmıştır. Her test numunesinin alttaki test levhası üzerine yapıştırma bölgesi genişliğinde iki bileşenli epoksi yapıştırıcı sürülerek kalıba yerleştirilmiş olup, sonrasında üzerine üst test levhası yerleştirilmiştir. Bu şekilde her bir yapıştırma işleminde üç adet test numunesi üretilecek şekilde test levhaları kalıp içerisine sırayla üst üste gelecek şekilde yerleştirilmiştir. Son olarak yapıştırma bölgesinde homojen basınç dağılımının sağlanabilmesi amacıyla üst kısma bir alüminyum blok yerleştirilmiştir. Yapıştırma işlemine başlamadan önce yapıştırma kalıplama işleminde kullanılan kalıp, alüminyum levhalar ve alüminyum bloğun yapıştırıcı ile temas edebilecek tüm yüzeylerine bir kat Polivaks kalıp ayırıcı sıvı PVA (Kalıp Ayırıcı Sıvı PVA, 2022) sürülerek en az 30 dakika kurumaya bırakılmış olup, sonrasında yapıştırma işlemlerine başlanmıştır. Yapıştırma işleminde her bir test numunesi arasına kalıp ayırıcı jelatin film yerleştirilmiştir. Bu şekilde hazırlanan



test numuneleri ve kalıp seti Şekil 4b’de gösterilen mekanik prese yerleştirilmiş olup, mekanik preste test numunelerinin yapıştırma bölgesi üzerine yerleştirilen alüminyum blok üzerine yapıştırma bölgesinde 0,5 MPa basınç oluşturacak şekilde kütleler yerleştirilmiştir. Bu şekilde test numuneleri oda sıcaklığında bir gün boyunca mekanik preste bekletilmiş olup (Şekil 4c), sonrasında presten çıkarılmışlardır (Şekil 4d). 0,5 MPa kürleştirme basıncı literatürdeki benzer çalışmalar göz önünde bulundurularak belirlenmiştir (Aydın vd., 2007; Temiz vd., 2004). Mekanik presten çıkarılan test numuneleri kalıptan ve birbirlerinden ayrılarak, fırınlama işleminde boyutsal deformasyonların engellenmesi için iki cam plaka arasına yerleştirilmişlerdir. Bu şekilde fırına yerleştirilen test numuneleri epoksi yapıştırıcının kürleşme işleminin hızlandırılması amacıyla 80 °C sıcaklıkta 1 saat süreyle fırınlanmıştır. 1 saat süre sonrasında fırın otomatik olarak kapanmış olup, fırın içerisindeki sıcaklık oda sıcaklığına düşene kadar test numunelerinin fırın içerisinde soğuması beklenmiştir. Fırınlama işleminde sonra test numunelerinin kütleleri ve yapıştırma bölgelerinin kalınlıkları ölçülmüştür. Son olarak tüm test numunelerine çekme testi uygulanmıştır. Çekme testleri Zwick/Roell Z100 çekme test cihazıyla, 1 mm/dk hızda yapılmıştır.

## BULGULAR VE TARTIŞMA

3B yazdırılmış ABS ve PLA levhaların Araldite 2011 ve Araldite 2015-1 iki bileşenli epoksi yapıştırıcılar kullanılarak yapıştırılmasıyla oluşturulan dört farklı parametredeki tek tesirli yapıştırma bağlantılı test numunelerinde her parametre için üçer adet üretilmiş olup, test numunelerinin yapıştırma ve fırınlama işleminden sonraki görüntüleri Şekil 5’de gösterilmiştir.



Şekil 5. Test Numunesi Görüntüleri

Üretilen test numunelerinin ölçümlerden elde edilen kütle, sertlik, aritmetik ortalama pürüzlülük ve kalınlık değerleri Tablo 4’de verilmiştir. Tabloda test numunelerinin yapıştırma öncesi ve fırınlama sonrasına ait kütle değerleri verilmiştir. Bu değerler incelendiğinde her bir parametre için üretilen test numunesi kütle değerlerinin birbirine çok yakın olduğu görülmektedir. Bu nedenle test numunesi üretimi sırasında 3B yazdırma işleminde ve yapıştırma işleminde herhangi bir düzensizliğin meydana gelmediği söylenebilir. Fırınlama işlemi sonrasında ABS malzeme ile üretilen test numunelerinde % 0,09~0,13 arasında, PLA malzeme ile üretilen test numunelerinde ise % 0,20~0,36 arasında kütle kaybı meydana gelmiştir. Tabloda test numunelerinin üst ve alt yüzey sertlik değerleri verilmiştir. ABS malzeme ile üretilen test numunelerinin sertlik değerleri incelendiğinde tüm numunelerin üst ve alt yüzey sertlik değerlerinin birbirine çok yakın olduğu görülmektedir. PLA malzeme ile üretilen test numunelerinde ise alt yüzey sertlik değerlerinin, üst yüzey sertlik değerlerinden daha düşük olduğu belirlenmiştir. Tabloda test numunelerinin üst ve alt yüzey aritmetik ortalama pürüzlülük değerleri verilmiştir. Tüm test numunelerinde alt yüzey pürüzlülük değerlerinin üst yüzey pürüzlülük değerlerinden yaklaşık olarak 1,7 kat daha yüksek olduğu görülmektedir. İlk katmanın yazdırılması sırasında bazı düzensizlikler söz konusu olabilmektedir. Bunlardan ikisi cam tabla kalibrasyon

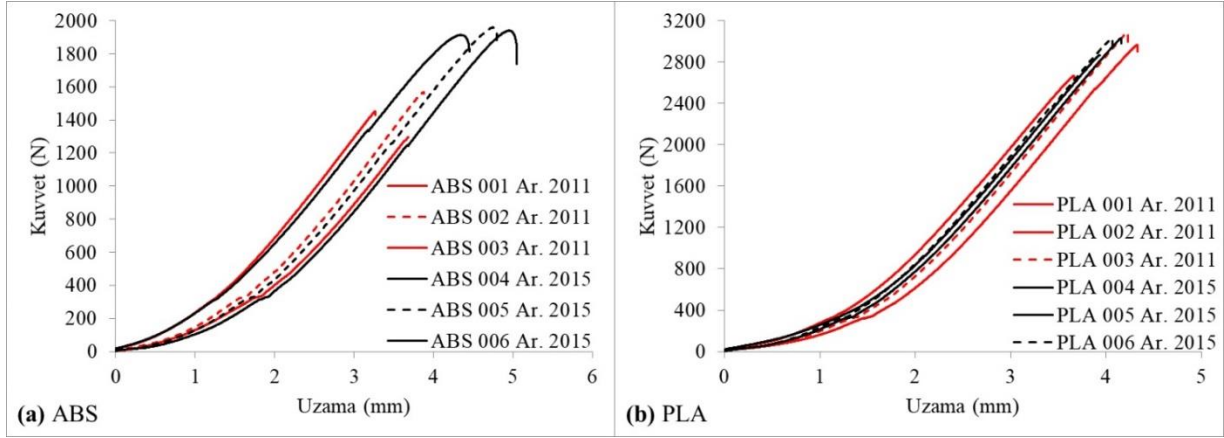
hataları ve cam tabla yüzeyi üzerindeki yapıştırıcı kalıntıları vb. nedeniyle oluşabilecek düzlemsellik bozukluklarıdır. 3B yazdırma işlemlerinde 0,4 mm hat genişliği kullanılmış olup, malzemelerin üst yüzeylerinde bu hat genişliği genel olarak korunurken, alt yüzeylerde bir hat yazdırılırken nozuldan çıkan malzemenin yanlara da bir miktar taşarak önceki ve sonraki hatlar üzerinde de bir miktar malzeme yığılmış olduğu tespit edilmiştir. Bunun neticesinde alt yüzey hat genişliklerinde azalmaların ve düzensizliklerin olduğu gözle görülebilmektedir. Bu nedenle malzemelerin alt yüzey pürüzlülük değerlerinde artış görülürken, alt yüzeylerdeki bu pürüzlülük artışının yine bu yüzeylerin sertlik değerlerinde bir miktar azalmaya neden olduğu söylenebilir. Tablodaki test numunelerinin yapıştırma bölgelerinin, yapıştırma öncesi ve fırınlama sonrası kalınlık değerleri verilmiştir. ABS malzeme ile üretilen test numunelerinin kalınlık değerleri incelendiğinde yapıştırma ve fırınlama işlemleri sonrasında yapıştırma bölgesinde yaklaşık 0,09~0,11 mm kalınlığında epoksi yapıştırıcının kaldığı söylenebilir. PLA malzeme ile üretilen test numunelerinde fırınlama işlemi sırasında camsı geçiş sıcaklığının üzerine çıkıldığından sadece polimer test levhasının kalınlığında yaklaşık olarak % 1,8'lik bir artış olduğu belirlenmiştir. Bu durum göz önüne alındığında PLA malzeme ile üretilen test numunelerinin yapıştırma bölgesinde yapıştırma ve fırınlama işlemleri sonrasında yaklaşık 0,06~0,13 mm kalınlığında epoksi yapıştırıcının kaldığı söylenebilir.

**Tablo 4.** Test Numuneleri Ölçüm Verileri

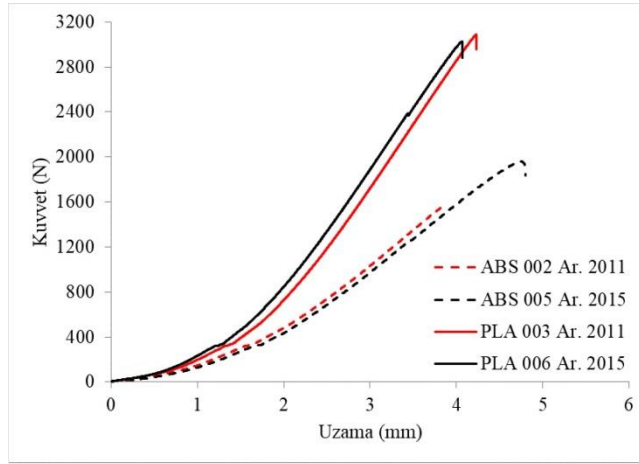
Test Numunesi Kodu	Kütle (g)		Sertlik Shore D (HS)		Aritmetik ortalama pürüzlülük $R_a$ ( $\mu\text{m}$ )		Kalınlık (mm)	
	Yapıştırma öncesi	Fırınlama sonrası	Üst	Alt	Üst	Alt	Yapıştırma öncesi $t_1+t_3$	Fırınlama sonrası $t_1+t_2+t_3$
ABS 001 Ar. 2011	21,89	22,23	67,2	66,1	5,705	9,954	6,14	6,23
ABS 002 Ar. 2011	21,79	22,19	66,8	65,8	6,038	10,186	6,10	6,19
ABS 003 Ar. 2011	21,78	22,15	66,9	65,4	5,536	9,418	6,10	6,21
ABS 004 Ar. 2015	21,80	22,32	68,0	65,9	5,455	8,962	6,10	6,20
ABS 005 Ar. 2015	21,74	22,23	66,8	66,8	5,757	9,359	6,10	6,20
ABS 006 Ar. 2015	21,70	22,25	67,3	66,4	5,916	9,605	6,07	6,16
PLA 001 Ar. 2011	24,88	25,15	69,7	65,2	5,383	10,211	6,43	6,65
PLA 002 Ar. 2011	24,87	25,11	71,7	64,0	5,556	9,637	6,42	6,60
PLA 003 Ar. 2011	24,81	25,04	70,6	65,4	6,121	10,569	6,38	6,62
PLA 004 Ar. 2015	24,67	25,11	69,1	65,9	5,149	9,111	6,34	6,54
PLA 005 Ar. 2015	24,67	25,11	68,2	66,0	5,409	9,736	6,36	6,58
PLA 006 Ar. 2015	24,75	25,26	70,0	66,2	5,380	8,940	6,38	6,61

Tüm tek tesirli yapıştırma bağlantılı test numunelerinin çekme testlerinde elde edilen kuvvet – uzama eğrileri Şekil 6'da gösterilmiştir. Şekildeki eğriler incelendiğinde her dört parametreye ait üçer eğrinin kendi içinde birbirine yakın ve tutarlı eğriler oldukları görülmektedir. Bunlar arasından her bir parametre için ortalama sayılabilecek eğriler seçilmiş olup, Şekil 7'de bu eğriler bir arada gösterilmiştir. Şekilde verilen eğrilerde çekme dayanımları ABS 002 Ar. 2011 test numunesinde 1566 N, ABS 005 Ar. 2015 test numunesinde 1958 N, PLA 003 Ar. 2011 test numunesinde 3085 N ve PLA 006 Ar. 2015 test numunesinde 3027 N olarak ölçülmüştür. Şekil incelendiğinde Araldite 2011 epoksi yapıştırıcı ile yapıştırılan ABS test numunesinin en düşük çekme dayanımına sahip numune olduğu, Araldite 2015-1 epoksi yapıştırıcı ile yapıştırılan ABS test numunesinin ise en yüksek kopma uzamasına sahip numune olduğu belirlenmiştir. Her iki epoksi yapıştırıcı ile yapıştırılan PLA test numunelerinin eğrilerinin neredeyse çakışık olduğu, tüm parametreler arasında en yüksek çekme dayanımının PLA test numunelerinde olduğu tespit edilmiştir.

Tüm tek tesirli yapıştırma bağlantılı test numunelerinin çekme testi sonrasındaki kopmuş görüntüleri Şekil 8'de gösterilmiştir. Araldite 2011 epoksi yapıştırıcı ile yapıştırılan ABS test numunelerinin tümünün yapıştırma yüzeylerinden ayrıldığı, daha detaylı incelendiğinde yapıştırıcının yüzeye tutunmakta zorlandığı, adeziv tip kopmanın meydana geldiği belirlenmiştir (Şekil 8a). Diğer üç parametre ile yapıştırılan test numunelerinin tamamının yapıştırma bölgelerinden kopmadığı, test numunelerinin çekme kesit alanından kopmaların gerçekleştiği görülmektedir (Şekil 8b, 8c, 8d).



Şekil 6. Çekme Testi Kuvvet – Uzama Eğrileri



Şekil 7. ABS ve PLA Test Numuneleri Karşılaştırma Grafiği



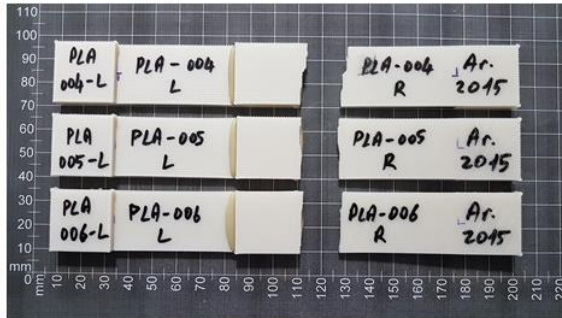
(a) ABS - Araldite 2011



(b) PLA - Araldite 2011



(c) ABS - Araldite 2015



(d) PLA - Araldite 2015

Şekil 8. Çekme Testi Sonrası Kopmuş Numunelerin Görüntüleri



## SONUÇLAR

Bu çalışmada, 3B yazıcı ile ABS ve PLA filamentler kullanılarak üretilen levhaların, aralarına Araldite 2011 ve Araldite 2015-1 iki bileşenli epoksi yapıştırıcıların uygulanmasıyla tek tesirli yapıştırma bağlantılı test numuneleri hazırlanmıştır. Hazırlanan tek tesirli yapıştırma bağlantılı test numunelerinin çekme testi davranışları incelenmiştir. Çalışmadan elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

- Fırınlama işlemi sonrasında ABS malzeme ile üretilen test numunelerinde % 0,09~0,13 arasında, PLA malzeme ile üretilen test numunelerinde ise % 0,20~0,36 arasında kütle kaybının meydana geldiği belirlenmiştir.
- PLA malzeme ile üretilen test numunelerinde fırınlama işlemi sırasında polimer test levhasının kalınlığında yaklaşık olarak % 1,8'lik bir artış olduğu belirlenmiştir.
- Araldite 2011 iki bileşenli epoksi yapıştırıcı uygulanan ABS test numunelerinde yaklaşık 1566 N, PLA test numunelerinde ise yaklaşık 3085 N çekme dayanımı değerleri ölçülmüştür.
- Araldite 2015 iki bileşenli epoksi yapıştırıcı uygulanan ABS test numunelerinde yaklaşık 1958 N, PLA test numunelerinde ise yaklaşık 3027 N çekme dayanımı değerleri ölçülmüştür.
- Araldite 2011 epoksi yapıştırıcı ile yapıştırılan ABS test numunelerinin tümünün yapıştırma yüzeylerinden ayrıldığı, adeziv tip kopmanın meydana geldiği tespit edilmiştir.
- Araldite 2011 epoksi yapıştırıcı ile yapıştırılan ABS test numunelerinin en düşük çekme dayanımına sahip numune olduğu, Araldite 2015-1 epoksi yapıştırıcı ile yapıştırılan ABS test numunelerinin ise en yüksek kopma uzamasına sahip numune olduğu belirlenmiştir.
- Tüm parametreler arasında en yüksek çekme dayanımının PLA test numunelerinde olduğu tespit edilmiştir.

## KAYNAKLAR

- Araldite 2011. (2021). <https://www.huntsman.com/products/araldite2000/araldite-2011> 20.11.2023 tarihinde erişildi.
- Araldite 2015-1. (2021). <https://www.huntsman.com/products/araldite2000/araldite-2015-1> 20.11.2023 tarihinde erişildi.
- Aydın, M., Yıldırım F., & Canti E. (2019). Investigation of the processing performance of PLA filament in different printing parameters. *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*, 3 (2), 102-115.
- Aydın, M. D., Temiz, Ş., & Özel, A. (2007). Effect of curing pressure on the strength of adhesively bonded joints. *Journal of Adhesion*, 83 (6), 553-571. <https://doi.org/10.1080/00218460701453536>
- Çalık, A., & Akpınar, S. (2019). Effect of extensometer usage on obtaining the force-displacement curve of the adhesively single lap joint. *European Mechanical Science*, 3 (4), 142-146. <https://doi.org/10.26701/ems.646610>
- Doğan, O., & Kamer, M. S. (2023). Farklı üretim parametreleri kullanılarak 3B yazıcı ile üretilen test numunelerinin sürünme davranışlarının deneysel olarak incelenmesi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 38 (3), 1839-1848. <https://doi.org/10.17341/gazimmfd.1122973>
- Erkliğ, A., & Abood Al-dulaimi, O. A. (2022). The effect of sewage sludge ash reinforced adhesive on tensile strength of single-lap joint. *The International Journal of Energy & Engineering Sciences*, 7 (1), 27-39.
- Guo, C., Liu, X., & Liu, G. (2021). Surface finishing of FDM-fabricated amorphous polyetheretherketone and its carbon-fiber-reinforced composite by dry milling. *Polymers*, 13, 2175. <https://doi.org/10.3390/polym13132175>
- Gültekin, K., & Yazıcı, M. E. (2022). Fonksiyonelleştirilmiş bor nanopartiküllerinin yapıştırıcıyla birleştirilmiş tek tesirli kompozit bağlantılar üzerinde etkisi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 37 (1), 175-191. <https://doi.org/10.17341/gazimmfd.847462>
- Kalıp Ayırıcı Sıvı PVA. (2022). <https://www.kompozitshop.com/kalip-ayirici-sivi-pva> 01.12.2022 tarihinde erişildi.
- Kamer, M. S., Temiz, Ş., Yaykaşlı, H., Kaya, A., & Akay, O. (2022a). 3B yazıcıda farklı yazdırma hızlarında ABS ve PLA malzeme ile üretilen çekme test numunelerinin mekanik özelliklerinin karşılaştırılması. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 37 (3), 1197-1212. <https://doi.org/10.17341/gazimmfd.961981>
- Kamer, M. S., Temiz, Ş., Yaykaşlı, H., Kaya, A., & Akay, O. (2022b). Effect of printed speed on FDM 3D-printed PLA samples produced using different two printers. *International Journal of 3D Printing Technologies and Digital Industry*, 6 (3), 438-448. <https://doi.org/10.46519/ij3dptdi.1088805>

Kopar, M., & Yıldız, A. R. (2023). Experimental investigation of mechanical properties of PLA, ABS, and PETG 3-d printing materials using fused deposition modeling technique. *Materials Testing*, 65 (12), 1795-1804. <https://doi.org/10.1515/mt-2023-0202>

Saraç, İ., Adin, H., & Temiz, Ş. (2019). Investigation of the effect of use of Nano-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Nano-TiO<sub>2</sub> and Nano-SiO<sub>2</sub> powders on strength of single lap joints bonded with epoxy adhesive. *Composites Part B: Engineering*, 166, 472-482. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.02.007>

Taufik, M., & Jain, P. K. (2020). Thermally assisted finishing of fused deposition modelling build part using a novel CNC tool. *Journal of Manufacturing Processes*, 59, 266-278. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.09.060>

Temiz, Ş., Özel, A., & Aydın, M. D. (2004). A study on durability of joints bonded with pressure-sensitive adhesives. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 18 (10), 1187-1198. <https://doi.org/10.1163/1568561041581289>

Tunçel, O., & Tutar, M. (2023). EYM ile üretilen YMK yapıları numunelerde kenar genişliğinin basma dayanımı üzerine etkisinin araştırılması. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 38 (3), 851-858. <https://doi.org/10.21605/cukurovaumfd.1377804>

Turan, K., & Barut, S. (2021). Fiber Takviyeli Yapıştırıcıların Kullanıldığı Tek Tesirli Yapışma Bağlantılarında Hasar Analizi. *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, 12 (2), 257-262. <https://doi.org/10.24012/dumf.853260>

Ultimaker-ABS-TDS-v5.00. (2022). <https://ultimaker.my.salesforce.com/sfc/p/#j0000000HOnW/a/5b000004UWOb/mqEDmbBEqiM6dfNicGFkHQEgcV9T8W762bqwplt4bxo> 08.11.2023 tarihinde erişildi.

Ultimaker-PLA-TDS-v5.00. (2022). <https://ultimaker.my.salesforce.com/sfc/p/#j0000000HOnW/a/5b000004UiRV/lt4XCkl0KOSLfPMcyG06mKKbES33WnYiFrMsG8bFGhw> 08.11.2023 tarihinde erişildi.

Ultimaker S5 Product data sheet. (2019). <https://cdn.webshopapp.com/shops/24440/files/300070983/ultimaker-s5-product-data-sheet-en-trideus.pdf> 09.11.2023 tarihinde erişildi.





# Kahramanmaraş Sütçü İmam University

## Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 28.12.2023  
Kabul Tarihi : 07.02.2024

Received Date : 28.12.2023  
Accepted Date : 07.02.2024

### BENTONİT KUM KARIŞIMLARINDA ELASTİK DRENAJSIZ MODUL-SERBEST BASINÇ MUKAVEMETİ İLİŞKİSİ

### THE RELATIONSHIP BETWEEN ELASTIC UNDRAINED MODULUS-UNDRAINED SHEAR STRENGTH FOR BENTONITE SAND MIXTURES

Eyyüb KARAKAN<sup>1</sup> (ORCID: 0000-0003-2133-6796)

<sup>1</sup> Kilis 7 Aralık Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Kilis, Türkiye

\*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Eyyüb KARAKAN, eyyubkarakan@kilis.edu.tr

#### ÖZET

Zeminlerin mühendislik özelliklerinin belirlenmesi için temel parametrelerden biri de gerilme şekil değiştirme davranışıdır. Zeminlerin gerilme şekil değiştirme özellikleri laboratuvarında serbest basınç ve statik üç eksenli deneyler ile bulunabilir. Bu çalışmada yüksek plastisiteye sahip Bentonit kili ile kum karışımları kullanılmıştır. Karışımlar %100 Bentonit kilinden başlayıp, %10 kum ilave edilerek %100 kuma kadar, 11 karışım oluşturulmuştur. Serbest basınç deneyleri optimum su içeriği, optimum +2 su içeriği ve optimum-2 su içeriği olmak üzere 3 farklı su içeriklerinde gerçekleştirilmiştir. Deney sonuçları incelendiğinde, en yüksek serbest basınç mukavemeti %100 bentonit kilinde optimum su içeriğinde ve 303.207 kPa olarak elde edilmiştir. En düşük serbest basınç mukavemeti ise optimum-2 su içeriğinde, %20 bentonit-%80 kum karışımında ve 30.09 kPa olarak bulunmuştur. Bentonit-kum karışımlarının artan kum içeriği ile birlikte her üç su içeriğinde de serbest basınç mukavemetleri azalmıştır. Artan bentonit içeriği ile birlikte karışımların drenajsız sekant modülü artmıştır. En yüksek drenajsız sekant modülü değerleri optimum su içeriklerinde elde edilmiştir. Her üç su içeriği için, drenajsız sekant modülü ile serbest basınç mukavemeti arasında doğrusal bir ilişki elde edilmiştir. Üç farklı su içeriği için, bentonit içeriği ile enerji sönümleme kapasitesinin değişimi hesaplanmıştır. Elde edilen sonuçlar bentonit içeriği ile enerji sönümleme kapasitesi arasında düzgün bir artış ya da azalış ilişkisinin elde edilemediğini göstermektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Elastik drenajsız modül, serbest basınç mukavemeti, bentonit-kum karışımı

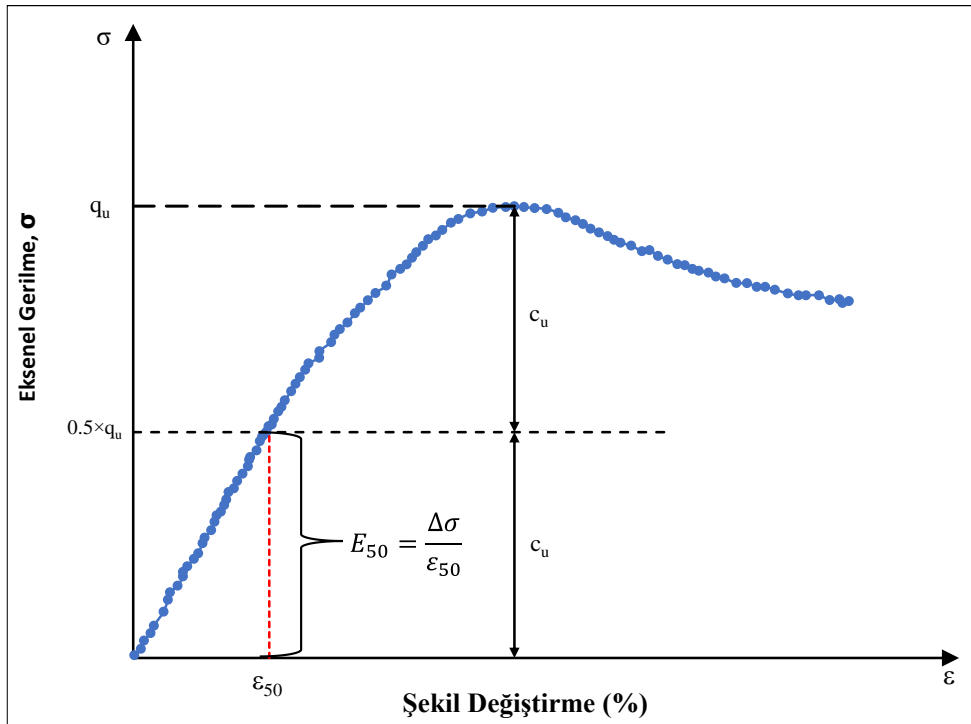
#### ABSTRACT

One of the main parameters for determining the engineering properties of soils is the stress-strain behavior. The stress-strain properties of soils can be determined by unconfined compression and triaxial tests in the laboratory. Bentonite sand mixtures were used in this study. Eleven mixtures were obtained, starting from 100% Bentonite to 100% sand by adding 10% sand. Unconfined compression tests were performed at 3 different water contents: optimum water content, optimum +2 and optimum-2 water contents. The highest unconfined compression strength was obtained as 303.207 kPa at optimum water content in 100% bentonite. The lowest unconfined compression strength was found 30.09 kPa at optimum-2 water content, 20% bentonite-80% sand mixture. The unconfined compression strength of bentonite-sand mixtures decreased with increasing sand content at all three water contents. The undrained secant modulus of the mixtures increased with increasing bentonite content. The highest undrained secant modulus values were obtained at optimum water contents. For all three water contents, a linear relationship was obtained between undrained secant modulus and unconfined compression strength. The variation of energy absorption capacity with bentonite content was calculated for three different water contents. A smooth increase or decrease relationship between bentonite content and energy absorption capacity cannot be obtained.

**Keywords:** Elastic undrained modulus, unconfined compression strength, bentonite-sand mixtures

Zemin davranışının gerilme-şekil değiştirme özellikleri, zeminin mühendislik özelliklerinin değerlendirilmesi için temel oluşturmaktadır. Aşırı yüklemeler altında zemin tepkisinin tahmin edilmesi için bu bilgi gereklidir. Örneğin laboratuvar deneylerinden elde edilen gerilme-şekil değiştirme eğrisi, malzemenin rijitliğini karakterize eden zemin parametrelerini belirlemek için temel oluşturmaktadır. Bir anlamda Young modülü  $E$ 'ye karşılık gelen elastik modüller, zemin durumunda olduğu gibi gerilme-şekil değiştirme ilişkileri doğrusal değildir ve deformasyon elastoplastik karakterdedir (Burland, 1990).

Rijitlik modülleri en temel geoteknik parametreler arasında yer almaktadır ve laboratuvarında statik üç eksenli deney, kesme kutusu deneyi ve serbest basınç deneyi ile hem drenajlı hem de drenajsız durumlarda farklı gerilme-şekil değiştirme koşulları altında belirlenirler. Sert, konsolide killer için yüksek şekil değiştirmelerde ( $\epsilon > \%1$ ) standart laboratuvar deneylerinde incelenen temel parametre, drenajsız kesme deneylerinden belirlenen sekant drenajsız modül  $E_{50}$ 'dir ve Şekil 1'de gösterilen gerilme şekil değiştirme eğrisinden elde edilmektedir (Head, 1986; Atkinson, 2007; PKN-CEN ISO/TS 17892, 2009). Şekil 1'de  $c_u$  drenajsız kayma dayanımı değeri,  $\epsilon_{50}$  ise drenajsız kayma dayanımına karşılık gelen şekil değiştirme değeridir.



Şekil 1. Doğrusal Olmayan Gerilme-Şekil Değiştirme İlişkilerinden Drenajsız Elastik Modül Türetilmesi (Masaki ve Terashi, 2013)

Laboratuvar koşullarında aşırı konsolide killer için  $E_{50}$  modülünün belirlenmesi tartışmalı bulunmuştur. Zorluklar, esas olarak örnekleme sürecinde kaçınılmaz olan zemin yapısının bozulmasından kaynaklanmaktadır. Numune alma yöntemi, tüp sonda çapı ve numunenin elde edildiği derinlik büyük önem taşımaktadır. Sonda çapı küçüldükçe ve örnekleme derinliği arttıkça, doğal toprak yapısının daha fazla bozulduğu ve sonuç olarak doğru parametrelerin belirlenmesinin daha zor olduğu varsayılmaktadır (Jamiolkowski vd., 1983; Lunne vd., 2006; Aslan, 2022; Güven vd., 2023). Yapısal bozulmalara en duyarlı olan örnekler genelde, örnekleme sürecinde şişen ve kırılan, büyük derinliklerden çıkarılan sert, ağır konsolide killerdir. Farklı araştırmacılar tarafından bu sorunlar literatürde kapsamlı bir şekilde tanımlanmaktadır (Bjerrum, 1973; Jamiolkowski vd., 1983; Jardine vd., 1984; Lunne vd., 2006; Strózyk ve Tankiewicz, 2014). Bununla birlikte, bu tür durumlarla başa çıkmanın çeşitli yöntemleri de mühendislik uygulamalarında yaygın olarak tanımlanmış ve uygulanmıştır. En yaygın prosedürlerden biri, zeminin yeniden konsolidasyon tekniğine, ön konsolidasyon basıncı ve aşırı konsolidasyon oranı (OCR) olarak tanımlanan normalizasyon prosedürlerine dayanmaktadır (Roscoe ve Burland, 1968; Bjerrum, 1973; Houlsby ve Wroth, 1991; Lunne vd., 2006).

Normalleştirme tekniği, MIT'de geliştirilen SHANSEP prosedürü (Soil History And Normalized Soil Engineering Properties) olarak bilinmektedir (Ladd ve Foott, 1974; Jamiolkowski vd., 1983; Whittle ve Kavvas 1994). Bu

prosedür, drenajsız geoteknik parametrelerini yerinde tahmin etmek için kullanılmaktadır. Böylece, laboratuvar deneylerinden elde edilen geoteknik parametrelerin yerinde değerlere dönüştürülmesini sağlanabilmektedir. Bu prosedür birkaç adımla özetlenebilir:

- Gerilme geçmiş kesin olarak belirlenmelidir. (ön konsolidasyon basıncı ve aşırı konsolidasyon oranı).
- Yeniden konsolidasyon tekniği ile bir dizi konsolidasyonlu drenajsız (CU) üç eksenli basınç deneyleri yapılmalıdır.
- Zeminin aşırı konsolide olması mekanik aşırı yüklemenin etkisi olmalıdır.
- Geoteknik parametreler, normalize edilmiş zemin parametreleri cinsinden ifade edilmeli ve önkaonsolidasyon basıncı ile aşırı konsolidasyon oranı arasındaki ilişki kurulmalıdır.
- Normalize edilmiş geoteknik parametresi, normalize edilmiş drenajsız kayma dayanımıdır.

Serbest basınç dayanımı ile ilgili ilk çalışmalardan biri Skempton ve Bjerrum (1957) tarafından rapor edilmiştir. Bu araştırmacılara göre normal konsolide zeminin drenajsız kayma mukavemeti sadece zemin indeks deneylerinden elde edilebilir. Osterman (1960), Leonards (1962), Bjerrum (1972) ve Kenney (1976)'de UCS ile plastisite indeksi arasındaki ilişkiyi tanımlamıştır. Daha sonra bu araştırmalar Holtz ve Kovacs (1981) tarafından birleştirilmiştir. Literatürde birçok araştırmacı tarafından, serbest basınç dayanımı, jeolojik yük ve zemin indeksi özellikleri arasındaki ilişkiler incelenmiştir (Davies ve Budhu 1986; Karakan ve Demir, 2018; 2020; Karakan, 2018; 2022; 2023a; 2023b; Karakan vd., 2020; Shimobe vd., 2021).

Bu çalışma kapsamında zeminlerin serbest basınç mukavemeti ile temel zemin özellikleri arasındaki ilişkileri araştırabilmek için bir laboratuvar test programı gerçekleştirilmiştir. Bunun için bentonit kili ile kötü derecelenmiş kum %100'den %0'a kadar %10 artış ile karıştırılarak toplamda 11 yapay karışım hazırlanmıştır. Ticari olarak temin edilebilen bentonit kili seçilmiştir. Kötü derecelenmiş kum ilavesinin nedeni esas olarak elde edilen karışımların üniformluk katsayısı (Cu), eğrilik katsayısı (Cc), D<sub>10</sub>, D<sub>30</sub>, D<sub>50</sub>, D<sub>60</sub>, likit limit (LL), plastik limit (PL), plastisite indisi (PI) değerlerine bağlı olarak serbest basınç mukavemetinin değişiminin belirlenmesidir. Bu amaçla sırası ile likit limit, plastik limit, standart kompaksiyon ve serbest basınç deneyleri gerçekleştirilmiştir.

## MATERYAL VE YÖNTEM

Doğgun killerin ve diğer kohezyonlu zeminlerin kıvamını belirlemek için serbest basınç mukavemeti (UCS) yaygın olarak kullanılmaktadır (Terzaghi vd., 1996). Bu test yöntemi, eksenel yükün gerilme kontrollü uygulaması kullanılarak, örselenmemiş, yeniden oluşturulmuş veya sıkıştırılmış durumda kohezyonlu zeminin serbest basınç dayanımının belirlenmesini sağlar (ASTM D 2166-00, 2003). Yükseklik/çap oranı yaklaşık 2 olan ve tipik olarak 50 mm çapa sahip silindirik bir dikey numune, uç plakalar arasına yerleştirilir. Düşey bir yük, dakikada yaklaşık %1'lik bir düşey deformasyon üretecek şekilde kademeli olarak uygulanır. Bu hız, numunenin drenajına göre o kadar hızlıdır ki, numuneyi kapatacak bir membran olmamasına rağmen önemli bir hacim değişikliği için zaman yoktur. Serbest basınç dayanımı, göçmesi veya ani bir hasar olmaması durumunda eksenel deformasyonun %20'ye ulaştığı gerilmenin, göçme anında numunenin kesit alanına bölünmesiyle elde edilen yüke eşit olduğu kabul edilir. Bir Mohr dairesi, aynı zamanda "kohezyon" olarak da bilinen drenajsız kesme mukavemeti, Denklem 1 ile aşağıdaki şekilde hesaplanır.

$$S_u = c = \frac{q_u}{2} \quad (1)$$

Denklem 1'de gösterilen  $q_u$  zeminin serbest basınç mukavemetidir. Bu deney sisteminde zeminin içsel sürtünme açısı  $\phi=0$  olarak elde edilir.

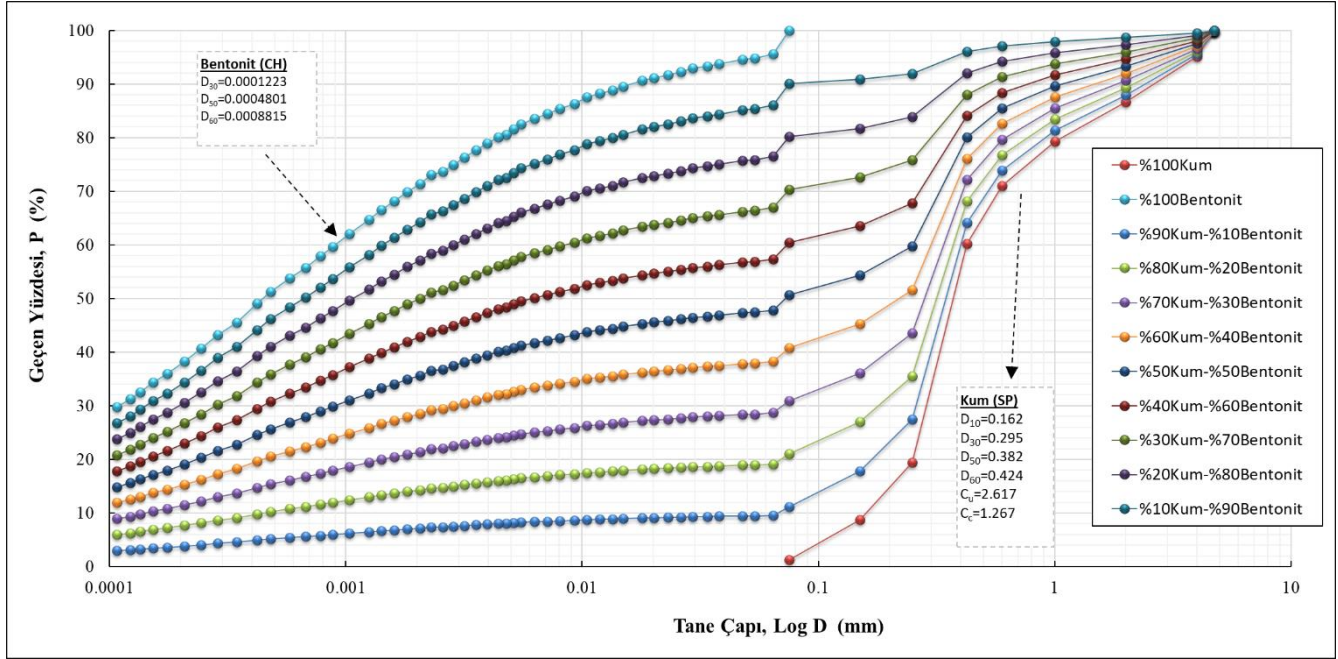
Bu çalışmada Tablo 1'de detaylı olarak verilen karışım yüzdeleri esas alınarak 11 farklı karışım ile bir seri laboratuvar deneyleri gerçekleştirilmiştir. Bu 11 farklı karışım sırasıyla; %100 bentonit, %90 bentonit+%10 kum, %80 bentonit+%20 kum, %70 bentonit+%30 kum, %60 bentonit+%40 kum, %50 bentonit+%50 kum, %40 bentonit+%60 kum, %30 bentonit+%70 kum, %20 bentonit+%80 kum, %10 bentonit+%90 kum, %100 kumdan oluşmaktadır

**Tablo 1.** Çalışmada Kullanılan Karışım Yüzdeleri ve Geoteknik Özellikleri

Malzeme	Karışım Yüzdeleri ve Parametreler (%)										
	100	90	80	70	60	50	40	30	20	10	0
Kum (%)	100	90	80	70	60	50	40	30	20	10	0
Bentonit (%)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
D <sub>10</sub> (mm)	0,162	0,067	0,00048	0,00015	---	---	---	---	---	---	---
D <sub>30</sub> (mm)	0,295	0,262	0,185	0,075	0,003164	0,001035	0,000481	0,000286	0,000207	0,000153	0,000122
D <sub>50</sub> (mm)	0,382	0,358	0,328	0,289	0,238322	0,0750	0,006298	0,002061	0,001035	0,000674	0,000481
D <sub>60</sub> (mm)	0,424	0,405	0,381	0,351	0,309868	0,250	0,075	0,009251	0,002842	0,001415	0,000881
C <sub>u</sub>	2,617	6,009	794,466	2292,792	---	---	---	---	---	---	---
C <sub>c</sub>	1,267	2,515	187,598	104,830	---	---	---	---	---	---	---
LL (%)	---	18,10	29,44	37,45	46,81	88,54	112,80	119,08	124,21	129,66	168,11
PL (%)	---	16,52	17,28	17,95	20,94	34,71	42,75	48,52	52,78	54,44	65,28
PI (%)	---	1,58	12,16	19,50	25,87	53,83	70,05	70,56	71,43	75,22	102,83
Zemin Sınıfı	SP	SP-SC	SC	SC	SC	CH	CH	CH	CH	CH	CH
Maksimum KBHA (kN/m <sup>3</sup> )	20,53	20,46	18,7	17,87	16,1	15,3	13,58	13,08	11,82	12,11	10,41
Optimum su içeriği (w <sub>opt</sub> , %)	13	11,54	14,03	17,08	20,75	23,1	24,43	31,88	34	40,2	41,3

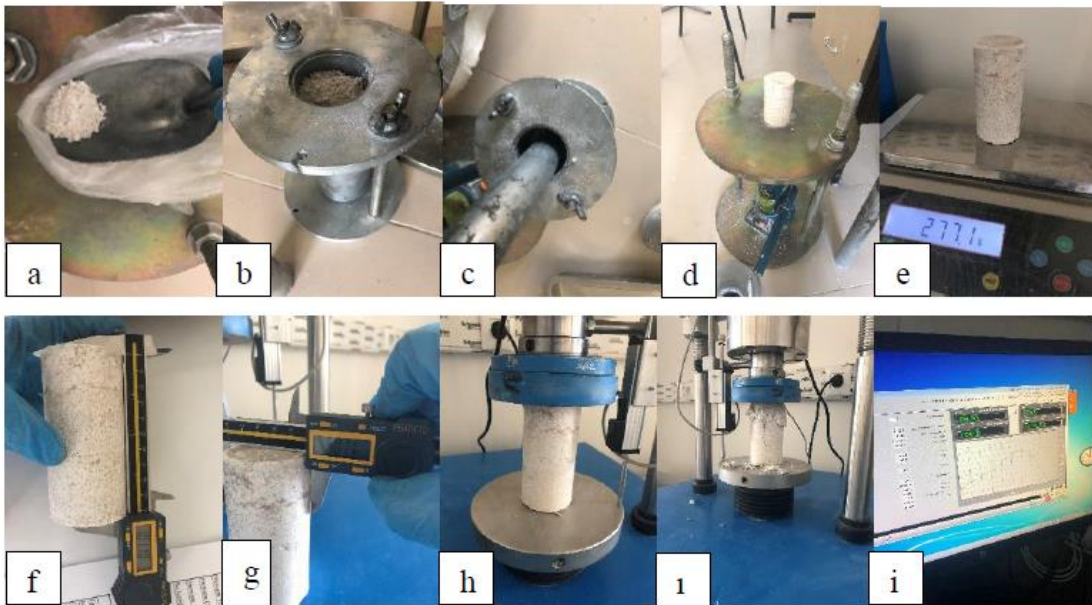


Tablo 1’de karışım oranları verilen bentonit kili ile kumun tane çapı dağılım eğrileri Şekil 2’de gösterilmektedir. Tane çapı dağılımı eğrilerinin elde edilmesi amacıyla bentonit kilinde hidrometre analizi gerçekleştirilirken, kum örnek için ise elek analizi yapılmıştır. Şekil 2’de verilen tane çapı dağılım eğrisinden de görüleceği üzere, %100 kumdan %70Kum-%30 Bentonit karışımına kadar olan karışımların  $D_{10}$ ,  $D_{30}$ ,  $D_{50}$  ve  $D_{60}$  değerleri bulunabilmektedir. %40 Kum-%60 Bentonit ve daha fazla bentonit içeren karışımları için  $D_{10}$  değeri hesaplanamamıştır. Bu nedenle, karışımdaki bentonit oranı %40’dan daha fazla olduğunda hidrometre deneyi ile yapılan en küçük tane çapı ölçümü 0.0001 mm olduğundan dolayı geri kalan 7 karışım için zeminlerin üniformluk katsayısı ( $C_u$ ) ve eğrilik katsayısı ( $C_c$ ) hesaplanamamıştır.



Şekil 2. Karışımların Tane Çapı Dağılım Eğrileri

Serbest basınç deneyi, çevre basıncına ihtiyaç duymayan bir zemin numunesinin aksel yük altında gösterdiği davranışı incelemek amacıyla yapılmaktadır. Tüm deneyler ASTM D-2166-00, standardına uygun olarak yapılmıştır. Bu deney sonucunda kohezyonlu zeminlerin serbest basınç mukavemeti ( $q_u$ ) değeri ve drenajsız kayma mukavemeti ( $c_u$ ) değeri elde edilmiştir. Serbest basınç deneyleri optimum su içeriğinin yanı sıra optimum+2 ve



Şekil 3. Serbest Basınç Deney Aşamaları



optimum-2 su içeriklerinde de gerçekleştirilmiştir. İlk olarak etüvde 24 saat kurutulmuş örnekler gerekli miktarda tartılarak kuru şekilde homojen hale gelene kadar karıştırılmıştır. Daha sonra her bir karışım için standart proktor deneyi sonucunda elde edilen optimum su muhtevaları hesaplanmış ve gerekli su, karışıma konularak, suyun homojen bir şekilde dağılması sağlanana kadar karıştırılmaya devam edilmiştir (Şekil 3a). Hazırlanan numuneler üç katman olacak şekilde iç çapı 50 mm olan kalıpta kompaksiyona tabi tutulmuştur (Şekil 3b). Kriko yardımı ile çıkarılan sıkıştırılmış numune tartılıp not edilmiştir (Şekil 3c ve 3d). Numunenin çapı ve boyu kumpas yardımı ile ölçülüp not edilmiştir (Şekil 3f ve 3g). Bu veriler ışığında serbest basınç ölçümü için numune deney aletine yerleştirilmiştir (Şekil 3h ve 3i). Deney aleti tam otomatik olup bilgisayar kontrollüdür (Şekil 3i). Numune bilgileri programa işlenmiştir. Test ekranı açılıp deney başlatılmıştır. Deney sırasında uygulanan yüklerle beraber numunede ilk başta çatlaklar sonrasında çatlaklar meydana gelmiştir. Deneyin hassas sonuçlara ulaşabilmesi için her karışım için en az 3 kez tekrarlanmıştır. Serbest basınç deneyi ilk önce optimum su muhtevalarında ardından optimum+2 su muhtevalarında ve optimum-2 su muhtevalarında olmak üzere 3 farklı su içeriğinde, 10 farklı karışım için deneyler tekrar edilmiştir. Böylece her bir karışım için 3 farklı su içeriğinde en az 3 deney olmak üzere toplam 90 serbest basınç deneyi yapılmıştır.

## DENEYSEL SONUÇLARIN DEĞERLENDİRİLMESİ

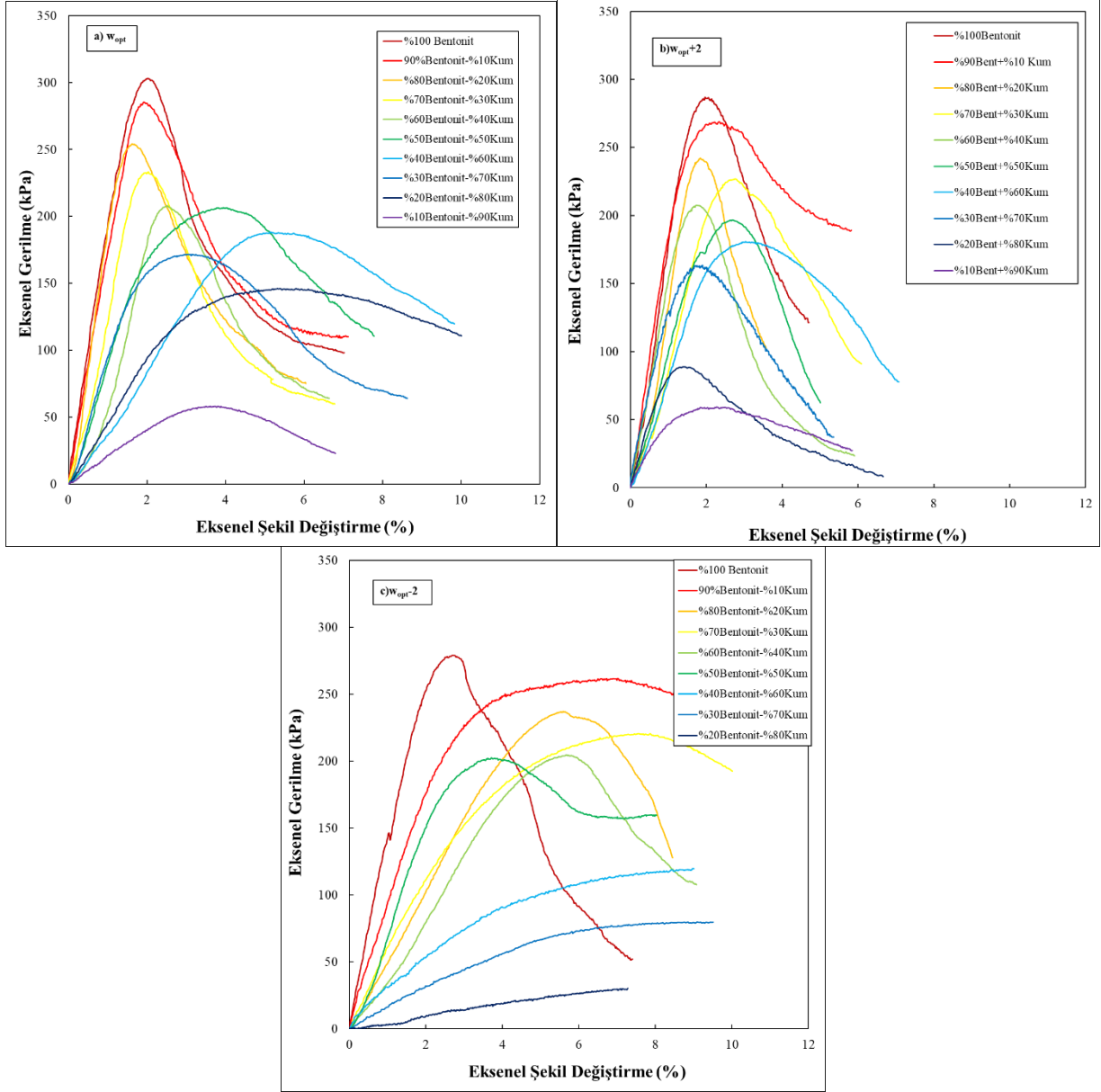
### *Bentonit-Kum Karışımlarının Serbest Basınç Mukavemeti*

Yapılan çalışmada %100 bentonitten %10 bentonit-%90kum karışımına kadar olan 10 karışım için optimum su içeriği, optimum+2 su içeriği ve optimum-2 su içeriği kullanılarak hazırlanan karışımlardaki eksenel gerilme eksenel şekil değiştirme grafiği sırası ile Şekil 4a, 4b ve 4c'de verilmiştir. Şekil 4a'da gösterilen optimum su içeriğinde hazırlanan karışımlar üzerinde yapılan serbest basınç deneyi sonucunda, gerilme şekil değiştirme grafikleri incelendiğinde %100 Bentonitten, %60Bentonit-%40Kum karışımına kadar yüksek eksenel gerilme değerleri düşük eksenel deformasyon seviyelerinde elde edilmiştir. %100 Bentonit için serbest basınç mukavemeti 303.207 kPa %2.02 eksenel deformasyon seviyesinde elde edilmiştir. %60Bentonit-%40Kum karışımında 207.79 kPa'lık serbest basınç mukavemeti %2.505 deformasyon seviyesinde ulaşılmıştır. Daha sonra artan kum miktarı ile bentonit-kum karışımlarının, ortalama tane çapı değerleri artış bu durumda gerilme deformasyon davranışı değişmiştir. Örneğin %50Bentonit-%50kum karışımı için elde edilen serbest basınç mukavemeti, %60Bentonit-%40Kum karışımından sadece 1 kPa daha az olarak 206.49 kPa'ya düşmüştür. Ancak bu gerilmeye karşılık gelen deformasyon seviyesi ise %3.943 olarak hesaplanmıştır. Bu durum deformasyon seviyesinin 1.57 kat artmış olduğunu göstermektedir. Şekil 4b'de  $[w_{opt}+2]$  su içeriğinde elde edilen deney sonuçlarına bakıldığında, optimum su içeriğinden elde edilen serbest basınç mukavemeti değerlerinden daha düşük olduğu net bir şekilde görülmektedir. Aynı karışım oranlarında daha fazla su içeriğine sahip olmaları durumunda mukavemetlerinde dayanım kaybı meydana gelmiştir. Şekil 4c'de standart proktor eğrisinde kuru taraf olarak adlandırılan kısma denk gelen  $[w_{opt}-2]$  su içerikleri kullanılarak elde edilen gerilme-şekil değiştirme grafikleri sunulmuştur. Şekil 4c'de elde edilen serbest basınç mukavemetleri hem optimum su içeriği hem de  $[w_{opt}+2]$  su içeriğinde elde edilen karışımlardan çok daha düşük seviyededir. Örneğin %90Bentonit-%10Kum karışımı her üç su içeriği için de incelenirse sırası ile serbest basınç mukavemetleri sırası ile 285.26 kPa, 268.95 kPa ve 261.82 kPa'dır. Çalışmada bentonit kili yüksek plastisiteye sahip olduğundan dolayı %10Bentonit-%90Kum karışımlarında,  $w_{opt}$  ve  $[w_{opt}+2]$  değerlerinde serbest basınç örnekleri elde edilmiş ve deneyler yapılmıştır. Bu deneylerde serbest basınç mukavemetleri sırası ile 58.05 ve 51.77 kPa olurken,  $[w_{opt}-2]$  su içeriğinde bu deney gerçekleştirilememiştir.

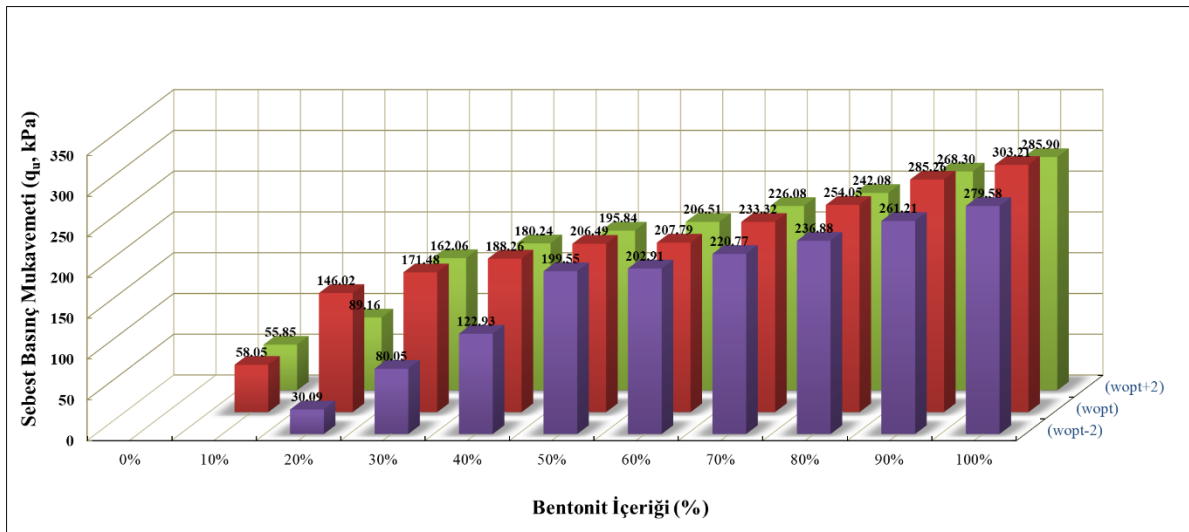
Şekil 5'de, üç farklı su içeriği için, serbest basınç deneyi sonucunda Şekil 4'de gerilme şekil değiştirme ilişkisi elde edilen grafikler kullanılarak her bir su içeriğinde 10 karışıma ait ortalama serbest basınç mukavemeti değerlerinin bentonit içeriğine bağlı değişimi gösterilmiştir. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde her üç su içeriği için karışımlardaki en büyük serbest basınç mukavemeti ( $q_u$ ) optimum su içeriklerinde meydana gelmiştir. Bunun yanı sıra, optimum su içeriğinin ıslak tarafında olan karışımların  $q_u$  değerleri, optimum su içeriğinin kuru tarafına kıyasla çok daha küçüktür. Tüm karışımlar içerisinde en düşük karışımların  $q_u$  değeri 30.09 kPa ile  $[w_{opt}-2]$  su içeriğinde ve %20Bentonit-%80Kum karışımında meydana gelmiştir.  $[w_{opt}-2]$  su içeriğinde, %10Bentonit-%90Kum karışımında serbest basınç mukavemeti elde edilememiştir.

### *Secant Modülü ile Zemin Özellikleri İlişkisi*

Her bir karışım için en az 3 adet serbest basınç deneyi gerçekleştirilmiş ve Şekil 1'de detayı verilen metodoloji ile her bir deney için drenajsız sekant modülü ( $E_{50}$ ) elde edilmiştir. İlk olarak Şekil 6'da her bir karışım için ortalaması

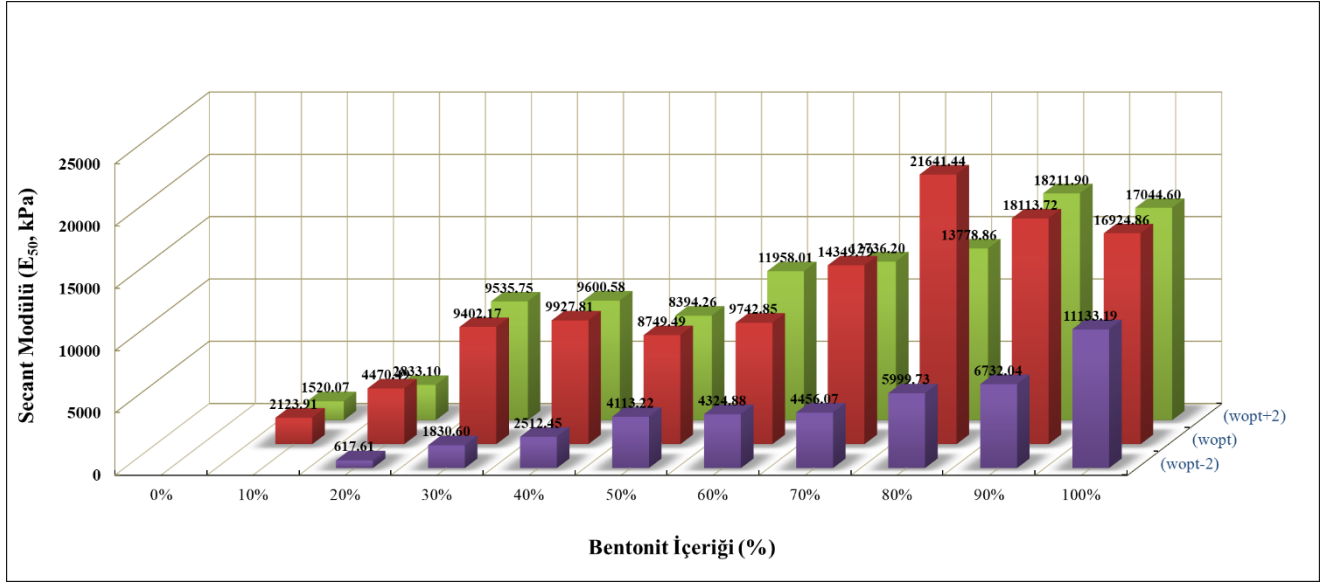


Şekil 4. Bentonit-Kum Karışımları İçin Gerilme-Şekil Değişirme Grafikleri a. Optimum Su İçeriği ( $w_{opt}$ ) b. ( $w_{opt}+2$ ) Su İçeriği c. ( $w_{opt}-2$ ) Su İçeriği



Şekil 5. Serbest Basınç Mukavemetinin Bentonit İçeriği ile Değişimi

alınmış Sekant modüllerinin  $w_{opt}$ ,  $w_{opt+2}$  ve  $w_{opt-2}$  su içerikleri için bentonit içeriğine bağlı değişimi incelenmiştir. Genel olarak her üç su içeriği içinde, artan bentonit içeriği ile birlikte sekant modülleri de artmıştır. Şekil 6'dan da görüleceği üzere en büyük sekant modülü değerleri optimum su içeriğinde hazırlanan serbest basınç deneylerinde elde edilmiştir. En büyük sekant modülü optimum su içeriğinde, 21641.4 kPa ile %80Bentonit-%20Kum karışımında elde edilirken, en düşük sekant modülü ise  $w_{opt-2}$  su içeriğinde ve %20Bentonit-%80Kum karışımında, 617.61 kPa olarak bulunmuştur.



Şekil 6. Sekant Modülünün Bentonit İçeriği ile Değişimi

Gerilme-şekil değiştirme davranışı, özellikle de numunelerin rijitliği hakkında ek bilgi elde etmek için, Şekil 6'daki serbest basınç mukavemeti ve sekant modülü arasındaki ilişkiler  $w_{opt}$ ,  $w_{opt+2}$  ve  $w_{opt-2}$  su içeriklerinde elde edilmiştir. Şekil 7'nin başlangıç kısmında yer alan çok düşük mukavemete ve sekant modülüne sahip zeminler genelde %10 Bentonit-%90Kum ve +20Bentonit-%80Kum karışımlarıdır. Bu çalışmada  $w_{opt}$ ,  $w_{opt+2}$  ve  $w_{opt-2}$  su içerikleri için sekant modülü ile serbest basınç mukavemeti arasında sırası ile aşağıdaki denklemler elde edilmiştir.

$$q_u = 0.01 \times E_{50} + 96.791 \quad (w_{opt}) \quad (2)$$

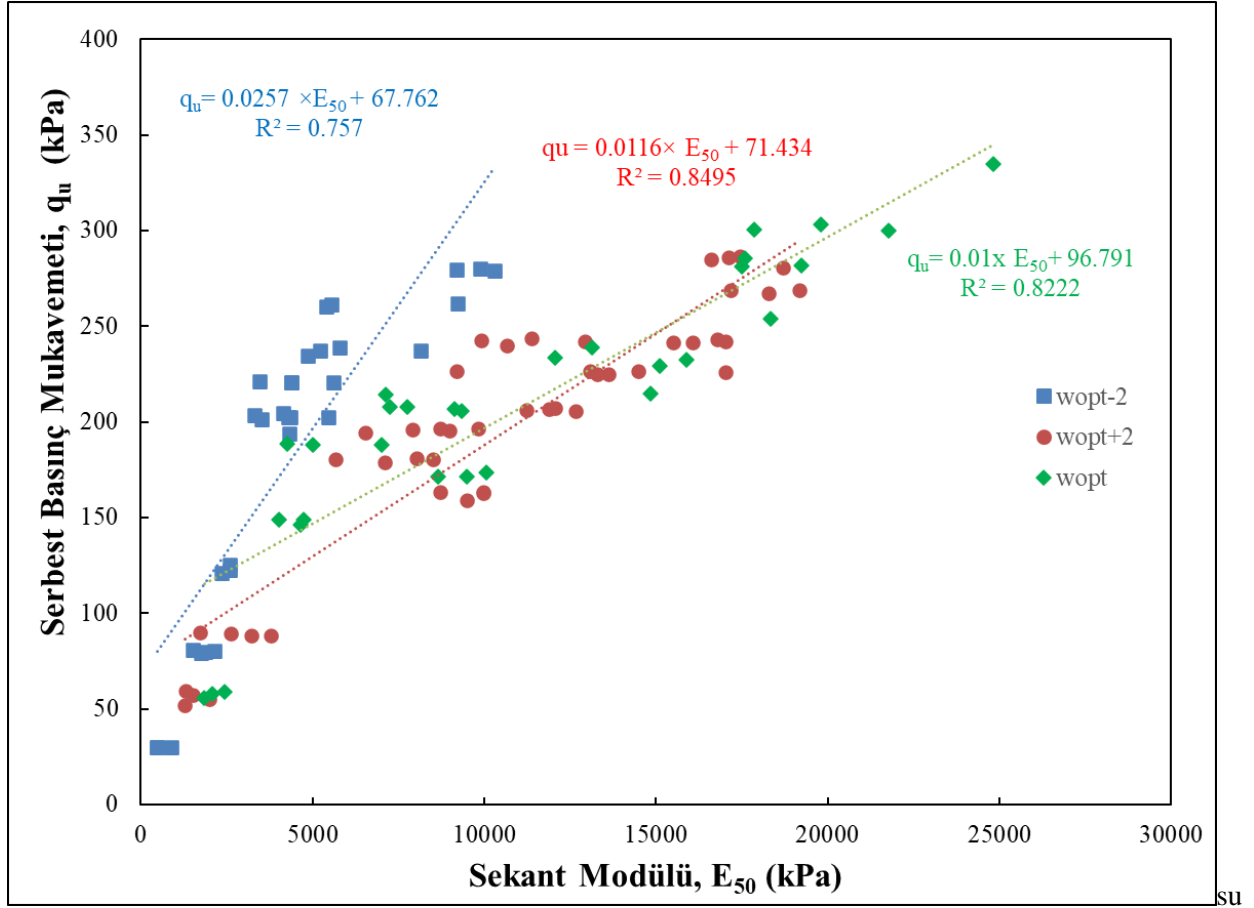
$$q_u = 0.0257 \times E_{50} + 67.762 \quad (w_{opt-2}) \quad (3)$$

$$q_u = 0.0116 \times E_{50} + 71.434 \quad (w_{opt+2}) \quad (4)$$

Şekil 7 incelendiğinde, optimum su içeriğinde %100 ve %90 gibi yüksek bentonit oranına sahip karışımlarda elde edilen serbest basınç mukavemeti ve bunlara karşılık gelen sekant modülleri de yüksektir. Benzer sonuçlar literatürde de elde edilmiştir (Sezer vd., 2017).

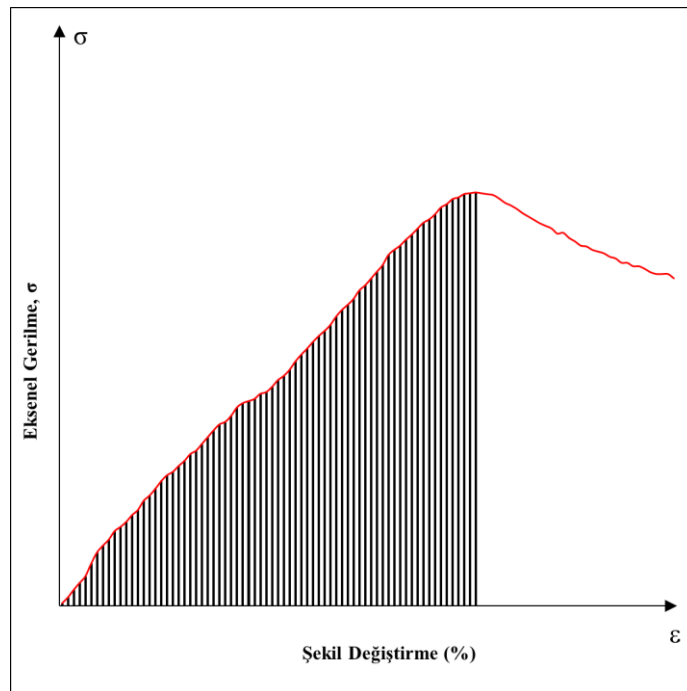
### Bentonit-Kum Karışımlarında Enerji Sönümlenme Kapasitesinin Belirlenmesi

Farklı su içeriklerinde ve farklı bentonit oranlarında Bentonit-Kum karışımlarının enerji sönümlenme kapasitesi (EAC) elde edilmiştir. EAC değeri, bir zemin numunesinin tokluğunu gösteren bentonit-kum karışımlarının gerilme-şekil değiştirme eğrisi altındaki alan dikkate alınarak hesaplanmıştır (Cabalar ve Alosman, 2021). Şekil 8, EAC'yi hesaplamak için kullanılan farklı şekil değiştirme oranlarında serbest basınç deneyinden elde edilen gerilme-şekil değiştirme eğrisinin tipik temsili diyagramını göstermektedir. Şekil 8'de başlangıç noktasından, en büyük aksel gerilmeye karşılık gelen şekil değiştirme değerine kadar olan kısmın altında kalan alan enerji sönümlenme kapasitesi olarak ifade edilmektedir. Üç farklı su içeriği için, bentonit içeriği ile enerji sönümlenme kapasitesinin değişimi Şekil 9'da gösterilmiştir. Elde edilen sonuçlar bentonit içeriği ile enerji sönümlenme kapasitesi arasında düzgün bir artış yada azalış ilişkisinin elde edilemediğini göstermektedir. Bentonit-kum karışımlarındaki en yüksek enerji sönümlenme kapasitesinin [ $w_{opt-2}$ ] su içeriğinde elde edildiğini göstermiştir. Örneğin en yüksek enerji sönümlenme kapasitesi 1135.80 kJ ile %90Bentonit-%10Kum karışımında meydana gelmiştir. Genel olarak karışımların [ $w_{opt-2}$ ] su içeriklerinde daha sünek davranış göstermelerinden dolayı daha büyük şekil değiştirme değerlerinde maksimum serbest basınç dayanımlarına ulaşmışlardır. Bu durum da, Şekil 8'de gösterilen alanın artmasına neden olmuştur. Örneğin maksimum enerji sönümlenme kapasitesine sahip [ $w_{opt-2}$ ]

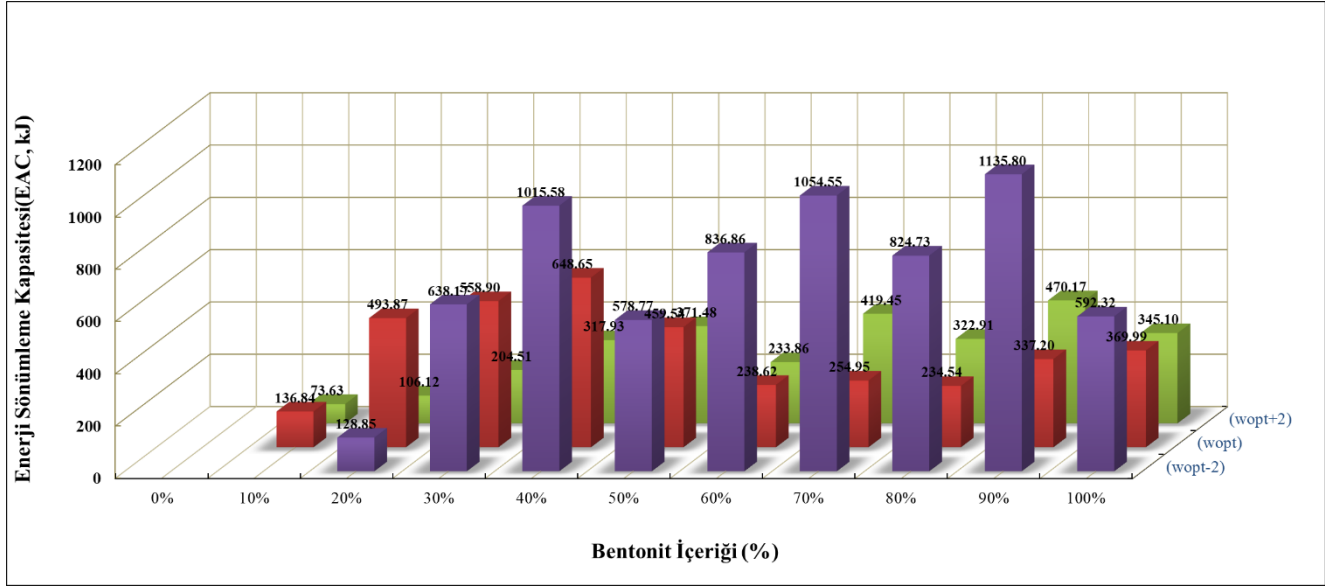


Şekil 7. Sekant Modülünün ile Serbest Basınç Mukavemeti İlişkisi

içeriğindeki %90Bentonit-%10Kum karışımı için  $\varepsilon_{50} = \%2.40$  değerleri ortalama olarak bulunmuştur. Aynı karışımın optimum su içeriğindeki  $\varepsilon_{50} = \%0.79$ 'dur. Bu durumda altında kalan alan çok daha az olduğu için enerji sönümleme kapasitesi daha da azalmıştır.



Şekil 8. UCS Testini Kullanarak EAC'yi Hesaplamak için Tipik Bir Gerilme-Şekil Değişirme Diyagramı



Şekil 9. Enerji Sönümlenme Kapasitesinin Bentonit İçeriği ile Değişimi

## SONUÇLAR

Bu çalışmada yüksek plastisiteye sahip bentonit kili ile kum, ağırlıkça %0'dan %100'e kadar, %10 artış oranında karıştırılarak 11 karışım elde edilmiştir. Elde edilen karışımlar üzerinde likit limit, plastik limit, standart proktor ve serbest basınç deneyleri gerçekleştirilmiştir. Daha sonra standart proktor deneylerinden elde edilen optimum su içeriği ve maksimum kuru birim hacim ağırlık değerleri kullanılarak serbest basınç numuneleri hazırlanmıştır. Ancak serbest basınç örnekleri sadece optimum koşullarda değil, aynı zamanda optimum su içeriğinin hem ıslak hem de kuru tarafında olmak üzere toplam 3 farklı su içeriğinde serbest basınç örnekleri hazırlanmıştır. Daha sonra serbest basınç deneyleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlar aşağıdaki şekilde özetlenebilir.

- Her üç su içeriğinde 11 karışım için gerilme şekil değiştirme grafikleri elde edilmiştir. En büyük eksenel gerilme değerleri optimum su içeriğine sahip zeminlerde elde edilmiştir. %100 bentonit için serbest basınç mukavemeti 303.207 kPa olarak bulunmuştur. Optimum su içeriğinde %10bentonit-%90kum için serbest basınç dayanımı 58.05 kPa olarak bulunmuştur.
- Deneysel sonuçlar, optimum su içeriğinin ıslak tarafında olan karışımların  $q_u$  değerlerinin, optimum su içeriğinin kuru tarafına kıyasla çok daha küçük olduğunu göstermektedir. Örneğin, %40Bentonit-%60 kum karışımı için  $[w_{opt}+2]$  ve  $[w_{opt}-2]$  su içeriklerinde serbest basınç mukavemeti sırası ile 180.24 kPa ve 122.93 kPa'dır.
- Aynı karışımlar üzerinde artan su içeriği ile beraber serbest basınç mukavemetine karşılık gelen şekil değiştirme değerlerinin de arttığı gözlemlenmiştir.
- Her üç su içeriğinde ayrıca, her bir deney için drenajsız sekant modülü ( $E_{50}$ ) elde edilmiştir. Genel olarak her üç su içeriği içinde, artan bentonit içeriği ile birlikte sekant modülleri de artmıştır. Sekant modülünü maksimum değeri optimum su içeriğinde, 21641.4 kPa ile %80bentonit-%20Kum karışımında elde edilmiştir. En düşük Sekant modülü ise optimum su içeriğinin kuru tarafında %20Bentonit-%80Kum karışımında sadece 617.61 kPa olarak bulunmuştur.
- Çalışma kapsamında bentonit kum karışımlarının serbest basınç mukavemeti ile Sekant modülleri arasında su içeriklerine bağlı olarak doğrusal denklemler elde edilmiştir. Denklemlerin regresyon katsayıları 0.76 ile 0.85 arasında değişim göstermiştir.
- Ayrıca, bentonit kum karışımlarının enerji sönümlenme kapasiteleri de belirlenmiştir. Elde edilen sonuçlar bentonit içeriği ile enerji sönümlenme kapasitesi arasında düzgün bir artış ya da azalış ilişkisinin elde edilemediğini göstermektedir. Bunun temel sebeplerinden birisi de, karışımların su içeriklerinde değişim gerilme şekil değiştirme davranışlarını değiştirmiş olmasıdır. Su içeriğindeki artış serbest basınç mukavemetini azaltmasına rağmen,  $q_u$ 'ya karşılık gelen şekil değiştirme değerini arttırmıştır.



## KAYNAKLAR

- Aslan, Y. (2022). Stabilizasyonda Kireç ve Tüflerin Birlikte Kullanımının Bentonitin Dayanımına Etkisi. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 25(3), 356-369. <https://doi.org/10.17780/ksujes.1118925>.
- ASTM D 2166-00. (2003). Standard test method for unconfined compressive strength of cohesive soil. In: Annual book ASTM standards, West Conshohocken, vol. 04.08; 2003. p. 201–6.
- Atkinson J., (2007). The mechanics of soils and foundations, CRC Press, 2007.
- Bjerrum L., (1973). Problems of soil mechanics and construction on soft clays, State of the art report, Session 4, Proc. VIII ICSMF, Moscow, 1973, Vol. 3.
- Bjerrum L. (1972). Embankments on soft ground. In: Proceedings of the ASCE special conf on performance of earth and earth-supported structures, vol. II. Purdue University; 1972. p. 81–118.
- Burland J.B., (1990). On the compressibility and shear strength of natural clays, *Géotechnique*, 1990, 40(3), 329–378.
- Cabalar A.F., & Alosman, S. O., (2021). Influence of rock powder on the behaviour of an organic soil. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 80:8665–8676. <https://doi.org/10.1007/s10064-021-02457-2>
- Davies TG, Budhu M. (1986). Non-linear analysis of laterally loaded piles in heavily over consolidated clays. *Geotechnique* 1986;36(4):527–38.
- Güven, B., Günek, Ş., & Kurt Albayrak, Z. N. (2023). Kilin Mukavemeti Ve Donma-Çözülme Sonrası Mukavemeti Üzerinde Biyopolimer Ve Lif Katkısının Ortak Etkisinin Araştırılması. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 26(4), 951-961. <https://doi.org/10.17780/ksujes.1328845>
- Head K.H., (1986). Manual of soil laboratory testing, Pentech Press, (Vol. 3), London.
- Houlsby G.T., Wroth C.P., (1991). The variation of shear modulus of a clay with pressure and overconsolidation ratio, *Soils and Foundations*, 1991, 31(3), 138–143.
- Holtz RD, Kovacs WD. (1981). An Introduction to geotechnical engineering. New Jersey: Prentice Hall; 1981. p. 733.
- Jamiolkowski M., Lancellotta R., Wolski W. (1983). Precompression and Speeding-up Consolidation. S.O.A. and General Report, VIII ECSMF, Helsinki.
- Jardine R.J., Symes M.J., Burland J.B., (1984). The measurement of soil stiffness in the triaxial apparatus, *Géotechnique*, 1984, 34(3), 323–340.
- Karakan, E. (2023). Flow index-liquid limit relationship by fall-cone tests in clay-sand mixtures. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 41, 101405.
- Karakan, E. (2023). Influence of clay mineralogy on undrained shear strength using Fall cone test. *Grağevinar*, 75(07.), 641-652.
- Karakan, E. (2022). Relationships among plasticity, clay fraction and activity of clay–sand mixtures. *Arabian Journal of Geosciences*, 15(4), 334
- Karakan, E., & Demir, S. (2020). Observations and findings on mechanical and plasticity behavior of sand-clay mixtures. *Arabian Journal of Geosciences*, 13, 1-20.
- Karakan, E., Shimobe, S., & Sezer, A. (2020). Effect of clay fraction and mineralogy on fall cone results of clay–sand mixtures. *Engineering Geology*, 279, 105887.
- Karakan, E. (2018). Factors effecting the shear strength of geotextile reinforced compacted clays. *Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, 20(60), 725-742.
- Karakan, E., & Demir, S. (2018). Effect of fines content and plasticity on undrained shear strength of quartz-clay mixtures. *Arabian Journal of Geosciences*, 11, 1-12.
- Kenney TC. (1976). Formation and geotechnical characteristics of glacial-lake varved soils. Bjerrum memorial volume, Norwegian Geotechnical Institute, Oslo; 1976. p. 15–39.

- Ladd C.C., Foott R., (1974). New design procedure for stability of soft clays, *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 1974, 100(7), 763–786.
- Leonards GA. (1962). *Foundation engineering*. New York: McGraw-Hill Book Company; 1962. p. 1136.
- Lunne T., Berre T., Andersen K.H., Strandvik S., Sjursen H., (2006). Effects of sample disturbance and consolidation procedures on measured shear strength of soft marine Norwegian clays, *Can. Geotechnical J.*, 2006, 43, 726–750.
- Masaki, K., & Terashi, M. (2013). *The deep mixing method*, CRC Press.
- Osterman J. (1960). Notes on the shearing resistance of soft clays. *ACTA Polytech Scand* 1960; 2:1–22.
- PKN-CEN ISO/TS 17892:2009. Geotechnical investigation and testing. Laboratory testing of soil.
- Roscoe K., Burland J.B., (1968). *On the generalized stress-strain behaviour of wet clay*, Cambridge University Press, 1968, 535–609.
- Sezer, A., Tanrıncı, N., & Adamcı, Y. E. (2017). Mechanical Behavior Of Fly Ash Or Cement Stabilized Sand-Bentonite Mixtures Exposed To Freeze-Thaw Action. *Anadolu University Journal of Science and Technology A - Applied Sciences and Engineering*, 18(5), 1008-1017. <https://doi.org/10.18038/aubtda.332155>
- Shimobe, S., Karakan, E., & Sezer, A. (2021). Improved dataset for establishing novel relationships between compaction characteristics and physical properties of soils. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 80(11), 8633-8663.
- Skempton AW, Bjerrum LA. (1957). Contribution to the settlement analysis of foundations on clay. *Geotechnique* 1957;7:168–78.
- Stróżyk J., Tankiewicz M., (2014). The Undrained Shear Strength of Overconsolidated Clays, *Procedia Engineering*, 2014, 91,317–321.
- Terzaghi K, Peck RB, Mesri G. (1996). *Soil mechanics in engineering practice*. 3d ed. New York: John Wiley and Sons; 1996. p. 512.
- Whittle A.J., Kavvas M.J., (1994). Formulation of MIT-E3 constitutive model for overconsolidated clays, *Journal of Geotechnical Engineering*, 1994, 120(1), 173–198.



# Kahramanmaraş Sutcu Imam University

## Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 31.12.2023  
Kabul Tarihi : 04.03.2024

Received Date : 31.12.2023  
Accepted Date : 04.03.2024

### A BIT-LEVEL AUDIO ENCRYPTION ALGORITHM USING A NEW HYBRID CHAOTIC MAP

### YENİ BİR HİBRİT KAOTİK HARİTA İLE BIT-SEVİYESİ SES ŞİFRELEME ALGORİTMASI

*Mehmet DEMİRTAŞ<sup>1</sup>* (ORCID: 0000-0002-9018-3124)

<sup>1</sup> Necmettin Erbakan Üniversitesi, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü, Konya, Türkiye

\*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Mehmet DEMİRTAŞ, mdemirtas@erbakan.edu.tr

#### ABSTRACT

Audio data is increasingly transmitted worldwide, necessitating robust encryption techniques to safeguard it from malicious actors. To secure transmitted audio files, a novel, and effective audio encryption method is introduced using a newly designed 1D chaotic map and bit-level operations in this work. The Sine-Chebyshev Hybrid Map (SCHM) is a new chaotic map with high randomness, created using two classical maps, such as the Sine map and the Chebyshev map. Two-dimensional (2D) and three-dimensional (3D) phase trajectories, bifurcation diagrams, initial condition sensitivity, Lyapunov exponent, and approximate entropy results of the proposed map are given. The analysis results show that SCHM has better chaotic properties and a wider chaotic range than the sine and Chebyshev maps. The algorithm implemented with SCHM, bit-level permutation, and diffusion operations can encrypt mono-channel or stereo-channel audio files losslessly. Various security analyses are performed to test the degree of security of the proposed audio encryption algorithm. The performance tests conducted on four different audio data verify that the proposed scheme is secure and can be used to encrypt one-channel or two-channel audio files.

**Keywords:** audio files, chaotic maps, encryption, multimedia security

#### ÖZET

Ses verilerinin dünya çapında giderek daha fazla iletilmesi, kötü niyetli aktörlerden korunmak için güçlü şifreleme tekniklerinin kullanılmasını gerektirmektedir. İletilen ses dosyalarının güvenliğini sağlamak için, bu çalışmada yeni bir 1B kaotik harita ile bit düzeyinde işlemler kullanılarak yenilikçi ve etkili bir ses şifreleme yöntemi önerilmiştir. Tasarlanan Sine-Chebyshev Hibrit Haritası (SCHM), sinüs haritası ve Chebyshev haritası gibi iki klasik harita kullanılarak oluşturulan, yüksek rastgeleliğe sahip yeni bir kaotik haritadır. Önerilen harita için 2B ve 3B faz yörüngeleri, çatallanma diyagramları, başlangıç durumu duyarlılığı, Lyapunov üssü ve yaklaşık entropi sonuçları verilmiştir. Analiz sonuçları, SCHM'nin sinüs ve Chebyshev haritalarına kıyasla daha geniş bir kaotik aralığa ve daha iyi kaotik özelliklere sahip olduğunu göstermektedir. SCHM ve bit düzeyinde permütasyon ve difüzyon işlemleriyle uygulanan algoritma, tek kanallı veya stereo kanallı ses dosyalarını kayıpsız bir şekilde şifreleyebilir. Önerilen ses şifreleme algoritmasının güvenlik derecesini test etmek için çeşitli güvenlik analizleri yapılmıştır. Dört farklı ses dosyası üzerinde yapılan performans testleri, önerilen şemanın güvenli olduğunu ve tek kanallı veya iki kanallı ses dosyalarını şifrelemek için kullanılabileceğini doğrulamıştır.

**Anahtar Kelimeler:** kaotik haritalar, multimedia güvenliği, ses dosyaları, şifreleme

## INTRODUCTION

The widespread sharing of audio files on social networks in the digital world necessitates security precautions to protect against privacy breaches and malicious actors. Similar to multimedia data such as images, texts, and videos, audio files can also be effectively protected with encryption (Hosny, Zaki, Lashin, Fouda, and Hamza, 2023). Audio encryption algorithms can protect audio information from unauthorized access by transforming its content into an incomprehensible data form. Since classical symmetric cryptographic algorithms like Data Encryption Standard (DES) and Advanced Encryption Standard (AES) are unable to encrypt multimedia data efficiently, chaotic functions can be employed to provide security to the audio data (Kafetzis, Volos, Nistazakis, Goudos, and Bardis, 2023). Chaotic functions are suitable for encryption algorithms due to their nonlinear properties and initial condition sensitivity (Muthu and Murali, 2021). Therefore, there is a growing interest in chaos-based audio encryption techniques. Additionally, there are audio encryption algorithms that employ the cosine number transform (Lima and da Silva Neto, 2016), discrete wavelet transform (DWT) (Al-kateeb and Mohammed, 2020), Elliptic-Curve Cryptography (ECC) (Sasikaladevi, Geetha, and Venkata Srinivas, 2018), and Collatz conjecture (Renza, Mendoza, and Ballesteros L, 2019) in the literature.

Spatial domain image encryption methods, which typically involve permuting and diffusing pixels, directly manipulate pixels without transforming them (M. Demirtaş, 2022; Mehmet Demirtaş, 2023b). Similarly, permutation and diffusion operations can be applied to audio samples in audio files. In (Hato and Shihab, 2015), for example, the Lorenz and Rossler chaotic systems are used to produce number sequences for permutation and diffusion processes. In this work, histogram and information entropy results are missing. Liu et al. (H. Liu, Kadir, and Li, 2016) proposed a lossless audio encryption scheme that can encrypt dual-channel audio inputs. This scheme also confuses and diffuses the plaintext audio using a multi-scroll chaotic system. Differential attack analysis is not performed in this article. An audio message encryption method is proposed in (Ghasemzadeh and Esmaeili, 2017) where the confusion and diffusion parameters are generated from three chaotic functions. However, in this study, histogram graphs and key sensitivity analysis are not presented. Kordov (Kordov, 2019) proposed a novel audio encryption scheme based on bit-level permutations and substitutions using pseudo-random numbers generated by a circle map. The statistical test results of the generated binary streams are provided. In (Sathiyamurthi and Ramakrishnan, 2020), a speech encryption algorithm based on the Fast Fourier Transform (FFT) and 3D chaotic map is presented. The transformed input speech samples are permuted and diffused using the number sequences obtained by the chaotic map. The input speech samples cannot be obtained losslessly in this method. In (Wang and Su, 2020), DNA encoding and piecewise linear chaotic map (PWLCM) are employed to implement confusion and diffusion on the plaintext audio samples. This method can encrypt both mono-channel and stereo-channel audio samples. The permutation and diffusion architecture is also used in (Mokhnache, Daachi, Bekkouche, and Diffellah, 2022) for a speech encryption scheme. The logistic map and cubic map are combined to obtain an enhanced 1D chaotic map. The combined map is used to produce the necessary parameters to scramble and diffuse the input audio. Histogram analysis of the proposed method is not given. An error-free sound encryption scheme is proposed in (Raducanu, Cheroiu, and Nitu, 2022). Permutation, XOR operation, and diffusion operations are applied using an Arnold 3D map and a tent map. Key sensitivity analysis is missing in the paper. Wu et al. (Wu et al., 2022) proposed an audio encryption algorithm based on a newly designed 2D chaotic system. The 2D system generates the required keystream for the scrambling and diffusion processes. Although most of the necessary security analyses are carried out in this study, histogram analysis is missing. The audio signal encryption algorithm in (Alanazi, Munir, Khan, and Hussain, 2023) uses the 3D Gensio-Tesi chaotic map to generate substitution and permutation networks. All security analyses except key space and key sensitivity are performed. In (Albahrani, Alshekly, and Lafta, 2023), a modified Lorenz system and 1D Bernoulli map are used to confuse and diffuse the original audio data. The algorithm in this study, in which all necessary security analyses are carried out, is a lossy voice encryption algorithm. A lossless encryption algorithm for audio files is proposed in (Mehmet Demirtaş, 2023a). The input audio samples are preprocessed before permutation and diffusion operations. This method can only encrypt mono-channel audio signals. In (Kumar and Dua, 2023), the plaintext audio is first permuted using the sine-cosine map and then scrambled and diffused using DNA encoding.

Since chaotic functions are aperiodic, unpredictable, deterministic, and sensitively dependent on the initial values, they are preferred in cryptographic applications (L. Liu and Wang, 2023). One-dimensional chaotic functions, which have simple equations and ease of implementation, can be used to generate pseudorandom sequences. However, 1D chaotic maps may suffer from some drawbacks such as a narrow discontinuous chaotic range, discontinuities, and non-uniform output sequences (Khairullah, Alkahtani, Bin Baharuddin, and Al-Jubari, 2021). For example, the

classical sine map has a limited chaotic range and there are periodic windows in the chaotic regime. These problems can be overcome by either creating new chaotic maps or combining the existing chaotic maps.

The first contribution of this study is the design of a new 1D hybrid chaotic map using the sine map and Chebyshev map. The proposed map has a simple equation with cost-effective implementation. Moreover, the problem of narrow chaotic intervals and discontinuities in the sine and Chebyshev maps has also been solved with the proposed map. The chaotic complexity and randomness of the designed map are proven by several graphs and metrics such as phase diagrams, bifurcation diagrams, Approximate entropy results, and Lyapunov exponent measurements. Secondly, the proposed method can encrypt both single-channel and stereo-channel input audio, which demonstrates the flexibility of the algorithm. Moreover, this algorithm is capable of encrypting and decrypting audio data without losing any information. Therefore, the quality of the transmitted audio data can be preserved with the proposed technique. To assess the reliability of the algorithm tests such as key analysis, information entropy, correlation analysis, histogram analysis, and differential attack analysis were carried out. The security tests performed show us that the proposed audio encryption method is safe and applicable.

The outline of the rest of the paper is given as follows. In Section 2, the newly created Sine-Chebyshev Hybrid Map (SCHM) is introduced and analyzed. SCHM-based bit-level audio encryption algorithm is described in Section 3. The security analysis results of the proposed algorithm are given in Section 4. In Section 5, the work is concluded.

## MATERIALS AND METHODS

### *Description of Sine-Chebyshev Hybrid Map (SCHM)*

The traditional sine map is defined by Eq. (1).

$$x_{n+1} = \rho \sin(\pi x_n) \quad (1)$$

when the control parameter  $\rho \in [0.87, 1]$ , the sine map exhibits chaotic behavior. Similarly, the Chebyshev map is mathematically expressed as in Eq. (2).

$$x_{n+1} = \cos(\gamma \cos^{-1}(x_n)) \quad (2)$$

when the control parameter  $\gamma > 2$ , the Chebyshev map is chaotic. A new 1D chaotic map called SCHM is created by combining Eq. (1) with Eq. (2) and adding exponential terms. The definition of the SCHM is given in Eq. (3).

$$x_{n+1} = \sin(\pi 10^\alpha \cos(\pi^{\alpha+10} \cos^{-1}(x_n))) \quad (3)$$

where  $\alpha$  is the control parameter and  $x_n \in [-1, 1]$ . When  $\alpha \in [0, +\infty)$ , SCHM shows chaotic behavior without non-chaotic regions.

### *Phase Diagrams*

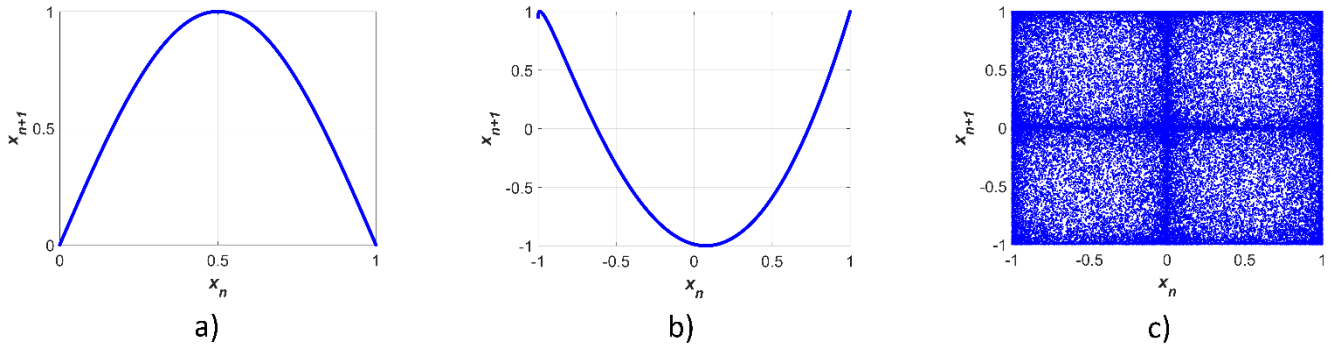
The attractor of a chaotic map can be depicted by plotting the 2D and 3D phase diagrams. The phase diagrams can be obtained by plotting two or three adjacent time series data generated by the chaotic map. The 2D and 3D phase diagrams for the sine map, Chebyshev map, and SCHM are illustrated in Fig. 1 and Fig. 2 for an initial condition  $x_0 = 0.25$ , respectively. 50,000 time series data were used to draw these graphs. The phase diagrams of the sine map and Chebyshev map show that a specific path is traced by both maps and a quite limited region in the 2D and 3D phases are visited. On the other hand, SCHM's time series data are distributed all over the graphs. SCHM shows better ergodicity compared to its classical counterparts because its time series data will eventually visit most of the phase spaces.

### *Bifurcation Diagrams*

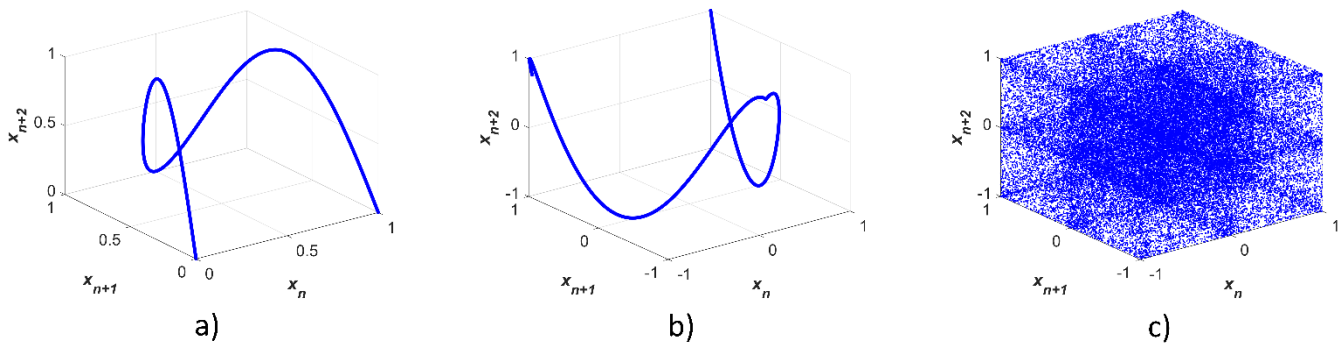
The bifurcation diagram of a chaotic function visualizes the long-term behavior of the map versus the control parameter. With the bifurcation diagram, it can be observed for which values of the control parameter the chaotic state is entered. The bifurcation diagrams for the sine map, Chebyshev map, and SCHM are shown in Fig. 3. In the bifurcation diagram of the sine map, stable fixed points and period doublings can be seen. When the control parameter is less than one, there is a chaotic region only for values greater than or equal to 0.87. If the control parameter is greater than one, non-chaotic regions are also visible. Similarly, the Chebyshev maps enter the chaotic regime when



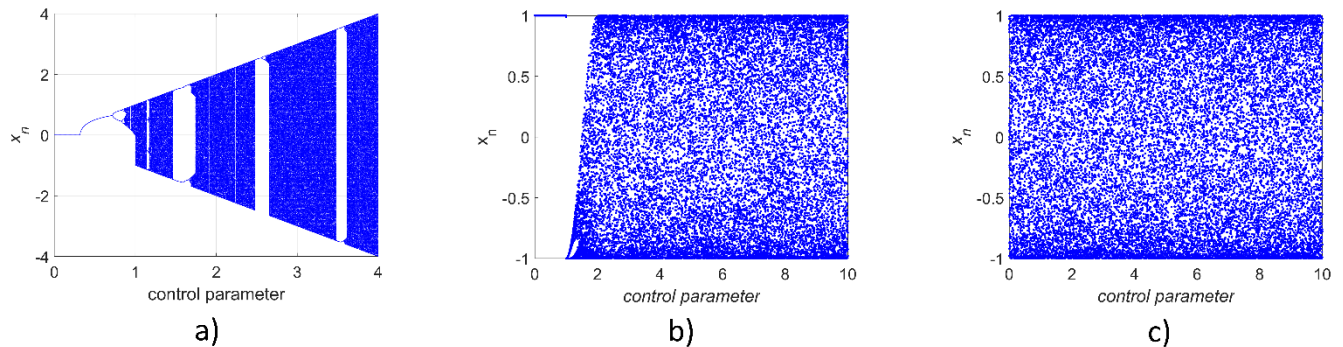
the control parameter is larger than or equal to two. It has a single fixed point if the control parameter is less than or equal to one. On the other hand, SCHM can produce chaotic values between -1 and 1 for all cases where the control parameter is equal to or greater than zero. The chaotic features and chaotic intervals of both the Chebyshev and the sine map are increased with SCHM.



**Figure 1.** 2D Phase Diagrams. **a.** Sine Map **b.** Chebyshev Map **c.** SCHM ( $x_0 = 0.25$ )



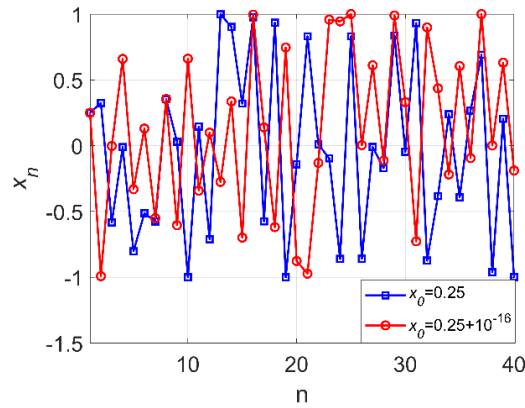
**Figure 2.** 3D Phase Diagrams. **a.** Sine Map **b.** Chebyshev Map **c.** SCHM ( $x_0 = 0.25$ )



**Figure 3.** Bifurcation Diagrams. **a.** Sine Map **b.** Chebyshev Map **c.** SCHM

**Initial Condition Sensitivity of SCHM**

Chaotic maps exhibit extreme sensitivity to initial conditions, implying that even a tiny change in the initial values can yield significantly different outcomes. The initial condition sensitivity of chaotic maps is one of the key properties of chaotic maps and makes them unpredictable, making chaotic maps a good choice for cryptography applications. To measure the initial condition sensitivity of SCHM, the results of 40 iterations for two initial conditions with  $10^{-16}$  differences are shown in Fig. 4. The proposed chaotic map can generate very different output values even if the initial values are changed very slightly.



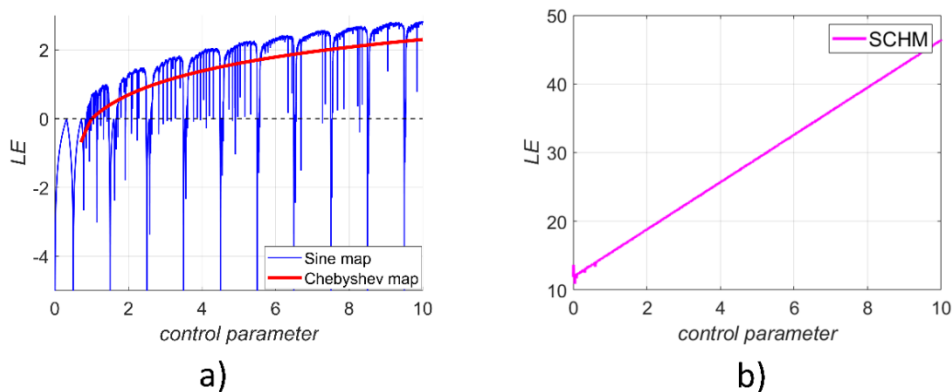
**Figure 4.** Initial Condition Sensitivity of SCHM

**Comparison of Lyapunov Exponents**

Lyapunov exponent (LE) measures the rate of the separation of two trajectories that have very close initial conditions. Chaotic behavior and sensitivity to the initial conditions can be indicated by a positive value of the Lyapunov exponent. LE of a chaotic map  $f(x_i)$  can be calculated using Eq. (4).

$$LE = \lim_{K \rightarrow \infty} \frac{1}{K} \sum_{n=0}^K \ln|f'(x_n)| \tag{4}$$

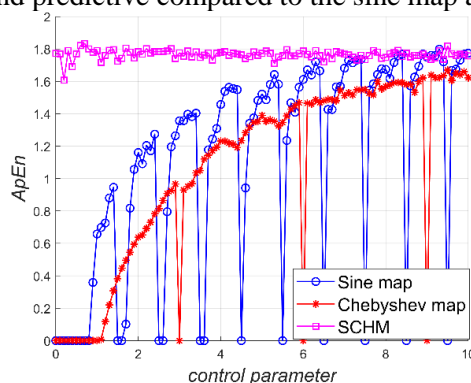
In Fig. 5, the plots of LEs of the sine map, Chebyshev map, and SCHM are illustrated. The LE values of SCHM are always positive and are greater than the LE values of the Chebyshev map and sine map. Since a higher LE value indicates more chaotic behavior, SCHM has better chaotic properties than the sine map and Chebyshev map.



**Figure 5.** Comparison of Lyapunov Exponents. **a.** Sine Map and Chebyshev Map **b.** SCHM

**Comparison of Approximate Entropies**

Approximate entropy (ApEn) is a measure of the level of regularity in time-series data (Delgado-Bonal and Marshak, 2019). A higher ApEn value implies greater unpredictability in time-series data. The sine map, Chebyshev map, and SCHM are iterated 1000 times to calculate ApEn values. In Fig. 6, ApEn values are plotted against the control parameter. SCHM is less repetitive and predictive compared to the sine map and Chebyshev map.



**Figure 6.** Comparison of Approximate Entropies

## THE PROPOSED AUDIO ENCRYPTION METHOD

The proposed audio encryption algorithm is based on bit-level operations using the sequences generated by SCHM. The encryption process of the proposed algorithm is shown in Fig. 7. In general, the encryption process consists of four main steps: conversion to bit-level, permutation, diffusion, and post-processing. Two secret keys  $k$  and  $Key$  are exchanged with the receiver in a secure channel before the transmission of the audio file. Assume that the input audio  $A$  is of length  $N$ . The first secret key  $k$  is obtained from the plaintext audio file using Eq. (5).

$$k = \begin{cases} \text{mod} \left( \sum_{i=1}^N A_i, 1 \right) & \text{if } \sum_{i=1}^N A_i \geq 0 \\ 1 - \text{mod} \left( \sum_{i=1}^N A_i, 1 \right) & \text{if } \sum_{i=1}^N A_i < 0 \end{cases} \quad (5)$$

where  $A = \{A_1, A_2, \dots, A_N\}$  and  $A_i \in [-1, 1]$  represents the value of the  $i$ th sample. On the other hand,  $Key$  is an external key of 400 bits length.  $Key$  is then divided into four equal parts  $\{K_1, K_2, K_3, K_4\}$ , each 100-bit long. The procedure of the proposed audio encryption scheme is described in the following steps.

**Step 1.** Firstly, the samples of the plaintext audio are mapped to the range  $[0, 255]$ . Additionally, integer and decimal parts of the transformed samples are obtained separately using Eqs. (6)-(8).

$$A_T = \frac{(A \times 255) + 255}{2} \quad (6)$$

$$A_{int} = \text{floor}(A_T) \quad (7)$$

$$A_d = A_T - A_{int} \quad (8)$$

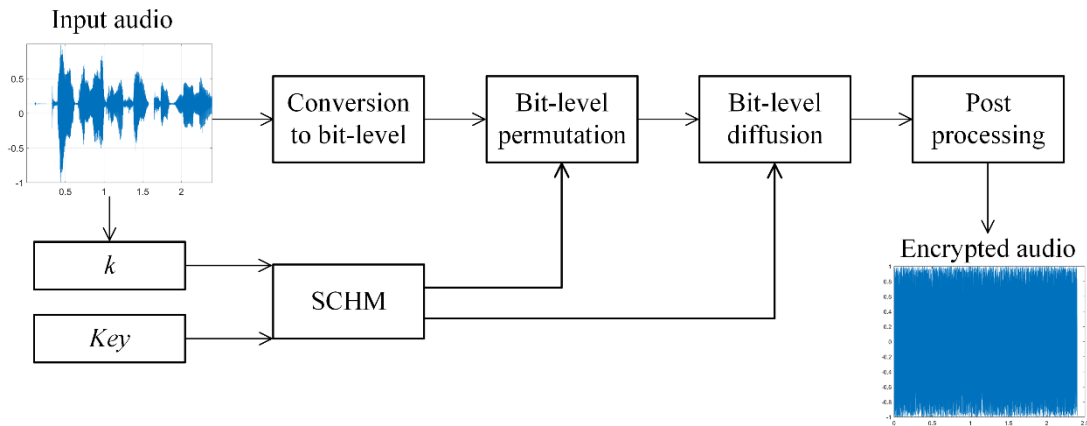
where  $A_T$  represents the transformed audio samples.  $A_{int}$  and  $A_d$  are the integer and decimal parts of  $A_T$ , respectively. Subsequently,  $A_{int}$  is converted to a binary  $A_{bit}$  matrix of size  $8 \times N$ . The 8-bit equivalents of each integer in  $A_{int}$  are found and placed in the columns of  $A_{bit}$ .

**Step 2.** SCHM is iterated  $N + 500$  times and the last  $N$  elements are stored in a chaotic array called  $P$ . The control parameter  $a$  and  $x_0$  are selected using Eq. (9) and Eq. (10).

$$a = \frac{\text{sum}(K1)}{\text{sum}(K)} + 3k \quad (9)$$

$$x_0 = 1 - k - \frac{\text{sum}(K2)}{\text{sum}(K)} \quad (10)$$

where the  $\text{sum}(\cdot)$  function finds the total number of non-zero elements in its input.



**Figure 7.** The Proposed Audio Encryption Process

**Step 3.** The bit-level permutation is performed on  $A_{bit}$  using the permutation array  $P$ . Each column of  $A_{bit}$  is shifted upwards or downwards according to the value of  $P$  using the definitions in Eq. (11).

$$A_{per} = \begin{cases} \text{shift}(A_{bit}(:, i), 3), & P(i) < 0 \\ \text{shift}(A_{bit}(:, i), -3), & P(i) \geq 0 \end{cases} (i = 1, 2, \dots, N) \quad (11)$$

where  $\text{shift}(\cdot)$  circularly shifts  $i$ th column of  $A_{bit}$  3 positions upwards if  $P(i)$  is positive, and 3 positions downwards if it is negative.  $A_{per}$  is the bit matrix obtained as a result of the permutation process.

**Step 4.** To obtain the diffusion sequence, SCHM is iterated again  $N + 500$  times and the last  $N$  elements are stored in an array called  $D_0$ . The control parameter  $a$  and the initial value  $x_0$  are chosen as in Eqs. (12)-(13).

$$a = \frac{\text{sum}(K3)}{\text{sum}(K)} + 5k \quad (12)$$

$$x_0 = -1 + k - \frac{\text{sum}(K4)}{\text{sum}(K)} \quad (13)$$

The diffusion array  $D \in [0, 255]$  is obtained from the chaotic sequence  $D_0$  using Eq. (14).

$$D = \text{mod}(|D_0(i)| \times 10^{10}, 256) \quad (i = 1, 2, \dots, N) \quad (14)$$

$D$  is converted to a binary  $D_{bit}$  matrix of size  $8 \times N$  by finding the 8-bit equivalent of each integer.  $D_{bit}$  is the bit-level diffusion matrix that is used in the following step.

**Step 5.** A bit-wise diffusion operation is implemented between  $A_{per}$  and  $D_{bit}$  using an XOR operator.

$$E_{bit} = A_{per} \oplus D_{bit} \quad (15)$$

where  $E_{bit}$  represents the bit-wise encrypted samples. In addition,  $E_{bit}$  is converted from binary to decimal to obtain an integer sequence  $E_0 \in [0, 255]$ .

**Step 6.** In the post-processing step, the permuted and diffused audio samples are mapped back to the range  $[-1, 1]$  as in Eqs. (16)-(17).

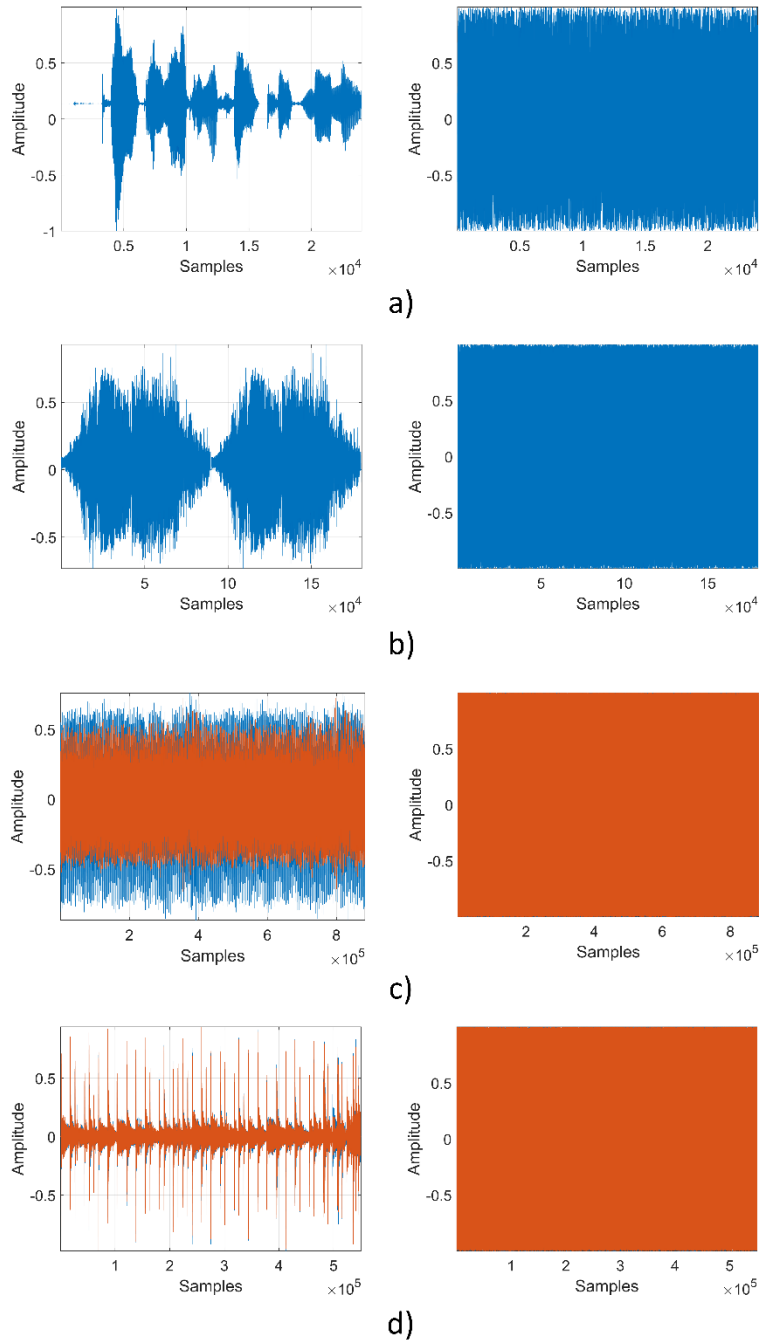
$$E_1 = E_0 + A_d \quad (16)$$

$$E = \frac{E_1}{128} - 1 \quad (17)$$

**Table 1.** Tested Audio Files

File Name	Content	Compression Method	Number of Channels	Sampling Rate (Hz)	Duration (s)	Total Samples
Audio 1	Female Speech	Uncompressed	1	8,000	3	24,000
Audio 2	Jet Airplane	Uncompressed	1	11,025	16.35	180,224
Audio 3	Engine	Uncompressed	2	44,100	20.02	882,688
Audio 4	Rock Drums	MP3	2	48,000	11.47	550,656

where  $E \in [-1, 1]$  denotes the encrypted audio file. In Eq. (16), decimal parts of the transformed input audio file are added to the encrypted samples so that a lossless audio encryption scheme has been achieved. Moreover, a stereo-channel plaintext audio file can be encrypted losslessly using this algorithm by encrypting each channel separately with the proposed algorithm. The decryption algorithm can be performed by taking the secret keys and the encrypted audio file as inputs and following the encryption steps in reverse order. Therefore, the decrypted audio file will be identical to the plaintext audio file as the proposed algorithm is a lossless method.



**Figure 8.** Waveforms of the Test Audios and Encrypted Audios. **a.** Audio 1 **b.** Audio 2 **c.** Audio 3 **d.** Audio 4

### SECURITY ANALYSIS RESULTS

Four audio files taken from MATLAB's Audio Toolbox, detailed in Table 1, were tested. Test audio files are sampled with different sampling rates and have different numbers of channels. Thus, the algorithm's performance in encrypting audio files with different features was observed. The waveforms of the test images and their corresponding encrypted versions are illustrated in Fig. 8. When the proposed method is used to encrypt single-channel or two-channel audio files, the sample values of the resulting encrypted audio data are evenly distributed as shown in the figure. It is not possible to obtain meaningful information from encrypted files, which proves the strength of the proposed algorithm.

#### *Histogram Analysis*

A histogram plot of audio data is the representation of the distribution of the signal amplitudes. It's a visual depiction that illustrates the occurrence frequency of various amplitudes within the audio signal. The histogram graph's horizontal axis depicts the amplitude values, while the vertical axis illustrates the quantity of samples within each bin. In Fig. 9, histogram graphs of the test audio files are presented. Whether it is a single-channel or two-channel



audio file, a uniform histogram graph can be obtained as a result of the proposed algorithm. Therefore, it is not possible to extract statistical information from audio files encrypted with this method.

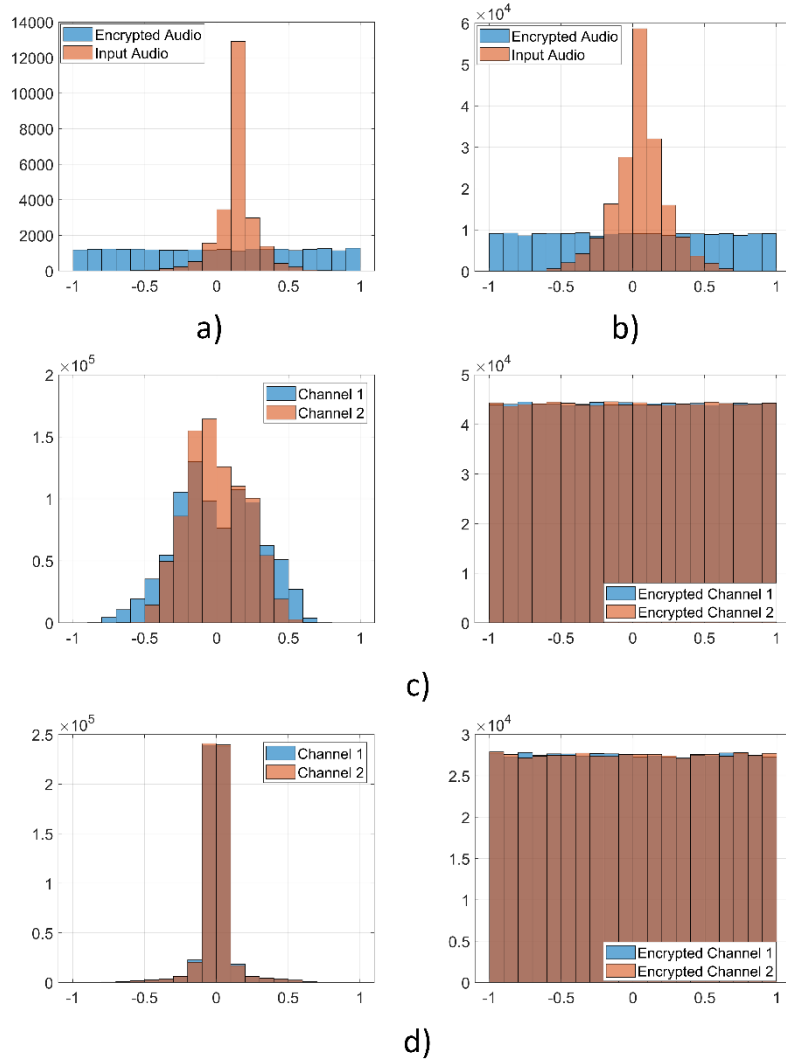


Figure 9. Histogram Plots. a. Audio 1 b. Audio 2 c. Audio 3 d. Audio 4

Table 2. Comparison of Keyspaces

Proposed Method	(Mokhnache et al., 2022)	(Wu et al., 2022)	(Albahrani et al., 2023)	(Mehmet Demirtaş, 2023a)	(Kumar and Dua, 2023)	(Wang and Su, 2020)
$2^{453}$	$2^{180}$	$2^{256}$	$2^{240}$	$2^{159}$	$2^{128}$	$2^{128}$

### Keyspace Analysis

In the proposed algorithm, there are two secret keys  $k$  and  $Key$ . While the first secret key depends on the sample values of the input audio file, the second secret key is chosen as a 400-bit external key. The precision of the first key is found to be  $10^{-16}$ . The keyspace of these two secret keys can be calculated as follows:  $2^{400} \times 10^{16} \cong 2^{453}$ . Exhaustive search attacks, which adopt the trial-and-error approach, try every possible secret key. Therefore, the key space must be larger than  $2^{100}$  so that an exhaustive search attack can be made infeasible. The proposed method is impossible to break using brute-force attacks due to the high keyspace. In Table 2, keyspace comparison with various algorithms is listed. The proposed method has a larger keyspace than various encryption schemes.

### Key Sensitivity Analysis

Key sensitivity analysis is a visual assessment of how sensitive the encryption scheme is to small changes in the secret keys during the decryption process. For Audio 1, the key sensitivity analysis results are shown in Fig. 10. When the correct secret keys are used, the input audio file can be obtained losslessly and accurately. However, if only the secret key  $k$  is changed by  $10^{-16}$ , the decrypted audio data is completely unrelated to the original audio file.

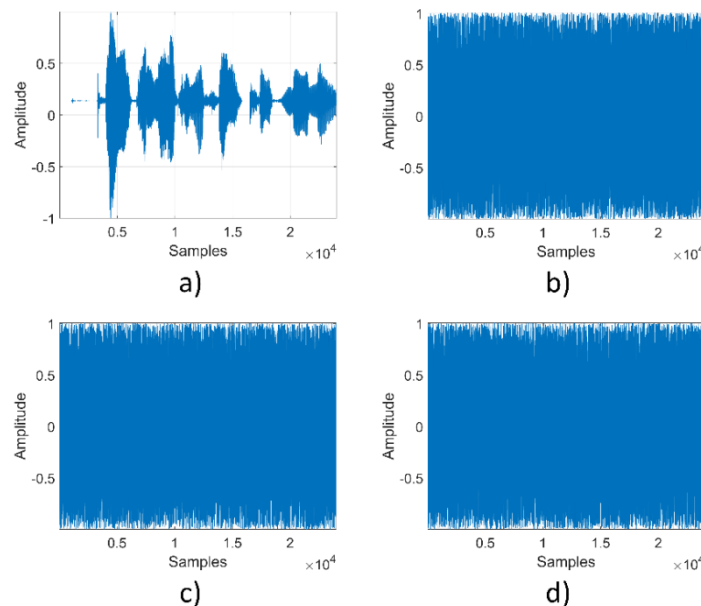
Similarly, when only the first or last bit of *Key* is flipped, the decrypted audio data is completely different from the input audio file. This visualization proves that the proposed algorithm exhibits a high level of sensitivity to the secret keys and displays a strong response to variations in the keys.

**Spectrogram Analysis**

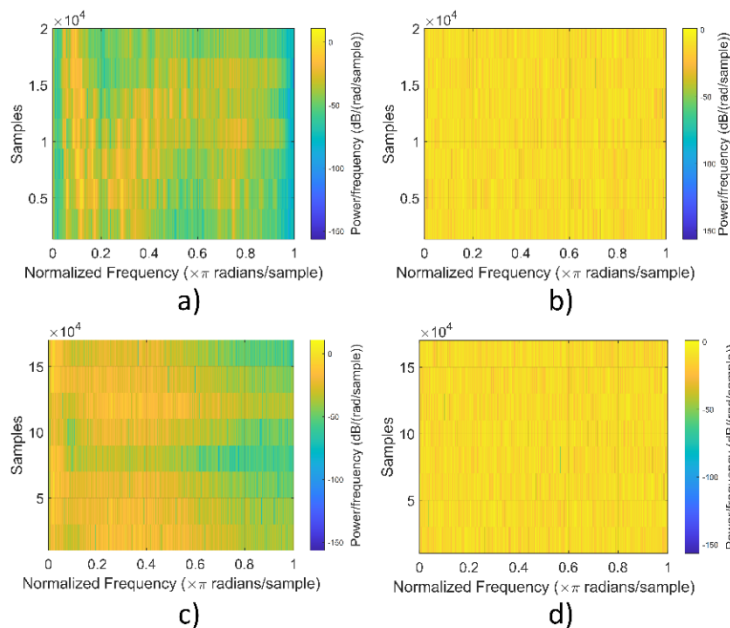
A spectrogram graph serves as a visual representation of the spectrum of frequencies of an audio file. The time-series audio input samples are transformed into frequency content using the Short-Time Fourier Transform. A uniform distribution in the spectrogram graph is an indicator of efficient encryption. In Fig. 11, the spectrogram graphs of the plaintext and encrypted signals are illustrated for Audio 1 and Audio 2 test files. As can be seen from Fig. 11, the audio files that are encrypted with the proposed method have evenly distributed frequency components.

**Correlation Analysis**

The consecutive samples in the plaintext audio file are expected to exhibit a strong correlation. Therefore, this strong correlation between successive samples should be reduced by an audio encryption algorithm. Reducing the correlation between audio samples is necessary to resist statistical attacks. The correlation between randomly selected two audio samples can be quantified by the correlation coefficient as defined in Eq. 18.



**Figure 10.** Key sensitivity results. **a.** Correct keys **b.**  $k + 10^{-16}$  **c.** Key's first bit toggled **d.** Key's last bit toggled



**Figure 11.** Spectrogram Graphs. **a.** Input Audio 1 **b.** Encrypted audio 1 **c.** Input Audio 2 **d.** Encrypted audio 2

$$c = \frac{\sum_{i=1}^L (x_i - E(x))(y_i - E(y))}{\sqrt{\sum_{i=1}^L (x_i - E(x))^2 \sum_{i=1}^L (y_i - E(y))^2}} \quad (18)$$

where  $(x_i, y_i)$  are the amplitude values of the randomly selected audio sample pairs and  $L$  is the number of those pairs.  $E(x)$  and  $E(y)$  are the average values of the audio samples. The calculated correlation coefficient values are listed in Table 3 for the test audio files. Although the correlation coefficient values between randomly selected sample pairs of the input audio files are very high, these values approached zero using the proposed encryption algorithm. Therefore, the proposed audio encryption algorithm can withstand statistical attacks. Furthermore, the correlation between adjacent audio samples can be visualized using correlation graphs. In Fig 12, the correlation graphs representing the distribution of 5,000 randomly selected audio sample pairs are displayed for the test images. In the figure, the left column depicts the distribution of adjacent samples of the input audio signals, while the right column illustrates the distribution of adjacent samples of the encrypted audio signals. In the input audio files, there is a strong correlation between adjacent samples. However, the adjacent samples are distributed widely across the plane in the encrypted audio files, indicating the absence of correlation between them.

### Information Entropy Analysis

Information entropy values can be used to quantify the level of randomness of audio signals. An information entropy value closer to 8 means that the relevant signal is more complex and unpredictable (Albahrani et al., 2023). Therefore, an audio encryption algorithm should increase the information entropy closer to 8. Information entropy values of the test audio signals are presented in Table 4. Encrypted audio files have almost ideal information entropy values, which are at least 7.99.

**Table 3.** Correlation Coefficient Values

	Audio 1	Audio 2	Audio 3 Channel 1	Audio 3 Channel 2	Audio 4 Channel 1	Audio 4 Channel 2
Plaintext	0.7879	0.6213	0.9993	0.9982	0.9873	0.9870
Encrypted	-0.0153	-0.0043	0.0020	-0.0015	0.0011	0.0027

**Table 4.** Information Entropies

	Audio 1	Audio 2	Audio 3 Channel 1	Audio 3 Channel 2	Audio 4 Channel 1	Audio 4 Channel 2
Plaintext	5.760	4.570	4.434	4.162	3.474	3.458
Encrypted	7.990	7.997	7.998	7.998	7.998	7.998

### Differential Analysis

An effective audio encryption method must be capable of dispersing the impact of one sample of the input audio file over a large portion of the encrypted audio file. Therefore, when one sample of the input audio undergoes a minor alteration, the encrypted audio file should be completely different. The number of sample change rate (NSCR) can be used to quantify the difference between two encrypted audio files and it is defined as follows.

$$NSCR = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N D(i) \quad (19)$$

$$D(i) = \begin{cases} 1 & \text{if } E_1(i) \neq E_2(i) \\ 0 & \text{if } E_1(i) = E_2(i) \end{cases} \quad (20)$$

where  $N$  is the total number of samples and  $E_1$  and  $E_2$  represent audio signals that share the same original input audio source, with only a minor difference in one of their samples. NSCR values were calculated by changing the amplitude value of a randomly selected sample from the input audio files by 5%. For each test audio file, the average of the

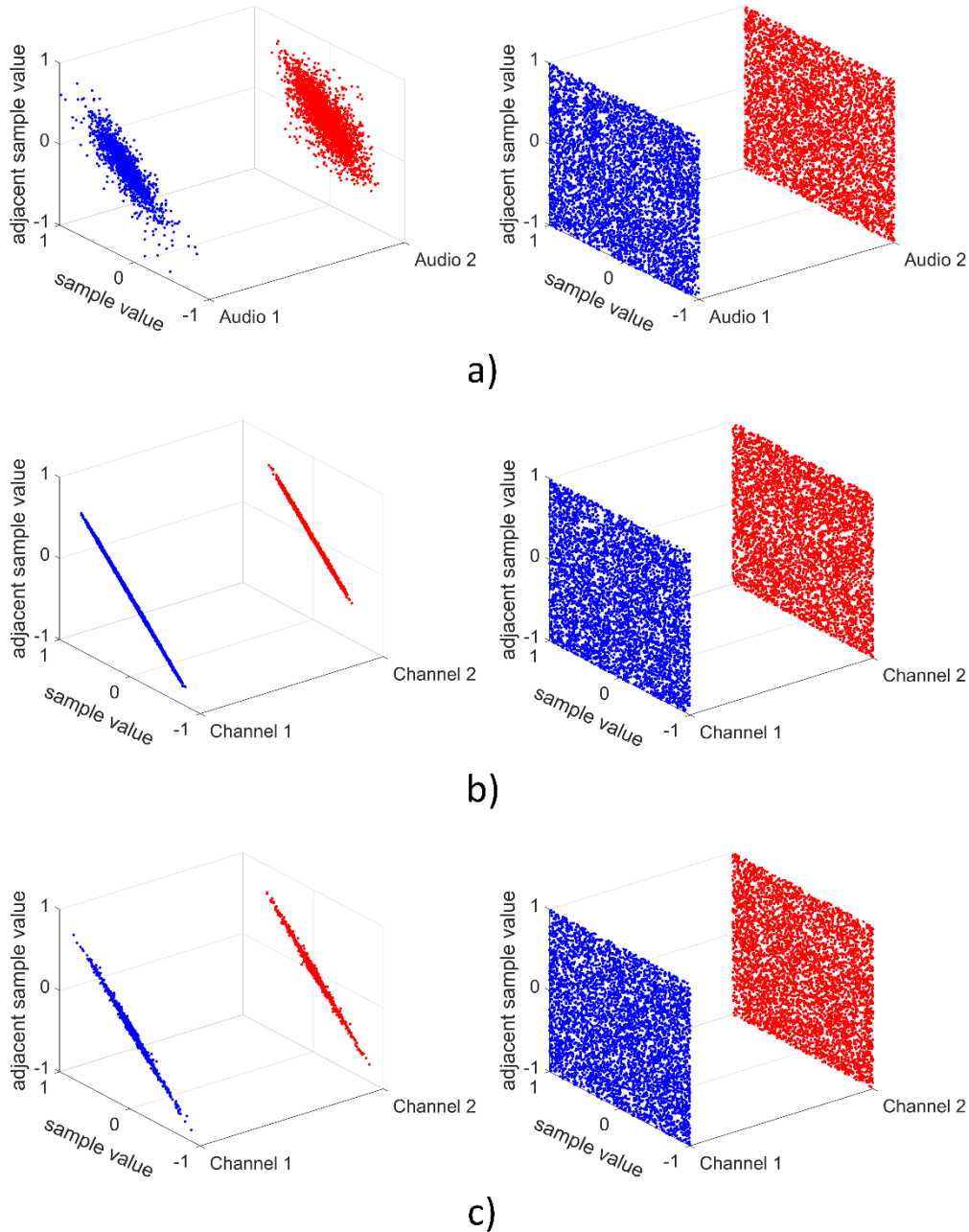
**Table 5.** Average NSCR Values

	Audio 1	Audio 2	Audio 3 Channel 1	Audio 3 Channel 2	Audio 4 Channel 1	Audio 4 Channel 2
NSCR (%)	99.608	99.613	99.603	99.604	99.612	99.607

**Table 6.** Time Spent for Encryption and Decryption

	Audio 1	Audio 2	Audio 3	Audio 4
Duration (s)	3	16.35	20.02	11.47
Number of Channels	1	1	2	2
Encryption (s)	0.165	0.686	5.461	3.395
Decryption (s)	0.053	0.395	3.525	2.075

NSCR values found for 10 different samples are shown in Table 5. As can be seen from the table, a 5% change of just one sample in the input audio file changes more than 99.6% of the output samples. These results demonstrate the robustness of the proposed audio signal encryption method against differential attacks.



**Figure 12.** Correlation Graphs. **a.** Audio 1 and Audio 2 **b.** Audio 3 **c.** Audio 4

**Running Time Analysis**

The proposed algorithm is simulated using MATLAB 2020a software that was implemented on a PC equipped with an Intel Core i7 processor running at 2.80 GHz and 16 GB of RAM. Times spent on encryption and decryption

processes are listed in Table 6. The encryption and decryption durations vary depending on the duration of the input audio file and the number of channels. Two-channel audio files require more time to encrypt or decrypt as expected.

## CONCLUSIONS

The need for encryption of audio files is increasing since they contain confidential and personal data. In this study, a novel and lossless audio encryption algorithm is presented to address this need. A newly developed chaotic map called SCHM, and bit-level operations are applied to encrypt different audio files with varying sizes and channels. It is proved using several analyses that SCHM exhibits better chaotic properties with a broader chaotic range compared to the sine and Chebyshev maps. To test the security of the proposed algorithm, the following analyses were conducted: histogram analysis, key space and key sensitivity analysis, spectrogram analysis, correlation coefficient and information entropy calculations, differential attack analysis, and running time measurements. The proposed method can withstand statistical attacks since it breaks the correlation between successive samples of the input audio file. Also, the encrypted audio samples exhibit a uniform distribution which is an indicator of resistance to statistical attacks. The uniform distribution of the output frequencies is also shown using the spectrogram graphs. Information entropy results are very close to the ideal value, indicating the proposed method's encryption capability. The proposed algorithm has a larger key space than several recently proposed encryption methods. This algorithm is also very sensitive to the secret keys and input samples, as shown by the key sensitivity analysis and differential analysis, respectively. In conclusion, the results of the security analysis affirm the effectiveness of the proposed audio encryption method.

## REFERENCES

- Al-kateeb, Z. N., & Mohammed, S. J. (2020). A novel approach for audio file encryption using hand geometry. *Multimedia Tools and Applications*, 79(27), 19615-19628. doi:10.1007/s11042-020-08869-8
- Alanazi, A. S., Munir, N., Khan, M., & Hussain, I. (2023). A novel design of audio signals encryption with substitution permutation network based on the Genesio-Tesi chaotic system. *Multimedia Tools and Applications*, 82(17), 26577-26593. doi:10.1007/s11042-023-14964-3
- Albahrani, E. A., Alshekly, T. K., & Lafta, S. H. (2023). New secure and efficient substitution and permutation method for audio encryption algorithm. *The Journal of Supercomputing*, 79(15), 16616-16646. doi:10.1007/s11227-023-05249-5
- Delgado-Bonal, A., & Marshak, A. (2019). Approximate Entropy and Sample Entropy: A Comprehensive Tutorial. *Entropy*, 21(6), 541.
- Demirtaş, M. (2022, 7-9 Sept. 2022). *AFast Multiple Image Encryption Algorithm Based on Hilbert Curve and Chaotic Map*. Paper presented at the 2022 Innovations in Intelligent Systems and Applications Conference (ASYU).
- Demirtaş, M. (2023a, 03/28). *A Lossless Audio Encryption Method based on Chebyshev Map*. Paper presented at the Orclever Proceedings of Research and Development.
- Demirtaş, M. (2023b). A NEW IMAGE ENCRYPTION METHOD BASED ON A 6D HYPERCHAOTIC MAP AND GENETIC OPERATORS. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 26(1), 261-278. doi:10.17780/ksujes.1208570
- Ghasemzadeh, A., & Esmaili, E. (2017). A novel method in audio message encryption based on a mixture of chaos function. *International Journal of Speech Technology*, 20(4), 829-837. doi:10.1007/s10772-017-9452-y
- Hato, E., & Shihab, D. (2015). Lorenz and Rossler Chaotic System for Speech Signal Encryption. *International Journal of Computer Applications*, 128, 25-33.
- Hosny, K. M., Zaki, M. A., Lashin, N. A., Fouda, M. M., & Hamza, H. M. (2023). Multimedia Security Using Encryption: A Survey. *IEEE Access*, 11, 63027-63056. doi:10.1109/ACCESS.2023.3287858
- Kafetzis, I., Volos, C., Nistazakis, H. E., Goudos, S., & Bardis, N. G. (2023, 28-30 June 2023). *A Real-time Chaos-based Audio Encryption Scheme*. Paper presented at the 2023 12th International Conference on Modern Circuits and Systems Technologies (MOCASST).
- Khairullah, M. K., Alkahtani, A. A., Bin Baharuddin, M. Z., & Al-Jubari, A. M. (2021). Designing 1D Chaotic Maps for Fast Chaotic Image Encryption. *Electronics*, 10(17), 2116.



- Kordov, K. (2019). A Novel Audio Encryption Algorithm with Permutation-Substitution Architecture. *Electronics*, 8(5), 530.
- Kumar, A., & Dua, M. (2023). Audio encryption using two chaotic map based dynamic diffusion and double DNA encoding. *Applied Acoustics*, 203, 109196. doi:<https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2022.109196>
- Lima, J. B., & da Silva Neto, E. F. (2016). Audio encryption based on the cosine number transform. *Multimedia Tools and Applications*, 75(14), 8403-8418. doi:10.1007/s11042-015-2755-6
- Liu, H., Kadir, A., & Li, Y. (2016). Audio encryption scheme by confusion and diffusion based on multi-scroll chaotic system and one-time keys. *Optik*, 127(19), 7431-7438. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2016.05.073>
- Liu, L., & Wang, J. (2023). A cluster of 1D quadratic chaotic map and its applications in image encryption. *Mathematics and Computers in Simulation*, 204, 89-114. doi:<https://doi.org/10.1016/j.matcom.2022.07.030>
- Mokhnache, S., Daachi, M. E. H., Bekkouche, T., & Diffellah, N. (2022). A Combined Chaotic System for Speech Encryption. *Engineering, Technology & Applied Science Research*, 12(3), 8578-8583. doi:10.48084/etasr.4912
- Muthu, J. S., & Murali, P. (2021). Review of Chaos Detection Techniques Performed on Chaotic Maps and Systems in Image Encryption. *SN Computer Science*, 2(5), 392. doi:10.1007/s42979-021-00778-3
- Raducanu, M., Cheroiu, D. G., & Nitu, C. M. (2022, 13-15 July 2022). *Sound Encryption Algorithm with Perfect Reconstruction using Tent Map and Multidimensional Arnold Chaotic Systems*. Paper presented at the 2022 45th International Conference on Telecommunications and Signal Processing (TSP).
- Renza, D., Mendoza, S., & Ballesteros L, D. M. (2019). High-uncertainty audio signal encryption based on the Collatz conjecture. *Journal of Information Security and Applications*, 46, 62-69. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jisa.2019.02.010>
- Sasikaladevi, N., Geetha, K., & Venkata Srinivas, K. N. (2018). A multi-tier security system (SAIL) for protecting audio signals from malicious exploits. *International Journal of Speech Technology*, 21(2), 319-332. doi:10.1007/s10772-018-9510-0
- Sathiyamurthi, P., & Ramakrishnan, S. (2020). Speech encryption algorithm using FFT and 3D-Lorenz–logistic chaotic map. *Multimedia Tools and Applications*, 79(25), 17817-17835. doi:10.1007/s11042-020-08729-5
- Wang, X., & Su, Y. (2020). An Audio Encryption Algorithm Based on DNA Coding and Chaotic System. *IEEE Access*, 8, 9260-9270. doi:10.1109/ACCESS.2019.2963329
- Wu, R., Gao, S., Wang, X., Liu, S., Li, Q., Erkan, U., & Tang, X. (2022). AEA-NCS: An audio encryption algorithm based on a nested chaotic system. *Chaos, Solitons & Fractals*, 165, 112770. doi:<https://doi.org/10.1016/j.chaos.2022.112770>



# Kahramanmaraş Sütçü İmam University

## Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 03.01.2024  
Kabul Tarihi : 14.02.2024

Received Date : 03.01.2024  
Accepted Date : 14.02.2024

### DENİZ YIRTICILARI ALGORİTMASI İLE TÜRKİYE’NİN ENERJİ TALEBİNİN TAHMİN EDİLMESİNE YÖNELİK KAPSAMLI BİR ÇALIŞMA

#### A COMPREHENSIVE STUDY ON FORECASTING TURKEY'S ENERGY DEMAND WITH THE MARINE PREDATORS ALGORITHM

Ahmet ÖZKİŞ<sup>1</sup> (ORCID: 0000-0002-1899-5494)

<sup>1</sup> Necmettin Erbakan Üniversitesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Konya, Türkiye

\*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Ahmet ÖZKİŞ, aozkis@erbakan.edu.tr

#### ÖZET

Enerjiye olan talep her geçen gün artmakta ve bu talebin önceden tahmin edilebilmesi büyük önem arz etmektedir. Bu çalışma, yakın zamanda önerilen deniz avcıları algoritması (MPA) ile Türkiye'nin 1979 – 2015 yılları arasındaki enerji talebini tahmin etmek amacıyla yapılmıştır. Çalışmada kullanılan doğrusal ve ikinci dereceden regresyon modellerinin ağırlıklarının belirlenmesinde MPA'dan yararlanılmıştır. Yapılan incelemelere göre MPA literatürde ilk kez bu amaçla kullanılmaktadır. MPA'nın toplam karesel hata ve toplam bağıl yüzde hatası metrikleri için elde ettiği sonuçlar, literatürde iyi bilinen diferansiyel evrim, Arşimet optimizasyon, güve alev optimizasyonu ve gri kurt algoritmaları ile kıyaslanmıştır. Literatürdeki diğer çalışmalardan farklı olarak performans karşılaştırmaları sadece en iyi değer üzerinden değil; en iyi, en kötü, ortalama ve standart sapma değerlerine göre yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar MPA'nın enerji talep tahmin probleminde karşılaştırılan algoritmalarından daha başarılı ve kararlı bir yapıya sahip olduğunu göstermiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Deniz avcıları algoritması, enerji talep tahmini, regresyon analizi, metasezgisel algoritmalar.

#### ABSTRACT

The energy demand is increasing day by day, and it is of great importance to predict this demand. This study was conducted to estimate Turkey's energy demand between 1979 - 2015 with the recently proposed marine predators algorithm (MPA). To determine the weights of the linear and quadratic regression models used in the study is utilized from the MPA. According to the studies, MPA is used for this purpose for the first time in the literature. The results obtained by the MPA for sum-squared-error and total-relative-percentage-error metrics were compared with algorithms well-known in the literature differential evolution, Archimedes optimization, moth flame optimization, and grey wolf optimizer. Unlike other studies in the literature, performance comparisons are not only based on the best value; it was made according to the best, worst, average, and standard deviation values. The results showed that MPA has a more successful and stable structure than the compared algorithms in the energy demand forecasting problem.

**Keywords:** Marine predator algorithm, energy demand estimation, regression analysis, metaheuristic algorithms

#### GİRİŞ

Enerji, ülkelerin ekonomik açıdan kalkınmaları için en önemli konu başlıklarından biridir. Enerji tüketim göstergeleri bir ülkenin refah ve gelişmişlik düzeyine işaret eden önemli metriklerdendir (Anwar, 2016). Yirminci yüzyıldan önce kömür gibi katı yakıtlar enerji üretimi için yoğun bir şekilde kullanılmaktaydı. Sanayileşmeyle birlikte enerjiye olan talep arttı ve petrol bazlı yakıtların kullanımı yaygınlaştı. Günümüzde, her ne kadar alternatif enerji kaynakları

ToCite: ÖZKİŞ, A., (2024). DENİZ YIRTICILARI ALGORİTMASI İLE TÜRKİYE’NİN ENERJİ  
TALEBİNİN TAHMİN EDİLMESİNE YÖNELİK KAPSAMLI BİR ÇALIŞMA. *Kahramanmaraş Sütçü  
İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 27(2), 615-630.

kullanılmaya başlansa da hala enerji üretiminin büyük bölümü fosil yakıtlardan sağlanmaktadır. Tablo 1'deki 2022 yılına ait enerji üretim kaynakları incelendiğinde dünyadaki toplam enerjinin %60'ından fazlasının kömür, doğal gaz ve likit yakıtlardan üretildiği görülmektedir (International Energy Outlook - U.S. Energy Information Administration (EIA), 2023).

**Tablo 1.** Dünya'da 2022 Yılındaki Enerji Üretim Kaynakları

Kaynak	MKWS türünden üretilen enerji miktarı	Toplam elektrik üretimi içindeki oranı
<b>Fosil</b>		
Sıvı yakıt	733	2,60%
Doğal gaz	6,699	23,72%
Kömür	9,696	34,34%
<i>Toplam fosil</i>	<i>17,128</i>	<i>60,66%</i>
<b>Nükleer</b>	2,666	9,44%
<b>Yenilenebilir</b>		
Hidro	4,320	15,30%
Rüzgâr	1,967	6,96%
Jeotermal	67	0,24%
Güneş	1,421	5,03%
Diğer	669	2,37%
<i>Toplam yenilenebilir</i>	<i>8,444</i>	<i>29,90%</i>

**MKWS:** milyar kilowatt saat

Fosil yakıtların aşırı kullanımı atmosfere karbonik gaz salınımına neden olmakta ve küresel ısınmayı ciddi oranda arttırmaktadır (Zergane vd., 2018). Küresel enerji tüketimindeki artışa paralel olarak 2030 yılına kadar dünyadaki enerji talebinin %50'nin üzerinde artacağı tahmin edilmektedir (Suganthi ve Samuel, 2012). Çevre dostu yenilenebilir enerji kaynaklarının da toplam talebin yaklaşık %30'unu karşılayabildiği düşünüldüğünde, ülkelerin enerji konusundaki planlamalarının önemi daha iyi anlaşılmaktadır (Ghalekhondabi vd., 2017). Özellikle uzun vadeli enerji talep tahminlerinin yapılması ve bu talebi karşılamaya yönelik kaynakların planlanması hayati bir öneme sahiptir.

Enerji konusunda Türkiye'deki duruma bakıldığında, %2,52'lik enerji tüketimi artış oranıyla üst-orta gelirli ülkelerden biri olup, Ekonomik Kalkınma ve İşbirliği Örgütü'nün (OECD) 2018 yılı verilerine göre 144,2 milyon ton petrol eşdeğeri (millions of tonnes of oil equivalent, MTOE) enerji ile enerji tüketiminde 17. sırada yer almaktadır (Özdemir vd., 2022). Türkiye Cumhuriyeti Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı verilerine göre 2022 yılında Türkiye'deki elektrik üretiminin, %34,6'sı kömürden, %22,9'u doğal gazdan, %20,3'ü hidrolik enerjiden, %10,6'sı rüzgârdan, %5,1'i güneşten, %3,4'ü jeotermal enerjiden ve %3'ü diğer kaynaklardan elde edilmiştir. Türkiye elektrik enerjisi tüketimi 2022 yılında bir önceki yıla göre %0,5 oranında azalarak 331,1 terawatt saat (TWh), elektrik üretimi ise bir önceki yıla göre %1,9 azalarak 328,3 TWh olarak gerçekleşmiştir. Türkiye Ulusal Enerji Planı çalışmasının sonuçlarına göre elektrik tüketiminin 2025 yılında 380,2 TWh, 2030 yılında 455,3 TWh, 2035 yılında ise 510,5 TWh seviyesine ulaşması beklenmektedir ("TC Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı," 2023). Türkiye, enerji üretmek için kullandığı doğalgaz ve petrol ürünlerinin büyük bir bölümünü Orta Doğu ülkeleri ve Rusya'dan ithal ettiği için enerji kaynakları bakımından dışa bağımlıdır. Literatürdeki çalışmalara göre enerji kaynağı konusunda dışa bağımlılık oranı %70 civarındadır (Aslan, 2023; Özdemir vd., 2022). Enerji üretim maliyetlerinin yüksekliği ve üretilen enerjinin büyük ölçüde depolanamaması nedeniyle enerji arz ve talebi arasında bir dengenin olması gerekmektedir. Bunun için gelecekteki enerji talebinin başarılı bir şekilde tahmin edilmesi ve bu talebe göre enerji üretim, dağıtım ve fiyatlandırma çalışmalarının yapılması kritik bir öneme sahiptir (Ünler, 2008).

Bu çalışmada Türkiye'nin enerji talebini tahmin etmek için Faramarzi vd. (2020) tarafından önerilen deniz avcıları algoritması (marine predators algorithm, MPA) kullanılmıştır. Çalışmada yapılanlar ve çalışmanın literatüre katkıları aşağıda maddeler halinde sunulmuştur:

- Bu çalışmada, Türkiye'nin 1979 – 2015 yılları arasındaki enerji talebini tahmin etmek için doğrusal ve ikinci dereceden 2 farklı model kullanılmıştır.
- Modellerde gayri safi yurtiçi hasıla, popülasyon, ithalat ve ihracat girdi değerlerini; enerji talebi ise çıktıyı ifade eder.
- Modellerdeki ağırlık katsayılarının optimum değerini belirlemek için deniz avcılığı algoritmasından faydalanılmıştır.
- Elde edilen sonuçlar deniz avcılığı algoritmasının karşılaştırılan algoritmalara göre oldukça başarılı ve kararlı sonuçlar ürettiğini göstermiştir.

## LİTERATÜR ÖZETİ

Literatür incelendiğinde, enerji talep tahmini problemi için farklı yöntemlerin kullanıldığı görülmektedir. Bunlardan ilki istatistik tabanlı yöntemlerdir. Baum (1984), gelişmekte olan ülkelerin enerji planlamasında istatistiksel yöntemleri kullanarak bu alandaki çalışmaların öncüsü olmuştur. Ediger ve Tatlıdil (2002) Türkiye'nin enerji talebini tahmin etmek için yarı istatistiksel bir yöntem olan çevrim analizinden faydalanmıştır. Dilaver ve Hunt (2011), 1960 – 2008 yılları arasındaki verilerle Türkiye'nin endüstriyel enerji talebini yapısal zaman serisi analizi yöntemini kullanarak tahmin etmiştir. Aynı yöntem Top ve Vapur (2018) tarafından Türkiye'nin genel enerji stratejisinin tahmininde kullanılmıştır. Ozturk ve Ozturk (2018) ARIMA istatistiksel yöntemi ile Türkiye'nin enerji talebini tahmin etmiştir. de Oliveira ve Oliveira (2018) ise orta ve uzun vadeli elektrik enerjisi tüketim tahmini için ARIMA istatistiksel yöntemini ve üstel bir hesaplama modelini kullanmıştır. Cihan (2022) aynı yöntemi COVID-19 döneminde uygulanan karantınaların, sanayi bölgelerindeki elektrik ve doğal gaz tüketimine etkisini tahmin etmek için kullanmıştır. Talep tahmin problemlerinde kullanılan bir diğer yöntem yapay sinir ağları (artificial neural network, ANN) algoritmasıdır. Gorucu (2004) Ankara'nın gaz tüketimini tahmin etmek için YSA'yı kullanmıştır. Aynı yöntem, Yunanistan'ın (Economou, 2010) ve Türkiye'nin (Es vd., 2014; Kankal ve Uzlu, 2017) enerji tüketimini tahmin etmek amacıyla da kullanılmıştır. Talep tahmini problemlerinde yaygın olarak kullanılan diğer bir yöntem ise metasezgisel algoritmalar. Çeşitli araştırmacılar genetik algoritmayı kullanarak Türkiye'nin enerji talebi üzerine çeşitli tahmin çalışmaları yapmıştır (Ceylan ve Ozturk, 2004; Haldenbilen ve Ceylan, 2005; H. K. Ozturk vd., 2005). Ardından Toksarı (2007) Türkiye'nin enerji talebini tahmin etmek için 1979 – 2005 yılları arasındaki gayri safi yurt içi hasıla, nüfus, ithalat ve ihracat verilerini kullanarak karınca koloni optimizasyonu algoritması ile doğrusal ve karesel hesaplama modelleri önermiştir. Bu öncü çalışmaların ardından çok sayıda araştırmacı metasezgisel tabanlı enerji tahmin çalışmaları yapmıştır. Bu çalışmalardan bazıları kullanılan algoritmalara göre gruplanarak Tablo 2'de sunulmuştur.

**Tablo 2.** Bazı Metasezgisel Tabanlı Enerji Talep Tahmin Çalışmaları

Araştırmacılar	Kullanılan Algoritma
Ünler (2008), Gulcu ve Kodaz (2017) (Aslan, 2023)	Parçacık sürü optimizasyonu (particle swarm optimization, PSO) Arşimet optimizasyon algoritması (Archimedes optimization algorithm, AOA)
Aslan ve Beşkirli (2022)	Aritmetik optimizasyon algoritması (arithmetic optimization algorithm, AOA)
(Toksarı, 2007, 2009)	Karınca koloni optimizasyonu (ant colony optimization, ACO)
Özkış (2020)	Girdap arama, (vortex search, VS) algoritması
Özdemir vd. (2022)	Yapay arı kolonisi, (artificial bee colony, ABC)
Kıran vd. (2012a)	PSO ve ACO
Kıran vd. (2012b)	ABC ve PSO
Koc vd. (2019)	Gri kurt optimizasyonu (grey wolf optimizer, GWO)
İsmail vd. (2018)	Yerçekimi arama algoritması (gravity search algorithm, GSA) ve yabancı ot optimizasyon algoritması (invasive weed optimization, IWO)

Bilici ve Özdemir (2023)

ABC, yüklü sistem arama algoritması (charged system search algorithm, CSS), karga arama algoritması (Crow search algorithm, CSA) ve harmoni arama algoritması (harmony search algorithm, HSA)

Enerji tahmin problemiyle ilgili literatür incelendikten sonra, bu çalışmada kullanılan MPA yöntemiyle ilgili çalışmalar incelenmiştir. MPA, 2020 yılında önerilmiş güçlü bir metasezgisel algoritmadır. Yapısında barındırdığı üç farklı arama stratejisi sayesinde benchmark problemlerinin optimizasyonunda (Arslan, 2023), yapay sinir ağlarının eğitilmesinde (Baştemur Kaya, 2023; Ikram vd., 2022), öznelik seçim problemlerinde (Abd Elminaam vd., 2021), görüntü işleme problemlerinde (Abdel-Basset vd., 2022), parametre tahmini problemlerinde (Abdel-Basset vd., 2021) ve çok amaçlı problemlerin çözümünde (Jangir vd., 2023; Zhong vd., 2021) başarılı olduğu görülmüştür.

## MATERYAL VE METOT

### *Enerji Talep Tahmin Problemi*

Literatürdeki pek çok çalışmada (Toksarı, 2007; Ünler, 2008), bir ülkenin enerji talebi ile belirtilen dört faktör arasında kuvvetli bir ilişki olduğu belirtilmiştir:

- 1) Gayri safi yurtiçi hasıla (GSYH)
- 2) Popülasyon
- 3) İthalat
- 4) İhracat

Özkan (2018) çalışmasında; Türkiye İstatistik Kurumu (TÜİK), Uluslararası Enerji Ajansı (IEA) ve OECD tarafından yayınlanan verilerle Tablo 3'teki veri setini oluşturmuştur. Tablo 3'te, 1979 – 2015 yılları arasındaki Türkiye'nin enerji talep miktarları ve bu talebe etki eden dört faktörün değerleri sunulmuştur. Literatürde (Toksarı, 2007; Ünler, 2008), bu dört faktöre dayalı olarak enerji talebinin tahmin edilebilmesi için iki farklı matematiksel model kullanılmıştır. Bunlardan ilki Denklem (1)'de verilen doğrusal (lineer) modeldir.

$$E_{lineer} = w_1 + w_2 \cdot x_1 + w_3 \cdot x_2 + w_4 \cdot x_3 + w_5 \cdot x_4 \quad (1)$$

Denklem (1)'deki  $x_1$ ,  $x_2$ ,  $x_3$  ve  $x_4$  girdi parametreleri sırasıyla Tablo 3'te verilen GSYH, nüfus, ithalat ve ihracat değerlerini;  $w_2$ ,  $w_3$ ,  $w_4$  ve  $w_5$  ise sırasıyla bu değerlerin ağırlık katsayılarını ifade etmektedir. Modeldeki  $w_1$  serbest ağırlık katsayısını,  $E_{lineer}$  ise modelin enerji talep tahmin sonucunu ifade eder.

**Tablo 3.** Türkiye'nin 1979 – 2015 Yılları Arasındaki GSYH, Nüfus, İthalat ve İhracat Değerleri

Yıl	GSYH (\$10 <sup>9</sup> )	Nüfus (10 <sup>6</sup> )	İthalat (\$10 <sup>9</sup> )	İhracat (\$10 <sup>9</sup> )	Enerji Talebi (MTOE)
1979	81	43,53	5,07	2,26	30,25
1980	68	44,438	7,91	2,91	31,45
1981	71	45,54	8,93	4,7	31,71
1982	64	46,688	8,84	5,75	33,7
1983	60	47,864	9,24	5,73	35,68
1984	59	49,07	10,76	7,13	37,11
1985	67	50,306	11,34	7,95	39,32
1986	75	51,433	11,1	7,46	42,36
1987	86	52,561	14,16	10,19	46,97
1988	90	53,715	14,34	11,66	47,29
1989	107	54,893	15,79	11,62	49,1
1990	150	56,203	22,3	12,96	52,7
1991	149	57,305	21,05	13,59	51,98
1992	157	58,401	22,87	14,72	53,63
1993	178	59,491	29,43	15,35	56,89
1994	132	60,576	23,27	18,11	56,21
1995	168	61,644	35,71	21,64	61,57
1996	181	62,697	43,63	23,22	66,92
1997	189	62,48	48,56	26,26	70,41
1998	207	63,459	45,92	26,97	71,74
1999	187	64,345	40,67	26,59	70,43



2000	200	67,461	54,5	27,78	75,92
2001	146	68,618	41,4	31,33	70,2
2002	181	69,626	51,55	36,06	74,21
2003	239	70,712	69,34	47,25	77,87
2004	299	71,789	97,54	63,17	80,72
2005	361	72,065	116,77	73,48	84,21
2006	400	72,974	139,58	85,53	93,15
2007	648	70,586	169,99	107,15	100
2008	742	71,517	201,96	132,02	98,7
2009	616	72,561	140,78	102,17	97,79
2010	731	73,723	185,49	113,93	106,65
2011	772	74,724	240,84	134,91	113,46
2012	786	75,627	236,55	152,46	118,14
2013	820	76,667	251,65	151,87	116,85
2014	780	77,695	242,18	157,61	121,5
2015	720	78,741	207,2	143,94	128,81

Diğer model ise Denklem (2)'de verilen ikinci dereceden (quadratic) modeldir.

$$E_{quadratic} = w_1 + w_2 \cdot x_1 + w_3 \cdot x_2 + w_4 \cdot x_3 + w_5 \cdot x_4 + w_6 \cdot x_1 \cdot x_2 + w_7 \cdot x_1 \cdot x_3 + w_8 \cdot x_1 \cdot x_4 + w_9 \cdot x_2 \cdot x_3 + w_{10} \cdot x_2 \cdot x_4 + w_{11} \cdot x_3 \cdot x_4 + w_{12} \cdot x_1^2 + w_{13} \cdot x_2^2 + w_{14} \cdot x_3^2 + w_{15} \cdot x_4^2 \quad (2)$$

Denklem (2)'deki  $x_1 - x_4$  ve  $w_1 - w_5$  Denklem (1)'deki ile aynı görevi yerine getirir. Denklemdeki  $w_6 - w_{11}$  katsayıları ise girdi parametrelerinin ikili kombinasyonlarının ağırlıklarını,  $w_{12} - w_{15}$  ise girdi parametrelerinin ikinci dereceden kuvvetlerinin ağırlık katsayılarını ifade etmektedir.  $E_{quadratic}$  ise modelin enerji talep tahmin sonucunu ifade eder.

Ağırlık katsayıları belirlendikten sonra Denklem (1) ve Denklem (2)'deki modellerle her bir yıl için enerji talep tahminleri hesaplanır. Bu tahminlerin, Tablo 3'teki enerji talep değerlerine yakın değerler üretmesi hedeflenir. Bu hedefi gerçekleştirmek için Denklem (3)'te verilen toplam karesel hata (sum squared error, SSE) matematiksel modeli amaç fonksiyonu olarak kullanılmıştır.

$$SSE = \text{Min } f(W) = \sum_{r=1}^R (E_r^{gercek} - E_r^{tahmin})^2 \quad (3)$$

Burada  $W$  ağırlık vektörünü,  $R$  toplam yıl (örnek) sayısını,  $r = 1, 2, \dots, R$  tahmin edilen yılın indisini,  $E_r^{gercek}$  ve  $E_r^{tahmin}$   $r$ .yıl için sırasıyla gerçek ve tahmin edilen enerji talep değerlerini ifade etmektedir. Burada hedef, SSE metriğini minimize edecek ağırlık katsayılarını bulmaktır.

SSE metriğinin örnek sayısına bölünmesi ile Denklem (4)'te verilen ortalama karesel hata (mean squared error, MSE), MSE değerinin karekökünün alınması ile de Denklem (5)'te verilen ortalama karesel hatanın karekökü (root mean squared error, RMSE) metrikleri elde edilir.

$$MSE = \frac{SSE}{R} \quad (4)$$

$$RMSE = \sqrt{MSE} \quad (5)$$

Her yılki enerji talep tahminlerinin yüzde bağıl hatası (absolute percentage error, APE) Denklem (6) ile, yüzde bağıl hataların ortalaması (mean absolute percentage error, MAPE) ise Denklem (7) ile hesaplanır.

$$APE_r = \text{abs}(E_r^{observed} - E_r^{predicted}) * 100 / E_r^{observed} \quad (6)$$

$$MAPE = \frac{1}{R} \sum_{r=1}^R APE_r \quad (7)$$

**Deniz Avcıları Algoritması (Marine Predators Algorithm, MPA)**

MPA, Faramarzi vd. (2020) tarafından okyanuslardaki av–avcı arasındaki biyolojik etkileşimde optimal karşılaşma oranı politikasından ilham alan, bir metasezgisel bir algoritmadır.

### MPA'nın konum güncelleme mekanizması

MPA, deniz canlılarının av – avcı durumundaki hızlarını dikkate alarak üç farklı konum güncelleme mekanizmasına (KGM) sahiptir:

KGM-1) Av, avcıdan daha hızlı hareket ettiğinde:

Bu senaryo, algoritmanın keşif (genel arama) sürecinde olduğu ilk yinelemelerde ortaya çıkar. Bu durumda avcı için en iyi strateji hiç hareket etmemektir.  $MakIter$  sonlandırma kriterini,  $iter$  o anki iterasyonu tanımlamak üzere  $iter < 1/3 MakIter$  iken, avların konumları Denklem (8) kullanılarak güncellenir.

$$\begin{aligned}\overrightarrow{stepsize}_i &= \vec{R}_B \otimes (\overrightarrow{Elite}_i - \vec{R}_B \otimes \overrightarrow{Prey}_i) \quad i = 1, \dots, n \\ \overrightarrow{Prey}_i &= \overrightarrow{Prey}_i + P \cdot \vec{R} \otimes \overrightarrow{stepsize}_i\end{aligned}\quad (8)$$

Burada  $n$  popülasyondaki toplam av sayısını,  $Prey_i$  i. avın konumunu,  $Elite_i$  (avcı) popülasyondaki en iyi uygunluğa sahip bireyi ifade eder.  $R_B$ , Denklem (9)'da verilen Brownian hareketini temsil eder ve normal dağılıma göre rastgele sayılardan oluşan bir vektördür,  $\otimes$  sembolü ise girişlerin çarpımını temsil eder.  $\vec{R}_B \otimes \overrightarrow{Prey}_i$  avın hareketini tanımlar.  $P = 0,5$  bir sabittir ve  $R$   $[0,1]$  aralığında rastgele sayılardan oluşan bir vektördür.

$$f_B(x; \mu, \sigma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{x^2}{2}\right) \quad (\mu = 0), \quad (\sigma^2 = 1) \quad (9)$$

KGM-2) Av ve avcı yaklaşık olarak aynı hızla hareket ettiğinde:

Bu senaryo, keşfin sömürüye (yerel arama) dönüştüğü ara aşamadır. Bu aşamada hem keşif hem de sömürü önemlidir ve popülasyonun yarısı keşif, diğer yarısı ise sömürü için kullanılır.  $1/3 MakIter < iter < 2/3 MakIter$  iken popülasyonun ilk yarısının konumu sömürü amacıyla Denklem (10) ile güncellenir.

$$\begin{aligned}\overrightarrow{stepsize}_i &= \vec{R}_L \otimes (\overrightarrow{Elite}_i - \vec{R}_L \otimes \overrightarrow{Prey}_i) \quad i = 1, \dots, n/2 \\ \overrightarrow{Prey}_i &= \overrightarrow{Prey}_i + P \cdot \vec{R} \otimes \overrightarrow{stepsize}_i\end{aligned}\quad (10)$$

Burada  $R_L$ , Lévy dağılımına dayanan rastgele sayıların bir vektörüdür. Avlar  $\vec{R}_L \otimes \overrightarrow{Prey}_i$  matematiksel modeline göre küçük adımlar oluşturur ve avların konum güncellemesi taklit edilir.

Popülasyonun ikinci yarısının konumu ise keşif amacıyla Denklem (11) ile güncellenir.

$$\begin{aligned}\overrightarrow{stepsize}_i &= \vec{R}_B \otimes (\vec{R}_B \otimes \overrightarrow{Elite}_i - \overrightarrow{Prey}_i) \quad i = n/2, \dots, n \\ \overrightarrow{Prey}_i &= \overrightarrow{Elite}_i + P \cdot CF \otimes \overrightarrow{stepsize}_i\end{aligned}\quad (11)$$

Avcının konumu Brownian hareketinin etkisiyle güncellenir. CF, avcının konumu güncellenirken adım boyutunu kontrol eden adaptif bir parametredir ve Denklem (12) kullanılarak hesaplanır.

$$CF = \left(1 - \frac{Iter}{Max\_Iter}\right)^{\left(2 \frac{Iter}{Max\_Iter}\right)} \quad (12)$$

KGM-3) Avcı, avdan daha hızlı hareket ettiğinde:

Bu durumla genellikle arama sürecinin son evresinde ( $iter > 2/3 MakIter$ ) karşılaşılır. Yüksek sömürüye ihtiyaç duyulan bir evredir. Avcılar için en iyisi Denklem (13) ile Lévy tarzı arama yapmaktır.

$$\begin{aligned}\overrightarrow{stepsize}_i &= \vec{R}_L \otimes (\vec{R}_L \otimes \overrightarrow{Elite}_i - \overrightarrow{Prey}_i) \quad i = 1, \dots, n \\ \overrightarrow{Prey}_i &= \overrightarrow{Elite}_i + P \cdot CF \otimes \overrightarrow{stepsize}_i\end{aligned}\quad (13)$$

Burada  $\vec{R}_L \otimes \overrightarrow{Elite}_i$  işlemi avcının Lévy tarzı hareketini simüle eder.

**Balık toplama cihazları (Fish aggregating devices, FADs)**

Yukarıda belirtilen adımların yanı sıra, MPA deniz avcılarının besin arama stratejilerini daha iyi modellemek için Denklem (14)'te verilen balık toplama cihazları (Fish Aggregating Devices, FADs) veya girdap dönüşümü olarak adlandırılan hareketi de taklit eder.

$$\vec{Prey} = \begin{cases} \vec{Prey} + CF[\vec{X}_{min} + \vec{R} \otimes (\vec{X}_{max} - \vec{X}_{min})] \otimes \vec{U} & \text{if } r \leq FADs \\ \vec{Prey} + [FADs(1-r) + r](\vec{Prey}_{r1} - \vec{Prey}_{r2}) & \text{if } r > FADs \end{cases} \quad (14)$$

Burada  $r(0, 1)$  aralığında rastgele bir sayı ve  $\vec{U}$  çözülen problemle aynı boyuta sahip ikili bir vektördür.  $\vec{U}$  vektörünün her bir boyutu için  $(0, 1)$  aralığında rastgele bir sayı üretilir. Üretilen sayı  $FADs = 0.2$  değerinden küçükse  $\vec{U}$  vektörünün ilgili boyutu 1, değilse 0 değerini alır. Yukarıdaki birinci model avların konumlarının  $\vec{U}$  vektörüne göre rastgele olarak dağılma olasılığını ifade eder. İkinci modeldeki  $r_1$  ve  $r_2$  ise av matrisinin rastgele indisleridir (Arslan, 2023).

**Deniz hafızası**

Deniz avcılarının bol miktarda avın bulunduğu yerleri hatırlama konusunda iyi bir hafızaları vardır. MPA'da deniz yırtıcılarının bu yeteneği açgözlü arama yöntemiyle uygulanmaktadır. Her avın uygunluk değeri bir önceki yinelemedeki uygunluk değeriyle karşılaştırılır ve daha iyi olan bir sonraki yineleme için kullanılır. O ana kadar elde edilen en iyi çözüm *Elite* matriste tutulur.

MPA'nın sözde kodu Şekil 1'de verilmiştir.

---

```

Arama ajanları (av) popülasyonunu başlat  $i = 1, \dots, n$ 
While  $iter < MakIter$ 
    Uygunluğu hesapla, Elite matrisi oluştur ve deniz hafızasını kullan
     $iter++$ 
    If  $iter < MakIter/3$  ise
        Avı KGM-1'e göre güncelle
    Elseif  $MakIter/3 < iter < 2 * MakIter/3$ 
        Avı KGM-2'ye göre güncelle
    Elseif  $iter > 2 * MakIter/3$  ise
        Avı KGM-3'e göre güncelle
    End if
    Uygunluğu hesapla, Elite matrisi oluştur, deniz hafızasını kullan
    Elite matrisi güncelle
     $iter++$ 
    FADs etkisini uygulama
End while
Elite bireyi gönder

```

---

Şekil 1. MPA'nın Sözde Kodu

**PERFORMANS ANALİZİ VE İSTATİSTİKSEL BULGULAR**

Çalışmada MPA, AOA (Hashim vd., 2021), DEA (Storn ve Price, 1997), GWO (Mirjalili vd., 2014) ve MFO (Karakoyun ve Özkış, 2021; Mirjalili, 2015) algoritmaları ile oluşturulan doğrusal ve ikinci dereceden regresyon modellerinin elde ettikleri ağırlık katsayıları, *SSE*, *MSE*, *RMSE*, *APE* ve *MAPE* değerleri sunulmuştur. Tüm algoritmalar 100 birey ve 5000 iterasyon için 30 tekrarlı olarak çalıştırılmıştır. Algoritmalara özgü parametreler Tablo 4'te verilmiştir.

**Doğrusal Modelle İlgili Performans Karşılaştırmaları**

Tablo 5'te algoritmaların doğrusal model için 30 çalıştırma sonucunda elde ettiği en iyi *SSE*, *MSE* ve *RMSE* metrik değerleri ve bu değerleri üreten ağırlıklar verilmiştir.

**Tablo 4.** Algoritmaların Özgü Parametre Değerleri

Algoritma	Parametre Değerleri
MPA	P = 0,5 FADs = 0,2
AOA	C1 = 1 C2 = 2 C3 = 1 C4 = 1 u = 0,9 l = 0,1
DEA	CR = 0,9 F = 0,5
GWO	a = [0, 2]
MFO	b = 1

**Tablo 5.** Algoritmaların Doğrusal Model için Elde Ettiği En İyi SSE, MSE Ve RMSE Değerleri ve Ağırlıkları

	MPA	AOA	DEA	GWO	MFO
$w_1$	-51,224479	-51,221094	-51,224479	-51,230486	-51,224481
$w_2$	0,019056	0,019059	0,019056	0,019078	0,019056
$w_3$	1,784920	1,784861	1,784920	1,784978	1,784920
$w_4$	0,006418	0,005541	0,006418	0,006557	0,006418
$w_5$	0,125734	0,127109	0,125734	0,125421	0,125734
<b>SSE</b>	<b>244,677</b>	244,679	<b>244,677</b>	<b>244,677</b>	<b>244,677</b>
<b>MSE</b>	<b>6,613</b>	<b>6,613</b>	<b>6,613</b>	<b>6,613</b>	<b>6,613</b>
<b>RMSE</b>	<b>2,572</b>	<b>2,572</b>	<b>2,572</b>	<b>2,572</b>	<b>2,572</b>

Tablo 6'da ise algoritmaların doğrusal model için 30 çalıştırma sonucunda elde ettiği en iyi ve en kötü SSE değerleri, SSE değerlerinin ortalamaları ve standart sapmaları verilmiştir. En iyi sonuçlar incelendiğinde AOA 244,679 değerini elde ederken, diğer algoritmalar ise 244,67 değerini elde ederek ilk sırayı paylaşmıştır. En kötü sonuçlar açısından MFO 8957,074 değeri ile en büyük SSE değerine sahip olurken, AOA 1244,86, GWO ise 269,924 SSE değerine sahip olmuştur. MPA ve DEA ise 244,677 SSE değeri ile en iyi sonucu elde etmişlerdir. Ortalama açısından MPA ve DEA 244,677 değeri ile ilk sırayı paylaşırken, GWO 253,282 ve AOA 287,647 değerleri ile 2. ve 3.sırayı elde etmiştir. MFO ise 2749,253 değeri ile ortalama performans açısından en kötü sonucu elde etmiştir.

**Tablo 6.** Doğrusal Model için 30 Çalıştırma Sonucunda Elde Edilen En İyi ve En Kötü SSE Değerleri, SSE Değerlerinin Ortalaması ve Standart Sapması

	MPA	AOA	DEA	GWO	MFO
En iyi	<b>244,677</b>	244,679	<b>244,677</b>	<b>244,677</b>	<b>244,677</b>
En Kötü	<b>244,677</b>	1244,860	<b>244,677</b>	269,924	8957,074
Ortalama	<b>244,677</b>	287,647	<b>244,677</b>	253,282	2749,253
S. sapma	1,86E-13	1,81E+02	2,36E-13	1,06E+01	3,82E+03

Doğrusal model için elde edilen ağırlık değerleriyle hesaplanan tahminler ve bu tahminlerin APE, toplam APE ve MAPE değerleri Tablo 7'de sunulmuştur. Burada GWO algoritması az bir farkla en iyi toplam APE değerini elde ederken, tüm algoritmaların birbirine yakın ve rekabetçi değerler elde ettiği görülmektedir.

**Tablo 7.** Algoritmaların Doğrusal Model için Elde Ettiği En İyi Ağırlıklarla Hesaplanan Tahminler, APE, Toplam APE ve MAPE Değerleri

Yıl	Gerçek Enerji Talebi	MPA		AOA		DEA		GWO		MFO	
		Tahmin	APE	Tahmin	APE	Tahmin	APE	Tahmin	APE	Tahmin	APE
1979	30,710	31,922	3,947	31,922	3,946	31,922	3,947	31,921	3,942	31,922	3,947
1980	31,970	29,810	6,757	29,808	6,763	29,810	6,757	29,808	6,762	29,810	6,757
1981	32,050	32,081	0,097	32,081	0,095	32,081	0,097	32,079	0,091	32,081	0,097
1982	34,390	34,113	0,806	34,114	0,804	34,113	0,806	34,110	0,813	34,113	0,806
1983	35,700	36,125	1,190	36,125	1,192	36,125	1,190	36,122	1,183	36,125	1,190
1984	37,430	38,451	2,729	38,452	2,731	38,451	2,729	38,449	2,722	38,451	2,729
1985	39,400	40,924	3,868	40,926	3,872	40,924	3,868	40,921	3,861	40,924	3,868
1986	42,470	43,012	1,277	43,013	1,280	43,012	1,277	43,010	1,272	43,012	1,277
1987	46,880	45,602	2,726	45,604	2,722	45,602	2,726	45,600	2,731	45,602	2,726

1988	47,910	47,935	0,051	47,938	0,059	47,935	0,051	47,932	0,046	47,935	0,051
1989	50,710	50,370	0,670	50,373	0,665	50,370	0,670	50,368	0,674	50,370	0,670
1990	52,980	53,560	1,094	53,558	1,092	53,560	1,094	53,559	1,093	53,560	1,094
1991	54,270	55,557	2,372	55,558	2,373	55,557	2,372	55,557	2,371	55,557	2,372
1992	56,680	57,756	1,898	57,756	1,899	57,756	1,898	57,755	1,897	57,756	1,898
1993	60,260	60,187	0,121	60,183	0,129	60,187	0,121	60,188	0,120	60,187	0,121
1994	59,120	61,562	4,131	61,567	4,139	61,562	4,131	61,560	4,127	61,562	4,131
1995	63,680	64,791	1,745	64,790	1,743	64,791	1,745	64,791	1,744	64,791	1,745
1996	69,860	67,342	3,604	67,336	3,613	67,342	3,604	67,343	3,603	67,342	3,604
1997	73,780	69,961	5,176	69,955	5,184	69,961	5,176	69,962	5,175	69,961	5,176
1998	74,710	72,426	3,058	72,423	3,062	72,426	3,058	72,426	3,057	72,426	3,058
1999	76,770	74,516	2,937	74,516	2,936	74,516	2,937	74,515	2,938	74,516	2,937
2000	80,500	76,769	4,635	76,759	4,647	76,769	4,635	76,770	4,634	76,769	4,635
2001	75,400	77,798	3,180	77,804	3,188	77,798	3,180	77,795	3,176	77,798	3,180
2002	78,330	80,784	3,133	80,789	3,139	80,784	3,133	80,782	3,131	80,784	3,133
2003	83,840	85,071	1,468	85,075	1,473	85,071	1,468	85,069	1,466	85,071	1,468
2004	87,820	90,039	2,527	90,040	2,528	90,039	2,527	90,037	2,525	90,039	2,527
2005	91,580	95,889	4,705	95,887	4,703	95,889	4,705	95,888	4,704	95,889	4,705
2006	99,590	99,876	0,287	99,872	0,283	99,876	0,287	99,878	0,289	99,876	0,287
2007	107,630	99,471	7,581	99,470	7,582	99,471	7,581	99,471	7,581	99,471	7,581
2008	106,270	105,982	0,271	105,987	0,266	105,982	0,271	105,981	0,272	105,982	0,271
2009	106,140	107,143	0,945	107,161	0,962	107,143	0,945	107,145	0,947	107,143	0,945
2010	109,270	108,927	0,314	108,922	0,319	108,927	0,314	108,929	0,312	108,927	0,314
2011	114,480	114,583	0,090	114,558	0,068	114,583	0,090	114,589	0,095	114,583	0,090
2012	118,140	119,429	1,091	119,432	1,094	119,429	1,091	119,430	1,092	119,429	1,091
2013	116,850	121,956	4,370	121,945	4,361	121,956	4,370	121,960	4,373	121,956	4,370
2014	121,500	123,690	1,802	123,695	1,806	123,690	1,802	123,690	1,802	123,690	1,802
2015	128,810	122,470	4,922	122,487	4,909	122,470	4,922	122,468	4,923	122,470	4,922
Toplam APE		91,576		91,625		91,576		<b>91,546</b>		91,576	
MAPE		2,475		2,476		2,475		<b>2,474</b>		2,475	

Tablo 8’de ise algoritmaların doğrusal model için 30 çalıştırma sonucunda elde ettiği en iyi ve en kötü *Toplam APE* değerleri, *Toplam APE* değerlerinin ortalamaları ve standart sapmaları verilmiştir. Elde edilen en iyi sonuçlar incelendiğinde tüm algoritmaların küçük farklarla benzer değerler elde ettiği görülmektedir. En kötü değerlere bakıldığında ise MFO 932,025 ile en büyük *Toplam APE* değerine sahip olurken, AOA 331,864, GWO 102,634, MPA ve DEA ise 91,576 değerine sahip olmuştur. Ortalama açısından MPA ve DEA 91,576 değeri ile ilk sırayı paylaşırken, GWO 94,147 ve AOA 103,339 değerleri ile 2. ve 3.sırayı elde etmiştir. MFO ise 360,264 değeri ile ortalama performans açısından en kötü sonucu elde etmiştir. Standart sapma değerleri incelendiğinde, MPA ve DEA’nın 30 çalıştırmanın tamamında neredeyse aynı performansı elde ettiği ve sifıra yakın bir standart sapmaya sahip olduğu görülmektedir. Bu durum, her iki algoritmanın doğrusal model için kararlı bir yapıya sahip olduğunu gösterir.

**Tablo 8.** Doğrusal Model için 30 Çalıştırma Sonucunda Elde Edilen En İyi ve En Kötü *Toplam APE* Değerleri, *Toplam APE* Değerlerinin Ortalaması ve Standart Sapması

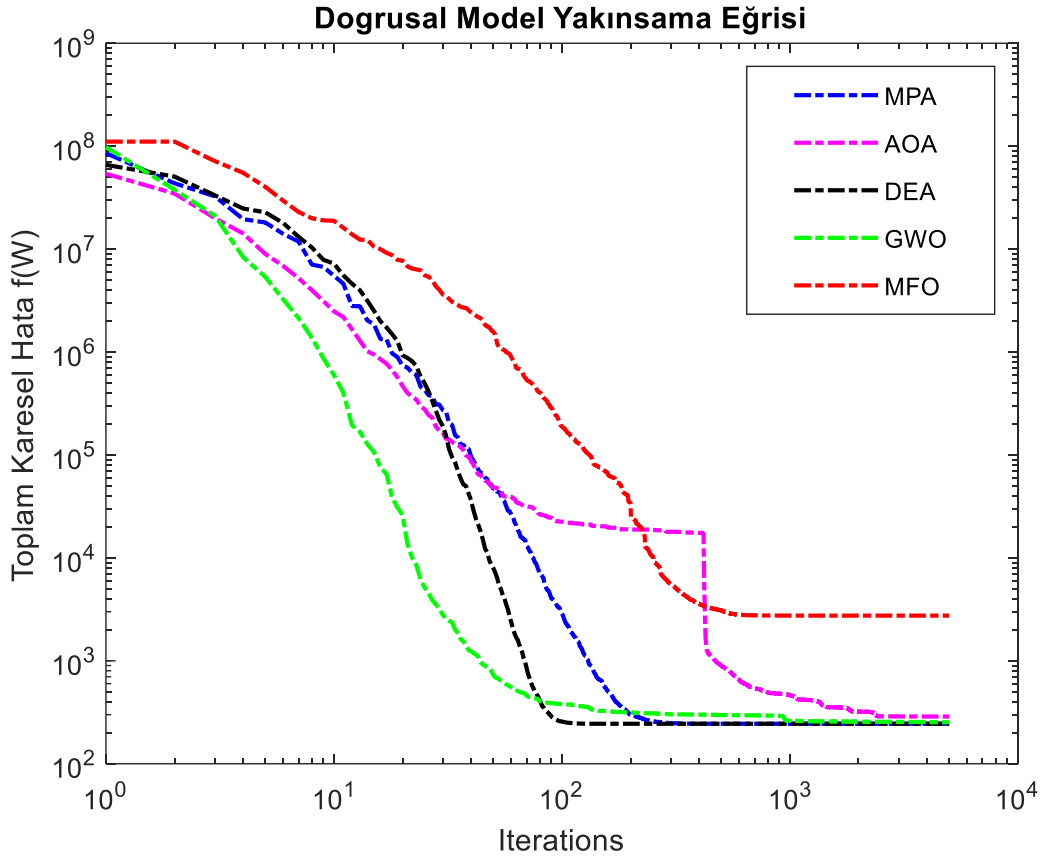
	MPA	AOA	DEA	GWO	MFO
En iyi	91,576	90,912	91,576	<b>90,902</b>	91,576
En Kötü	<b>91,576</b>	331,864	<b>91,576</b>	102,634	932,025
Ortalama	<b>91,576</b>	103,339	<b>91,576</b>	94,147	360,264
S. sapma	5,44E-07	4,34E+01	5,28E-07	4,41E+00	3,61E+02

Doğrusal modelde, algoritmaların her iterasyon için elde ettiği *SSE* değerleri kullanılarak yakınsama grafikleri oluşturulmuş ve Şekil 2’de sunulmuştur. Buradan MPA ve DEA’nın diğer algoritmalarından daha başarılı bir yakınsama performansına sahip olduğu gözlenmektedir.

### **İkinci Dereceden Modelle İlgili Performans Karşılaştırmaları**

Tablo 9’da algoritmaların ikinci dereceden model için 30 çalıştırma sonucunda elde ettiği en iyi *SSE*, *MSE* ve *RMSE* metrik değerleri ve bu değerleri üreten ağırlıklar verilmiştir.





Şekil 2. Algoritmaların Doğrusal Model için Yakınsama Grafiği

Tablo 9. Algoritmaların İkinci Dereceden Model için Elde Ettiği En İyi *SSE*, *MSE* ve *RMSE* Değerleri ve Ağırlıkları

	MPA	AOA	DEA	GWO	MFO
$w_1$	-68,408165	0,002728	-68,406015	1,987522	100,000000
$w_2$	-0,262545	-0,001249	-0,262558	0,000097	100,000000
$w_3$	2,619311	0,000331	2,619246	-0,043970	-100,000000
$w_4$	3,956309	0,012023	3,956221	-0,020622	-100,000000
$w_5$	-4,329726	0,175248	-4,329523	-0,213955	-100,000000
$w_6$	0,005889	0,001468	0,005889	-0,000095	-2,922746
$w_7$	-0,003094	-0,000291	-0,003094	-0,002179	0,950379
$w_8$	0,010866	0,000192	0,010866	-0,000407	-7,452941
$w_9$	-0,056668	0,000282	-0,056666	-0,001113	4,142511
$w_{10}$	0,057130	-0,005220	0,057127	0,008616	3,288050
$w_{11}$	-0,016784	-0,000581	-0,016786	0,000551	26,888251
$w_{12}$	-0,000690	-0,000064	-0,000690	0,000305	0,626126
$w_{13}$	-0,010023	0,014076	-0,010023	0,016097	2,203389
$w_{14}$	0,010676	0,000547	0,010677	0,004103	-10,174738
$w_{15}$	-0,013351	0,001624	-0,013351	0,000219	-2,280638
<b>SSE</b>	<b>79,001</b>	210,526	<b>79,001</b>	472,734	91085030,841
<b>MSE</b>	<b>2,135</b>	5,690	<b>2,135</b>	12,777	2461757,590
<b>RMSE</b>	<b>1,461</b>	2,385	<b>1,461</b>	3,574	1568,999

Tablo 10'da ise algoritmaların ikinci dereceden model için 30 çalıştırma sonucunda elde ettiği en iyi ve en kötü *SSE* değerleri, *SSE* değerlerinin ortalamaları ve standart sapmaları verilmiştir. En iyi sonuçlar incelendiğinde, MPA ve

DEA 79,001 değeriyle ilk sırayı paylaşırken, AOA 210,526, GWO 472,734 değerleriyle 2. ve 3. sırayı elde etmiştir. MFO ise en iyi olarak 91085030,841 SSE değerini elde ederek diğer algoritmalara göre oldukça başarısız bir performans göstermiştir. En kötü sonuçlar açısından MFO 400236548396,422 değeri ile en büyük SSE değerine sahip olurken, GWO 2895433845,587, AOA ise 4234,821 SSE değerine sahip olmuştur. DEA 82,225 ile en iyi 2. değeri elde ederken, MPA 79,001 ile en iyi sonucu elde etmiştir. Ortalama açısından MPA 79,001 SSE değeri ile ilk sırayı alırken, DEA 79,186 SSE değeri ile az farkla 2. olmuştur. AOA 502,861 değeri ile 3. olurken GWO 155091179,635 ile 4. ve son olarak MFO 71693180344,079 değeri ile en kötü sonucu elde etmiştir.

**Tablo 10.** İkinci Dereceden Model için 30 Çalıştırma Sonucunda Elde Edilen En İyi ve En Kötü SSE Değerleri, SSE Değerlerinin Ortalaması ve Standart Sapması

	MPA	AOA	DEA	GWO	MFO
En iyi	79,001	210,526	79,001	472,734	91085030,841
En Kötü	79,001	4234,821	82,225	2895433845,587	400236548396,422
Ortalama	79,001	502,861	79,186	155091179,635	71693180344,079
S. sapma	4,65E-07	8,67E+02	6,12E-01	5,35E+08	1,01E+11

İkinci dereceden model için elde edilen ağırlık değerleriyle hesaplanan tahminler ve bu tahminlerin APE, toplam APE ve MAPE değerleri Tablo 11’de sunulmuştur. Burada 61,957 toplam APE değeri ile MPA ve DEA ilk sırayı paylaşırken, AOA 91,97 ile 2. ve GWO ise 142,664 ile 3. sırayı almıştır. MFO 49518,999 değeri ile diğer algoritmaların oldukça gerisinde kalmıştır.

**Tablo 11.** Algoritmaların İkinci Dereceden Model için Elde Ettiği En İyi Ağırlıklarla Hesaplanan Tahminler, APE, Toplam APE ve MAPE Değerleri

Yıl	Gerçek Enerji Talebi	MPA		AOA		DEA		GWO		MFO	
		Tahmin	APE	Tahmin	APE	Tahmin	APE	Tahmin	APE	Tahmin	APE
1979	30,710	29,703	3,279	34,060	10,909	29,703	3,279	34,236	11,481	1223,111	3882,777
1980	31,970	31,770	0,625	31,817	0,479	31,770	0,625	31,913	0,180	669,186	1993,168
1981	32,050	32,621	1,782	33,463	4,408	32,621	1,782	33,667	5,045	359,250	1020,906
1982	34,390	33,821	1,655	34,550	0,464	33,821	1,655	35,414	2,979	-109,997	419,851
1983	35,700	36,627	2,597	35,953	0,709	36,627	2,597	37,081	3,869	-96,632	370,678
1984	37,430	38,788	3,629	37,564	0,359	38,788	3,629	39,038	4,295	-98,120	362,142
1985	39,400	40,580	2,994	39,829	1,088	40,580	2,994	41,172	4,498	-222,008	663,471
1986	42,470	42,806	0,792	42,034	1,027	42,806	0,792	43,031	1,320	-229,145	639,547
1987	46,880	44,924	4,173	44,339	5,420	44,924	4,173	45,214	3,555	-411,539	977,856
1988	47,910	45,996	3,996	46,333	3,291	45,996	3,996	47,579	0,690	-823,009	1817,823
1989	50,710	49,300	2,780	49,386	2,610	49,300	2,780	49,731	1,932	-670,820	1422,855
1990	52,980	53,323	0,648	53,978	1,884	53,323	0,648	52,099	1,663	1032,123	1848,137
1991	54,270	54,692	0,777	55,791	2,802	54,692	0,777	54,516	0,454	251,397	363,234
1992	56,680	57,030	0,617	58,089	2,487	57,030	0,617	56,655	0,044	197,527	248,495
1993	60,260	60,274	0,023	61,238	1,623	60,274	0,023	58,087	3,605	1921,819	3089,212
1994	59,120	60,845	2,918	60,123	1,697	60,845	2,918	61,041	3,250	-1638,339	2871,209
1995	63,680	66,569	4,537	64,446	1,204	66,569	4,537	62,771	1,427	-356,126	659,244
1996	69,860	70,600	1,059	67,419	3,494	70,600	1,059	64,600	7,530	237,752	240,326
1997	73,780	73,308	0,640	69,979	5,152	73,308	0,640	67,391	8,660	32,517	55,927
1998	74,710	74,013	0,933	73,136	2,107	74,013	0,933	70,544	5,577	-435,837	683,372
1999	76,770	75,458	1,709	74,761	2,616	75,458	1,709	74,248	3,285	-1453,532	1993,359
2000	80,500	78,698	2,238	77,667	3,519	78,699	2,238	75,306	6,453	-162,254	301,558
2001	75,400	74,113	1,707	75,432	0,043	74,113	1,707	80,482	6,740	681,210	803,461
2002	78,330	78,730	0,510	79,641	1,674	78,730	0,510	83,081	6,065	159,552	103,692
2003	83,840	84,148	0,368	85,001	1,385	84,148	0,368	87,115	3,906	-355,707	524,269
2004	87,820	88,105	0,325	90,401	2,939	88,105	0,325	93,198	6,124	2012,042	2191,098
2005	91,580	94,405	3,084	97,617	6,592	94,405	3,084	99,608	8,766	1166,033	1173,240
2006	99,590	100,739	1,154	102,052	2,472	100,739	1,154	98,089	1,507	-1636,964	1743,704
2007	107,630	102,573	4,699	99,746	7,325	102,573	4,699	98,382	8,592	2305,722	2042,267
2008	106,270	108,624	2,215	105,281	0,930	108,624	2,215	102,585	3,468	3065,087	2784,245
2009	106,140	106,100	0,038	106,223	0,078	106,100	0,038	108,204	1,944	1285,748	1111,370

2010	109,270	108,648	0,569	110,013	0,680	108,648	0,569	107,264	1,836	-733,441	771,219
2011	114,480	115,170	0,603	112,781	1,484	115,170	0,603	115,720	1,083	-2640,635	2406,635
2012	118,140	119,253	0,942	117,986	0,130	119,253	0,942	116,363	1,504	890,493	653,761
2013	116,850	116,019	0,711	119,036	1,871	116,019	0,711	119,421	2,200	1148,252	882,672
2014	121,500	121,342	0,130	124,835	2,745	121,342	0,130	127,138	4,641	1877,544	1445,303
2015	128,810	128,166	0,500	125,880	2,275	128,166	0,500	125,594	2,496	-6256,193	4956,916
Toplam APE		<b>61,957</b>		91,970		<b>61,957</b>		142,664			49518,999
MAPE		<b>1,675</b>		2,486		<b>1,675</b>		3,856			1338,351

Tablo 12’de ise algoritmaların ikinci dereceden model için 30 çalıştırma sonucunda elde ettiği en iyi ve en kötü *Toplam APE* değerleri, *Toplam APE* değerlerinin ortalamaları ve standart sapmaları verilmiştir. Elde edilen en iyi sonuçlar incelendiğinde DEA 60,285 ile ilk sırada yer alırken, MPA 61,955 ile 2., AOA 91,97 ile 3., GWO 142,664 ile 4. olmuştur. En kötü değerlere bakıldığında ise MFO 5728800 ile en büyük *Toplam APE* değerine sahip olurken, GWO 325880, AOA 537,286, DEA 63,629 ve MPA 61,959 değerine sahip olmuştur. Ortalama açısından MPA 61,957 değeri ile ilk sırada yer alırken, DEA 61,959 ile 2., AOA 136,756 ile 3., GWO 39343 ile 4. ve MFO 1555800 değeri ile son sırada yer almıştır. Standart sapma değerleri incelendiğinde, MPA’nın 30 çalıştırmanın tamamında neredeyse aynı performansı elde ettiği ve sıfıra yakın bir standart sapmaya sahip olduğu görülmektedir. Bu durum, MPA’nın ikinci dereceden model için kararlı bir yapıya sahip olduğunu gösterir.

**Tablo 12.** İkinci Dereceden Model için 30 Çalıştırma Sonucunda Elde Edilen En İyi ve En Kötü *Toplam APE* Değerleri, *Toplam APE* Değerlerinin Ortalaması ve Standart Sapması

	MPA	AOA	DEA	GWO	MFO
En iyi	61,955	91,970	<b>60,285</b>	142,664	49519,000
En Kötü	<b>61,959</b>	537,286	63,629	325880,000	5728800,000
Ortalama	<b>61,957</b>	136,756	61,959	39343,000	1555800,000
S. sapma	1,10E-03	1,03E+02	5,39E-01	6,78E+04	1,59E+06

Şekil 3’te ikinci dereceden model için algoritmaların 30 çalıştırma sonucunda elde ettikleri ortalama yakınsama grafikleri sunulmuştur. Buradan doğrusal modelde olduğu gibi MPA ve DEA’nın diğer algoritmalarından daha başarılı bir yakınsama performansına sahip olduğu gözlenmektedir.

## TARTIŞMA VE SONUÇ

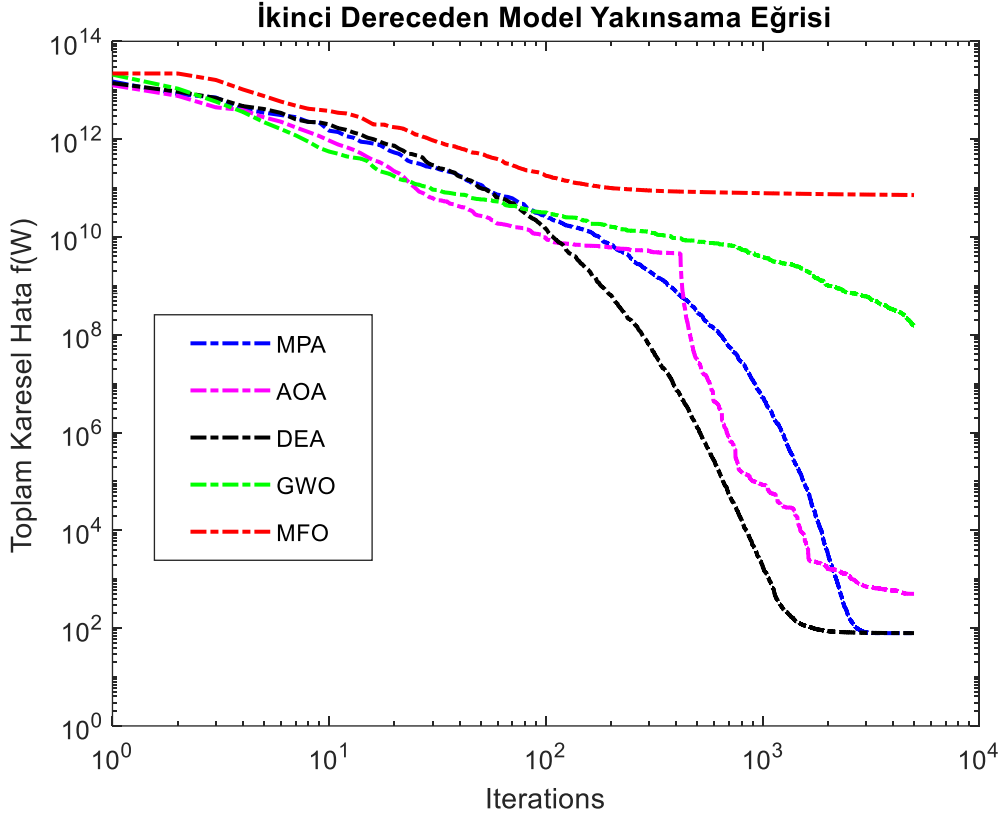
Bu çalışmada, Türkiye’nin enerji talebinin tahmin edilmesine yönelik 1979 – 2015 yılları arasındaki veriler kullanılarak doğrusal ve ikinci dereceden regresyon modelleri geliştirilmiştir. Modellerin geliştirilmesinde MPA, DEA, AOA, GWO ve MFO metasezgisel algoritmalarından faydalanılmıştır. Literatür incelendiğinde MPA’nın bu alanda ilk kez kullanıldığı görülmektedir. Ayrıca literatürdeki önceki çalışmalarda sadece elde edilen en iyi sonuç üzerinden bir kıyaslama yapılırken bu çalışmada en iyi, en kötü, ortalama ve standart sapma üzerinden daha kapsayıcı bir karşılaştırma yapılmıştır.

Doğrusal model için elde edilen sonuçlar incelendiğinde, MPA ve DEA 30 çalıştırma boyunca kararlılıklarını korurken, GWO küçük bir miktar sapma göstermiştir. AOA ve MFO algoritmalarının 30 çalıştırma için elde ettikleri en iyi ve en kötü değerlerin birbirinden oldukça farklı olması, ortalama ve standart sapma değerlerinin de diğer algoritmalarından oldukça büyük olması bu iki algoritmanın kararsız bir yapıda olduklarına işaret etmektedir.

İkinci dereceden model için elde edilen sonuçlar incelendiğinde, MPA 30 çalıştırma boyunca optimum değeri elde ederek kararlılığını ortaya koyarken, DEA küçük bir miktar sapma göstermiştir. AOA ikinci derece modelde yine bir miktar sapma göstererek MPA ve DEA’nın gerisinde kalmıştır. GWO algoritması doğrusal modelin aksine ikinci dereceden modelde büyük bir standart sapmaya sahip olarak başarısız bir performans ortaya koymuştur. MFO algoritması ise her açıdan oldukça başarısız sonuçlar elde ederek bu model için de diğer algoritmaların gerisinde kalmıştır.

Ayrıca, algoritmaların 30 çalıştırma sonucunda elde ettikleri ortalama yakınsama grafikleri incelendiğinde her iki model için de DEA’nın en hızlı yakınsama performansına sahip olduğu, MPA’nın ikinci sırayı alarak rekabetçi bir yakınsama performansına sahip olduğu gözlenmiştir. GWO ve AOA doğrusal modelde son iterasyonlarda DEA ve MPA’nın elde ettiği hata değerine yaklaşmayı başarırken, MFO bir noktadan sonra yerel minimuma takılarak

yakınsama performansını sürdürmemiştir. İkinci derece modelde ise AOA son iterasyonlara doğru DEA ve MPA'nın elde ettiği hata değerine yaklaşırken, GWO ve MFO oldukça kötü bir yakınsama performansı göstermiştir. MPA'nın bu başarısında, arama uzayının detaylı bir şekilde aranmasını sağlayan üçlü konum güncelleme stratejisinin ve algoritmanın yerel minimuma takılmasını önleyen *balık toplama cihazları* hareketinin önemli bir payı olduğu düşünülmektedir. DEA ve MPA dışındaki algoritmaların konum güncelleme stratejilerinde genel en iyi çözümden yoğun bir şekilde faydalanmaları ve yerel minimumlardan kurtulma stratejilerinin olmaması algoritmaların başarısızlığına neden olmuş olabilir.



Şekil 3. Algoritmaların İkinci Dereceden Model için Yakınsama Grafiği

Özetle, tüm karşılaştırma durumları dikkate alındığında MPA'nın enerji tahmin probleminde oldukça kararlı ve başarılı bir algoritma olduğu görülmektedir. Buradan hareketle sonraki çalışmalar için aşağıdaki önerilerde bulunulabilir:

- Bu çalışmada kullanılan doğrusal ve ikinci dereceden model dışındaki regresyon modelleri ile MPA'nın performansı enerji tahmin problemi üzerinde test edilebilir.
- Enerji tahmin problemi dışındaki problemler için MPA tabanlı regresyon modelleri geliştirilebilir.
- MPA başkaca sürekli optimizasyon problemlerinin çözümünde kullanılarak performansı analiz edilebilir.

## KAYNAKLAR

Abd Elminaam, D. S., Nabil, A., Ibraheem, S. A., & Houssein, E. H. (2021). An efficient marine predators algorithm for feature selection. *IEEE Access*, 9, 60136-60153. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3073261>

Abdel-Basset, M., El-Shahat, D., Chakraborty, R. K., & Ryan, M. (2021). Parameter estimation of photovoltaic models using an improved marine predators algorithm. *Energy Conversion Management*, 227, 113491. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113491>

Abdel-Basset, M., Mohamed, R., & Abouhawwash, M. (2022). Hybrid marine predators algorithm for image segmentation: Analysis and validations. *Artificial Intelligence Review*, 1-53. <https://doi.org/10.1007/s10462-021-10086-0>

- Anwar, J. (2016). Analysis of energy security, environmental emission and fuel import costs under energy import reduction targets: A case of Pakistan. *Renewable Sustainable Energy Reviews*, 65, 1065-1078. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.07.037>
- Arslan, S. (2023). Güncel Metasezgisel Algoritmalarının Performansları Üzerine Karşılaştırılmalı Bir Çalışma. *Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi*, 11(4), 1861-1884. <https://doi.org/10.29130/dubited.1150453>
- Aslan, M. (2023). Archimedes optimization algorithm based approaches for solving energy demand estimation problem: a case study of Turkey. *Neural Computing and Applications*, 35(26), 19627-19649. 10.1007/s00521-023-08769-6
- Aslan, M., & Beşkirli, M. (2022). Realization of Turkey's energy demand forecast with the improved arithmetic optimization algorithm. *Energy Reports*, 8, 18-32. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.06.101>
- Baştemur Kaya, C. (2023). On Performance of Marine Predators Algorithm in Training of Feed-Forward Neural Network for Identification of Nonlinear Systems. *Symmetry*, 15(8), 1610. <https://doi.org/10.3390/sym15081610>
- Baum, V. (1984). *Energy planning in developing countries*. USA: Oxford University Press.
- Bilici, Z., & Özdemir, D. (2023). Comparative analysis of metaheuristic optimization algorithms for natural gas demand forecast with meteorological parameters. *Journal of the Faculty of Engineering Architecture of Gazi University*, 38(2), 1153-1167. <https://doi.org/10.1016/j.jer.2023.100127>
- Ceylan, H., & Ozturk, H. K. (2004). Estimating energy demand of Turkey based on economic indicators using genetic algorithm approach. *Energy Conversion Management*, 45(15-16), 2525-2537. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2003.11.010>
- Cihan, P. (2022). Impact of the COVID-19 lockdowns on electricity and natural gas consumption in the different industrial zones and forecasting consumption amounts: Turkey case study. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 134, 107369. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2021.107369>
- de Oliveira, E. M., & Oliveira, F. L. C. (2018). Forecasting mid-long term electric energy consumption through bagging ARIMA and exponential smoothing methods. *Energy*, 144, 776-788. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.12.049>
- Dilaver, Z., & Hunt, L. C. (2011). Industrial electricity demand for Turkey: a structural time series analysis. *Energy Economics*, 33(3), 426-436.
- Ediger, V. Ş., & Tatlıdil, H. (2002). Forecasting the primary energy demand in Turkey and analysis of cyclic patterns. *Energy Conversion and Management*, 43(4), 473-487. [https://doi.org/10.1016/S0196-8904\(01\)00033-4](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(01)00033-4)
- Ekonomou, L. (2010). Greek long-term energy consumption prediction using artificial neural networks. *Energy*, 35(2), 512-517. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2009.10.018>
- Es, H., Kalender Öksüz, F., & Hamzacebi, C. (2014). Forecasting the net energy demand of Turkey by artificial neural networks. *Journal of the Faculty of Engineering Architecture of Gazi University*, 29(3).
- Faramarzi, A., Heidarinejad, M., Mirjalili, S., & Gandomi, A. H. (2020). Marine Predators Algorithm: A nature-inspired metaheuristic. *Expert systems with applications*, 152, 113377. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2020.113377>
- Ghalekhondabi, I., Ardjmand, E., Weckman, G. R., & Young, W. A. (2017). An overview of energy demand forecasting methods published in 2005–2015. *Energy Systems*, 8, 411-447. <http://dx.doi.org/10.1007%2Fs12667-016-0203-y>
- Gorucu, F. B. (2004). Artificial Neural Network Modeling for Forecasting Gas Consumption. *Energy Sources*, 26(3), 299-307. 10.1080/00908310490256626
- Gulcu, S., & Kodaz, H. (2017). The estimation of the electricity energy demand using particle swarm optimization algorithm: A case study of Turkey. *Procedia computer science*, 111, 64-70. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2017.06.011>
- Haldenbilen, S., & Ceylan, H. (2005). Genetic algorithm approach to estimate transport energy demand in Turkey. *Energy Policy*, 33(1), 89-98. [https://doi.org/10.1016/S0301-4215\(03\)00202-7](https://doi.org/10.1016/S0301-4215(03)00202-7)



- Hashim, F. A., Hussain, K., Houssein, E. H., Mabrouk, M. S., & Al-Atabany, W. (2021). Archimedes optimization algorithm: a new metaheuristic algorithm for solving optimization problems. *Applied Intelligence*, 51, 1531-1551. <https://doi.org/10.1007/s10489-020-01893-z>
- Ikram, R. M. A., Ewees, A. A., Parmar, K. S., Yaseen, Z. M., Shahid, S., & Kisi, O. (2022). The viability of extended marine predators algorithm-based artificial neural networks for streamflow prediction. *Applied Soft Computing*, 131, 109739. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2022.109739>
- International Energy Outlook - U.S. Energy Information Administration (EIA). (2023). <https://www.eia.gov/outlooks/ieo/data.php> Erişim: 13.11.2023
- İsmail, K., Nureddin, R., & Kahramanlı, H. (2018). Türkiye'de enerji talebini tahmin etmek için doğrusal form kullanarak gsa (yerçekimi arama algoritması) ve iwo (yabani ot optimizasyon algoritması) tekniklerinin uygulanması. *Selçuk Üniversitesi Mühendislik, Bilim Ve Teknoloji Dergisi*, 6(4), 529-543. <https://doi.org/10.15317/Scitech.2018.150>
- Jangir, P., Buch, H., Mirjalili, S., & Manoharan, P. (2023). MOMPA: Multi-objective marine predator algorithm for solving multi-objective optimization problems. *Evolutionary Intelligence*, 16(1), 169-195. <https://doi.org/10.1007/s12065-021-00649-z>
- Kankal, M., & Uzlu, E. (2017). Neural network approach with teaching–learning-based optimization for modeling and forecasting long-term electric energy demand in Turkey. *Neural Computing Applications*, 28, 737-747. <https://doi.org/10.1007/s00521-016-2409-2>
- Karakoyun, M., & Özkış, A. (2021). Transfer Fonksiyonları Kullanarak İkili Güve-Alev Optimizasyonu Algoritmalarının Geliştirilmesi ve Performanslarının Karşılaştırılması. *Necmettin Erbakan Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 3(2), 1-10. <https://doi.org/10.47112/neufmbd.2021.7>
- Kıran, M. S., Özceylan, E., Gündüz, M., & Paksoy, T. (2012a). A novel hybrid approach based on particle swarm optimization and ant colony algorithm to forecast energy demand of Turkey. *Energy Conversion and Management*, 53(1), 75-83. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2011.08.004>
- Kıran, M. S., Özceylan, E., Gündüz, M., & Paksoy, T. (2012b). Swarm intelligence approaches to estimate electricity energy demand in Turkey. *Knowledge-Based Systems*, 36, 93-103. <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2012.06.009>
- Koc, I., Kivrak, H., & Babaoglu, I. (2019). The estimation of the energy demand in turkey using grey wolf optimizer algorithm. *Annals of the Faculty of Engineering Hunedoara*, 17(1), 113-117.
- Mirjalili, S. (2015). Moth-flame optimization algorithm: A novel nature-inspired heuristic paradigm. *Knowledge-Based Systems*, 89, 228-249. <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2015.07.006>
- Mirjalili, S., Mirjalili, S. M., & Lewis, A. (2014). Grey wolf optimizer. *Advances in engineering software*, 69, 46-61. <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2013.12.007>
- Özdemir, D., Dörterler, S., & Aydın, D. (2022). A new modified artificial bee colony algorithm for energy demand forecasting problem. *Neural Computing and Applications*, 34(20), 17455-17471. <https://doi.org/10.1007/s00521-022-07675-7>
- Özkan, E. (2018). Parçacık Sürü Optimizasyonu ve Genetik Algoritma Kullanarak Türkiye'nin 2050 Yılına Kadar Enerji Tüketim Tahmininin Yapılması. Yüksek Lisans Tezi. Korkut Ata Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Yönetim Bilişim Sistemleri Ana Bilim Dalı, Osmaniye 108s.
- Özkış, A. (2020). A new model based on vortex search algorithm for estimating energy demand of Turkey. *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, 26(5), 959-965. <https://dx.doi.org/10.5505/pajes.2020.74943>
- Ozturk, H. K., Ceylan, H., Canyurt, O. E., & Hepbasli, A. (2005). Electricity estimation using genetic algorithm approach: a case study of Turkey. *Energy*, 30(7), 1003-1012. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2004.08.008>
- Ozturk, S., & Ozturk, F. (2018). Forecasting energy consumption of Turkey by Arima model. *Journal of Asian Scientific Research*, 8(2), 52.
- Storn, R., & Price, K. (1997). Differential evolution—a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces. *Journal of global optimization*, 11, 341-359. <https://doi.org/10.1023/A:1008202821328>

- Suganthi, L., & Samuel, A. A. (2012). Energy models for demand forecasting—A review. *Renewable Sustainable Energy Reviews*, 16(2), 1223-1240. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.08.014>
- TC Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı. Enerji üretim kaynakları ve gelecekteki talep tahminleri.(2023). <https://enerji.gov.tr/bilgi-merkezi-enerji-elektrik#:~:text=2022%20y%C4%B1%20C4%B1nda%20elektrik%20%C3%BCretimimizin%2C%20%34,%C3%BC%20di%C4%9Fer%20kaynaklardan%20elde%20edilmi%C5%9Ftir.> Erişim: 21.12.2023
- Toksarı, M. D. (2007). Ant colony optimization approach to estimate energy demand of Turkey. *Energy Policy*, 35(8), 3984-3990. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2007.01.028>
- Toksarı, M. D. (2009). Estimating the net electricity energy generation and demand using the ant colony optimization approach: case of Turkey. *Energy Policy*, 37(3), 1181-1187. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2008.11.017>
- Top, S., & Vapur, H. (2018). Evolution of energy strategies in Turkey: Forecasts by time series. *Journal of Energy Research Reviews*, 1(4), 1-16.
- Ünler, A. (2008). Improvement of energy demand forecasts using swarm intelligence: The case of Turkey with projections to 2025. *Energy Policy*, 36(6), 1937-1944. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2008.02.018>
- Zergane, S., Smaili, A., & Masson, C. (2018). Optimization of wind turbine placement in a wind farm using a new pseudo-random number generation method. *Renewable Energy*, 125, 166-171. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.02.082>
- Zhong, K., Zhou, G., Deng, W., Zhou, Y., & Luo, Q. (2021). MOMPA: Multi-objective marine predator algorithm. *Computer Methods in Applied Mechanics Engineering*, 385, 114029. <https://doi.org/10.1007/s12065-021-00649-z>



# Kahramanmaraş Sütçü İmam University

## Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 03.01.2024  
Kabul Tarihi : 25.03.2024

Received Date : 03.01.2024  
Accepted Date : 25.03.2024

### ATIK CAM TOZU KATKILI BETONLARIN YÜKSEK SICAKLIK ALTINDAKİ PERFORMANSLARININ İNCELENMESİ

#### INVESTIGATION OF THE PERFORMANCE OF WASTE GLASS POWDER SUBSTITUTED CONCRETES UNDER HIGH TEMPERATURES

Tuba DEMİR<sup>1\*</sup> (ORCID: 0000-0003-2092-1029)

Bahar DEMİREL<sup>1</sup> (ORCID: 0000-0001-7483-2668)

Ayşe Çiğdem ŞİRECI<sup>1</sup> (ORCID: 0000-0001-8465-8624)

<sup>1</sup> Fırat Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Kahramanmaraş, Türkiye

\*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Tuba DEMİR, t.demir@firat.edu.tr

#### ÖZET

Bu çalışmanın amacı atık cam tozu kullanılarak üretilen betonların yüksek sıcaklık öncesi ve sonrası dayanım performanslarındaki değişimini araştırmaktır. Bu doğrultuda, farklı atık cam tozu ikame oranı içeren 6 farklı beton karışım serisi hazırlanmıştır. Üretilen beton serileri üzerinde mekanik testler içeren deneysel bir program yürütülmüştür. Kür süresini tamamlayan beton serileri, sırasıyla 400 °C, 600 °C, 800 °C'de, 1 saat yüksek sıcaklıkta bekletilmiştir. Bu beton gruplarının yüksek sıcaklık sonrası basınç dayanımı kayıpları belirlenmiştir. Betonda atık cam tozu ikamesinin artmasıyla betonun mekanik özelliklerinde azalma görülmüştür. Öte yandan en iyi sonuç cam tozu oranının %10 oranında kullanıldığı serilerde gözlenmiştir. Betonda cam tozu oranının %10'a kadar kullanımının betonun performansını arttırdığı gözlenmiştir. Sonuç olarak, atık cam tozunun yüksek sıcaklığa dayanıklı beton üretiminde çimento ikame malzemesi olarak kullanılabileceği görülmüştür. Çimento miktarında yapılacak bu azaltma ile karbon ayak izi azaltılmış daha çevreci bir beton üretiminin mümkün olabileceği görülmüştür. Ayrıca beton üretiminde atık cam tozu kullanımının, atık yönetimine çözüm ve döngüsel ekonomiye katkı sağlayarak inşaat sektörü için potansiyel bir seçenek haline gelmektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Beton, atık cam tozu, beton basınç dayanımı, yüksek sıcaklık

#### ABSTRACT

This study aims to investigate the changes in the strength performance of concretes produced using waste glass powder before and after high temperature. Accordingly, a series of 6 concretes with different waste glass powder replacement ratios were produced. An experimental program including mechanical tests was carried out on the produced concrete series. Concrete series that completed the curing period were kept at 400 °C, 600 °C, 800 °C, respectively, and compressive strength losses after high temperature were determined. The mechanical properties of concrete decreased with the increase of waste glass powder substitution in concrete. On the other hand, the best results were observed in the series where the glass powder ratio was 10%. It was observed that the use of up to 10% of glass powder in concrete increased the performance of concrete. As a result, it was observed that waste glass powder can be used as a cement replacement material in the production of high temperature resistant concrete. With this reduction in the amount of cement, it has been seen that it is possible to produce a more environmentally friendly concrete with a reduced carbon footprint. In addition, the use of waste glass powder in concrete production becomes a potential option for the construction sector by providing a solution to waste management and contributing to the circular economy.

**Keywords:** Concrete, waste glass powder, concrete compressive strength, high temperature

## GİRİŞ

Yapı sektöründe kullanılan beton, istenilen şeklin verilmesi, ekonomik olması, dayanımının ve durabilitesinin yüksek olması sebebiyle yaygın olarak kullanılmaktadır (Bengal vd., 2022). Kentsel dönüşümlerin, depremler sonrası meydana gelen yıkımların vb. durumlar nedeniyle betonun kullanımı sürekli artmaktadır. Yaşanan bu artış çevre kirliliğinin, endüstriyel atıkların ve doğaya salınan sera gazlarının artışını da beraberinde getirmektedir. Bu durumu en aza indirmek için çok sayıda çalışma yapılmaktadır (Acikgenc Ulas, 2022; Alyamac vd., 2017; Ferdosian vd., 2017). Bu çalışmaların birçoğu beton üretimi sırasında kullanılacak çimento miktarını azaltmaya yöneliktir; kalan kısmı ise atıkların beton kullanımında nasıl geri kazandırılabilirliği şeklindedir. Yapılan bu çalışmalar CO<sub>2</sub> salınımı tamamen ortadan kaldıramasa da minimum seviyede tutmaya yardımcı olmaktadır (Demir ve Alyamaç, 2022). Sanayileşmiş ülkeler arasında sera gazı etkisini azaltmak için Kyoto Antlaşması imzalanmıştır. Bu protokolün maddelerinden biri olan yüksek enerji tüketen ve endüstriyel atık oluşturan üretim tesislerinde atık işlemlerinin yeniden düzenlenmesi açıkça belirtilmiştir (Delay, 2008). Bu düzenlemeler göz önüne alındığında sürdürülebilirlik kavramı üretim alanına uyarlanmaya başlanmıştır. Sürdürülebilirlik, doğal kaynakların kullanımı sürerken, diğer yandan bu kaynakların korunması, tasarrufu, geri kazanımının gerçekleştirilmesi ve gelecek nesillerin de kullanılabilirliğini güvence altına almak olarak tanımlanabilir (Katare vd., 2020) (Demir vd., 2022). İnşaat endüstrisinde sürdürülebilirlik kavramı ise kullanılan malzemenin CO<sub>2</sub> salınımı, tekrar kullanılabilirliği, çevre kirliliği oluşturması, atıkların kullanımı gibi birçok boyuttan ele alınmaktadır (Martínez-Lage vd., 2020). Bir malzemenin sürdürülebilir olması inşaat sektöründe tek parametre değildir. Malzemenin aynı zamanda beton dayanımına olumlu etki yapması da önemli bir parametredir (Monteiro, 2006; Zhong vd., 2018).

Beton endüstrisinde kullanılabilir bir malzeme olarak tercih edilen atık ürünlerden biri cam tozudur. Diğer atık türleri ile birlikte cam tozunun da saklanması, yok edilmesi veya tekrar kullanıma hazır olması önemli bir çalışma konusu olarak ele alınmaktadır (Orhan vd., 2017). Şöyle ki cam tozu, ahşap ve plastik gibi birçok katı atık türüyle karşılaştırıldığında, kimyasal yapısı gereği stabildir (Raju ve Kumar, 2014). Toprağa gömülü kalan cam diğer atık ürünlere nazaran uzun süre biyolojik olarak parçalanamaz (Derinpınar vd., 2022; Shayan vd., 2006). Bununla birlikte bazı kimyasal birleşenleri içeren camlar toprağı ve yeraltı sularını kirletmektedir. Bu durum toplumsal olarak büyük tehdit oluşturmaktadır (Paul vd., 2022). Dünya genelinde yıllık cam üretim miktarı 140 milyon ton seviyesindedir. Bu oran doğal çevre için önemli bir kirlilik anlamına gelmekte aynı zamanda halkın sağlığını tehlikeye atmaktadır (Omran vd., 2016).

Betonda camın geri dönüştürülmesi, katı atık yönetiminde büyük umut vaat etmektedir. Ancak atık camın betondaki etkileri konusunda belli bir kanaat oluşmamıştır. Çünkü bazı literatür çalışmalarında betonda atık cam kullanımının betonun mekanik özelliklerine olumlu etkisi olduğu belirtilirken, bazı çalışmalarda ise betonun performansının düşürdüğü belirtilmektedir. Ayrıca literatür çalışmalarında diğer mineral katkılarla birlikte atık cam tozu (CT) kullanılarak betonun performansı belirlenmiştir. Bu çalışmada farklı oranlarda sadece atık cam tozu içeren betonların yüksek sıcaklık öncesi mekanik özellikleri ve yüksek sıcaklık sonrası dayanım performanslarındaki değişim araştırılmıştır. Böylece sadece atık cam tozu kullanılarak, bu katkının betonun performansına olan etkisi incelenmiştir. Dolayısıyla hem çevresel boyutta hem de betonun özelliklerinin iyileştirilmesine katkı sunulması hedeflenmiştir.

## MALZEME VE METOT

### Malzeme

Atık CT katkılı beton numunelerinin üretimi için Elazığ çimento fabrikasında üretilen TS EN 197-1'e uygun CEM I 42.5 R - Portland Çimentosu (PÇ) kullanılmıştır (TS EN 197-1, 2012). Atık cam tozu, 50 µm tane boyutuna sahip olup, Mey kimya firmasından temin edilmiştir (Şekil 1). Çimento ve atık cam tozuna ait kimyasal özellikler Tablo 1'de sunulmuştur.

Beton numunelerin üretiminde Elazığ yöresine ait kırma taş kullanılmıştır. Agregalara standartlara uygun şekilde agrega elek analizi deneyi yapılmıştır (TS EN 1097-2, 2000). Deneysel çalışmada kullanılan maksimum agrega tane çapı 8 mm olup, agregalar 0-4 mm, 4-8 mm olmak üzere 2 farklı gruba ayrılmıştır (Şekil 2). Agregaya ait granülometri eğrisi Şekil 3'te verilmiştir. Beton karışım suyu olarak Elazığ şebeke suyu kullanılmıştır.



Şekil 1. Atık Cam Tozu

Tablo 1. Çimento ve Atık Cam Tozuna Ait Kimyasal ve Fiziksel Özellikler

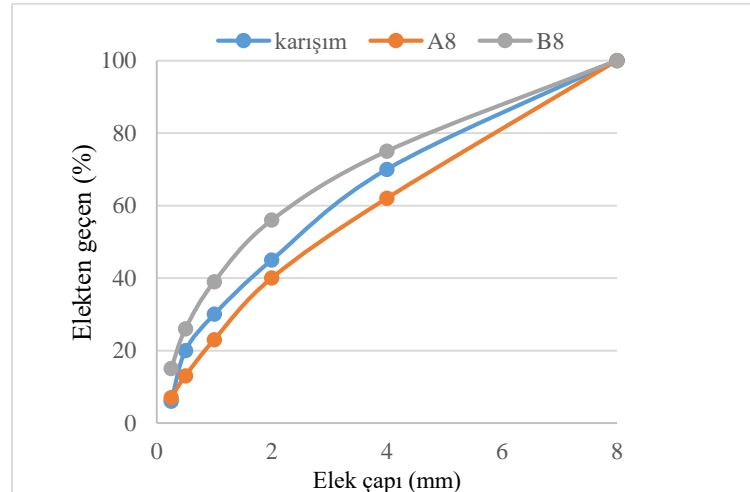
Kimyasal Özellikler	Çimento	Atık CT
SiO <sub>2</sub>	21,12	73,90
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,62	1,69
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,24	0,98
CaO	62,94	9,89
MgO	2,73	1,72
SO <sub>3</sub>	2,30	2,96
Na <sub>2</sub> O	-	7,89
K <sub>2</sub> O	-	-
Fiziksel Özellikler		
Özgül ağırlık (gr/cm <sup>3</sup> )	3,15	2,60



(a)

(b)

Şekil 2. (a) 0-4 mm Agrega (b) 4-8 mm Agrega



Şekil 3. Agrega Granülometri Eğrisi



Kimyasal katkı malzemesi, Basf firmasından temin edilen MasterLife WP 701'dir. Bu katkıya ait kimyasal özellikler Tablo 2' de gösterilmiştir.

**Tablo 2.** Kimyasal Katkı Malzemesine Ait Özellikler

Görünüm	Kahverengi – Sıvı
Yoğunluk (20 oC' de)	1.053-1.093 kg/lt
Alkali içeriği (%)	≤ 10 ağırlıkça
Klor iyon içeriği (%)	≤ 0.10 ağırlıkça
Korozyon davranışı	Sadece BS EN 934-1:2008,EK A.1 standardına uygun bileşenleri içerir.
Tehlikeli maddeler	Tamamen Ek – AZ 'ye uygundur.

### Beton Numunelerin Hazırlanması

Bu çalışmada, atık cam tozu ilavesiz 1 adet kontrol karışımı ve atık cam tozunun hacimce % 5, % 10, % 15, % 20, % 25 ve % 30 oranlarında çimento ile yer değiştirilerek kullanıldığı toplamda 7 farklı beton karışım hazırlanmıştır. Tüm serilerde %1.5 oranında kimyasal katkı kullanılmıştır. Karışım oranlarına ait bilgiler Tablo 3'te verilmiştir.

**Tablo 3.** Beton Karışım Miktarları (kg/m<sup>3</sup>)

Seri Adı	Çimento	Su	Cam Tozu	İnce agrega (0-4) mm	İri agrega (4-8) mm	Kimyasal katkı
CT 0	400	200	0	1164	543	6,0
CT 5	380	200	17	1164	543	6,0
CT 10	360	200	34	1164	543	5,9
CT 15	340	200	50	1164	543	5,9
CT 20	320	200	67	1164	543	5,8
CT 25	300	200	84	1164	543	5,8
CT 30	280	200	101	1164	543	5,7

Karışım hazırlanırken ilk olarak ince ve iri agregalar karıştırılıp daha sonra atık cam tozu ve çimento ilave edilerek kuru karışım hazırlanmıştır. Kuru karışım hazırlandıktan sonra su ve su ile seyreltilmiş kimyasal katkı karışıma eklenmiştir. Karılma işlemi sonrası her seriye slump (çökme) deneyi uygulanmıştır. Daha sonra beton karışım 100x100x100 mm'lik kalıplara yerleştirilerek 24 saat laboratuvar ortamında bekletilmiştir. Prizini alan numuneler kalıplardan çıkarılarak kür havuzuna bırakılmıştır. Numuneler 7., 28. ve 90. günlerde kür havuzundan çıkartılarak 105 °C'de 24 saat boyunca etüvde kurutulmuş daha sonra su emme, ultrases geçiş hızı, basınç dayanımı ve yarmada çekme dayanım testlerine tabi tutulmuştur. Çalışmanın deneysel programı Tablo 4'te sunulmuştur.

**Tablo 4.** Deneysel Program Özeti

Testler	Test standartı	Test yaşı (gün)	Test edilen numune sayısı	Numune geometrisi (mm <sup>3</sup> )
Slump (çökme)	TS EN 12350-2			
Ultrases geçiş hızı	TS EN 12504-4	28	3	100x100x100
Su emme	TS EN 993-1	28	4	100x100x100
Basınç dayanımı	TS EN 12390-3	7, 28, 90	3	100x100x100
Yarmada çekme dayanımı	TS EN 12390-6	28	3	100x100x100

### Slump (çökme)Deneyi

Beton üretiminden sonra taze betonun işlenebilirliği TS EN 12350-2'ye göre uygulandı (TS EN 12350-2, 2019). Bu standart doğrultusunda taban çapı 200 mm, üst çapı 100 mm ve yüksekliği 300 mm olan metalik koni şeklindeki kalıp, her beton seri üretiminden hemen sonra üç aşamada taze beton karışımıyla doldurulmuştur. Her aşamada, 16 mm çapında ve 600 mm uzunluğunda bir sıkıştırma çubuğu kullanılarak 25'er defa eşit şekilde şişleme işlemi yapılmıştır. Kalıbın dikey olarak yukarıya doğru kaldırılmasıyla elde edilen çökme değeri ölçülmüştür. (Şekil 4).



Şekil 4. Slump (çökme) deneyi

### ***Basınç Dayanımı ve Yarmada Çekme Dayanımı Testi***

Basınç dayanım testleri, TS EN 12390-3'e göre, 3 kN/sn yükleme hızı uygulanarak gerçekleştirilmiştir (TS EN 12390-3, 2019). Testlerde Autotest 3000 hidrolik yük kontrollü Beton Basınç Dayanım Presinde, elde edilen basınç dayanım sonuçları ortalamaları, o seriye ait basınç dayanımı olarak hesaplanmıştır. (Şekil 5a).

### ***Ultrases Geçiş Hızı Testi***

Tahribatsız test metotlarında ultrases geçiş hızı (UGH) testi, basit ve ekonomik olması sebebiyle betonda yaygın olarak kullanılmaktadır (Zhang vd., 2021). Ultrases geçiş hızı değerlerine göre beton kalitesi hakkında fikir edinebilmek için Whitehurst tarafından yapılmış bir önerme bulunmaktadır. Bu önermeye göre betonun zamana bağlı olarak aldığı yol için sınır değerler tanımlanmıştır. Tanımlanan sınırlara göre betonlar çok kötü ( $UGH < 2$  km/sn), kötü ( $2 < UGH < 3$ ), şüpheli ( $3 < UGH < 3.5$ ), iyi ( $3.5 < UGH < 4.5$ ) ve mükemmel ( $4.5 < UGH$ ) olarak genel bir fikir yürütmeye tabi tutulabilmektedir (BS Standard, 2004). (Şekil 5b).



(a)

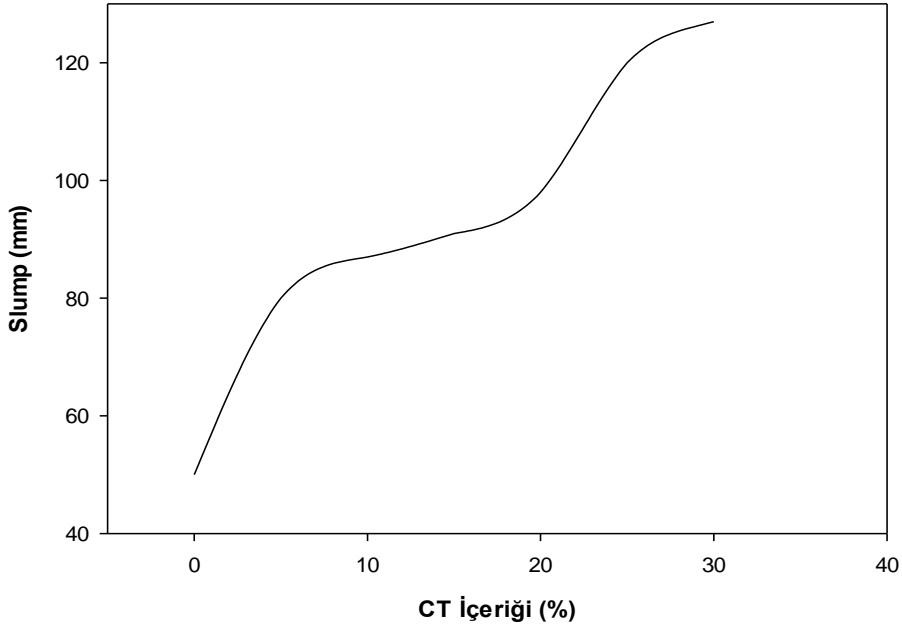
(b)

Şekil 5. (a) Basınç dayanımı –yarmada çekme dayanımı testi (b) Ultrases geçiş hızı testi

## **BULGULAR VE TARTIŞMA**

### ***Slump (çökme)Deneyi***

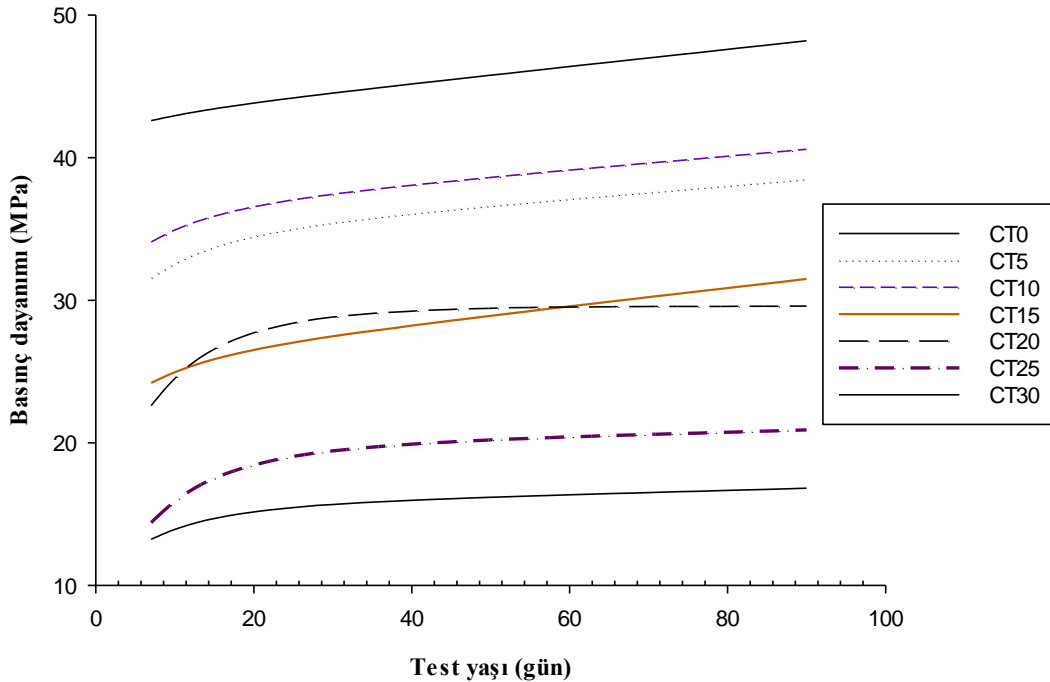
Şekil 4'te gösterildiği gibi CT içeriğindeki artışla birlikte çökmede de bir artış gözlenmiştir. Bu artan işlenebilirliğin, CT'lerin yapışmayan yüzeyinden kaynaklandığı düşünülmektedir (Guo vd., 2020). Ayrıca CT'nin hidratasyonun yavaş gerçekleşmesi de slump değerinde artışa neden olabilmektedir (Paul vd., 2022).



Şekil 4. Slump (çökme) Değerleri

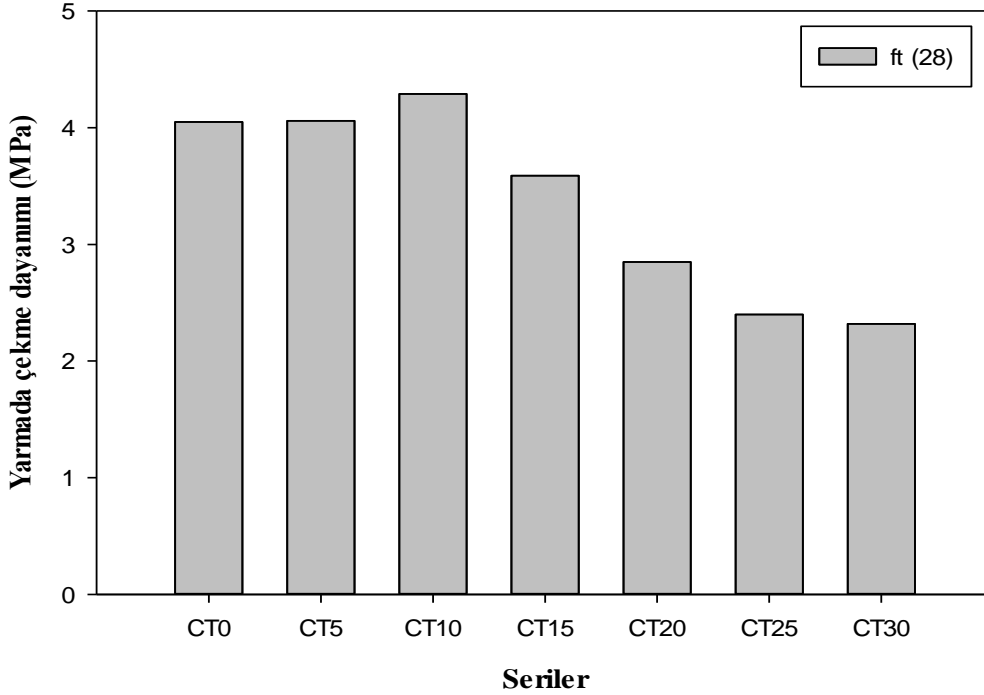
### Basınç Dayanımı ve Yarmada Çekme Dayanımı

Tüm beton serilerine ait 7, 28 ve 90 günlük beton basınç dayanım değişimleri Şekil 5'te gösterilmiştir. CT0, CT5, CT10, CT15, CT20, CT25, CT30 serilerinin 7 günlük basınç dayanım değerleri sırasıyla 42.6, 31.6, 34.1, 24.2, 22.6, 14.4 ve 13.2 MPa'dır. 7 günlük ve diğer kür yaşlarında CT0 serisinin basınç dayanımı en yüksek değerde çıkmıştır. Çimento miktarının fazla olmasından kaynaklanan bu durum beklenen bir sonuçtur. CT oranının artmasıyla puzolanik reaksiyon için yeterli su bulunmadığından, kalsiyum-silikat hidrat (CSH) oluşamamaktadır. (Öz, 2017). Kontrol serisinden (CT0) sonra en yüksek basınç dayanım değeri %10 çimento ikamesinin yapıldığı CT10 serisinde gözlenmiştir. Beton serilerinde CT kullanım yüzdesinin artmasına bağlı basınç dayanım değerinde azalma eğilimi görülmektedir. Bunun nedeni CT'lerin puzolanik reaksiyonun yavaş gerçekleşmesinden yani erken yaşlarda puzolanik aktivitesinin daha düşük değerde olduğu düşünülmektedir (Derinpınar vd., 2022). Ayrıca CT'lerin yeterli inceliğe sahip olmaması sebebiyle yeterli miktarda CSH yapısı oluşamadığından basınç dayanımı değerinde düşüş olduğu kanaatine varılmıştır (Turkey vd., 2022).



Şekil 5. Beton Serilerin 7, 28, 90 Günlük Basınç Dayanım Sonuçları

Yarmada çekme dayanımına ( $f_t$ ) ait veriler Şekil 6'da sunulmuştur.  $f_t$  sonuçları incelendiğinde CT 10 serisinde  $f_t$  değeri, CT0 serisine göre % 5.94 oranında bir artış göstermiştir. Bu durum nedeni CT oranının belli miktarda artmasıyla daha fazla CSH oluşmaktadır. Bu da dayanım değerinde artışa sebep olmaktadır. Ancak atık cam tozu oranının %15 ve üzeri olan serilerde yarmada çekme dayanımı düşüş göstermiştir. Bu durum CT oranının belli orandan sonra kullanımının ortamda yeterli suyun da bulunmaması nedeni ile puzolanik aktivitenin yeterince gerçekleşemediğinden ve arayüz geçiş bölgesinin özelliğinden kaynaklanabileceği kanaatine varılmıştır (Paul vd., 2022).



Şekil 6. Beton Serilerin 28 Günlük Yarmada Çekme Dayanım ( $f_t$ ) Sonuçları

### Porozite

Porozite değerlerine ait veriler Şekil 7'de sunulmuştur. Porozite testinde numuneler ilk olarak doygun yüzey ağırlıkları daha sonra su altındaki ağırlıkları ölçülmüştür. Sonrasında 105 °C sıcaklıktaki etüvde 24 saat bekletilmiştir. Daha sonra etüvden çıkarılan numuneler tartılmış ve Eşitlik 1'deki formül kullanılarak Porozite değerleri belirlenmiştir ( TS EN 772-4, 2000).

$$P = \frac{W_{dyk} - W_{kuru}}{W_{dyk} - W_{sualti}} \times 100 \quad (1)$$

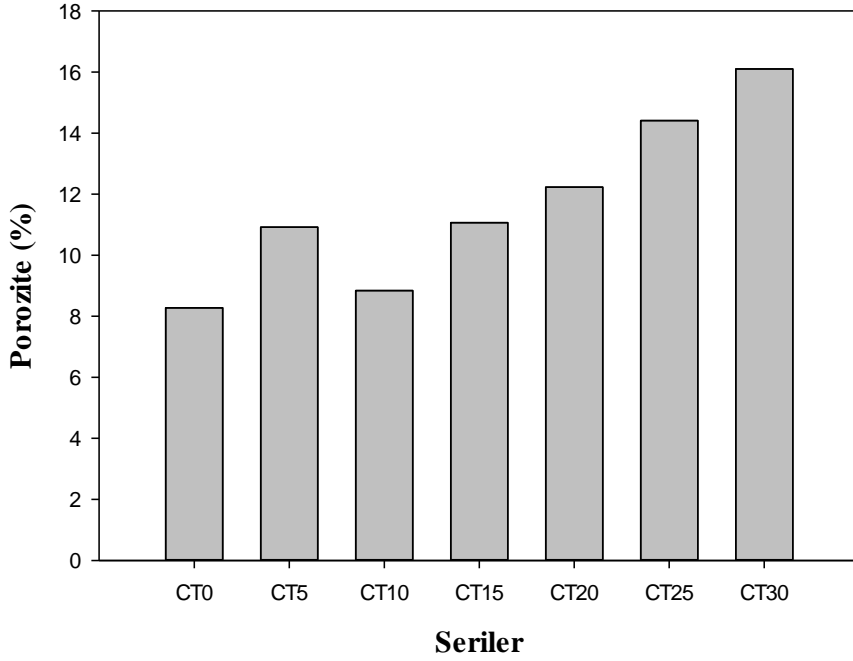
Burada;

$W_{dyk}$  = Numunenin doygun yüzey kuru ağırlığı, (kg)

$W_{kuru}$  = Numunenin etüv kurusu ağırlığı, (kg)

$W_{sualti}$  = Numunenin su altındaki ağırlığı, (kg).

Şekil 7 incelendiğinde genel olarak CT kullanım yüzdesinin artmasına bağlı olarak porozite değerinde artış olmuştur. Ancak bu artış CT10 serisinden sonra düzenli bir artma eğilimi göstermiştir. Yarmada çekme dayanımı sonuçlarında olduğu gibi porozite değerlerindeki bu değişimde de CT10'dan sonraki artışın ortamda yeterli suyun bulunmaması nedeni ile puzolanik aktivitenin yeterince gerçekleşemediğinden ve arayüz geçiş bölgesinin özelliğinden kaynaklanabileceği düşünülmektedir.

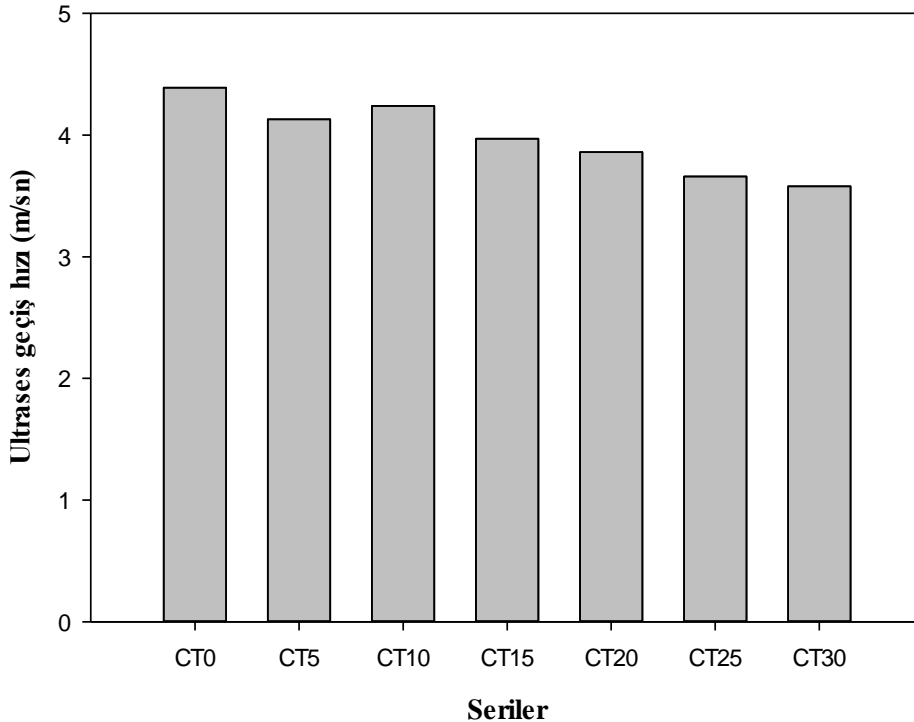


Şekil 7. Beton Serilerin 28 Günlük Porozite Deneyi Sonuçları

### Ultrases Geçiş Hızı

Şekil 8’de görüleceği üzere üretilen betonların ultrases geçiş hızı değerleri CT0 için 4.3 km/sn, CT5 için 4.1 km/sn, CT 10 için 4.2 km/sn, CT 15 için 4.0 km/sn, CT 20 için 3.9 km/sn ve CT 25 için ise 3.7 km/sn olarak bulunmuştur. Elde edilen bulgular incelendiğinde, üretilen serilerin hiçbiri içyapısındaki doluluk bakımından mükemmel kaliteye sahip olmamakla birlikte, Whitehurst tarafından yapılan önermeye göre içyapıdaki boşluk miktarının az ve iyi kalitede olduğu söylenebilir (Saint-Pierre vd, 2016). Sonuç olarak çimento yerine farklı oranlarda atık cam tozunu ikame edilerek ikamesiz betonlara benzer şekilde iyi yerleştirilmiş ve içyapısında az boşluk bulunan kaliteli betonlar üretmek mümkündür.

Ayrıca atık cam tozu oranı arttıkça ultrases geçiş hızının azaldığı görülmektedir. Atık cam tozu içeren beton numuneleri arasında en yüksek ultrases geçiş hızı değerine CT10 serisinin ulaştığı görülmektedir.

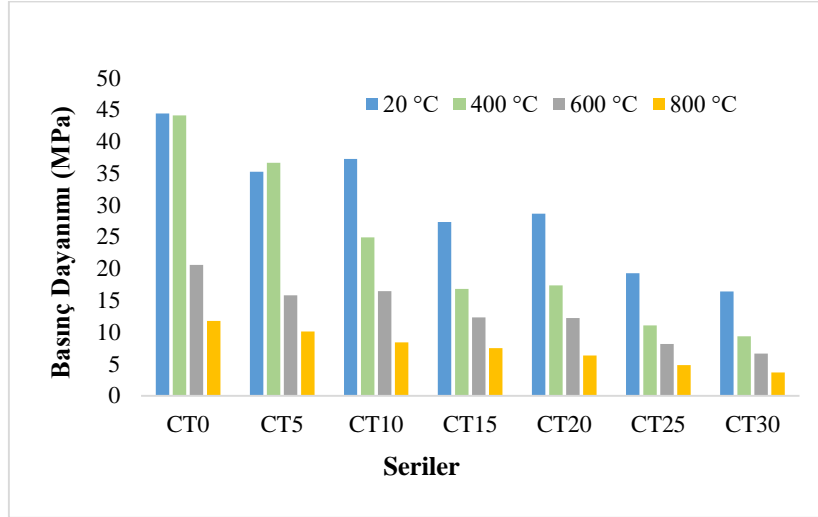


Şekil 8. Beton Serilerin 28 Günlük Ultrases Geçiş Hızı Testi Sonuçları



### Yüksek Sıcaklık Sonrası Basınç Dayanımı

Yüksek sıcaklığa maruz bırakılacak seriler, Fırat Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Malzeme Laboratuvarı'nda bulunan, ısınma hızı 2.5 °C / dk. olan 1200 °C kapasiteli Protherm HLF 150 markalı laboratuvar tipi fırında yapılmıştır. 28 günlük kürünü tamamlayan tüm seriler 3 farklı yüksek sıcaklık değerine ( 400 °C, 600 °C ve 800 °C ) maruz bırakılmışlardır. Beton serilerin basınç dayanımlarının değişimi Şekil 9' da verilmiştir.



Şekil 9. Beton Serilerin Yüksek Sıcaklık Sonrası 28 Günlük Beton Basınç Dayanımı Sonuçları

400 °C sıcaklıkta CT 0 ile CT 5 en iyi sonucu vermiştir ve 20 °C' ye göre dayanım kaybı görülmemektedir. Yüksek sıcaklıkla birlikte serbest suyun buharlaşması ve beton numunelerin jel yapısının da bozulması ile çatlaklar oluşmuştur (Binici vd., 2013). Özellikle 600 °C ve üzeri sıcaklıkta çatlakların artmasına bağlı olarak bozulmalar meydana gelmiştir. Dolayısıyla beton basınç dayanım kayıpları meydana gelmiştir. Bu dayanım kayıplarının oranları Tablo 5' te gösterilmiştir.

Tablo 5. Beton Serilerin Yüksek Sıcaklık Sonrası 28 Günlük Basınç Dayanımındaki Değişimler

Seri Adı	T (°C)	Basınç Dayanımı (MPa)	Dayanım Kaybı (%)
CT0	20	47,14	-
	400	44,13	6,37
	600	20,57	56,35
	800	11,77	75,03
CT5	20	36,18	-
	400	36,66	-1,33
	600	15,81	56,29
	800	10,11	72,07
CT10	20	38,47	-
	400	24,9	35,23
	600	16,44	57,26
	800	8,38	78,22
CT15	20	28,49	-
	400	16,80	41,03
	600	12,31	56,81
	800	7,51	73,65
CT20	20	30,52	-
	400	17,36	43,13

CT20	600	12,20	60,02
	800	6,32	79,29
CT25	20	19,29	-
	400	11,16	42,0
	600	8,15	57,76
	800	4,80	75,12
CT30	20	16,42	-
	400	9,37	42,94
	600	6,64	59,56
	800	3,64	77,83

Tablo 5 incelendiğinde CT0 beton serisinde, 20 °C' den 800 °C' ye kadar basınç dayanım kaybı olduğu gözlemlenmiştir. Cam tozu kullanılan seriler içinde CT5 'te, 20 °C ve 400 °C' deki dayanımın % 1.33 değerinde arttığı gözlemlenmiştir. Bunun sebebi yükselen sıcaklıkla birlikte beton içerisinde bulunan suyun buharlaşmasıyla birbirine daha yakın hareket eden çimento jel tabakaları arasında bulunan Van der Waals kuvvetlerinin artması ile çimento pastasının dayanım kazanmasından kaynaklandığı ortaya çıkmıştır (Abed vd., 2020; Wu vd., 2019). Serilerin 600 °C'de yüksek oranda dayanım kaybettikleri gözlemlenmiştir. Yüksek sıcaklık artışına bağlı olarak beton numuneler içerisindeki suyun buhara dönüşmesi ile oluşan iç gerilmeler sonucu bu dayanım kayıpları meydana gelmektedir (Derinpinar vd., 2022). Cam tozu katkılı seriler de yüksek sıcaklıktan olumsuz etkilenmiştir.

## SONUÇLAR

Literatürde çeşitli mineral katkılarla birlikte atık cam tozunun bir arada kullanıldığı betonların yüksek sıcaklık sonrası performanslarını inceleyen birçok çalışma mevcuttur. Bu çalışmada farklı oranlarda sadece atık cam tozu kullanılarak üretilen geleneksel betonların mekanik özellikleri ve yüksek sıcaklık sonrası dayanım performanslarındaki değişim araştırılmıştır. Bunun sonucunda aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

- CT içeriğinin artmasıyla literatüre paralel olarak betonun işlenebilirliğinin arttığı görülmüştür (Paul vd., 2022).
- Yüksek sıcaklık öncesi yapılan deneylerde, beton seriler dayanım performansları açısından incelendiğinde, sadece atık cam tozu ile üretilen betonlarda, CT'nin optimum kullanım oranı %10 olarak tespit edilmiştir. Böylece betonda çimento ile cam tozunun ikamesiyle, atık malzemelerin azaltılması, yeniden kullanılması ve geri dönüştürülmesiyle hem mekanik hem de çevresel açıdan önemli kazanımlar elde edilmiştir.
- Ultrases geçiş hızı; basınç dayanım deneyi ve yarmada çekme dayanım deneyleri ile paralellik göstermektedir.
- Yüksek sıcaklık sonrası yapılan deneylerde, 400 °C' de Van der Waal's kuvvetlerinin artmasından dolayı CT 5 serisinde basınç dayanımlarında artış meydana gelmektedir.
- Cam tozu olsun ya da olmasın tüm seriler 400'ün üzerindeki sıcaklıklarda yüksek dayanım kayıplarına maruz kalmıştır.
- Yüksek sıcaklık sonrası kalan dayanım değerleri incelendiğinde cam tozu kullanılan serilerin yüksek sıcaklıktan daha az etkilendiği görülmüştür. Bu durumun betonda CT kullanımının, betonun yüksek sıcaklık direncini arttırdığını göstermektedir.

Bu çalışma ile bütünsel bir yaklaşım benimsenerek CT kullanımının sürdürülebilir kalkınma açısından kapsamlı bir değerlendirmesi yapılmıştır. CT'nin betonda kullanımı ile azalan çimentoya paralel olarak çimento üretimi sırasındaki karbon salınımı da düşmektedir. Bununla birlikte CT'nin betonda efektif kullanımının ve özellikle yüksek sıcaklık sonrası beton performansının tespit edilmeye çalışıldığı bu çalışma ile hem atık yönetimi hem dayanım performansının iyileştirilmesi hem de karbon ayak izinin azaltılması gibi hedeflere ulaşılmaya çalışılmıştır. Ayrıca önemli sosyal, çevresel ve ekonomik kazanımlar elde edileceği düşünülmektedir.

## KAYNAKLAR

Abed, M., & de Brito, J. (2020). Evaluation of high-performance self-compacting concrete using alternative materials and exposed to elevated temperatures by non-destructive testing. *Journal of Building Engineering*, 32, 101720. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101720>

- Acikgenc Ulas, M. (2022). Development of an artificial neural network model to predict waste marble powder demand in eco-efficient self-compacting concrete. *Structural Concrete*. <https://doi.org/10.1002/suco.202200043>
- Alyamac, K. E., Ghafari, E., & Ince, R. (2017). Development of eco-efficient self-compacting concrete with waste marble powder using the response surface method. *Journal of Cleaner Production*, 144, 192–202. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.12.156>
- Bengal, S. N., Pammar, L. S., & Nayak, C. B. (2022). Engineering application of organic materials with concrete: A review. *Materials Today: Proceedings*, 56, 581–586. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.02.390>
- Binici, H., Temiz, H., Sevinç, A. H., Mustafa, E., Mehmet, K., & Şayir, Z. (2013). Alüminyum Talaşı, Bims ve Gazbeton Tozu İçeren Betonların Yüksek Sıcaklık Etkisinin İncelenmesi. *Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 9(1), 1–15. e-ISSN:1305-631X
- Delay, R. (2008). Our Post-Kyoto Treaty Climate Change Framework: Open Market Carbon-Ranching as Smart Development. *Penn St. Envtl. L. Rev.*, 17, 55.
- Demir, T., and Alyamaç, K. E. (2022). Investigation of the Use of Marble Powder in Production of High Strength Concretes. *Open Journal of Nano*, 7(1), 18–25. <https://doi.org/10.56171/ojn.1034691>
- Demir, T., Demirel, B., and Öztürk, M. (2022). An Evaluation of the Effect of Waste Aluminum Sawdust on the Carbonation of Concrete. *Bitlis Eren University Journal of Science*, 11(4), 993–999. <https://doi.org/10.17798/bitlisfen.1141419>
- Demirel, B., & Keleştemur, O. (2011). Yüksek Sıcaklığa Maruz Pomza ve Silis Dumanı Katkılı Betonların Mekanik ve Fiziksel Özelliklerine Kür Yaşının Etkisi. *Electronic Journal of Construction Technologies/Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi*, 7(1). e-ISSN:1305-631X
- Derinpinar, A. N., Karakoç, M. B., & Özcan, A. (2022). Performance of glass powder substituted slag based geopolymer concretes under high temperature. *Construction and Building Materials*, 331, 127318. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127318>
- Ferdosian, I., & Camões, A. (2017). Eco-efficient ultra-high performance concrete development by means of response surface methodology. *Cement and Concrete Composites*, 84, 146–156. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.08.019>
- Guo, P., Meng, W., Nassif, H., Gou, H., & Bao, Y. (2020). New perspectives on recycling waste glass in manufacturing concrete for sustainable civil infrastructure. *Construction and Building Materials*, 257, 119579. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119579>
- Katare, V. D., & Madurwar, M. V. (2020). Design and investigation of sustainable pozzolanic material. *Journal of Cleaner Production*, 242, 118431. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118431>
- Martínez-Lage, I., Vázquez-Burgo, P., & Velay-Lizancos, M. (2020). Sustainability evaluation of concretes with mixed recycled aggregate based on holistic approach: Technical, economic and environmental analysis. *Waste Management*, 104, 9–19. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.12.044>
- Monteiro, P. (2006). *Concrete: microstructure, properties, and materials*. McGraw-Hill Publishing.
- Omran, A., & Tagnit-Hamou, A. (2016). Performance of glass-powder concrete in field applications. *Construction and Building Materials*, 109, 84–95. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.02.006>
- Orhan, E., & Yüksel, E. (2017). Öğütülmüş Atık Cam Tozu Katkılı Betonun Pozolanik Aktivitesi ve Yarmada Çekme Dayanımının Belirlenmesi. *Engineering Sciences*, 12(2), 108–116. ISSN: 1308 7231
- Öz, H. Ö. (2017). Atık Cam Tozu ve Yüksek Fırın Cürufunun İçeren Kendiliğinden Yerleşen Harçların Taze, Mekanik ve Durabilite Özellikleri. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 20(4), 9–22.
- Paul, D., Bindhu, K. R., Matos, A. M., & Delgado, J. (2022). Eco-friendly concrete with waste glass powder: A sustainable and circular solution. *Construction and Building Materials*, 355, 129217. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129217>
- Raju, S., & Kumar, P. R. (2014). Effect of using glass powder in concrete. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, 31, 21–427. ISSN: 2319 8753

- Saint-Pierre, F., Philibert, A., Giroux, B., & Rivard, P. (2016). Concrete quality designation based on ultrasonic pulse velocity. *Construction and Building Materials*, 125, 1022–1027. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.08.158>
- Shayan, A., & Xu, A. (2006). Performance of glass powder as a pozzolanic material in concrete: A field trial on concrete slabs. *Cement and Concrete Research*, 36(3), 457–468. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2005.12.012>
- Standard, B. (2004). BS EN 12504-4: 2004: Testing concrete–Part 4: Determination of ultrasonic pulse velocity. London, Reino Unido.
- TS EN 772-4. (2000). Kagir Birimler, deney metotları–Bölüm 4: Tabii taskâgir birimlerin toplam ve görünen porozitesi ile bosluksuz ve bosluklu birim hacim kütlelerinin tayini (Methods of test for masonry units–Part 4: Determination of real and bulk density and of total a. TS EN 772-4 Ankara-Turkey.
- TS EN 197-1. (2012). Cement - Part 1: General Cements, Composition, Ankara, Türkiye.
- TS EN 1097–2. (2000). Agregaların Mekanik ve Fiziksel Özellikleri İçin Deneyler Bölüm 2: Parçalanma Direncinin Tayini İçin Metotlar. Türk Standartları Enstitüsü, Ankara.
- TS EN 12350-2. (2019). T. beton deneyleri-B. 2: Ç. (slump) deneyi, Türk Standartları Enstitüsü, Ankara, Türkiye.
- Turkey, F. A., Beddu, S. B., Ahmed, A. N., & Al-Hubboubi, S. K. (2022). Effect of high temperatures on the properties of lightweight geopolymer concrete based fly ash and glass powder mixtures. *Case Studies in Construction Materials*, 17, e01489. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01489>
- Wu, Z., Lo, S. H., Kang, H. T., & Su, K. L. (2019). High strength concrete tests under elevated temperature. *Athens Journal of Technology & Engineering*. ISSN: 2241-8237
- Zhang, Y., Aslani, F., & Lehane, B. (2021). Compressive strength of rubberized concrete: Regression and GA-BPNN approaches using ultrasonic pulse velocity. *Construction and Building Materials*, 307, 124951. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124951>
- Zhong, R., Wille, K., & Viegas, R. (2018). Material efficiency in the design of UHPC paste from a life cycle point of view. *Construction and Building Materials*, 160. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.049>



# Kahramanmaraş Sütçü İmam University

## Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 30.11.2023  
Kabul Tarihi : 05.01.2024

Received Date : 30.11.2023  
Accepted Date : 05.01.2024

### MULTİSPEKTRAL VE HİPERSPEKTRAL GÖRÜNTÜLEME TEKNİKLERİNİN MEYVE - SEBZE İŞLEME TESİSLERİNDE KULLANIM OLANAKLARI

### POTENTIALS OF MULTISPECTRAL AND HYPERSPECTRAL IMAGING TECHNIQUES IN FRUIT AND VEGETABLE PROCESSING PLANTS

Özgür Neşe ÖZEN<sup>1</sup> (ORCID: 0009-0008-3192-5272)

Fatih AKKOYUN<sup>2</sup> (ORCID: 0000-0002-1432-8926)

Ahmet GÖRGÜÇ<sup>3</sup> (ORCID: 0000-0003-3018-4595)

Fatih Mehmet YILMAZ<sup>3\*</sup> (ORCID: 0000-0002-1370-1231)

<sup>1</sup> Aydın Adnan Menderes Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gıda Mühendisliği Anabilim Dalı, Aydın, Türkiye

<sup>2</sup> İzmir Demokrasi Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, İzmir, Türkiye

<sup>3</sup> Aydın Adnan Menderes Üniversitesi, Gıda Mühendisliği Bölümü, Aydın, Türkiye

\*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Fatih Mehmet YILMAZ, fatih.yilmaz@adu.edu.tr

#### ÖZET

Bu çalışmada ileri görüntüleme tekniklerinden olan multispektral görüntüleme ve hiperspektral görüntülemenin meyve ve sebze endüstrisinde kullanım olanakları derlenmiştir. Multispektral görüntüleme ve hiperspektral görüntüleme teknikleri; meyve sebzeleri sınıflandırma, olgunluğa göre sıralama, kusurlu ürün ayırma, kuraklık ölçümü yapma, hasat zamanını belirleme gibi birçok uygulamada teşhis ve müdahale amacıyla kullanılmaktadır. Deneysel çalışmalarda multispektral görüntülemenin görünür ve yakın dalga boylarında gıdaların sınıflandırılması amacıyla kullanıldığında yüksek oranda başarılı olduğu görülmüştür. Hiperspektral görüntülemeye ise meyve ve sebzelerde renk, sıklık, asitlik, şeker, antioksidan madde miktarı, toplam çözünür kuru madde miktarını belirlemek gibi spesifik durumların yanında olgunluk, fizyolojik bozukluk, mekanik hasar, duysal kalite, biyolojik kusur gibi kalite parametrelerinin belirlenmesi amacıyla da kullanıldığı görülmüş ve yüksek oranlarda başarılar elde edilmiştir. Bu görüntüleme teknikleri diğer sınıflandırma yöntemlerine kıyasla hızlı sonuç veren, çevreye duyarlı, meyve ve sebzelerde tahribat yaratmayan yöntemlerdir.

**Anahtar Kelimeler:** İleri görüntüleme teknikleri, meyve kalitesi, meyve sınıflandırma, tayflı kameralar, tahribatsız ölçüm

#### ABSTRACT

In this study, the potentials of advanced imaging techniques, *i.e.*, multispectral imaging and hyperspectral imaging, in the fruit and vegetable industry were reviewed. Multispectral imaging and hyperspectral imaging techniques are used for diagnosis and intervention in many applications, such as classifying fruits and vegetables, sorting them according to maturity, separating defective products, measuring drought, and determining harvest time. In experimental studies, multispectral imaging has been shown to be successful when used for classification at visible and near wavelengths. In hyperspectral imaging, it has been seen that it is used to determine specific conditions such as color, firmness, acidity, sugar, antioxidant compound amount, total soluble solids in fruits and vegetables, as well as quality parameters such as ripeness, physiological disorder, mechanical damage, sensory quality, biological defect, and has high levels success rates have been achieved. These imaging techniques provide faster results compared to other classification methods and are environmentally friendly and nondestructive to fruits and vegetables.

**Keywords:** Advanced imaging techniques, fruit quality, fruit sorting, spectrum cameras, non-destructive measurement

ToCite: ÖZEN, Ö. N., AKKOYUN, F., GÖRGÜÇ, A. & YILMAZ, F. M., (2024). MULTİSPEKTRAL VE HİPERSPEKTRAL GÖRÜNTÜLEME TEKNİKLERİNİN MEYVE - SEBZE İŞLEME TESİSLERİNDE KULLANIM OLANAKLARI. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 27(2), 643-656.



## GİRİŞ

Multi/hiperspektral görüntüleme teknolojisi geleneksel görüntüleme ve tayf ölçümünün bir arada yapılmasıyla, alansal ve tayfsal bilginin nesnelere elde edilmesidir (Li vd., 2013). Bu teknolojinin sağlık, savunma, gıda ve tarım alanları gibi birçok uygulamada kullanımı bulunmaktadır. Multi/hiperspektral görüntüleme uygulamalarında nesnelere farklı açılardan görüntülenerek iki ve üç boyutlu olarak incelenebilmektedir. Bu görüntüler birçok alanda durum tespiti, gelişim takibi, tanı ve tedaviyle ilgili değerli bilgileri barındırmaktadır (Ebner vd., 2023). Bunun yanında görünür ötesinde dalga boylarının da incelenmesiyle görünür ışıkta teşhis edilemeyen sıra dışı durumların da izlenmesi mümkün olmaktadır (Oberti vd., 2016). Spektral görüntüleme çalışmalarında standart siyah beyaz/renkli (BW/RGB) kameralar, çok tayflı (multispektral) kameralar ve hiper tayflı (hyperspektral) kameralar kullanılmaktadır. Ticari kapsamda bulunan görüntüleme çözümleri, çoğunlukla görünür ışık bandında ölçüm yapan cihazlardan oluşmaktadır. Bu cihazlarla sadece üç spektral bant (RGB) ölçümü mümkün olmakta dolayısıyla özellikle mor ötesi ve kızıl ötesi bantlarında reflektansı olan nesnelere incelenmesi kısıtlı kalmaktadır (Li vd., 2018a). Elektromanyetik dalga boylarının nesnelere üzerinde yansımaları farklı tayflarda, farklı ışık yoğunluğunda meydana gelmektedir. Nesnelere yansıyan farklı ışık tayfları görüntülenerek, görünür ötesinde inceleme yapılmasını; örneğin, insan derisinin altında bulunan yapıların takibini mümkün kılmaktadır. Bu yansımalarından daha fazla dalga boyu kullanılarak kıyaslamalar yapıldığında, nesnelere daha isabetli bir biçimde incelenmesi mümkün hale gelmektedir. Bu işleme sahip tayfsal ölçüm cihazları, sağlık, tarım ve savunma alanlarındaki araştırmalar için oldukça önemli olup, farklı dalga boylarında ölçümler üzerinden birçok yeni sonuç elde edilebilmektedir (Montembeault vd., 2010; Ortega vd., 2020).

Taze meyve ve sebzelerde kusura sebep olabilecek pek çok faktör vardır. Meyve ve sebzelerde oluşan kusurlar özellikle hasat sırasında, meyve ve sebzelerin işlenmesi sırasında, taşıma, depolama ve pazarlama sırasında oluşmaktadır (Tang, Zhang ve Mujumdar, 2022; Du vd., 2020; Wang vd., 2016). Meyve sebzelere uygulanan ön işlemler; soyma, kesme veya dilimleme, yıkama, tartım ve paketlemedir. Bu ön işlemler sırasında meyve sebzelerde mekanik yaralanmalar oluşabilmekte ve kesme yüzeyinde renk değişikliği, doku kaybı, yumuşama, su kaybı, mikroorganizmaların hızlı büyümesi, aroma kaybı ve istenmeyen uçucuların oluşmasına sebep olmaktadır. Su, hava, toprak, ekipman ve işçilerin uygunsuz çalışması, taze kesilmiş ürünlerin güvenliğini etkileyebilmektedir (Tang, Zhang ve Mujumdar, 2022). Oluşan bu kusurlar meyve ve sebzelerin şeker içeriği ve asit içeriğini etkilediği için duyu kalitesini bozar. Sonunda ürünün ticari olarak değerinin azalmasına sebep olur, bu da etkilenen ürünlerin fermentasyona, çürümeye veya küflenmeye karşı savunmasız olması ve depolama sırasında diğer sağlıklı ürünleri enfekte etmesi nedeniyle potansiyel gıda güvenliği sorunlarına neden olur (Du vd., 2020).

Tüketiciler her zaman yüksek güvenliğe ve kaliteye sahip ürünler talep etmektedir. Doğru, hızlı ve objektif kalite kontrol sistemlerinin geliştirilmesi, gıda endüstrisinde tüm gıda prosesi sırasında önem arz etmektedir (Wu ve Sun, 2013). Kalite kontrol sınıflandırmalarında el ile ayıklama ve insan görsel muayenesi hala yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak birim zamanda ayrılacak ürün miktarı çok fazla olması ve bu durum yapan kişinin yorgunluğuna, psikolojik durumuna göre değişiklik gösterdiği gibi, zaman alıcı, zahmetli, sıkıcı ve tutarsızdır (Wu ve Sun, 2013; Cömert, Hekim ve Kemal, 2019; Munera vd., 2021). Meyve ayıklama işlemlerinde personel hatası veya kriterlerin belirsizliği ayıklama oranını düşürebilir. Meyve ve sebzeleri ayıklamada bu olumsuz faktörler otomatik denetim sistemleri kullanılarak ortadan kaldırılabılır (Munera vd., 2021). Geleneksel tekniklerden olan duyu değerlendirme, enstrümantal ve fizikokimyasal analizlerin sistemi iyi kurulmuş olsa da bu yöntemler numuneye zarar vermekte, uğraştırıcı ve sonuç alma işlemi uzun sürmektedir. Ayrıca geleneksel teknikler meyve ve sebzelerde kalite hakkında bilgi verirken çürüklerin yerini ve dağılımını belirleyemez (Wu ve Sun, 2013).

Birçok sınıflandırma çalışmasında insan hatasını en aza indiren, temassız, tahribatsız ölçüm imkânı tanıması nedeniyle ihtiyaç duyulan spektral görüntüleme teknikleri günümüzde gıdaların sınıflandırılmasında daha da ön plana çıkmaktadır. Bu çalışmada meyve ve sebzeleri sınıflandırmak ve hızlı bir şekilde analiz yapmak için kullanılan spektral yöntemlerden multispektral görüntüleme ve hiperspektral görüntüleme teknikleri incelenmiş ve son dönemde bunlarla ilgili yapılan çalışmalar derlenmiş, sonuçları ve başarı oranları sunulmuştur.

## GÖRÜNTÜLEME TEKNİKLERİ

### Spektral Görüntüleme

Spektral görüntüleme 1980'lerde geliştirilen ve düzlemsel görüntüleme teknolojisi ile tayf teknolojisini organik olarak birleştiren yeni bir teknolojidir. Hiperspektral görüntüleme teknolojisi, birbirine yakın çok sayıda tayf bandı sayesinde yüksek tayf çözünürlüğüne ve alansal çözünürlük özelliklerine sahiptir. Bu bağlamda 1983 yılında, Jet Tahrik Laboratuvarı tarafından ilk hava görüntüleme spektrometresi geliştirilmiş ve görüntü elde etme ve analizi konusunda büyük potansiyel ortaya çıkmıştır. Tam anlamıyla "optik spektrum" olarak adlandırılan spektrum, ışığın optik sistemler aracılığıyla bölünmesinden sonra oluşan sıralı monokromatik ışıktan oluşmaktadır. Bu yapı tayf görüntüleme tekniğinin temelini teşkil etmektedir (Chen, Lin ve Zhao., 2021).

Geleneksel olan optik görüntüleme yöntemleriyle monokrom (BW) ya da renkli (RGB) görüntüler elde edilmektedir. Bu görüntülerde genellikle hedeflenen boyut, şekil, yüzey örüntüsü gibi alansal özelliklerin incelenmesidir. BW ve RGB görüntüleme yöntemlerinin nesnelerin iç yapılarının gözlemlenmesindeki kısıtları bilinmektedir, Yüzeysel görüntülerden elde edilen sonuçlar, nesnelerin iç yapılarını tanımlama, gözleme ve analiz etmede yetersiz kalmaktadır (Gracia-Romero vd., 2018; Yaqoob, Sharma ve Aggarwal, 2021). Tayf ölçümlerinde yaygın olarak kullanılan diğer bir optik yöntem ise spektroskopidir. Görünür ve ötesi dalga boylarında verilerin elde edilmesinde kullanılan bu yöntem tüm spektrumun noktasal ölçümle elde edilmesini sağlamaktadır (Gao ve Smith, 2015). Noktasal ölçüm olarak da bilinen spektroskopi nesnelerin alansal bilgilerini sunmamaktadır. Geleneksel yöntemlerden farklı olarak multi/hiperspektral görüntüleme yöntemleri, gözlemlenen her bir piksel için tüm spektrumda istenilen spektral aralıktaki dalga boyunu yakalayabilmektedir. Bu özellik nesnelerin sadece fiziksel yapılarının incelenmesinden ziyade yansıma ya da geçirgenliğe bağlı olarak kimyasal ve biyolojik durumlarının da incelenmesini mümkün kılmaktadır (Ebner vd., 2023).

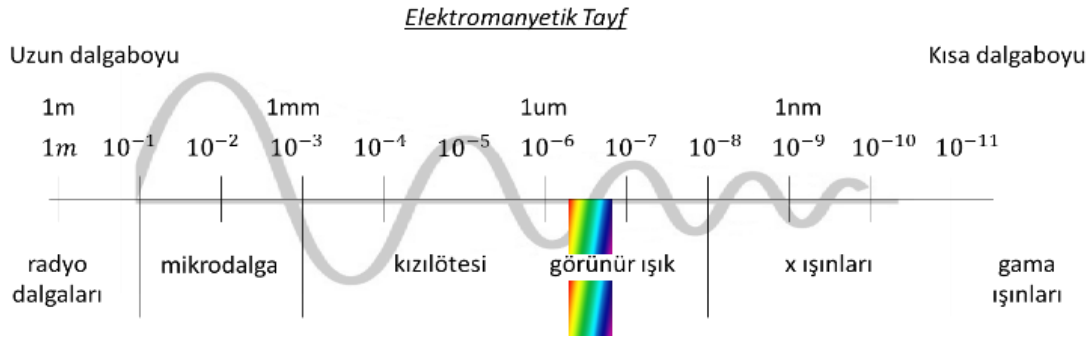
**Tablo 1.** Monokrom, RGB, Spektroskopi, Multispektral ve Hiperspektral Ölçümlerin Kıyaslanması

Özellik	Monokrom	RGB	Spektroskopi	Multispektral	Hiperspektral
Uzamsal bilgi	Var	Var	Yok	Var	Var
Bant sayısı	1	3	30 – 100	3 – 10	30 – 100
Tayf bilgisi	Yok	Yok	Var	Sınırlı	Var

Görünür ötesi dalga boyları görünür ışık yansımalarından daha farklı, daha geniş bir bilgi kaynakları barındırmakta ve bu sayede uygulamalarda tanı, teşhis, takip ve analiz fırsatlarını sunmaktadır. Tablo 1'de spektral görüntüleme (multi/hiper) yöntemlerinin geleneksel monokrom, RGB ve spektroskopi yöntemlerine kıyasla avantajları sunulmuştur. Multi/hiperspektral görüntülerin geleneksel yöntemlerden daha fazla bilgiyi sunduğu görülmektedir. Bu görüntüler alansal verinin tayf verileriyle birlikte kullanılarak değerlendirme ve sınıflandırma aşamalarında daha iyi sonuçlar oluşturmaktadır. Bu nedenlerle spektral görüntüleme yönteminin birçok alanda kullanımı mümkün hale gelmektedir (Li vd., 2020).

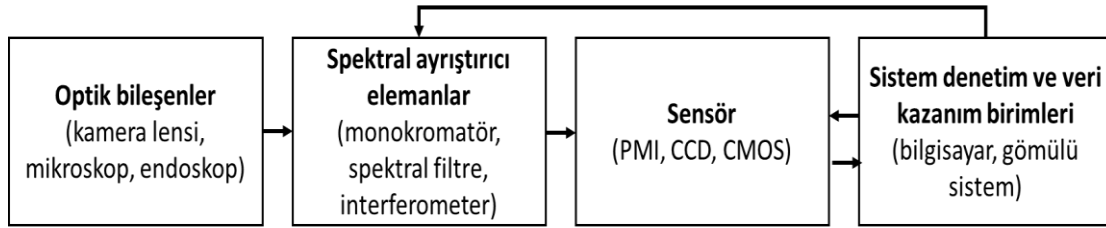
Sınıflandırma süreçlerinde insanın hata yapma olasılığının yüksek olması sebebiyle bu hataların önüne geçilebilmesi için kullanılacak en önemli unsurlardan biri makine görüşüdür (Lorente vd., 2012). Spektral görüntüleme, görüntü elde etme, görüntüleme, işleme ve analiz yorumlama için çeşitli bantlardaki hedef nesnelerin ışığı soğurma oranlarının spektral kanallarını kullanan bir teknolojidir. Bir pikselin karakterize edilmesiyle elde edilen spektrumlar görüntü analizini spektral analiz ile birleştirir. Elde edilen görüntü ile meyve ve sebzelerin iç yapısının özellikleri, kompozisyon içeriği ve diğer bilgileri yansıtmak için boyutunu, şeklini ve rengini görünüm özelliklerini kullanarak spektral bilgileri ile açıklar. Bu nedenle, spektral görüntüleme teknolojisi, gıda ve tarım ürünlerinin iç ve dış kalite özelliklerini görselleştirebilir. Ayrıca gıda ve tarım ürünlerinin kalite ve güvenlik tespitinde benzersiz avantajlara sahiptir (Chen, Lin ve Zhao, 2021; Lorente vd., 2012).

Spektrum genel olarak ultraviyole (UV), görünür ve kızılötesi bantlara ayrılabilir. Hiperspektral görüntüleme ve multispektral görüntüleme ile ilgili çalışmalar Şekil 1'de görülen elektromanyetik spektrum bölgelerinden UV, görünür ışık ve kızılötesi ışınlar bölgesinde gerçekleştirilmektedir. Bunlar arasında 400nm'nin altı UV, 400 - 780 nm görünür ışık, 780 - 2500 nm yakın kızılötesi (NIR), 2500 - 5600 nm orta kızılötesi, 5600 - 15000 nm uzak kızılötesi ışık ve 15000 - 100000 nm çok uzak kızılötesi ışık vardır (Chen, Lin ve Zhao, 2021; Güzel ve Özlüoymak, 2015).



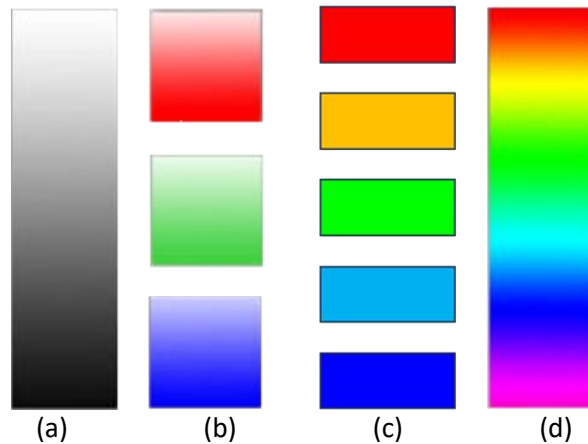
Şekil 1. Elektromanyetik Spektrum Bölgeleri

Son yıllarda, görüntüleme teknolojisi, özellikle bütün meyve ve sebzelerin kalite tespiti için yüksek verimlilik, hızlı ve tahribatsız avantajları nedeniyle araştırmacıların yoğun ilgisini çekmektedir. Sınıflandırma, tanıma, renk, kalite değerlendirme, derin öğrenme ve tahribatsız ölçüm ile yakından ilişkili olan makine/bilgisayar görüşü, hiperspektral/multispektral görüntüleme de oldukça sık kullanılan bir tekniktir. Spektral çözünürlük, bant sayısı, bantların genişliği ve sürekliliğindeki farklılığa göre, spektral görüntüleme multispektral, hiperspektral ve ultraspektral görüntüleme olarak ayrılabilir (Tang, Zhang ve Mujumdar, 2022). Multi/Hiperspektral görüntüleme sistemi Şekil 2’de görüldüğü gibi optik bileşenler, ışık ayrıştırıcıları, sensör ve verileri elde etmeyi ve depolamayı sağlayan bir denetim biriminden oluşur (Hashim, Onwude ve Osman, 2018).



Şekil 2. Multi/Hiperspektral Görüntüleme Sistemlerinin Şematik Diyagramı

Şekil 3'te siyah beyaz görüntü yakalayabilen monokrom banttıan yüze yakın spektral çözünürlüğü olan hiperspektral bant kapsamları sunulmuştur. Bant sayısı arttıkça daha ayrıntılı spektrum verilerinin elde edildiği ve spektral çözünürlük bakımından daha iyi görüntülerin ortaya çıkarılabildiği Şekil 3'ten anlaşılmaktadır. Bu nedenle hiperspektral görüntüleme daha ayrıntılı veri ortaya çıkarma bakımından diğer görüntüleme yöntemlerine kıyasla ön plana çıkmaktadır.



Şekil 3. Spektral Görüntüleme Yöntemlerinde Yaygın Kullanılan Bantlar, a) Siyah Beyaz, b) Kırmızı, Yeşil ve Mavi, c) Görünür ve Yakın Kızılötesi Bantlar, d) Görünür, Morötesi ve Kızılötesi Bantlar

## **Multispektral Görüntüleme**

Multispektral görüntüleme, çok kanallı görüntüleme teknolojisinin kısaltmasıdır. Kanalların her pikseli, kanaldaki karşılık gelen nesne noktasının spektral yansıma değeri ile orantılıysa, görüntüye multispektral görüntü adı verilir (Chen, Lin ve Zhao, 2021).

Spesifik olarak, multispektral görüntüleme sistemi genellikle 3 ila 20 bant veya görüntü planlarına sahip bir görüntü verebilir. Gruplar arasında süreklilik yoktur (Su ve Sun, 2018). Belirli bir ışık frekansı aralığında görüntü yakalayan geleneksel dijital kameranın aksine, multispektral görüntüleme, elektromanyetik spektrum boyunca iki veya daha fazla farklı spektral görüntüleme dalga bandında görüntü elde edilmesini sağlar (Hashim, Onwude ve Osman, 2018). Birden çok, farklı dalga boyuna sahip görüntülerden oluşan üç boyutlu veri bloğu, numunenin bileşimin, dağılımını ve yüzey dokusunu gözlemlemek ve analiz etmek için kullanılabilir. Bu durum ise teknolojiyi çevrimiçi proses izleme ve kalite kontrolü için; doğrudan veri ve düşük maliyet avantajlarıyla multispektral görüntülemeyi ideal hale getirir (Liu vd., 2015). Multispektral görüntüleme teknolojisi, jeolojik keşif, çevresel izleme, yaşam durumu gözlemi ve diğer alanlarda yaygın olarak kullanılmakta olan bir teknolojidir (Chen, Lin ve Zhao, 2021).

Li vd. (2016) tarafından yapılan çalışmada iki renkli şeftalilerde multispektral yöntemle dokuz farklı kusur tespit edilmeye çalışılmıştır. Bu çalışmada iki renkli şeftalilerde birden fazla kusur tespit edildiğinde tek dalga boyu yeterli olmamıştır. Deney verileri incelendiğinde farklı her kusurun tespiti için farklı bir dalga boyu gerektiği görülmüştür. Çalışma kapsamında iki renkli şeftali için farklı kusurları bulunan şeftalilerin 550 nm'de hiperspektral tek bantlı görüntüleri üzerinden cilt yaralanması, yara izi, böcek hasarı, delinme yaralanması, çürüme, hastalık lekeleri, ayrık oluşumu, antraknoz kusurları hiperspektral verilerden tespit edilebilmiştir. Multispektral görüntüleme ise, iki renkli şeftalide bulunan kusurların multispektral yöntemde 425 nm-1000 nm arasındaki spektral bölge kullanılarak elde edilen görüntü verileri yardımıyla cilt yaralanması, yara izi, böcek hasarı, delinme yaralanması, çürüme, hastalık lekeleri, ayrık oluşumu, antraknoz oluşumları ENVI yazılım paketi kullanılarak incelenmiştir.

Hafifliği, donanım basitliği ve edinme hızı nedeniyle, multispektral görüntüleme için en zorlu süreç, ilgilenilen meyve sebzeleri karakterize eden belirli özellikleri temsil etmek için uygun dalga boylarını seçmektir. Bu nedenle, gıda endüstrisi için multispektral görüntülemenin temel özelliği, gıda kalitesini modellemek ve değerlendirmek için gereksiz hiperspektral görüntüler yerine süresiz multispektral görüntü verilerini kullanmaktır (Su ve Sun, 2018). Multispektral görüntüleme teknolojisi, jeolojik keşif, çevresel izleme, yaşam durumu gözlemi ve diğer alanlarda yaygın olarak kullanılmaktadır (Chen, Lin ve Zhao, 2021).

Hiperspektral görüntüleme yüzlerce bitişik spektral görüntü içerirken, multispektral görüntüleme birkaç farklı dalga boyunda görüntüler elde eder. Multispektral görüntüleme gıda ve tarım ürünlerinin yüksek hızlı çevrimiçi güvenliğini ve kalite denetimini iletme için geliştirilmiştir. Multispektral görüntüleme ile karşılaştırıldığında, hiperspektral görüntüleme daha uzun görüntü alma süresi gerektirir ve bazı durumlarda gerçek zamanlı veri toplama ve işleme için uygun olmayabilecek büyük hacimli verileri (iki uzamsal boyut ve bir spektral boyuttan oluşan üç boyutlu veriler) içerir (Siripatrawan ve Makino, 2018).

Sonuç olarak multispektral görüntülemenin avantajlarını hızlı sonuç edinme, tahribatsız analiz imkânı, çevre dostu olarak sıralayabiliriz. Bunun yanında tek dalga boyu ölçüm sistemleriyle kıyaslandığında multispektral görüntüleme sistemi sayesinde daha kapsamlı numune bilgisi alınabilir. Ayrıca hiperspektral görüntüleme sistemlerine kıyasla sistemin maliyetinin nispeten düşük olduğu görülmektedir. Bu nedenlerle multispektral görüntüleme çoğu uygulama için spesifik verilerin (kusur belirleme, sınıflandırma vs.) işlenmesinde daha uygun konumda bulunmaktadır (Chen, Lin ve Zhao, 2021).

Şekil 4'te bir bitkinin farklı dalga boylarında reflektansları ve tam spektrum reflektansı sunulmuştur. Burada görüldüğü gibi yeşil ve sağlıklı bir bitki kırmızı ve mavi bantlarda ışığı soğurmakta ve bir miktar, yaklaşık %10 reflektansla, yeşil rengini yansıtmaktadır. Bitkilerin görünür ve yakın bantlarda ışığı soğurarak fotosentez yapması bitkinin sağlıklı olduğunun göstergelerindedir. Bu durum multispektral bir kamera üzerinden şekildeki gibi ortaya çıkarılabilmektedir (Akkoyun, 2022).



**Şekil 4.** Yeşil Bir Bitkinin Mavi (a), Yeşil (b) Kırmızı (c) Görünür Bantlarda, Kızılötesi Bantlarda (d-f), Tam Spektrum Reflektansı (g) ve Asıl Görüntüsü (h)

### **Hiperspektral Görüntüleme**

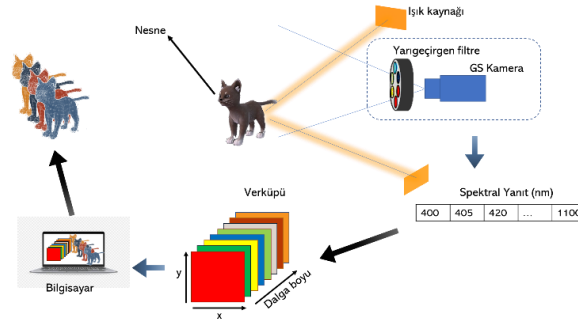
Hiperspektral görüntüleme, geleneksel görüntüleme ve spektroskopi yöntemlerinin birleşimiyle hem spektral hem de alansal çözünürlüğe sahip bir görüntüleme tekniğine dayanmaktadır. Uygulamalarda, ihtiyaca en yakın dalga boylarını bulmak için çok sayıda spektral verinin içinden bazı bilgilerin ayrıştırılması gerekir. Bu işlem makine öğrenimi yoluyla da gerçekleştirilebilir. Bulunan temsili dalga boyları, meyve sebzelerde olgunluk, yaralanama, çürük gibi belirli bir nesnel özellikleri tespit etmek için kullanılabilir (Du vd., 2020). Hiperspektral görüntüleme, bir test örneğinin görüntüsündeki tüm pikseller için UV ve VIS-IR spektrumları elde etme açısından multispektral görüntülemeye çok benzerdir (Su ve Sun, 2018). Temel fark olarak Hiperspektral görüntüleme verilerini 400 nm ile 1000 nm aralığında veya daha geniş dalga boyu aralığında yüze yakın spektral bantla sağlayabilirken multispektral görüntüleme yalnızca birkaç spektral bantta veriler elde edebilir (Du vd., 2020). Hiperspektral görüntüleme tekniği, görüntüleme ve spektral teknikleri tek bir sistemde bütünleştiren yeni bir tespit yöntemi olarak ortaya çıkmıştır. Bir hiperspektral görüntüleme sistemi genellikle bir spektrograf, yük bağlaşımlı cihaz (CCD) kamera veya Bütünleyici Metal Oksit Yarı İletken (CMOS), halojen ışık kaynakları, bir meyve tutma platformu ve görüntü yakalama, hareket mekanizması denetimi için bir bilgisayardan oluşur (Wang vd., 2016).

Şekil 5'te bir hiperspektral görüntüleme sisteminin temel yapısı sunulmaktadır. Bu sistemlerde multispektral görüntülemeden farklı olarak, birbirine yakın onlarca spektral bant verisi birleştirilerek bir hiperspektral veri küpü (hiperküp) ortaya çıkarılmaktadır. Şekilde belirtildiği gibi, ışık kaynağından gelen ışık nesneden yansdıktan sonra sırasıyla, yarı geçirgen filtrelerden, görüntü sensöründen geçerek bilgisayara aktarılmaktadır. Bilgisayar ortamında hiperküp olarak birleştirilen bu görüntüler istenildiğinde tümleşik istenildiğinde her bir bant için bağımsız olarak analiz edilmesi mümkün olmaktadır.

Hiperspektral görüntü verileri büyük miktarda bilgiye sahiptir ve bir tespit hedefi için yüzlerce hatta binlerce görüntü toplanabilir. Hiperspektral görüntüleme teknolojisi özellik tanımda önemli avantajlara sahiptir, ancak aynı zamanda büyük zorlukları beraberinde getirir. Büyük veri işleme algılama hızını büyük ölçüde azaltır ve modern gıda işlemenin hızlı çevrimiçi algılama gereksinimlerini karşılaştırmak zordur (Chen, Lin ve Zhao, 2021).

Görüntüleme tekniklerinin gıda analizlerinde uygulanması son yıllarda önemli ölçüde artmıştır. Uygulamaların en önemli özelliklerinden biri de meyve ve sebzeleri, UV, NIR ve IR bölgeleri gibi insan gözünün göremeyeceği elektromanyetik bölgelerinde inceleme olasılığını ortaya çıkarmış olmasıdır (Rajkumar vd., 2012).





Şekil 5. Hiperspektral Görüntüleme Sisteminin Çalışma Yöntemi ve Hiperküplerin Oluşturulması

Geleneksel görüntüleme yöntemlerinde kırmızı, yeşil ve mavi (RGB) dalga boylarına odaklanan üç filtre kullanılarak görüntüler video kameralarla kayıt altına alınır ve görünür ışık bantlarında çalışılır. Bu nedenle meyve ve sebzelerin iç yapısı hakkında fazla bilgi edinemezler ve görünür ışık ötesinde bulunan kusurları tespit edemezler. Hiperspektral görüntülemeye geleneksel görüntülemeye farklı olarak, spektral ve uzamsal bilgi (ne ve nerede) sağlarken, spektrometri, meyve ve sebzeler üzerindeki belirli bir noktada yakalanan spektral bilgiler hakkında bilgi sağlar (Lorente vd., 2012). Hiperspektral görüntüleme X-ışını görüntülemeye göre daha güvenli, FT-IR görüntüleme ve manyetik rezonans görüntülemeye göre daha hızlı ve uygun fiyatlı ve termal görüntülemeye göre daha iyi bir görüntü kalitesine sahiptir (Lan vd., 2021). Hiperspektral görüntüleme, gıda endüstrisinin verimliliğini artırır, maliyeti düşürür ve süreci tüketicilere daha iyi kalitede daha güvenli hale getirir. Elde edilen görüntü, bitki olgunluğunu, hastalık veya stres durumlarını tahmin etmede kullanılır. Ayrıca, bu tekniğin; nesnelere çeşitlilik, olgunluk, kalite, kompozisyon ve kontaminasyonlara göre sınıflandırması amacıyla kullanılması olasıdır (Rajkumar vd., 2012). Hiperspektral görüntüleme meyve ve sebzeler için hem tanımlanmış değişkenler (örneğin, renk, sıklık, asitlik, şeker) hem de karmaşık özellikler (örneğin, olgunluk, olgunluk, biyolojik kusurların tespiti, fizyolojik bozukluklar, mekanik hasarlar, duyu kalite) üzerindeki kalite parametrelerinin değerlendirilmesinde etkili bir araç olarak kullanılabilirliğini göstermektedir (Wieme vd., 2022).

Meyve ve sebze kusurlarını anlık olarak tespit etmek için hiperspektral görüntüleme teknolojisini doğrudan kullanmak çok zordur, çünkü hiperspektral görüntülerin elde edilmesi ve analizi çok zaman alıcıdır. Bunun yerine, kusurların hızlı tespiti için hızlı multispektral görüntüleme sistemleri geliştirmek üzere karakteristik dalga boyu görüntülerinden birkaçı seçilebilir (Zhang vd., 2020).

Hiperspektral görüntülemeye bulunan bazı dezavantajlar şunlardır;

- Standart kameralarla karşılaştırıldığında daha pahalı ve karmaşık sistemlerdir.
  - Görüntülerin mevcut elde edilme süreleri, belirli önemli dalga boylarını seçerek, yukarıda belirtildiği gibi, bunları geliştirmek için değerli araçlar olmalarına rağmen, sıralı veya gerçek zamanlı denetim sistemleri için kullanılmalarına izin vermemektedir.
  - Kötü aydınlatma, lens hataları, sensör hataları, lambaların spektral dağılımının eşit olmaması sonucu etkiler.
- Bu nedenle sistemin kalibrasyonunun iyi yapılmış olması gerekir.

Meyve ve sebze gibi değişken biyolojik ürünlerde meydana gelebilecek uzun süre ve farklı durumlar için kullanılabilirlik sağlam kalibrasyon modellerinin oluşturulması gerekir. Geliştirilen istatistiksel modeller genellikle zaman, boyut ve veri kümesi ile ilgilidir ve bu nedenle sonuçlar deneysel koşullara bağlıdır (Lorente vd., 2012). Yapılan çalışmaların çoğu, bir mevsim boyunca belirli bir meyve bahçesinde hasat edilen meyveleri kullanır. Bu nedenle bir sonraki mevsimde aynı veriler geçerli olmayabilir. Karydas vd. (2020) kirazların antioksidan kapasiteleri üzerine yaptığı çalışmada önceki yılın verileriyle kıyaslandığında başarı oranının düştüğünü rapor etmişlerdir.

Munera vd. (2021) hiperspektral görüntüleme sistemi kullanarak yaptıkları çalışmada malta eriğinde sağlam ve kusurlu meyve ayrıştırmasını %97,5 oranında sağlayabildikleri. Kusurların mor leke, morarma, yara izleri ve et kahverengileşmesi gibi tanımlandığı durumda ise, %95,9'luk doğru sınıflandırma oranı ile ayırım sağlanmıştı.

Li vd. (2018) hiperspektral görüntüleme yöntemi kullanılarak yaptıkları çalışmada kiraz meyvesinin çözünür kuru madde içeriği (SSC) ve pH değerleri göz önüne alınarak olgunluk seviyesine göre sınıflandırmada %96,4'lük doğru bir ayırım elde edilmiştir. Wang vd. (2016) *Cerasus humilis* (Kuzey Çin'de yetişen çalı kiraz) üzerinde hiperspektral

çalışmalar yapmış olup 3 farklı kusuru tespit etmeye çalışmıştır. Başarı oranı %88,57 olarak bulunmuştur. Daha önce yapılan çalışmalara göre bu oran düşüktür. Araştırma nesnesinin küçük hacmi ve kusur alanının küçük bir oranda olması sebebiyle düşük bir tanıma oranına neden olmuş olabileceği düşünülmektedir. Ayrıca, küresel bir meyve olarak, *Cerasus humilis* meyvesi üzerindeki eşit olmayan aydınlatma dağılımı da kusur tespitinin düşük doğruluğuna neden olan ana sorunlardan biri olduğu düşünülmektedir. Karydas vd. (2020) yaptığı çalışmada multispektral görüntüleme yöntemini kullanmıştır. Ağaçta bulunan kirazların antioksidan kapasitelerini tahmin edebilmek için uzaktan algılama, toprak analizi, iklimsel, topografik ve hidrografik verileri kullanarak bir sonraki sene oluşacak kirazların antioksidan kapasitesini belirlemeye çalışmışlardır.

Siedliska vd. (2018) hiperspektral görüntüleme yöntemiyle çilekte *Botrytis cinerea* ve *Colletotrichum acutatum* kaynaklı bozulmaları tanımlayarak %97 oranında ayırım sağladıkları görülmüştür. Liu vd. (2014) çileklerle ilgili multispektral yöntem kullanılan çalışmada olgunlaşmış ve olgunlaşmamış çileklerin karşılaştırılmasında 2 farklı model kullanmış ve bu modellerden BPNN modelinin sınıflandırma doğruluğu %93,33 olarak bulunurken SVM modelinin sınıflandırma doğruluğu %100 olarak bulunmuştur.

Zhang vd. (2017) hiperspektral görüntüleme ile 'Fuji' elma çeşidi üzerine yaptığı çalışma ile sağlam elmalar ile çürük elmaların birbirinden ayrılmasını sağlamıştır. Yapılan çalışmada %92,5 oranında doğru ayırım yapıldığı görülmüştür. Lan vd. (2021) 4 farklı çeşit elma ile yaptığı hiperspektral çalışmada kuru madde içeriği, toplam şekerler, asitler ve polifenollerin ölçümlerini yapmış fakat elma meyvesindeki kuru madde ve toplam şekerler gibi baskın çözünür içerikleri tahmin etmek için uygun olduğu görülmüş ancak bireysel bileşiklerin (fruktoz, glikoz, sakkaroz ve malik asit) veya mikro bileşenler (polifenollerin toplamı) için uygun olmadığı belirlenmiştir. Huang, Lu ve Chen (2020) elmalarla yaptığı çalışmada kusurları belirlerken ışık kaynağının konumunun önemini araştırmış ve 3 farklı noktadan ışık kaynağı verilerek görüntü alınmıştır. En yüksek başarının %93 oranında ayırım ile gövdeye dik verilen ışıklardan olduğu saptanmıştır. Hiperspektral görüntüleme ve multispektral görüntüleme ile ilgili yapılan güncel çalışmalarla ilgili ayrıntılı bilgiler Tablo 2'de gösterilmiştir.

## MULTİSPEKTRAL VE HİPERSPEKTRAL GÖRÜNTÜLEME İLE YAPILAN GÜNCEL ÇALIŞMALAR

**Tablo 2.** Multispektral ve Hiperspektral Görüntüleme ile Yapılan Güncel Çalışmalar

KULLANILAN TEKNİK + MAKİNE ÖĞRENMESİ	AMAÇ	MEYVE ya da SEBZE	ÖNEMLİ BULGU	FAYDASI	ÇALIŞILAN DALGA BOYU	REFERANS
Multispektral görüntüleme	Toprak analizi, iklimsel, topografik ve hidrografik verileri kullanarak kiraz meyvelerinin antioksidan kapasitesini tahmin etmek	Kiraz ( <i>Prunus avium</i> )	Bu çalışma, kiraz meyvelerinin antioksidan kapasitesinin tahmini için uzaktan algılama, toprak analizi, iklimsel, topografik ve hidrografik verileri kullanmaya yönelik ilk girişimdir.	DPPH ve FCR arasındaki regresyon katsayısı 2018 yılı için ( $R^2 = 0,21$ ) 2019 yılı için ( $R^2 = 0,81$ )	550 nm, 660 nm, 735 nm 790 nm	Karydas vd. (2020)
Multispektral görüntüleme	Zeytinleri sertliklerine göre sınıflandırmak	Zeytin ( <i>Picual</i> )	İç dokusu daha yumuşak olan zeytinlerden üretilen yağlarda kalitede düşüş olduğu görülmüştür.	%95 oranında doğru sınıflandırma	675 nm 588 nm	Martinez Gila vd. (2022)
Multispektral görüntüleme	Ananasın duyuşal ve mikrobiyal kalitesini tahmin etmek için farklı analitik cihazlardan elde edilen verilere dayanan matematik modelleri geliştirme	Ananas ( <i>Ananas comosus</i> )	Renk ve doku için geliştirilen tüm modeller düşük tahmin performansı gösterdi	Koku için %85'in üzerinde hassasiyet Renk ve doku için geliştirilen tüm modeller düşük tahmin performansı gösterdi	405, 435, 450, 470, 505, 525, 570, 590, 630, 645, 660, 700, 850, 870, 890, 910, 940 ve 970 nm	Manthou vd. (2020)
Multispektral görüntüleme	Kemometrik yöntemlerle birleştirilmiş multispektral görüntüleme kullanılarak bozulmamış domateslerde likopen ve fenolik bileşiklerin içeriğini eşzamanlı ve tahribatsız bir şekilde ölçmek	Domates ( <i>Solanum lycopersicum</i> )	Çıkarılan spektrumlar ile referans değerler (kimyasal olarak belirlenen) arasındaki kalibrasyon modellerini tahmin etmek için kullanılmıştır. Kemometri ile multispektral görüntülemenin, bozulmamış domates meyvesindeki biyoaktif bileşiklerin içeriğinin tahmini için herhangi bir ön numune hazırlığı yapılmadan başarıyla uygulanabileceği bulunmuştur.	Likopen için $R^2 = 0,938$ Fenolik madde için $R^2 = 0,965$	405-970 nm arasında 405, 435, 450, 470, 505, 525, 570, 590, 630, 645, 660, 700, 780, 850, 870, 890, 910, 940 ve 970 nm	Liu vd. (2015)
Multispektral görüntüleme	Çilek meyvesinde başlıca kalite özelliklerini ve olgunluk aşamasını tahmin etmek için multispektral görüntüleme uygulamasını değerlendirmek ve PLS, SVM ve BPNN kullanılarak elde edilen tahmin modellerinin performansını karşılaştırmaktır	Olgunlaşmış çilek x olgunlaşmamış çilek ( <i>Fragaria x ananassa</i> Duch.)	Uygun analiz modeli ile, çilek meyvesinde kalite özelliklerinin hızlı bir şekilde tahmin edilmesi ve olgunluk aşamasının sınıflandırılması için multispektral yöntemin uygun olduğu görülmüştür.	BPNN modelinin sınıflandırma doğruluğu %93,33 SVM modelinin sınıflandırma doğruluğu %100	405-970 nm (405, 435, 450, 470, 505, 525, 570, 590, 630, 645, 660, 700, 780, 850, 870, 890, 910, 940 ve 970 nm)	Liu vd. (2014)

**Tablo 2.** Multispektral ve Hiperspektral Görüntüleme ile Yapılan Güncel Çalışmalar (devamı)

KULLANILAN TEKNİK + MAKİNE ÖĞRENMESİ	AMAÇ	MEYVE ya da SEBZE	ÖNEMLİ BULGU	FAYDASI	ÇALIŞILAN DALGA BOYU	REFERANS
Multispektral görüntüleme	Soğuk hava deposunun mango üzerindeki etkisini tahribatsız bir şekilde tanımlamak	Mango ( <i>Mangifera indica L.</i> )	Meyvelerin soğutma sıcaklıklarında depolanması, mikro alanların akışkanlığındaki azalma nedeniyle membran proteininin zarar görmesinden kaynaklanan membran sertliğinde bir artışa neden olabilir. Bununla birlikte, BS, kontrol ve CI örnekleri arasında TSS'de anlamlı bir değişiklik gözlenmemiş, pH önemli ölçüde azalmıştır	%83,3 oranında soğuk yaralanmaları tanımlanmıştır.	630 nm, 545 nm 450 nm 750 nm 915 nm	Hashim, Onwude ve Osman (2018)
Multispektral görüntüleme	Nar meyvesinde online kalite testleri (toplam suda çözünür katı miktarı TSS, pH ve titrasyon asitliği TA) yapabilmek	Nar ( <i>Punica granatum L.</i> )	Briks, titrasyon asitliği ve pH hakkında iyi bir öngörü yeteneğine sahip olduğu görülmüştür.	TSS'yi $r = 0.95$ pH için $r = 0.85$ TA için $r = 0.93$ (Yapılan analizler ve multispektral yöntemle bulunan sonuçların arasındaki regresyon katsayısıdır.)	700, 800, 900 ve 1000 nm	Khodabakhshian vd. (2017)
Hiperspektral görüntüleme (VIS-NIR-HSI)	Kusurlu ürünleri ayırt etmek (Mor benek, berelenme, paslanma, etli esmerleşme)	Yeni dünya ( <i>Eriobotrya japonica L.</i> )	Amaca ulaşmak için 3 farklı yaklaşım incelenmiştir. En uygun olanın III yaklaşım olduğu görülmüştür. Bu yaklaşıma göre meyve; mor nokta, yara izi, morarma veya et kahverengileşmesi kusuru olarak sınıflandırılmıştır.	I. yaklaşımda %97,5 oranında kusur ayırımı II. yaklaşımda %96,7 oranında kusur ayırımı III. yaklaşımda %95,9 oranında kusurun tanımlanarak ayırımı	450-1040nm	Munera vd. (2021)
Hiperspektral görüntüleme (NIR-HSI)	NIR hiperspektral görüntüleme teknolojisi ile çözünür katı madde içeriği(SSC) ve pH için regresyon modelleri oluşturmak, birden fazla kirazı görsel olarak aynı anda tespit etmek ve olgunluk aşamalarını sınıflandırmaktır.	Taze kiraz ('Hongdeng')	Sonuçlar kirazların konsantrasyon dağılım haritalarına, SSC'sine ve pH'na dayanarak umut vadecidir ve üç olgunluk aşamasının sınıflandırılmasının yüksek doğrulukla uygulanabilir olduğu gösterilmiştir.	%96.4 oranında olgunluklarına göre doğru sınıflandırma	874-1734nm	Li vd. (2018b)
VIS-NIR Hiperspektral görüntüleme/Multispektral görüntüleme	İki renkli şeftalilerde yüzeyde tespit edilen 9 farklı kusuru bulmak	Taze şeftali ('Pinggu')	Sıralı uygulamalar için çok sayıda spektral kanala sahip bir hiperspektral sistem kurmak pratik değildir. Bunun yerine, sadece iki seçilmiş optimal dalga boyunu kullanan multispektral görüntülemenin daha hızlı çözüme götüreceği görülmüştür.	%96.6 oranında doğru kusur tespiti	325-1100 nm	Li vd. (2016)
Hiperspektral görüntüleme	Meyve olgunluğunu tespit etmek	'Hass' avokado ( <i>Persea americana Mill</i> )	Avokadoların olgunlukları ve ağırlıkları arasında bir ilişki bulunamamıştır. Avokadoların olgunluklarının kuru madde miktarıyla orantılı olduğu görülmüştür.	$R^2=0,9$ oranında olgunluk tespiti	400-1000 nm.	Vega Diaz, Sandoval Aldana ve Reina Zuluaga (2021)
Hiperspektral görüntüleme (VNIR/SWIR-HSI)	Hasat sonrası çilek meyvesinde sıklıkla bulunan <i>B. cinerea</i> ve <i>C. acutatum</i> gibi iki tipik bozulma mikroorganizmasının VNIR/SWIR hiperspektral görüntüleme tekniklerinin etkinliğini belirlemek	Çilek (senga senganana) Çilek (honeoye)	Mantar kontaminasyonunun görünmez olduğu aşılamaadan itibaren 24 saatte başlayan çilek meyvesinde <i>Botrytis cinerea</i> ve <i>Colletotrichum acutatum</i> enfeksiyonlarının erken tespiti için VNIR ve SWIR bölgelerinde hiperspektral görüntülemenin iyi uygulanabilirliğini ortaya koymuştur	%97 oranında doğru ayırım	450-2500nm	Siedliska vd. (2018)
Hiperspektral görüntüleme	Kusurlu olan özellikleri (pas lekesi, çatlak, böcek hasarı) tespit edebilmek	<i>Cerasus humilis</i> (Kuzey Çin'de yetişen çalı kiraz)	Araştırma sonuçlarından, görüntü işleme tekniklerinin tüm kusur örneklerini tanımlamadığı görülmektedir.	%88,57 oranında doğru kusur tespiti	895-1700nm	Wang vd. (2023)
Hiperspektral görüntüleme (NIR-HSI)	Plastik ambalajların içindeki taze meyveleri tespit etmek için NIR-HSI görüntülemenin potansiyelini araştırmak	Elma-Muz-Armut ve ambalajları	Çalışmada üç farklı meyve (elma, muz ve armut) ve üç farklı oranda polietilen filmi içeren plastik ambalaj filmi kullanılmıştır. Yüksek polietilenli film dışında diğer iki çalışma için ambalajın etkisi ortadan kaldırılmıştır.	>%97 oranında doğru sınıflandırma	900-1700 nm	Mishra, Chauhan ve Pettersson (2023)
VIS-NIR hiperspektral görüntüleme	Şarap için hasat edilecek üzümde bulunan toplam çözünür kuru madde (TSS) ve antosiyanin miktarını ölçmek	Taze üzüm	Üzüm bağlarının haritalanması bağcılığın ortak bir bileşenidir. Bu çalışmada geliştirilen teknoloji, TSS, antosiyanin konsantrasyonu ve üzüm olgunlaşmasının mekansal olarak hızlı ve tahribatsız bir şekilde haritalanmasını sağlamaktadır	Antosiyanin miktarı için $R^2=0,72$ Toplam çözünür kuru madde için $R^2=0,91$	400-1000 nm	Gutiérrez vd. (2019)

Tablo 2. Multispektral ve Hiperspektral Görüntüleme ile Yapılan Güncel Çalışmalar (devamı)

KULLANILAN TEKNİK + MAKİNE ÖĞRENMESİ	AMAÇ	MEYVE ya da SEBZE	ÖNEMLİ BULGU	FAYDASI	ÇALIŞILAN DALGA BOYU	REFERANS
Hiperspektral görüntüleme	Domateslerde görülen kuraklık stresini önlemek, sulamayı optimize etmek ve meyve kalitesini arttırmak	Domates ( <i>Solanum lycopersicum</i> L.)	Klorofil içeriğinin protein içeriğinin kuraklık stresi altında azaldığı ve stres derecesi ne kadar derin olursa, içeriğin o kadar düşük olduğu gösterilmiştir. Bitki sisteminin fizyolojik durumunu tahmin etmek için iki farklı yaprak türü yetersiz olabilir. Kontrol edilemeyen aydınlatma, karmaşık arka plan için ise çalışma yetersiz kalmıştır.	RIS modeli için %95,90 oranında doğru tespit SVM modeli için %95,78 oranında doğru tespit	400-1000nm	Weng vd. (2023)
(NIR-HSI) Hiperspektral görüntüleme	Elmanın yapısal değişkenliğini ve heterojenliğini değerlendirmek için; kuru madde içeriği, toplam şekerler, asitler ve polifenollerin ölçümlerini azaltmak, basit ve verimli bir yöntem sağlamak	4 çeşit elma ( <i>Golden Delicious, Granny Smith, Braeburn, Royal Gala</i> )	HSI spektrumlarına ve referans değerlerine dayanan tahmin modelleri, elma meyvesindeki kuru madde ve toplam şekerler gibi baskın çözümler içerikleri tahmin etmek için uygun olduğu görülmüştür, ancak bireysel bileşiklerin (fruktoz, glikoz, sakkaroz ve malik asit) veya mikrobileşenler (polifenollerin toplamı) için uygun olmadığı belirlenmiştir.	Kuru madde (mg/g) $R^2=0,83$ Toplam şeker içeriği (g/kg) $R^2=0,81$ Fruktoz (g/kg) $R^2=0,38$ Sakkaroz (g/kg) $R^2=0,67$ Glikoz (g/kg) $R^2=0,29$ Malik asit (g/kg) $R^2=0,31$ Polifenollerin toplamı (g/kg) $R^2=0,14$	990 nm-2450 nm	Lan vd. (2021)
Hiperspektral görüntüleme	Taze kesilmiş patates dilimlerinin renk ve su içeriğini hızlı bir şekilde belirlemek	Taze patates (Holland fifteen)	Renk ve kuru madde tayini numunede geri dönülmez hasara neden olur ve uzun sürer. Bu çalışmada hem numunenin bütünlüğü korunmuş hem de hasarı önlenmiş olup kısa sürede sonuca ulaşıldığı görülmüştür. Çalışma renk tahmini için başarılı fakat su içeriğini belirlemede daha fazla çalışma gerektirdiğini göstermiştir. PLS ve LSSVM modeli kullanılmıştır.	LSSVM modeli için renk tahmini $R^2=0,90$ Su içeriği tahmini $R^2=0,80$ PLS modeli için renk tahmini $R^2=0,84$ Su içeriği tahmini $R^2=0,77$	400-1000 nm	Xiao, Bai ve He (2020)
Hiperspektral görüntüleme	Salatalıkların soğuk depolamadan kaynaklı oluşan yaralanmalarının erken tespiti	Salatalık (Excursion)	Bu çalışmada geliştirilen yöntemler, salatalıkların çevrimiçi olarak sıralanması ve derecelendirilmesi için multispektral modda çalışacak çevrimiçi bir hiperspektral görüntüleme sisteminde uygulanabilir.	İkili sınıflandırma (normal-soğuk yaralanma) %100 oranında ayırım üçlü sınıflandırma (normal-hafif yaralanma-ciddi yaralanma) %91,6 oranında ayırım	(500-675 nm) ve geçirgenlik (675-1000 nm)	Cen vd. (2016)
Çok kanallı VIS/NIR spektroskopik sistem	Elmalardaki iç kusuru tespit etmek için farklı açılardan ölçüm yapmak (A-ışık kaynağına bakan uç B-ışık kaynağına bakan kaliks uç C- gövdeye dik gelen ışık)	Elma 'Honeycrisp'	Sınıflandırma sonuçlarının algılama lifi ve meyve oryantasyonuna göre değiştiğini göstermiştir. Hafif kusurlu elmalar için ortalama spektrumlar kullanıldığında, her bir algılama lifinin spektrumunu kullanmaktan önemli ölçüde daha iyi sınıflandırma sonuçları elde edilmiştir.	A oryantasyonu için %91,5 oranında ayırım B oryantasyonu için %89,2 oranında ayırım C oryantasyonu için %93,1 oranında ayırım	550-1650 nm	Huang, Lu ve Chen (2020)
VIS-NIR hiperspektral görüntüleme	Mandalinalarda görülen dört tip kusurun (örneğin, antraknoz, yara izi, çürüme ve thrips skarlaşması) tespiti incelenmiştir.	Mandalina ( <i>Citrus reticulata</i> Blanco)	Çalışma, önerilen multispektral görüntü algılama yöntemi mandalinalarda belirlenen kusurları tanımlama yeteneğini göstermiştir. 680 nm ve 715 nm'deki dalga boyu görüntülerinin, mandalinalardaki her türlü kusurun tespiti için en uygun seçim olduğunu gösteremedi, çünkü her tip kusur için sınırlı numune sayısı ve sadece dört tip kusur tipi kullanıldı.	%96,63 oranında doğru kusur tespiti	680 nm ve 715 nm	Zhang vd. (2020)
Hiperspektral görüntüleme	Elmaları çürüklük seviyelerine göre sınıflandırma	Elma (Fuji)	Çürük elmaları çürük olanlardan ayırt etmek gerekirse, model hem doğru hem de etkilidir. Elmaların erken çürüklerinin derecesini tespit etmek ve sınıflandırmak için iyi bir yöntemdir.	% 92,5 oranında doğru sınıflandırma	400-1050 nm	Zhang vd. (2017)

## SONUÇLAR

Araştırma laboratuvarlarında ve saha çalışmalarında kullanımı giderek artmakta olan Multi/Hiperspektral görüntüleme teknolojilerinin uygulamalarda sunduğu imkanların yanında maliyet, kalibrasyon ve uzman gereksinimini kısıtlayıcı yanları da bulunmaktadır. Bu görüntüleme teknikleri görünür ve görünür ötesinde spektral bant verileri sunmaktadır. Hiperspektral görüntüleme bant sayısı bakımından diğer yöntemlere kıyasla çok daha ayrıntılı tayf bilgisi sunabilmekte bunun yanında maliyet, tarama hızı, kalibrasyon zorluğu gibi noktalarda kısıtları bulunmaktadır.

Genel olarak yapılan çalışmalar incelendiğinde multispektral görüntülemenin basit ve hızlı çözümlere ihtiyaç duyan uygulamalarda kullanıldığı görülmüştür. Multispektral görüntüleme, Hiperspektral görüntülemeye göre daha hızlı



görüntü elde etmeyi ve daha az sayıda spektral battan görüntü işlemeyi içerir. Bu nedenle kusur ayrımlarında, olgunluk sınıflandırmalarında multispektral görüntülemeyi kullanmak daha mantıklıdır. Ayrıca görünür ve yakın kızılötesini kapsayan belirli dalga boylarında çalışmalarda sıklıkla kullanılmaktadır. Multispektral görüntüleme ile çalışma yapılması sırasında en önemli basamak doğru dalga boyunu seçmektir. Dalga boyu sayısı daha kısıtlı olması sebebiyle daha az veri ile daha hızlı sonuç alınması sağlanabilmektedir.

Hiperspektral görüntüleme ise daha fazla tayf taranarak çok daha ayrıntılı spektrum verisi elde etme amacıyla kullanılmaktadır. Hiperspektral görüntüleme meyve ve sebzelerde renk, sıklık, asitlik, şeker, antioksidan miktarı, toplam çözünür kuru madde miktarını belirlemek gibi spesifik durumların yanında, olgunluk, fizyolojik bozukluk, mekanik hasar, duyu kalite, biyolojik kusur gibi kalite parametrelerinin belirlenmesi amacıyla da kullanılır. Hiperspektral görüntüleme geniş bir spektrumda çalışma olanağı sağlar. Böylece ayrıntılı bilgi verilerine ulaşmamızı sağlar. Fakat verileri ayıklamak zaman alıcı ve zahmetlidir. Bu nedenle yapılacak işlem sınıflandırma gibi basit bir işlem ise multispektral görüntülemeyi kullanmak zamandan tasarruf sağlayacaktır.

Meyve ve sebzelerde oluşabilecek kusurların, hasarların tespit edilmesinde hiperspektral görüntüleme ve multispektral görüntüleme oldukça yenilikçi bir teknolojidir, hızlı, tahribatsız ve doğru sonuç vermesinin yanında çevre dostu bir uygulamadır. Yapılan çalışmalar incelendiğinde gelecekte kullanımı oldukça umut vaat edicidir.

## KAYNAKLAR

- Akkoyun, F. (2022). Inexpensive multispectral imaging device. *Instrumentation Science & Technology*, 50(5), 543-559. <https://doi.org/10.1080/10739149.2022.2047061>
- Cen, H., Lu, R., Zhu, Q., & Mendoza, F. (2016). Nondestructive detection of chilling injury in cucumber fruit using hyperspectral imaging with feature selection and supervised classification. *Postharvest Biology and Technology*, 111, 352-361. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2015.09.027>
- Chen, Q., Lin, H., & Zhao, J. (2021). Spectral imaging technology in food. *Advanced nondestructive detection technologies in food*, 127-160. <https://doi.org/10.1007/978-981-16-3360-7>
- Cömert, O., Hekim, M., & Kemal, A. D. E. M. (2019). Faster R-CNN kullanarak elmalarda çürük tespiti. *International Journal of Engineering Research and Development*, 11(1), 335-341. DOI: [10.29137/umagd.469929](https://doi.org/10.29137/umagd.469929)
- Du, Z., Zeng, X., Li, X., Ding, X., Cao, J., & Jiang, W. (2020). Recent advances in imaging techniques for bruise detection in fruits and vegetables. *Trends in Food Science & Technology*, 99, 133-141. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.02.024>
- Ebner, A., Gattinger, P., Zorin, I., Krainer, L., Rankl, C., & Brandstetter, M. (2023). Diffraction-limited hyperspectral mid-infrared single-pixel microscopy. *Scientific Reports*, 13(1), 281. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-26718-6>.
- Gao, L., & Smith, R. T. (2015). Optical hyperspectral imaging in microscopy and spectroscopy—a review of data acquisition. *Journal of biophotonics*, 8(6), 441-456. <https://doi.org/10.1002/jbio.201400051>
- Gracia-Romero, A., Vergara-Díaz, O., Thierfelder, C., Cairns, J. E., Kefauver, S. C., & Araus, J. L. (2018). Phenotyping conservation agriculture management effects on ground and aerial remote sensing assessments of maize hybrids performance in Zimbabwe. *Remote Sensing*, 10(2), 349. <https://doi.org/10.3390/rs10020349>
- Gutiérrez, S., Tardáguila, J., Fernández-Novales, J., & Diago, M. P. (2019). On-the-go hyperspectral imaging for the in-field estimation of grape berry soluble solids and anthocyanin concentration. *Australian journal of grape and wine research*, 25(1), 127-133. <https://doi.org/10.1111/ajgw.12376>
- Güzel, E., & Özlüoymak, Ö. B. (2015). Elektromanyetik Spektrumun Tarım Makinaları Araştırmalarında Kullanımı. *Tarım Makinaları Bilimi Dergisi*, 11(4), 315-320.
- Hashim, N., Onwude, D. I., & Osman, M. S. (2018). Evaluation of chilling injury in mangoes using multispectral imaging. *Journal of food science*, 83(5), 1271-1279. <https://doi.org/10.1111/1750-3841.14127>
- Huang, Y., Lu, R., & Chen, K. (2020). Detection of internal defect of apples by a multichannel Vis/NIR spectroscopic system. *Postharvest Biology and Technology*, 161, 111065. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2019.111065>



- Karydas, C., Iatrou, M., Kouretas, D., Patouna, A., Iatrou, G., Lazos, N., ... & Mourelatos, S. (2020). Prediction of antioxidant activity of cherry fruits from UAS multispectral imagery using machine learning. *Antioxidants*, 9(2), 156. <https://doi.org/10.3390/antiox9020156>
- Khodabakhshian, R., Emadi, B., Khojastehpour, M., Golzarian, M. R., & Sazgarnia, A. (2017). Development of a multispectral imaging system for online quality assessment of pomegranate fruit. *International Journal of Food Properties*, 20(1), 107-118. <https://doi.org/10.1080/10942912.2016.1144200>
- Lan, W., Jaillais, B., Renard, C. M., Leca, A., Chen, S., Le Bourvellec, C., & Bureau, S. (2021). A method using near infrared hyperspectral imaging to highlight the internal quality of apple fruit slices. *Postharvest Biology and Technology*, 175, 111497. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2021.111497>
- Li, C., Chen, G., Zhang, Y., Tang, F., & Wang, Q. (2020). Advanced fluorescence imaging technology in the near-infrared-II window for biomedical applications. *Journal of the American Chemical Society*, 142(35), 14789-14804. <https://doi.org/10.1021/jacs.0c07022>
- Li, J., Chen, L., Huang, W., Wang, Q., Zhang, B., Tian, X., ... & Li, B. (2016). Multispectral detection of skin defects of bi-colored peaches based on vis-NIR hyperspectral imaging. *Postharvest Biology and Technology*, 112, 121-133. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2015.10.007>
- Li, Q., He, X., Wang, Y., Liu, H., Xu, D., & Guo, F. (2013). Review of spectral imaging technology in biomedical engineering: achievements and challenges. *Journal of biomedical optics*, 18(10), 100901-100901. <https://doi.org/10.1117/1.JBO.18.10.100901>
- Li, X., Li, R., Wang, M., Liu, Y., Zhang, B., & Zhou, J. (2018a). Hyperspectral imaging and their applications in the nondestructive quality assessment of fruits and vegetables. *Hyperspectral imaging in agriculture, food and environment*, 27-63. DOI:10.5772/intechopen.72250.
- Li, X., Wei, Y., Xu, J., Feng, X., Wu, F., Zhou, R., ... & He, Y. (2018b). SSC and pH for sweet assessment and maturity classification of harvested cherry fruit based on NIR hyperspectral imaging technology. *Postharvest Biology and Technology*, 143, 112-118. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2018.05.003>
- Liu, C., Liu, W., Chen, W., Yang, J., & Zheng, L. (2015). Feasibility in multispectral imaging for predicting the content of bioactive compounds in intact tomato fruit. *Food Chemistry*, 173, 482-488. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2014.10.052>
- Liu, C., Liu, W., Lu, X., Ma, F., Chen, W., Yang, J., & Zheng, L. (2014). Application of multispectral imaging to determine quality attributes and ripeness stage in strawberry fruit. *PLoS one*, 9(2), e87818. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0087818>
- Lorente, D., Aleixos, N., Gómez-Sanchis, J. U. A. N., Cubero, S., García-Navarrete, O. L., & Blasco, J. (2012). Recent advances and applications of hyperspectral imaging for fruit and vegetable quality assessment. *Food and Bioprocess Technology*, 5, 1121-1142. DOI:10.1007/s11947-011-0725-1
- Manthou, E., Lago, S. L., Dargès, E., Lianou, A., Tsakanikas, P., Panagou, E. Z., & Nychas, G. J. E. (2020). Application of spectroscopic and multispectral imaging technologies on the assessment of ready-to-eat pineapple quality: A performance evaluation study of machine learning models generated from two commercial data analytics tools. *Computers and Electronics in Agriculture*, 175, 105529. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2020.105529>
- Martínez Gila, D. M., Navarro Soto, J. P., Satorres Martínez, S., Gómez Ortega, J., & Gámez García, J. (2022). The advantage of multispectral images in fruit quality control for extra virgin olive oil production. *Food Analytical Methods*, 1-10. <https://doi.org/10.1007/s12161-021-02099-w>
- Mishra, P., Chauhan, A., & Pettersson, T. (2023). Seeing through plastics: A novel combination of NIR hyperspectral imaging and spectral orthogonalization for detecting fresh fruit inside plastic packaging to support automated barcode less checkouts in supermarkets. *Food Control*, 150, 109762. <https://doi.org/10.1016/j.foodcont.2023.109762>
- Montembeault, Y., Lagueux, P., Farley, V., Villemaire, A., & Gross, K. C. (2010, June). Hyper-Cam: Hyperspectral IR imaging applications in defence innovative research. In *2010 2nd Workshop on Hyperspectral Image and Signal Processing: Evolution in Remote Sensing* (pp. 1-4). IEEE. DOI: 10.1109/WHISPERS.2010.5594890

- Munera, S., Gómez-Sanchís, J., Aleixos, N., Vila-Francés, J., Colelli, G., Cubero, S., ... & Blasco, J. (2021). Discrimination of common defects in loquat fruit cv. 'Algerie' using hyperspectral imaging and machine learning techniques. *Postharvest Biology and Technology*, *171*, 111356. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2020.111356>
- Oberti, R., Marchi, M., Tirelli, P., Calcante, A., Iriti, M., Tona, E., ... & Ulbrich, H. (2016). Selective spraying of grapevines for disease control using a modular agricultural robot. *Biosystems engineering*, *146*, 203-215. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2015.12.004>
- Ortega, S., Halicek, M., Fabelo, H., Callico, G. M., & Fei, B. (2020). Hyperspectral and multispectral imaging in digital and computational pathology: a systematic review. *Biomedical Optics Express*, *11*(6), 3195-3233. <https://doi.org/10.1364/BOE.386338>
- Rajkumar, P., Wang, N., Elmasry, G., Raghavan, G. S. V., & Garipey, Y. (2012). Studies on banana fruit quality and maturity stages using hyperspectral imaging. *Journal of food engineering*, *108*(1), 194-200. <https://doi.org/10.1016/j.jfoodeng.2011.05.002>
- Siedliska, A., Baranowski, P., Zubik, M., Mazurek, W., & Sosnowska, B. (2018). Detection of fungal infections in strawberry fruit by VNIR/SWIR hyperspectral imaging. *Postharvest Biology and Technology*, *139*, 115-126. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2018.01.018>
- Siripatrawan, U., & Makino, Y. (2018). Simultaneous assessment of various quality attributes and shelf life of packaged bratwurst using hyperspectral imaging. *Meat science*, *146*, 26-33. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2018.06.024>
- Su, W. H., & Sun, D. W. (2018). Multispectral imaging for plant food quality analysis and visualization. *Comprehensive reviews in food science and food safety*, *17*(1), 220-239. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12317>
- Tang, T., Zhang, M., & Mujumdar, A. S. (2022). Intelligent detection for fresh-cut fruit and vegetable processing: Imaging technology. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*, *21*(6), 5171-5198. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.13039>
- Vega Diaz, J. J., Sandoval Aldana, A. P., & Reina Zuluaga, D. V. (2021). Prediction of dry matter content of recently harvested 'Hass' avocado fruits using hyperspectral imaging. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, *101*(3), 897-906. <https://doi.org/10.1002/jsfa.10697>
- Wang, B., Yang, H., Zhang, S., & Li, L. (2023). Detection of Defective Features in *Cerasus Humilis* Fruit Based on Hyperspectral Imaging Technology. *Applied Sciences*, *13*(5), 3279. <https://doi.org/10.3390/app13053279>
- Wang, N. N., Sun, D. W., Yang, Y. C., Pu, H., & Zhu, Z. (2016). Recent advances in the application of hyperspectral imaging for evaluating fruit quality. *Food analytical methods*, *9*, 178-191. DOI 10.1007/S12161-015-0153-3
- Weng, S., Ma, J., Tao, W., Tan, Y., Pan, M., Zhang, Z., ... & Zhao, J. (2023). Drought stress identification of tomato plant using multi-features of hyperspectral imaging and subsample fusion. *Frontiers in Plant Science*, *14*, 1073530. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1073530>
- Wieme, J., Mollazade, K., Malounas, I., Zude-Sasse, M., Zhao, M., Gowen, A., ... & Van Beek, J. (2022). Application of hyperspectral imaging systems and artificial intelligence for quality assessment of fruit, vegetables and mushrooms: A review. *biosystems engineering*, *222*, 156-176. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2022.07.013>
- Wu, D., & Sun, D. W. (2013). Advanced applications of hyperspectral imaging technology for food quality and safety analysis and assessment: A review—Part I: Fundamentals. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, *19*, 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2013.04.014>
- Xiao, Q., Bai, X., & He, Y. (2020). Rapid screen of the color and water content of fresh-cut potato tuber slices using hyperspectral imaging coupled with multivariate analysis. *Foods*, *9*(1), 94. <https://doi.org/10.3390/foods9010094>
- Yaqoob, M., Sharma, S., & Aggarwal, P. (2021). Imaging techniques in agro-industry and their applications, a review. *Journal of Food Measurement and Characterization*, *15*, 2329-2343. <https://doi.org/10.1007/s11694-021-00809-w>

Zhang, H., Zhang, S., Dong, W., Luo, W., Huang, Y., Zhan, B., & Liu, X. (2020). Detection of common defects on mandarins by using visible and near infrared hyperspectral imaging. *Infrared Physics & Technology*, 108, 103341. <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2020.103341>

Zhang, S., Wu, X., Zhang, S., Cheng, Q., & Tan, Z. (2017). An effective method to inspect and classify the bruising degree of apples based on the optical properties. *Postharvest Biology and Technology*, 127, 44-52. <https://doi.org/10.1016/j.postharvbio.2016.12.008>