



**KAHRAMANMARAŞ SÜTÇÜ İMAM**  
ÜNİVERSİTESİ

e-ISSN 1309-1751

**Mühendislik Bilimleri Dergisi**  
Journal of Engineering Sciences

**2024**

SAYI / NUMBER : 3

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. Pinar 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)



### BU SAYIYA (CİLT 27 SAYI 3) KATKI VEREN HAKEMLER

- |                    |                     |
|--------------------|---------------------|
| Hüseyin KADOĞLU    | Assad FAROOQ        |
| Yasemin KORKMAZ    | Bekir Cihad BAL     |
| Selim ŞEN          | Mahit GÜNEŞ         |
| İsrafil KARADÖL    | Erdal KILIÇ         |
| Metin KÖK          | Rüstem BİNALI       |
| Ali GÜNEŞ          | Mehtap KÖSE ULUKÖK  |
| Ebubekir SEYYARER  | Murat KARAKOYUN     |
| Salim CEYHAN       | Özgür YURTSEVER     |
| İsmail YILDIZ      | Tayfur YAVUZBARUT   |
| Ulaş MATİK         | Ramazan SANDAL      |
| Oğuz DOĞAN         | Mehmet Umut SALUR   |
| Ensar Arif SAĞBAŞ  | Yunus SANTUR        |
| Mustafa DEMİRBİLEK | Ayşe Gül EKER       |
| Fatih UYSAL        | Fuat TÜRK           |
| Ayten ATEŞ         | Can Burak ÖZKAL     |
| İrfan KOCAMAN      | Caner GÖÇER         |
| Adnan KIRAL        | Selman AYDOĞAN      |
| Dicle BAL AKKOCA   | Oğuz ERYILMAZ       |
| Zehra YILDIZ       | Emre İsa ALBAK      |
| Bahadır Erman YÜCE | Oğuz TUNÇEL         |
| Taner EKİCİ        | Nusret NURLU        |
| Mehmet Fatih ALTAN | Sinan CANSIZ        |
| Fatma ELÇİN ERKURT | İbrahim UYANIK      |
| Tamer KORALAY      | Necla KÖPRÜBAŞI     |
| Eriñç ULUDAMAR     | Ahmet ÇETİN         |
| Erkan KARAKOYUN    | Ramazan ACAR        |
| Murat CAMUZCUOĞLU  | Ayşe Didem KILIÇ    |
| Ali GÜRBÜZ         | Mehmet Fatih YILMAZ |

**Fahri BİRİNCİ**  
**Abdülkadir ALBAYRAK**  
**Melek AKGÜL**  
**Rüstem KEÇİLİ**  
**Hakan AÇIKGÖZ**  
**Zehra URAL BAYRAK**  
**Ersan HARPUTLU**  
**Burhan DUMAN**  
**Esra SÖĞÜT**  
**Mehmet Eren GÜLŞAN**  
**Ersin KOZAN**

**Mehmet Zeki KONYAR**  
**Halil İbrahim FEDAKAR**  
**Serkan ATLI**  
**İbrahim DOLAK**  
**Ercan İZGİ**  
**Aydeniz DEMİR**  
**Devrim AKGÜN**  
**Güzin ÖZMEN**  
**Müge Elif FIRAT**  
**İbrahim Halil ÖZKİRİŞÇİ**  
**Serhat ERDEM**



## İÇİNDEKİLER

### **ARAŞTIRMA MAKALESİ – RESEARCH ARTICLE**

- Impact Of Various Traveler Weights On The Quality And Performance Of Identical Count Yarn Produced From Different Cotton Varieties**  
**Farklı Pamuk Çeşitlerinden Üretilen Aynı Numaralı İpliklerin Kalite Ve Performansı Üzerinde Çeşitli Kopça Ağırlıklarının Etkisi** 657-668  
Mehmet ŞAHİN, Osman BABAARSLAN
- Geleneksel Vitrayın Lazer Teknolojisi İle İnovasyonu Ve Cam Mobilya Kapağı Tasarımına Uygulanması**  
**Innovation Of Traditional Stainless Window With Laser Technology And Application To Glass Furniture Cover Design** 669-678  
Cebrail AÇIK
- Transformer Based Covid-19 Detection Using Chest X-Rays** 679-687  
**Akciğer Görüntülerinden Transformer Tabanlı Covid-19 Tespiti**  
Hacı Ömer DOKUMACI
- Investigation The Effects Of Sustainable Cooling/Lubrication Conditions On The Machinability Of Al-3Gr Based Hybrid Composites** 688-705  
**Sürdürülebilir Soğutma/Yağlama Koşullarının Al-3Gr Esaslı Hibrit Kompozitlerin İşlenebilirliği Üzerindeki Etkilerinin Araştırılması**  
Üsame Ali USCA, Ünal DEĞİRMENCİ, Serhat ŞAP
- Öneri Sistemlerinde Kullanılan Performans Metriklerinin Filtreleme Teknolojilerine Göre Değerlendirilmesi: İş Öneri Sistemleri Alanı Üzerine Bir Araştırma Çalışması** 706-725  
**Evaluation Of Performance Metrics Used In Recommendation Systems According To Filtering Technologies: A Research Study On The Field Of Job Recommendation Systems**  
Selin BİTİRİM, Duygu ÇELİK ERTUĞRUL
- Multilevel Thresholding For Brain Mr Image Segmentation Using Swarm-Based Optimization Algorithms** 726-754  
**Sürü Zekası Temelli Optimizasyon Algoritmaları Kullanılarak Çok Seviyeli Eşikleme İle Beyin Mr Görüntülerinin Bölütlenmesi**  
Ahmet Nusret TOPRAK, Ömür ŞAHİN, Rifat KURBAN
- Toz Metalurjisiyle Üretilen Niti'nin Mikrosertlik Ve Mikroyapı Davranışı** 755-762  
**Microhardness And Microstructure Behavior Of Niti Manufactured By Powder Metallurgy**  
Gül TOSUN, Tuncay KAYMAK, Nihat TOSUN



- Metallerin Yapıştırma Bağlantılarının Farklı Modelleme Yaklaşımları Kullanarak Sonlu Elemanlar Yöntemi İle Karşılaştırmalı Statik Yükleme Analizi**  
**Comparative Finite Element Analysis Of Statically Loaded Adhesively Bonded Metallic Structures Using Different Modelling Approaches** 763-778  
Faik Fatih KORKMAZ, Kadir ÇAVDAR
- Classification Of Customer Sentiments Based On Online Reviews: Comparative Analysis Of Machine Learning And Deep Learning Algorithms**  
**Çevrimiçi Değerlendirmeler Üzerinden Müşteri Duygularının Sınıflandırılması: Makine Öğrenmesi Ve Derin Öğrenme Algoritmalarının Karşılaştırmalı Analizi** 779-799  
Vahid SİNAP
- 3-Dimensional Automatic Segmentation Of Pituitary Tumor Using Deep Learning**  
**Derin Öğrenme Kullanılarak Hipofiz Tümörünün 3 Boyutlu Otomatik Bölütlenmesi** 780-791  
Sinan ALTUN
- Predicting Lung Cancer Using Explainable Artificial Intelligence And Boruta-Shap Methods**  
**Açıklanabilir Yapay Zeka Ve Boruta-Shap Yöntemleriyle Akciğer Kanserinin Öngörülmesi** 792-803  
Erkan AKKUR, Ahmet Cankat ÖZTÜRK
- Removal Of Veterinary Antibiotics By Using Layered Double Hydroxide Photocatalysts: Effects Of Reaction Parameters And Kinetic Modelling**  
**Tabakalı Çift Hidroksit Fotokatalizörler Kullanarak Veteriner Antibiyotiklerin Giderimi: Reaksiyon Parametrelerinin Etkileri Ve Kinetik Modelleme** 804-820  
Merve BARAÇ, Burcu PALAS, Gülin ERSÖZ
- 6 Şubat 2023 Depremleri İçin Kırsaldaki Yığma Yapıların Performansları Üzerine Bir Saha Araştırması: Nurdağı/Gaziantep Örneği**  
**A Field Study On The Performance Of Masonry Structures In Rural Areas For The 6 February 2023 Earthquakes: Nurdağı/Gaziantep Example** 821-837  
Musa YETKİN
- Göl Ortamında Oluşmuş Bitümlü Kiltası Çökellerinde Havzanın Paleo-Tuzluluk İncelemeleri: Diyatome Türü Algilerle Tuzluluk Arasındaki İlişki**  
**Paleo-Salinity Investigations Of The Basin In Bituminous Claystone Sediments Formed In Lacustrine Environment: The Relationship Between Diatom Type Algae And Salinity** 838-853  
Ali SARI, Kamal ISMAYILZADA, Elif AKISKA, Fuat EROL
- Üç İplik Örme Kumaşlarda Fiziksel Özellikler Ve Patlama Mukavemeti Üzerine Farklı Astar İpliği Oranlarının Etkilerinin İncelenmesi**  
**Investigation Of The Effects Of Different Backed Yarn Ratios On Physical Properties And Bursting Strength Of Three-Fleece Knitted Fabrics** 854-860  
Seval UYANIK, Sabih OVALI
- Duvar Yalıtım Tipleri Ve CO<sub>2</sub> Emisyonları: Sınırdaki Karbon Düzenleme Mekanizmasını Tamamlayıcı Bireysel İyileştirmeler Çerçevesinde Bir İnceleme**  
**Wall Insulation Types And CO<sub>2</sub> Emissions: A Study Within The Framework Of Individual Improvements Complementary To The Carbon Border Adjustment Mechanism** 861-872  
Ahmet Serhan CANBOLAT

- Güvendik Dayk Karmaşığı'na Ait Metagranitlerin Zirkon U-Pb Jeokronolojisi Ve Lu-Hf İzotopları**  
**Zircon U-Pb Geochronology And Lu-Hf Isotopes Of Metagranites Belonging To The Güvendik Dike Complex** 873-885  
Abdullah SAR, Sevcan KÜRÜM, Hao-yang LEE
- Ham Perlit Esaslı Hafif Geopolimerlerde Hidrojen Peroksit Kaynaklı Genleşme: Deneysel Bir Yaklaşım**  
**Hydrogen Peroxide-Induced Expansion In Raw Perlite Based Lightweight Geopolymers: An Experimental Approach** 886-895  
Ali İhsan ÇELİK, Mehmet Cemal ACAR, Ufuk TUNÇ, Ramazan KAYABAŞI, Ahmet ŞENER
- Landfill Leachate Treatment Via Nano Zero Valent Iron Particles (NZVI) Of Adsorption Process**  
**Adsorpsiyon Prosesinin Nano Sıfır Değerli Demir Parçacıkları (NZVI) Yoluyla Çöp Sızıntı Suyu Arıtımı** 896-907  
Serdar GÖÇER, Zeynep ZAIMOĞLU, Kevser CIRIK
- Manto Peridotitlerinde Kısmi Ergime Ve Metazomatizma Etkisi: Kızıldağ Ofiyoliti Örneği (Hatay, Türkiye)**  
**Partial Melting And Metasomatism Effects In Mantle Peridotites: The Case Of Kizildağ Ophiolite (Hatay, Turkey)** 908-928  
Mustafa Eren RİZELİ, A. Feyzi BİNGOL, Abdullah SAR, Kuo-lung WANG
- Alaşımli Alüminyum Boru Malzemelerde Büzme/Çap Azaltma Uygulamaları** 929-937  
**Swaging/Diameter Reduction Applications In Aluminum Alloy Pipe Materials**  
Mustafa TAŞ, Abdul Kadir EKŞİ
- Elazığ'ın Meteorolojik Ve Tarımsal Kuraklığının Farklı Kuraklık İndisleri Kullanılarak Değerlendirilmesi**  
**Evaluation Of Meteorological And Agricultural Drought In Elazığ Using Different Drought Indices** 938-962  
Veysi KARTAL
- Akdağmadeni (Yozgat) Civarındaki Plütonik Kayaçların Petrolojik Özellikleri**  
**Petrological Properties Of Plutonic Rocks In The Vicinity Of Akdağmadeni (Yozgat)** 963-984  
Nazmi OTLU
- Basınç Ve Eğilme Altındaki Eliptik Kolonların Taşıma Kapasitelerinin Esnek Hesaplama Yöntemleri İle Tahmini**  
**Ultimate Capacity Prediction Of Elliptical Section Columns In Compression And Bending By Soft Computing Methods** 985-998  
Mehmet KURT, Esra METE GÜNEYİSİ, Kasım MERMERDAŞ
- Computer-Aided Detection Of Brain Tumors Using Image Processing Techniques** 999-1018  
**Görüntü İşleme Teknikleri Kullanarak Beyin Tümörlerinin Bilgisayar Destekli Tespiti**  
Hilal GÜVEN, Ahmet SAYGILI
- Comparison Of Rigid Pavement Designs For Airport Runways Under Strong And Weak Ground Conditions At Low And High Traffic Airports** 1019-1032  
**Düşük Ve Yüksek Trafikli Havaalanlarında Güçlü Ve Zayıf Zemin Koşulları Altında Havaalanı Pistleri İçin Sert Kaplama Tasarımlarının Karşılaştırılması**  
Osman HANSU, Nildem TAYSI, Dilan UZUNKODALAK AKSOY
- Investigation Of The Effectiveness In The Solid Phase Extraction Studies Of The Graphene Hybrids** 1033-1043  
**Grafen Hibritlerinin Katı Faz Ekstraksiyon Çalışmalarındaki Etkinliğinin Araştırılması**  
Zaman Adnan MOHAMMED, Derya KILIÇASLAN, Muharrem KARABÖRK

- Determination Of Pi Coefficients In Speed Control Of Brushless DC Motor With Gray Wolf Optimization And FPGA Application** 1044-1056  
**Fırçasız DC Motorunun Hız Kontrolünde Pi Katsayılarının Gri Kurt Optimizasyonu İle Belirlenmesi Ve FPGA Uygulaması**  
Yurdagül BENTEŞEN YAKUT
- Facile Ultrasonic-Assisted ZIF-67 Synthesis And Use In Phenol Removal From Aqueous Solutions** 1057-1068  
**Basit Ultrasonik-Destekli ZIF-67 Sentezi Ve Sulu Çözeltilerden Fenolün Uzaklaştırılmasında Kullanımı**  
Cihan GEÇGEL
- Porozite Analizine Derin Öğrenme Yaklaşımı: U-Net İle Dinamik Eşikleme** 1069-1077  
**A Deep Learning Approach To Porosity Analysis: Dynamic Thresholding With U-Net**  
Saim ERVURAL, Emre Burak ERTUŞ, Hüseyin Furkan CERAN
- Haycam Vs Eigencam For Weakly-Supervised Object Detection Across Varying Scales** 1078-1088  
**Farklı Ölçeklerde Zayıf Denetimli Nesne Tespiti İçin Haycam Ve Eigen Karşılaştırılması**  
Ahmet ÖRNEK, Murat CEYLAN
- Harç Atığı İkameli Mikro Betonlarda Sertleşmiş Hal Ve Mikroyapı Değerlendirilmesi** 1089-1101  
**Evaluation Of Hardened State and Microstructure Properties Of Mortar Waste Substituted Micro Concretes**  
Melek AKGÜL, Osman HANSU
- Motion Capture Teknolojileri Üzerine Bibliyometrik Bir Araştırma** 1102-1116  
**A Bibliometric Study On Motion Capture Technologies**  
Gülseren DİNVAR PEKŞEN, Tolga BARMAN



# Kahramanmaraş Sütçü İmam University Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 17.08.2023  
Kabul Tarihi : 04.03.2024

Received Date : 17.08.2023  
Accepted Date : 04.03.2024

## IMPACT OF VARIOUS TRAVELER WEIGHTS ON THE QUALITY AND PERFORMANCE OF IDENTICAL COUNT YARN PRODUCED FROM DIFFERENT COTTON VARIETIES

### FARKLI PAMUK ÇEŞİTLERİNDEN ÜRETİLEN AYNI NUMARALI İPLİKLERİN KALİTE VE PERFORMANSI ÜZERİNDE ÇEŞİTLİ KOPÇA AĞIRLIKLARININ ETKİSİ

Mehmet ŞAHİN<sup>1\*</sup> (ORCID: 0000-0001-5070-7360)  
Osman BABAARSLAN<sup>2</sup> (ORCID: 0000-0002-1606-3431)

<sup>1</sup> Harran Üniversitesi, Tekstil Teknolojisi Programı, Şanlıurfa, Türkiye  
<sup>2</sup> Çukurova Üniversitesi, Müh. Fakültesi, Tekstil Mühendisliği Bölümü, Adana, Türkiye

\* Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Mehmet ŞAHİN, mehmentsahin@harran.edu.tr

#### ABSTRACT

In recent years, due to the excessive increase in machine prices, changes in energy policies, the rising cost of fibre, and fluctuations in the prices of spare materials, the goal has been to achieve a high-performance working system without sacrificing quality while reducing production costs. The selection and maintenance of the ring traveler, ring, and bobbin group, which are essential components in the yarn winding process, are crucial in the ring-spinning system for continuous performance. Even small improvements in this area are significant, as they can lead to higher production and increased profits for the enterprise. This study investigates the quality changes and machine performance that may occur by using light and heavy travelers, in addition to the standard traveler, in producing compact ring yarn with a count of Ne 30/1 (20 tex) using 100% domestic cotton. The results indicate a positive effect on yarn quality parameters, especially hairiness, and tenacity, with the best results obtained using ISO 31.5, known as a light traveler. The best result in terms of yarn breaks per 1000 spindles per hour was also achieved with ISO 31.5.

**Keywords:** Ring spinning, traveler, hairiness, yarn strength

#### ÖZET

Son yıllarda makine fiyatlarının aşırı artması, enerji politikaları, kullanılacak elyafın fiyat artışı ve yedek malzeme sarfiyatında fiyat dalgalanmalarının yukarı yönde gerçekleşmesinden dolayı, üretimde maliyetin düşürülmesi için kaliteden ödün vermeden performanslı çalışma sistemi hedeflenmektedir. Performanslı çalışmanın devamlı olması için ring iplik eğirme sisteminde kopça, bilezik ve iplik sarım malzemesi olan masura grubunun seçimi ve bakım işlemleri önemlidir. Burada yapılabilecek küçük iyileştirmeler dahi işletmeye üretim ve kar olarak döneceğinden büyük önem arz etmektedir. Bu çalışmada %100 yerli pamuk kullanılarak Ne 30/1 (20 tex) numarada üretilen kompakt ring ipliği üretiminde kullanılan standart kopçanın dışında bir hafif bir de ağır kopça kullanılarak oluşabilecek kalite değişimleri ve makine performansı incelenmiştir. Sonuçta tüm iplik kalite parametrelerinin yapılmış olan bu küçük değişiklikten etkilenmiş olduğu görülmüş olup en iyi sonucun hafif kopça olarak bilinen İSO 31,5'ta elde edildiği tespit edilmiştir. Saatte 1000 iğ başına iplik kopuşu açısından da en iyi sonuç ISO 31.5 ile elde edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Ring iplikçiliği, kopça, tüylülük, iplik mukavemeti

ToCite: ŞAHİN, M., & BABAARSLAN, O., (2024). IMPACT OF VARIOUS TRAVELER WEIGHTS ON THE QUALITY AND PERFORMANCE OF IDENTICAL COUNT YARN PRODUCED FROM DIFFERENT COTTON VARIETIES. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 27(3), 657-668.

## INTRODUCTION

In recent years, the textile sector has been developing rapidly, and the capacity of the spinning sector is increasing. With this large capacity, ring-spinning systems occupy an important place in the sector and require significant attention. Cost is one of the most important issues to be examined in these systems. The most crucial factors affecting the cost of ring-spinning machines are the traveler, ring, and bobbin area, collectively known as the twist trio.

For the traveler, which is a consumable in the twisted triad, using a traveler that is not of optimal weight for the yarn number (Ne) and opting for a heavier traveler can result in improved hairiness values. However, after approximately 75% of the normal usage period of the traveler, production, and quality issues may arise due to surface deterioration. If travelers are used as heavy or light according to the yarn number, hairiness values change accordingly. For yarn counts around Ne 30/1 and finer, hairiness decreases, whereas an increase in hairiness can be observed with higher machine speeds due to increased tension in the yarn run by the ideal traveler. To reduce hairiness, high speeds should be used if a light traveler is employed (Can and Kırtay, 2011).

Using a light traveler and increasing speed optimizes the tension of the yarn on the bobbin, positively affecting production and machine performance. For medium or thicker yarn counts, using light travelers can lead to an increase in ends down during production due to wear on the surface where the traveler contacts the ring, resulting in production loss, decreased machine efficiency, and productivity (Kaya, 2005).

Well-trained technical personnel can mitigate tension and surface wear issues through proper ring centering. Using the ideal weight traveler for Ne 30/1 and thicker yarns results in better quality yarn production and more efficient workflows due to the protection of the traveler coating surface (Erem, 2006).

Travelers used in ring spinning vary according to the type of ring. C-type travelers are used for non-inclined rings (T-flange), while SFB-style travelers are used for inclined rings (orbit rings) (Alaşehirli, 2009). Recently, surface coatings resistant to instantaneous temperature increases (average 300°C) have been applied to prevent wear on the contact surfaces of travelers with rings (Alaşehirli, 2009).

Travelers aim to maximize their change time to enhance ring machine efficiency. This is achieved by producing coating travelers that resist surface temperature-induced wear (Coşkun, 2019; Çetin, 2009). The bracelet, named after the ring spinning diameter, varies according to the yarn count. Small-diameter bracelets are used for fine yarns, and large-diameter bracelets for thick yarns. Proper ring centering, a regular traveler running-in program, and timely traveler changes enable higher traveler speeds and healthier performance. Increasing the contact surface between the traveler and the ring also facilitates higher speeds, necessitating the use of lighter travelers due to increased wear and friction (Uzun, 2007).

The advantages of reducing the ring diameter according to the yarn count to be produced are as follows: a decrease in ring diameter at constant speed leads to reduced energy consumption, and small-diameter collars and short bobbins improve balloon stability due to reduced air resistance. Thus, it is possible to use lightweight travelers at high spindle speeds and small balloon conditions.

However, the smaller diameter of ring spinning can also create some disadvantages. These include an increase in the number of piecings in the yarn package due to the reduced cop volume and a decrease in the efficiency of the ring spinning machine due to frequent doffing.

In ring spinning, the reduction in diameter has led to an increase in production with an increase in spindle speed. The reasons for the increase in production are as follows: improved spindle bearing technology, new arrangements in bracelets and travelers, developments in the materials used for bracelets and travelers, and small-scale bracelet selection.

The most important way to maintain the efficiency of bobbin machines is to ensure compatibility between the ring and the traveler. In bobbin machines, knotting is aimed to be used only during cop changes, thus reducing the number of ends down. High spindle speeds and appropriate quality, obtained according to the limited traveler speed, are only possible with reduced ring diameters (Gemci and Bıçkı, 2003).

To increase machine efficiency, attention should be paid to ensuring that the ring tool changes are made as soon as possible, and the number of ends down per 1000 spindles/hour should be kept at the lowest level. Yarn breaks occur when the ideal spinning triangle is not formed. If the yarn tensions in the spindles are homogeneous and at the perfect level, minimizing thick and thin places faults in the yarns also occurs. When determining the traveler weights, the aim should be to prevent breaks caused by yarn tension and prevent the formation of large balloons. Additionally, to prevent mechanical breaks that occur during doffing in ring machines, the reserve winding (bobbin winding) must be wound smoothly and adequately. In this manner, during tool changing, the yarn from the reserve winding and the actual yarn break are distinguished (Bozkurt, 1993).

Waste of yarn from the reserve during doffing can be clearly understood when yarn residues that have curled at the end of the yarn guides are wrapped. This happens when the yarn only takes a twist after it comes out and eventually breaks due to excessive twists. This problem is primarily related to the initial tension of the thread, which can be eliminated by improving the tension. The problems causing this issue include the speed of yarn output, the machine starting position during ring up and down movement, starting the drafting unit before the spindles, and incorrect traveler selection (Bozkurt, 1993).

Apart from the traveler, the main factors affecting yarn breaks in the machine can be listed as follows: roving evenness, suction, and blowing organs, problems in sleeves and aprons, environmental air currents, values such as maturity, micronaire, and Presley in raw materials, and shooting area cleaning (Usta, 2000).

While analyzing breaks with these six items, the negative situations caused by breaks, which are cost-oriented, can be listed as follows: production stops (reducing efficiency), the number of spindles assigned to the worker, negative effects on efficiency in the coil chamber, problems in weaving and knitting, lower quality, and raw material loss (wick waste).

In general, the yarn frictions caused by yarn breaks can be listed as fiber properties, yarn structural and volumetric properties, and machine-induced process parameters. These include fiber surface roughness, raw material quality values, variation in yarn count, low twist, contamination in the spinning method, hairiness, excessive tension caused by the traveler, moisture, and roughness in the places where the yarn passes (Ayan and Sabir, 2013).

In this study, Ne 30/1 (20 tex) ring compact yarn with three different traveler weights was produced from different kinds of cotton from the Şanlıurfa region: one with the ideal micronaire weight, one lighter than the ideal micronaire weight, and one heavier than the ideal micronaire weight. A T-flange traverse study was conducted to determine the performance related to yarn quality and machine efficiency among the produced yarns.

## MATERIAL AND METHOD

### Material

The raw materials used in the study were Fiona and Gandia seed-origin cotton from the Şanlıurfa region, and the HVI values of the cotton are provided in Table 1. The fiber samples for obtaining HVI values were taken from 8-10 bales, with an average of 20 g from each bale. Cotton HVI test values were obtained using the Uster HVI M 1000 device. The cotton samples were conditioned in the laboratory for 24 hours at  $65\pm 2\%$  relative humidity and  $22^\circ\text{C}\pm 2$  temperature. These humidity and temperature values significantly affect the measurement values of the device. Therefore, laboratory ambient conditions are regularly measured and recorded.

**Table 1.** HVI Values of Used Cotton

Cotton	Length (mm)	Uniformity index	strength (cN/tex)	Elongation (%)	MIC	SFI	SCI	+b	CG
Urfa Fiona	30.35	84.2	32.4	6.9	4.6	6.4	154	8.4	41-1
Urfa Gandia	31.23	81.1	29.5	5.8	4.9	7.8	129	7.7	51-1

According to Uster statistics, the 1000 spindles/hour end-down evaluation is given in Table 2. The machine's performance can be assessed by examining the number of breaks listed in the table.

**Table 2.** Evaluation of Yarn Breaks (Bozkurt, 1993).

Breakage of 1000 Spindle/hr-Evaluation	O.E. Rotor	Ring (combed) >Ne40	Ring (combed) <Ne40	Ring (carded)
Very Good	<30	<15	<12	<20
Good	30-70	15-25	12-21	20-30
Middle	70-110	25-30	21-28	25-35
Bad	>110	>30	>28	>35

### Method

In the experimental study, Ne 30/1 compact combed cotton yarn was produced. The standard traveler weight for Ne 30/1 compact combed yarn is ISO 35.5, which corresponds to 5.0 travelers. However, in this study, ISO 40 (4.0) and ISO 31.5 (6.0) travelers, known as heavy and light travelers respectively, were also used instead of the ideally worked travelers. Traveler weights are expressed in micrograms as the total weight of 1000 travelers determined in production. Factory air conditioning values are set at 30°C temperature and 45% relative humidity.

The type of traveler used is C1 EL UDR type T-flange travelers, and the working time of each traveler is determined as the normal traveler change period, including the time it is attached to the machine and the running-in period (Figure 1).



a) Kops (Kaya, 2005)



b) Ring traveler and yarn (Kaya, 2005)

**Figure 1.** Compatibility of Spindle, Ring, and Traveler Used in the Study

This period is aimed at an average of 240 hours. The experimental study was conducted on a single 1632 spindle K-45 compact machine, which was determined as a reference. Before starting this study, the twist on the reference machine was set to 720 T/m and the speed to 19,000 rpm, depending on the condition of the traveler.

The following spindle-based studies were applied to all spindles and, therefore, to the entire machine to assess the traveler performance on the reference machine before the experiment. Conditions such as absolute balance control of the ring table, diameter control of the balloon breakers suitable for the ring diameter, control of the traveler blade distance adjustment (3 mm) used to protect the traveler from fiber fly, conformity of the bobbin diameter and length to the ring diameter, control of the ring centering, and control of the yarn guide, pigtail, balloon breaker, and ring in a single center were checked on all machine spindles to ensure ideal air conditioning conditions and prevent fiber fly and air circulation during operation.

The machine data used in the study are given in Table 3 below.

**Table 3.** Operating Machine Data

Cotton	Gandia and Fiona
Comb Strip Number	5906 Tex (Ne 0,100)
I.Passage Traction Number	5369 Tex (Ne 0,110)
Wadding Weight	78 gram/meter
Combed Ribbon Number	4926 Tex (Ne 0,120)
Combed Waste Rate	18,30 %
Passage II Lane Number	4926 Tex (Ne 0,120)
Roving Ribbon Number	656 tex (Ne 0,90)
Ring Yarn Count	19,68 Tex (Ne 30/1)
Ring Machine Cycle	19000 Rpm
Yarn Twisting	720 Lap/meter
Yarn Clasp Type	C1 EL UDR
Buckle Weights	ISO40, ISO35.5, ISO31.5
Bracelet type	T Flange Orbit
Ring Machine Model	RIETER K45
Number of ring spindles	1632

## RESEARCH FINDINGS AND DISCUSSION

In this study, the effect of both heavy and light travelers on yarn quality and machine efficiency was investigated by taking the ideal traveler for Ne 30/1 compact combed yarn as a reference. The device used for yarn quality testing is the USTER® TESTER 5-S400, and the results were obtained by connecting the cops to the device as they arrived in the laboratory environment.

Yarn tests were conducted daily on samples from 10 spindles, which were determined as references on the reference machine, starting from the second day of traveler use and continuing for a total of seven days, including the eighth day. The total number of ends down was recorded for each set daily, aiming to reach a result of 1000 spindles/hour in the total number of breaks. This approach allows for an assessment of the machine's performance.

In the first study, a twist of 720 T/m and a speed of 19,000 rpm was maintained for Ne 30/1 yarn, using an ISO 40 (4.0) traveler for the entire machine. The process began with a 15% reduction in speed and a 6-hour running-in program, with the goal of reaching the machine's normal speed by the end of the 6-hour period to protect the traveler's surface from sudden burns due to yarn tension resulting from the machine speed after fastening.

For the second study, an ISO 35.5 (5.0) C1 EL UDR T-flange traveler was used. After removing the previous ISO 40 travelers, the machine was thoroughly cleaned, and the ISO 35.5 travelers were installed.

The yarn quality values obtained from Fiona and Gandia cotton for the ISO 40 traveler and the 1000 spindle/hour ends down values are given in Table 4 and Table 5.

**Table 4.** Fiona-Type Yarn Quality Values obtained with ISO 40 Traveler

The working day of the traveler	U%	CVm%	Index	Thin place -%50/km	Thick place +%50/km	Neps +%200/km	Hairiness (H)	1000 spindles/hr ends down values	Rkm
2. Day Av.	8.56	11.76	1.16	0	12.5	27.5	3.15	10	17.1
3. Day Av.	8.64	11.64	1.14	0	15	26	3.2	14	18.2
4. Day Av.	8.95	11.86	1.18	0	18	28	3.18	13	18.6
5. Day Av.	9.25	11.97	1.22	1	18	26	3.42	26	15.76
6. Day Av.	9.42	11.85	1.21	2	24	38	4.26	29	16.2
7. Day Av.	9.89	12.12	1.25	2	25	33	4.16	38	14.35
8. Day Av.	10.12	12.44	1.24	3	28	35.5	4.42	42	15.23
Average	9.26	11.95	1.2	1.14	20.07	30.57	3.68	24.57	16.48



**Table 5.** Gandia-Type Yarn Quality Values obtained with ISO 40 Traveler

The working day of the traveler	U%	CV <sub>m</sub> %	Index	Thin place -%50/km	Thick place +%50/km	Neps +%200/km	Hairiness (H)	1000 spindles/hr ends down values	Rkm
2. Day Av.	9.15	11.62	1.18	0	17	34	3.55	25	16.5
3. Day Av.	9.23	11.72	1.19	0	13	39	3.89	19	17.5
4. Day Av.	9.15	11.37	1.12	1	9	45	3.75	17	17.2
5. Day Av.	9.1	11.56	1.21	0	10	16	3.78	20	18.4
6. Day Av.	9.25	11.75	1.21	0	14	19	3.49	25	18.9
7. Day Av.	9.25	11.75	1.25	0	13	25	4.29	37	17.3
8. Day Av.	9.29	11.80	1.27	1	27	32	4.02	39	17.5
Average	9.20	11.65	1.20	0.29	14.71	30.00	3.82	26.00	17.61

In the ISO 40 traveler run, quality deterioration in the Fiona-type cotton became evident from the 6th day, starting with a significant increase in the number of yarn breaks in the machine's operating performance. This traveler run was completed at the end of the 8th day, approximately at the 195th hour. Although the yarn quality values were good on the 2nd, 3rd, 4th, and 5th days of the study, the traveler was removed on the 8th day due to the high surface damage rate caused by the friction of the traveler with the ring and its weight compared to the ISO 35.5 traveler.

In the Ne 30/1 yarn quality values obtained from Gandia-type cotton in the ISO 40 traveler study, ideal quality values were maintained until the end of the 6th day. However, deterioration in yarn and strength values started to occur from the 7th day due to traveler surface abrasion. Additionally, the amount of ends down on the spinning machine started to increase from the 7th day, as seen in Table 5.

The yarn quality values obtained from Fiona and Gandia cotton for the ISO 35.5 traveler and the 1000 spindle/hour ends down values are given in Table 6 and Table 7.

**Table 6.** Fiona-Type Yarn Quality Values obtained with ISO 35.5 Traveler

The working day of the traveler	U%	CV <sub>m</sub> %	Index	Thin place -%50/km	Thick place +%50/km	Neps +%200/km	Hairiness (H)	1000 spindles/hr ends down values	Rkm
2. Day Av.	8.95	11.32	1.18	0	17.5	27.5	3.65	16	18.1
3. Day Av.	9.08	11.44	1.19	0	11.5	23	3.62	15	17.24
4. Day Av.	9.01	11.75	1.13	0	15.5	24	3.44	14	17.9
5. Day Av.	9.12	11.59	1.14	0	14	28.5	3.75	25	17.62
6. Day Av.	9.15	11.85	1.21	1	18	38	3.9	26	17.5
7. Day Av.	9.18	11.75	1.19	0	19	33.5	4.02	29	17.8
8. Day Av.	9.21	11.92	1.21	1	21	35.5	3.98	29	17.4
Average	9.1	11.66	1.18	0.29	16.64	30	3.77	22	17.65

**Table 7.** Gandia-Type Yarn Quality Values obtained with ISO 35.5 Traveler

The working day of the traveler	U%	CV <sub>m</sub> %	Index	Thin place -%50/km	Thick place +%50/km	Neps +%200/km	Hairiness (H)	1000 spindles/hr ends down values	Rkm
2. Day Av.	8.78	11.06	1.15	1	12	29.5	3.55	11	16.57
3. Day Av.	8.95	11.19	1.19	0	9	27	3.48	9	15.5
4. Day Av.	9.11	12.41	1.21	1	21	33	3.87	7	19.7
5. Day Av.	9.18	11.58	1.2	0	18	24	3.71	14	18.2
6. Day Av.	9.25	11.35	1.2	1	18	29	3.91	19	17.3
7. Day Av.	9.35	11.84	1.22	0	21.5	30	3.95	16	16.2
8. Day Av.	9.40	11.66	1.2	1	18.5	41	4.2	51	16.8
Average	9.19	11.58	1.20	0.57	16.86	30.50	3.81	18.14	17.18

The ring control of the part in contact with the surface was carried out with 5.0 travelers after approximately 230-240 hours for both cotton types. It was determined that some traveler surfaces burned, some burned dimly, and some showed no problems. Here, burning can be identified by whitening in the area where the traveler comes into

contact with the ring. This burning is caused by the temperature at the friction point of the ring-traveler pair rising above 300°C. It is also observed that there is a smooth variation in yarn strength, with a slight decrease in strength towards the traveler change date.

After the ISO 35.5 travelers were removed, the machine underwent a detailed cleaning process. Then, ISO 31.5 (6.0) travelers were attached to the machine, and Ne 30/1 yarn quality values obtained from different cotton types were measured by applying the same lapping program. The yarn master quality values obtained from the ISO 31.5 travelers and the values showing the number of ends down per 1000 spindle/hour are given in Table 8 and Table 9.

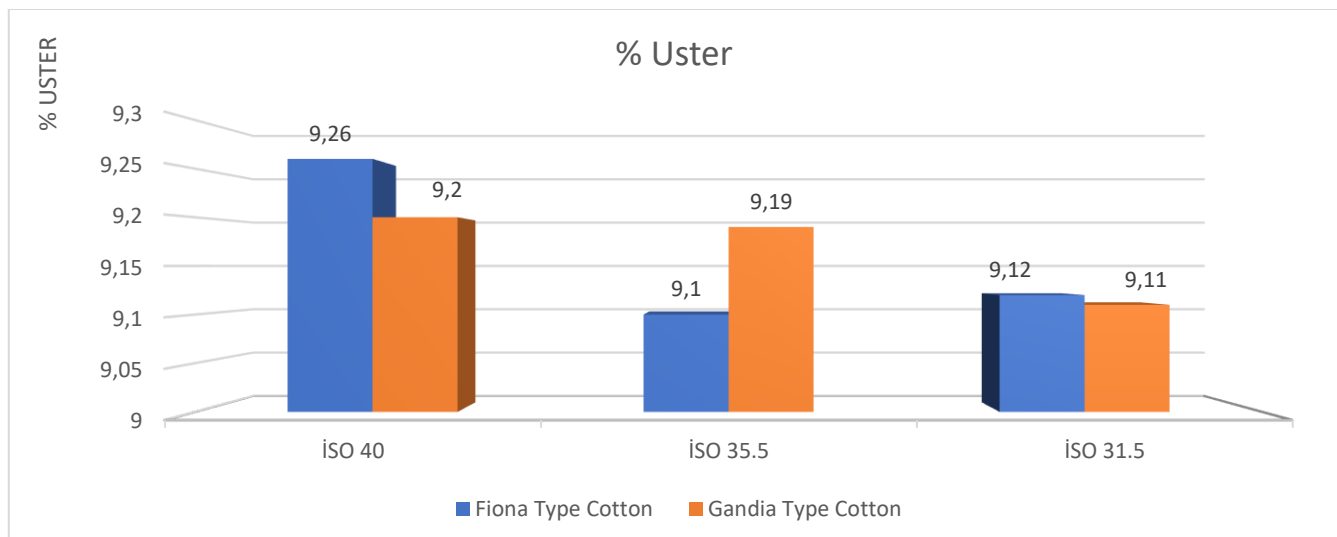
**Table 8.** Fiona-Type Yarn Quality Values obtained with ISO 31.5 Traveler

The working day of the traveler	U%	CVm%	Index	Thin place -%50/km	Thick place +%50/km	Neps +%200/km	Hairiness (H)	1000 spindles/hr ends down values	Rkm
2. Day Av.	8.97	11.31	1.16	0	12.5	40	3.45	14	16.65
3. Day Av.	9.03	11.4	1.17	0	15	22.5	3.38	18	17.9
4. Day Av.	8.83	11.23	1.15	0	15	30	3.61	16	17.54
5. Day Av.	9.17	11.61	1.19	0	32.5	40	3.49	17	18.9
6. Day Av.	8.93	11.27	1.15	2.5	10	17.5	3.69	17	17.48
7. Day Av.	9.47	11.97	1.23	0	15	12.5	3.65	24	17.68
8. Day Av.	9.41	11.93	1.22	0	35	35	3.8	28	16.42
Average	9.12	11.53	1.18	0.36	19.29	28.21	3.58	19.14	17.51

**Table 9.** Gandia-Type Yarn Quality Values obtained with ISO 31.5 Traveler

The working day of the traveler	U%	CVm%	Index	Thin place -%50/km	Thick place +%50/km	Neps +%200/km	Hairiness (H)	1000 spindles/hr ends down values	Rkm
2. Day Av.	8.95	11.19	1.19	0	13.5	38.0	3.65	16	17.00
3. Day Av.	9.16	11.45	1.15	0	15.0	31.0	3.75	17	16.80
4. Day Av.	9.25	11.56	1.18	0	12.0	29.0	3.71	7	17.45
5. Day Av.	8.90	11.13	1.19	0	11.0	42.0	3.82	22	17.25
6. Day Av.	9.15	11.44	1.20	0	16.5	32.0	3.69	19	18.00
7. Day Av.	9.10	11.38	1.19	0	25.0	29.0	3.71	15	17.35
8. Day Av.	9.25	11.56	1.17	0	38.0	45.0	3.80	20	17.01
Average	9.11	11.39	1.18	0.00	18.71	35.14	3.73	16.57	17.27

The ISO 31.5 traveler differs from the others in that the speed was increased to 19,800 rpm to reduce yarn breaks at the start of the doffing due to its lighter weight and to minimize balloon-induced breakages caused by maximum balloon diameter. The starting position of the traveler on the bobbin was set 5 mm higher on the ring rail.



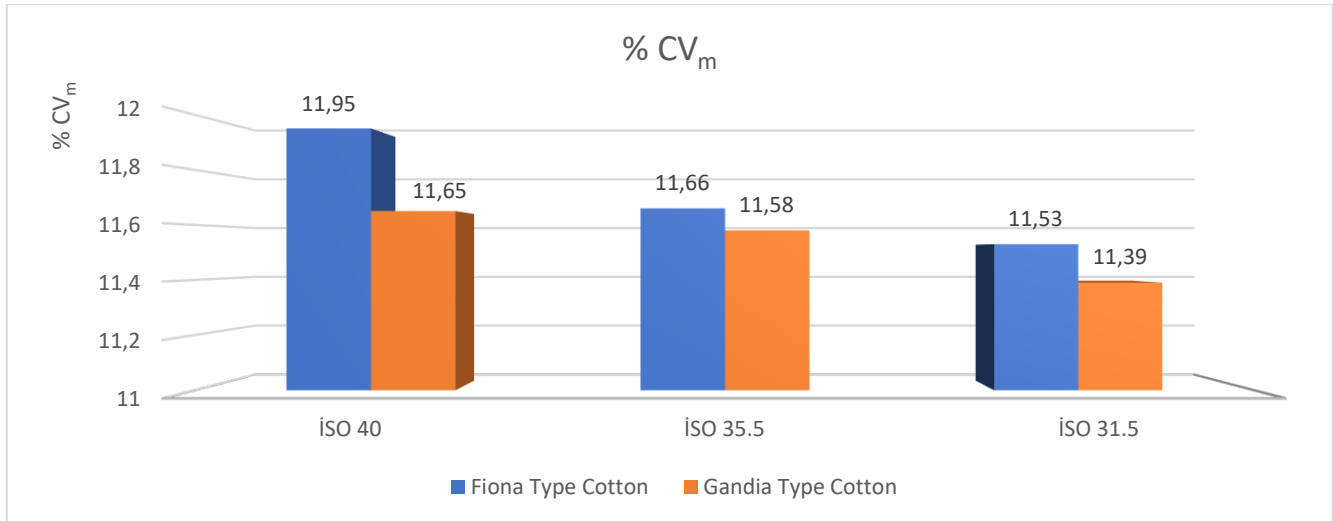
**Figure 2.** Uster Values of Travelers

The increase in speed was directly attributed to the lighter weight of the ISO 31.5 traveler and its impact on reducing balloon-induced yarn breakages at the traveler-ring contact surface. However, it was observed that better results were achieved in terms of quality and production. Importantly, there were no negative changes in yarn hairiness and Rkm values observed in both types of cotton compared to other travelers.

Figure 2 presents a comparison of Uster values from three different studies conducted on various types of cotton.

In both cotton types, the best result was obtained with ISO 31.5 despite the high speed. It is also observed that similar values are obtained even with the ISO 35.5 traveler.

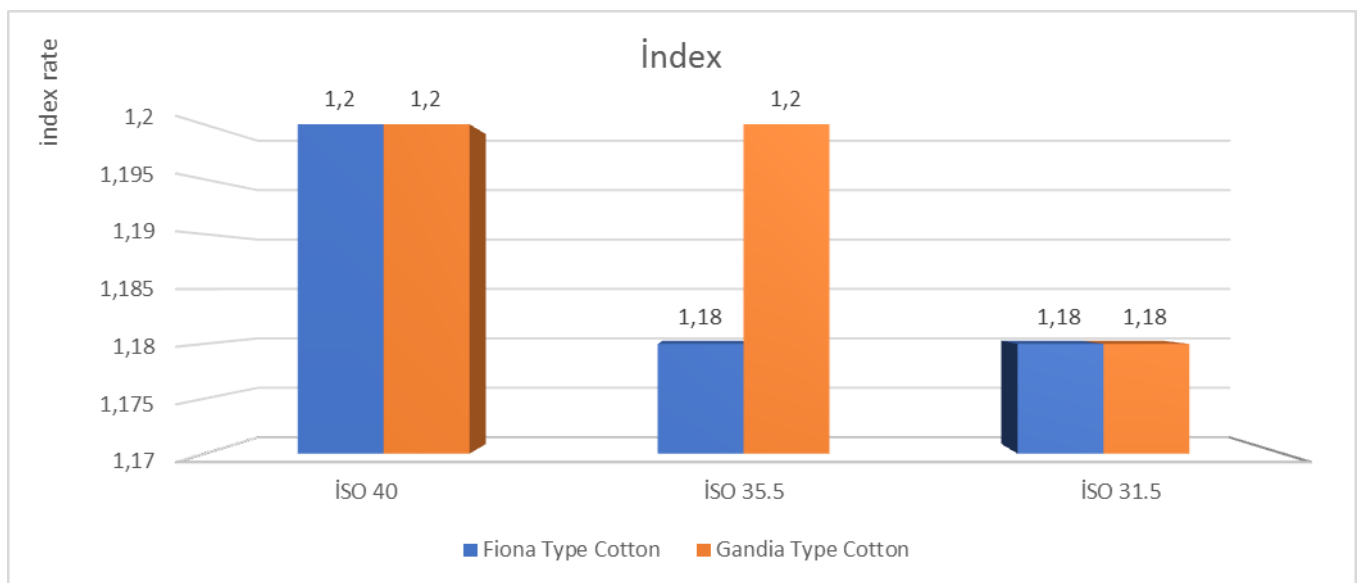
Figure 3 presents the comparison of CVm% values for three different travelers on two different types of cotton.



**Figure 3.** CVm% Values of Travelers

In Figure 3, it was determined that the best results were obtained with the ISO 31.5 traveler despite the high speed in both types of cotton. Additionally, very similar quality values were obtained with the ISO 35.5 traveler.

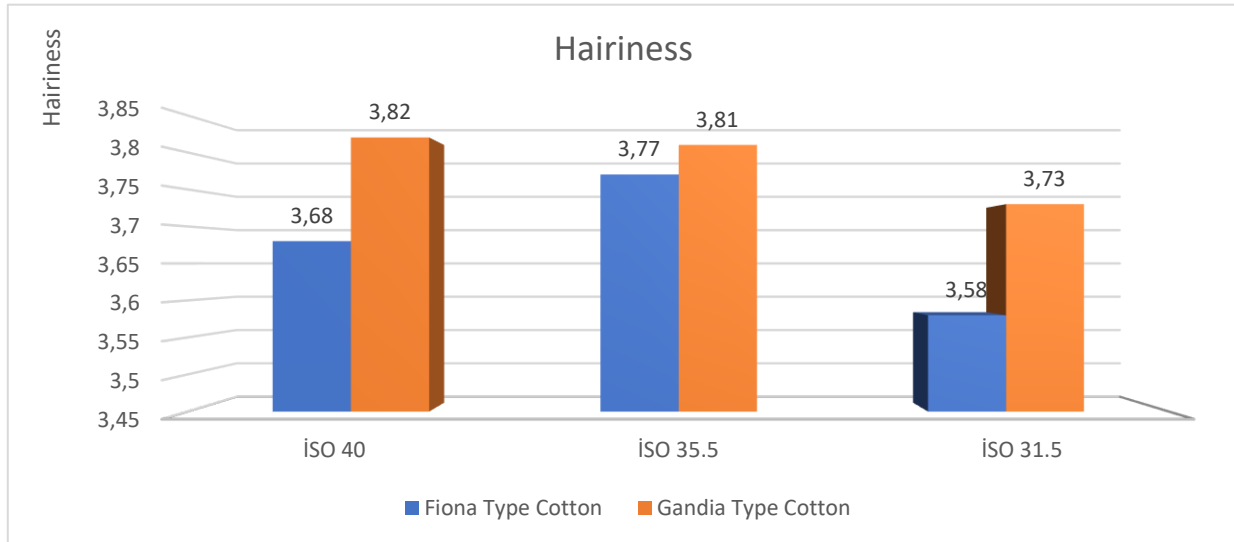
Figure 4 presents the comparison of index values from three different studies conducted on different types of cotton.



**Figure 4.** Index Values of Travelers

One of the most important metrics that provides insight into Uster quality values is the index, and according to the results obtained, all index values are very close to each other.

Figure 5 presents the comparison of hairiness values from three different studies conducted on two different types of cotton.



**Figure 5.** Hairiness (H) Values of Travelers

In general, one of the most crucial factors affected by the traveler in the ring-spinning system is the yarn hairiness value. According to these experimental results, the best result was obtained with the ISO 31.5 traveler, despite the high speed.

The reasons for the increase in yarn hairiness values include airflow at high speeds, increased airflow during the process, various forces exerted by the traveler from variable directions of the yarn winding machine, and fibers escaping from the yarn structure due to increased centrifugal force. Therefore, the light traveler with minimal friction during average working time tends to produce less hairiness (Balcı Kılıç, 2010).

Another critical factor influencing yarn hairiness is the twist level; hairiness tends to be higher in low-twist yarns and lower in high-twist yarns, whether single-ply or multi-ply (Şahin and Babaarslan, 2022).

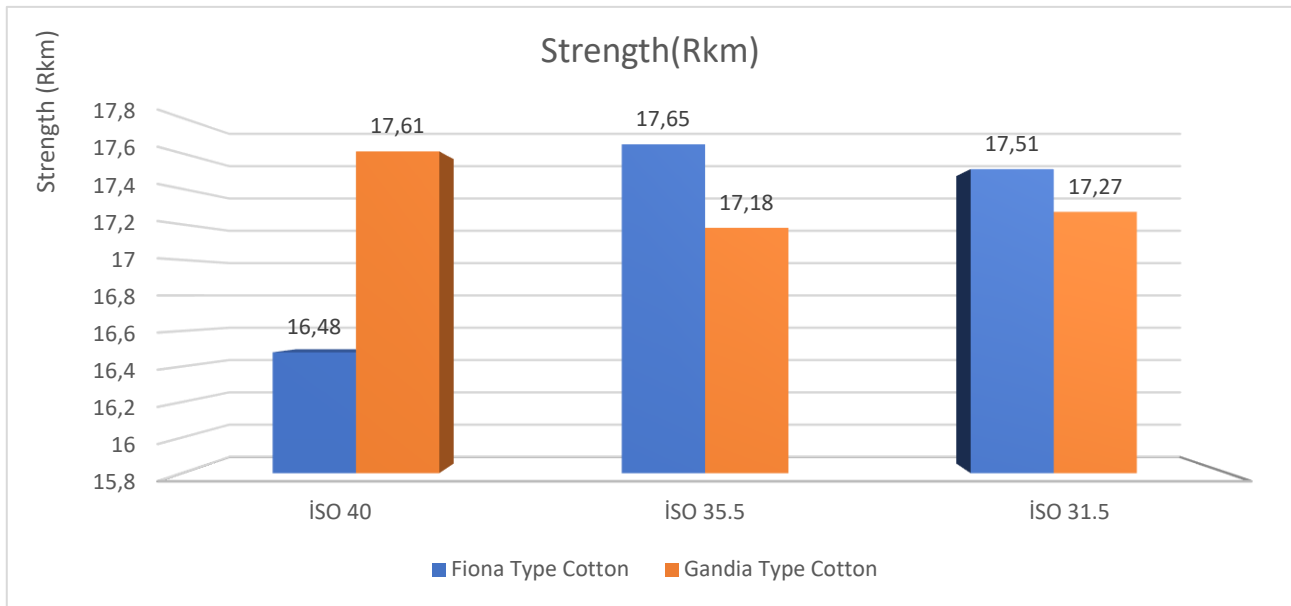
The superior hairiness and quality values observed with heavy travelers are valid for the initial 4-5 days before friction and tension cause the traveler to burn, as indicated in all tables. However, consistent observations for days 6-9 are not possible, as shown in Figure 5.

Yarn strength is another crucial parameter influenced significantly by hairiness, impacting yarn efficiency in subsequent stages. Figure 6 illustrates the comparison of yarn strength values across different traveler weights obtained from various types of cotton.

In the study, it was concluded that yarn tension reduces hairiness, and yarn count and twist do not significantly affect yarn hairiness, strength, or elongation within the study's conditions. Increasing traveler weight in the ring-spinning system positively impacts defect numbers and hairiness values in combed yarns, as well as hairiness and breakage force values in carded yarns, provided the traveler surface does not burn out.

The shape, weight, and type of the traveler significantly influence hairiness. Generally, hairiness decreases as traveler weight increases. Additionally, yarn tension and twist homogeneity improve with heavier travelers, resulting in smoother fiber placement and reduced hairiness (Örtlek and Babaarslan, 2003).

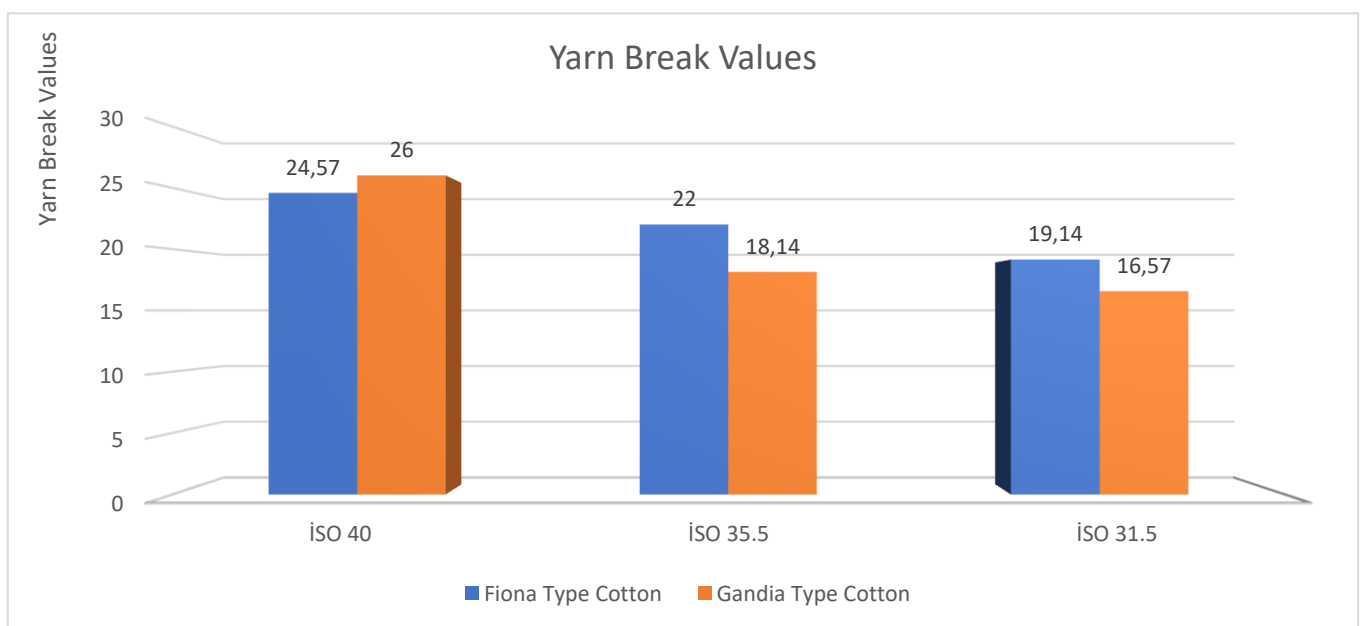
Moreover, examination of Tables 4-9 reveals no significant changes in nep count or thick place numbers with varying traveler weights. This finding is consistent with Tanrı's study (2007), which also emphasized hairiness as a prominent quality indicator, corroborated by Tables 4-9.



**Figure 6.** Strength (Rkm) Values of Travelers

A critical aspect for evaluating machine efficiency, a primary focus of this study, is the number of breaks occurring during experimental runs across all days. This metric provides insights into machine productivity and effectiveness. As depicted in Figure 6, the 1000 spindle/hour ends down rate achieved with the ISO 35.5 traveler, considered ideal, outperforms heavy travelers but falls short of light travelers. This discrepancy arises because heavier travelers, while reducing some break causes, experience shorter lifespans due to higher tension, resulting in increased yarn breaks.

According to our experimental findings, the lowest number of breaks occurred with light travelers. This outcome can be attributed to reduced contact between the traveler and ring surface at high speeds, combined with a set position starting 5mm above during tool head changes, effectively lowering the 1000 spindles/hour ends down rate throughout a set. This strategy could potentially optimize production efficiency, especially if complemented by increased machine speed with light travelers, as illustrated in Figure 7.



**Figure 7.** Breakage Values of Travelers at 1000 Spindle/Hour

## CONCLUSION

It has been observed that yarn unevenness, which refers to variations in yarn weight per unit length, increases with spindle speed when using the same traveler. This is primarily due to fibers experiencing high tension and inadequate control, resulting in short fibers entering the drafting zone and an increased presence of floating fibers.

Increased unevenness can also result from angular variations in the spinning triangle, exacerbated by higher speeds with either heavier or ideal travelers. As demonstrated in the study, while Uster values are closely comparable for ISO 35.5 and ISO 31.5 travelers, the ISO 31.5 traveler, being lighter, has shown superior results in terms of reduced hairiness and fewer ends down per 1000 spindles/hour, thereby enhancing efficiency and cutting costs.

Issues such as thin and thick places can arise from drafting zone problems in ring spinning machines, potentially affecting yarn quality. Neps, primarily caused during combing, and surface burning due to heavy travelers can further complicate these issues. It's crucial to consider strength values impacted by hairiness, as they correlate with traveler performance.

Consequently, in the machine using the ISO 31.5 traveler, significant ballooning occurs initially due to the traveler's lightweight. This can lead to increased tool head breaks. Higher breakage rates not only increase labor requirements but also raise raw material wastage. Therefore, optimizing ballooning by initiating the tool position 5 mm higher and increasing machine speed by 5-10% can effectively mitigate breakouts and enhance overall operational efficiency compared to other setups.

## REFERENCES

- Alaşehirli, G. (2009). Investigation of hollow yarn spinning techniques in ring spinning machine and investigation of yarn properties (Doctoral dissertation, SDÜ Institute of Science and Technology). Engin, İ., (1997), *Tekstil Maraton*, Issue 6, Adana
- Ayan, H.E. & Sabır, E.C. (2013). The Effect of Spinning Parameters on Yarn Quality. *Çukurova University Journal of Engineering-Architecture Faculty*, 28(1), 111-118. Retrieved from <https://dergipark.org.tr/tr/pub/cukurovaummf/issue/22759/242923>
- BALCI KILIÇ, G. O. N. C. A. (2010). Factors affecting yarn friction properties (Doctoral dissertation, DEÜ Institute of Science and Technology).
- Bozkurt, Y. (1993). Analysis of Yarn Breakage in Ring Spinning Machines, *Tekstil ve Mühendis*, vol. 7, no. 42.
- Can, Y., & Kırtay, E. (2011). Yarn Hairiness and Factors Affecting Hairiness in Cotton Yarns (Literature Review). *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences*, 9 (3).
- Coşkun, E. Investigation of the Effect of Traveler Life on Energy Consumption of Ring Spinning Machine. *UCTEK* 2019, 72.
- Cetin, E. (2009). The Effect of Friction Coefficient and Yarn Hairiness on Pilling in Ring and Compact Yarns (Doctoral dissertation, Marmara Üniversitesi, Turkey).
- Erem, A. D. (2006). Investigation of chenille yarn parameters affecting the usage performance and abrasion resistance of upholstery fabrics (Doctoral dissertation, Institute of Science and Technology).
- Gemci, R., & Bıçkılı, O. (2003). Effects of ring diameter variation on yarn quality in ring spinning. *Journal of Uludag University Faculty of Engineering and Architecture*, 8(1), 39-44.
- Kaya, M. T. (2005). The Effects of Balloon Angle and Yarn Tension on Yarn Properties in Ring Spinning Machine (Doctoral dissertation, Marmara Üniversitesi, Turkey).
- Örtlek, H. G., & Babaarslan, O. (2003). Investigation of hairiness properties of core-spun yarns (pes/viscose) containing spandex (lycra). *Journal of Uludag University Faculty of Engineering and Architecture*, 8(1), 79-93.
- Şahin, M., & Babaarslan, O. (2022). Use of Hamel Twisting (Elasto-Twist) Technology in Plying-Twisting of Fine Count Compact Yarns and Yarn Properties. *Çukurova University Journal of Engineering Faculty*, 37(1), 159-170. <https://doi.org/10.21605/cukurovaumfd.1095009>

Tanır, S. K. (2007). Investigation of Hairiness and Various Yarn Properties of Blended Ring Yarns Depending on Blend Ratios (Doctoral dissertation, Marmara Üniversitesi, Turkey).

Usta, İ., Factors Affecting Hairiness in Yarn and Solution Approaches', PhD Thesis, Marmara University Science. Ens., 2000

Uzun, M. (2007). The relationship between traveler properties and yarn properties in ring spinning (Doctoral dissertation, Marmara Üniversitesi, Turkey).



# Kahramanmaraş Sütçü İmam University Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 31.10.2023  
Kabul Tarihi : 12.08.2024

Received Date : 31.10.2023  
Accepted Date : 12.08.2024

## GELENEKSEL VİTRAYIN LAZER TEKNOLOJİSİ İLE İNOVASYONU VE CAM MOBİLYA KAPAĞI TASARIMINA UYGULANMASI

### INNOVATION OF TRADITIONAL STAINLESS WINDOW WITH LASER TECHNOLOGY AND APPLICATION TO GLASS FURNITURE COVER DESIGN

Cebrail AÇIK<sup>1\*</sup> (ORCID: 0000-0002-1094-6946)

<sup>1</sup> İl Millî Eğitim müdürlüğü Kahramanmaraş, Türkiye

\*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Cebrail AÇIK, cebrail46@hotmail.com

#### ÖZET

Bu çalışmada mimari geleneksel cam vitray süslemelerinden kumlama vitray ve boyama vitray tekniklerinin bilgisayar kontrollü lazer teknolojisi ile üretilebilirliği ve camlı mobilya elamanlarında kullanılması durumunda avantaj ve dezavantajları belirlenmeye çalışılmıştır. Çalışmada 4 mm kalınlığında cam kullanılmıştır. Cam yüzeyini işlemede 130 watt güç çıkışlı, karbondioksit gazlı tüp, 2 inch (50.8 mm) odak mesafeli lens donanımına sahip, su soğutmalı, 1,5 mm nozul çaplı ve 10,6 µm dalga boyunda lazer ışığına sahip CNC (Bilgisayarlı sayısal kontrol) lazer makinesi kullanılmıştır. İlk aşamada cam yüzeyinin işlenmesinde lazer gücü ve lazer hızının etkisini belirlemek için CNC lazer makinesinde, % 30, % 60 ve % 90 oranında cam deney örneği üzerine, farklı oranlarda lazer işlem hızı ve lazer işlem gücü parametreleri uygulanarak deney yapılmıştır. Deney sonuçlarından elde edilen bulgulara göre bir mobilya kapağına lazer kazıma vitray ve lazer boyama vitray uygulaması yapılarak elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Mobilya cam aksesuar aksamındaki lazer vitraylarda, düşük lazer gücünde ve yüksek lazer hızlarında işlenmiş vitrayların, başarıyla kullanılabilceği sonucuna ulaşılmıştır. Ayrıca lazerle işlenmiş cam yüzeylerine boyama vitray uygulaması yapılabileceği, ancak bu uygulamanın geleneksel boyama vitraya göre mobilya elamanlarına daha mat görüntünün dışında estetik anlamda fazla katkısı olmadığı sonucu elde edilmiştir. Bu sonuçlar doğrultusunda endüstriyel lazer kullanıcılarına, mobilya üretim ve tasarımcılarına önerilerde bulunulmuştur.

**Anahtar Kelimeler:** Lazer kazıma, cam vitray, mobilya tasarım

#### ABSTRACT

In this study, it was tried to determine the manufacturability of sandblasting stained glass and painting stained glass techniques, which are traditional architectural glass stained glass decorations, with computer-controlled laser technology and their advantages and disadvantages when used in glass furniture elements. 4 mm thick glass was used in the study. CNC (Computer Numerical Control) laser with 130 watt power output, carbon dioxide gas tube, 2 inch (50.8 mm) focal length lens equipment, water-cooled, 1.5 mm nozzle diameter and 10.6 µm wavelength laser light for processing the glass surface. machine was used. In the first stage, in order to determine the effect of laser power and laser speed on the processing of the glass surface, experiments were carried out on a glass test sample of 30%, 60% and 90% on a CNC laser machine by applying laser processing speed and laser processing power parameters at different rates. According to the findings obtained from the test results, the results obtained by applying laser engraving stained glass and laser painting stained glass to a furniture cover were compared. It has been concluded that stained glass processed at low laser power and high laser speeds can be used successfully in laser stained glass

ToCite: AÇIK, C., (2024). GELENEKSEL VİTRAYIN LAZER TEKNOLOJİSİ İLE İNOVASYONU VE CAM MOBİLYA KAPAĞI TASARIMINA UYGULANMASI. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 27(3), 669-678.



in furniture glass accessory parts. On the other hand, it has been concluded that painting stained glass can be applied to laser-treated glass surfaces, but this application does not contribute much to the aesthetics of furniture elements other than a more matte appearance compared to traditional stained glass. In line with these results, recommendations were made to industrial laser users, furniture manufacturers and designers.

**Keywords:** Laser engraving, stained glass, furniture design

## GİRİŞ

Vitray, eskiden beri mimarimizde var olan bir sanat dalıdır. Bizde bu sanat dalı, camilerimizde görkemli bir şekilde alçı pencere olarak görülmüş, eski konaklarımızın zevkli mimarisinde de ahşaba monte edilen renkli camlarla yaşatılmıştır. Ancak yakın yıllar içerisinde geçmişi kadar değerlendirilememiş ve bu sanat dalı ihmale uğramıştır (Işık, 2016).

Vitray Fransızca'da "vitrail", İngilizcede "stained glass" ve Almancada "glasmalerei" şeklinde isimlendirilmektedir. Son zamanlarda vitrayın birbirine yakın değişik tanımlamaları yapılmaktadır. Vitray, demir bir armatüre kurşun ya da çimentoyla yapıştırılmış, çoğu zaman renkli cam parçalarından oluşan ve bir açığı doldurmak, ya da aydınlık ve dekoratif geniş bir alan elde etmek için yapılan saydam yüzey çalışmalarıdır. Renklendirilen cam katmanları, daha önceden etüdü yapılan planlamaya göre küçük objeler halinde kesilir. Bu kesilen parçaların alçı, demir ve kurşundan çerçevelere yapıştırılmasıyla elde edilen düzenlemelere vitray denir. Bu düzenlemeler camlardan oluşmuştur. Vitray sanatı, özellikle cam parçalarından görsel oluşturmak ve onları ışığın önüne tanzim etmekten oluşur. Bu işlemlerin mimariye uyumlu olmasına ve aydınlatma düzenlemesine itina gösterilir.

Vitray sanatı camın icadıyla başlar. İnsanlar, yaşadıkları mekânlara ışıktan faydalanabilmek için pencere ya da benzeri çeşitli boşluklar bırakmışlardır. Bu boşluklar yapıların cinslerine, kullanım amaçlarına ve buldukları yerlerin iklim yapılarına göre değişik biçim ve ebatlarda olabilmektedirler. Bu boşlukların farklı zamanlardaki hava koşulları farklılığı nedeniyle kısmen veya tamamen kapatılması yöntemine başvurulmuştur. İlk vitray tekniği Romalılar tarafından geliştirilmiştir. Bu tekniği, açmış oldukları küçük boşlukları, camlarla doldurarak gerçekleştirmişlerdir (Hakayık, 2018). Daha sonraları boşlukları taşıyan bağlantı elamanları, bronz, bakır, kurşun, alçı ve mermer olmak üzere farklılaşmıştır. 7. yüzyıla ulaşıldığında Araplar, Bizanslılardan aldıkları tekniği, daha çok süsleme motifleriyle çalışmışlardır. 10. ve 11. yüzyılda birçok kaynak, bu teknikte ahşap çerçevelerin esas eleman olarak kullanıldığını belirtmektedir. 11. yüzyıla ait kaynaklar, bu eserlerden 21. yüzyıla kadar uzanan bir işaret kalmadığını göstermektedir. 14. yüzyılda yapılan tezyinlerde, İran ve Arabistan' da çizgi tezyinleri ile çiçek ve yapraklar kullanılmıştır. İslamiyet'in resim yapmayı menetmesi, zanaatkârları çizgi, yazı ve doğal motifler üzerinde çalışmalar yapmaya yöneltmiştir. Vitrayın 15. yüzyıldaki kaybolmaya yüz tutması, Türkler için yeni bir dönemin başı olmuştur. Türklerde vitrayın 15. yüzyılda uygulanmaya başlandığı görülmektedir. Türk zanaatında daha çok alçılı vitray kullanılmıştır. En güzel alçılı vitray çalışmaları, 1557 yılında yapımı tamamlanan Süleymaniye Camisi'nin pencerelerinde, meşhur zanaatkârın işlediği renkli camlarda görülür (Eliri, 2011). Osmanlılar, 16. yüzyılda kendi dini yapılarına vitrayı ulaştırmışlardır. Osmanlıda vitray, Hıristiyanlardaki gibi dini içerikleri taşıyamadığı için, Osmanlı'nın dini yapılarında cam, bir tezyin unsuru olarak yerini almıştır. Vitrayda medeniyetler değişik birleştirme unsuru kullanmışlardır. Batı kurşun uygularken Osmanlı alçı uygulaması yapmıştır. Türkler, vitrayda kendilerine özgün bir yöntem geliştirmişlerdir. Eskiden ayna camı, buzlu camlar çiçekli, göbekli, hareli, kaplama renkli, kavratmalı cam türlerini kullanan Türkler, pencerede bulunan camların kaidelerini, ilk önce çamurdan, daha sonraları ise alçıdan yapmışlardır. Türkler Süleymaniye Camisi'nde, Kanuni Türbesi'nde ve Topkapı Sarayı'nda bu yöntemin en güzel emsallerini meydana getirmişlerdir. Aşağıda Şekil 1'de Mimar Sinan'ın Süleymaniye Camisi'nde bulunan usta ellerden çıkmış vitray çalışmaları görülmektedir.



Şekil 1. Mimar Sinan'ın Süleymaniye Camisi'nde bulunan vitray çalışmaları

Türkiye’ de ortaöğretim ve yükseköğretim kurumlarında verilen vitray eğitim programları, ilk defa 1950’ li yıllarda Tatbiki Güzel Sanatlar Okulunda okutulmuştur. Daha sonraları Devlet Güzel Sanatlar Akademisinde 1970’ li yıllarda Ferruh Başağa tarafından değişik vitray yöntemleri ile çalışılmaya başlanmıştır (MEGEP, 2014).

Günümüzde ise vitray yöntemlerinin bir kısmının, iç mekânlarda görsel olumsuzluğa neden olan, hoş görünmeyen bazı alanlarda uygulandığı görülür. Hem mekân içindeki bazı bölme amaçlı yapılmış iç mekân donatılarında, hem de aynı mekân içinde aydınlatma aracı olarak da tasarlandığı görülmektedir. Son zamanlarda vitray, mimariye biçim vermenin ötesinde, iç veya dış mekânın etkili ve görkemli bir özelliğe sahip olması amacıyla kullanılmaktadır. Uygulama mekânı olarak vitray, genelde ışığı iyi alan yerlere uygulandığı görülmektedir. Ancak kapı tavan gibi ışık almayan bölümlere de uygulanmaktadır. Işığa göre vitrayın hangi mekâna ve hangi teknikle uygulanacağı kararı önemli bir unsurdur. Vitray uygulanmadan önce, uygulanacak alanın dışarı ile bağlantısı, hatta iç dekorasyonla bağlantısı detaylı bir şekilde irdelenerek işe başlanması oldukça önemlidir. Rengi, çizgisi, hareketi ile uyumlu olarak ortaya çıkarılan bir vitrayın, mekâna uyumu olmadığı takdirde fazla bir katkısının olmayacağı da bilinmelidir (MEGEP, 2014). Bu bakımdan mobilya tasarımlarında kullanılacak vitray motiflerinin, öncelikle uygulanacağı mobilyaya, daha sonra da mobilyanın kullanıldığı mekâna uygun olması gerekmektedir.

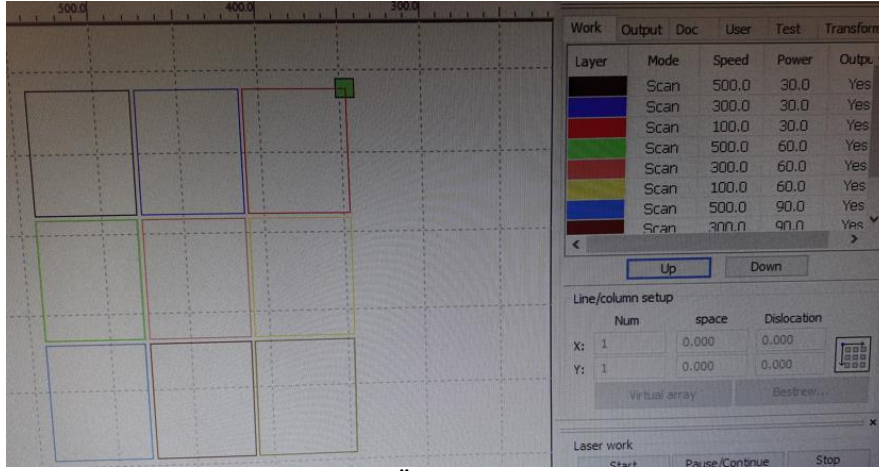
Cam vitrayın daha çok dış ve iç mekânlardaki sabit yapı elamanlarında kullanıldığı görülmektedir. Mobilyalarda kullanımının ise oldukça kısıtlı olduğu görülmektedir. Bunun bir nedeni de genellikle küçük motifli süslemeleri hassas olan cam veya aynalı mobilya elamanlarına, el işçiliği ile uygulamanın zorluğundan kaynaklandığı değerlendirilmektedir. Son zamanlarda cam teknolojisinin ilerlemesiyle birlikte cam, mimari, medikal, otomotiv, düz panel ekran ve elektronik uygulamalarında en önemli mühendislik malzemelerinden biri haline gelmiştir. Camın istenilen şekle dönüşmesine ancak doğru ve hassas işleme tekniği ile ulaşılabilir. Lazer teknolojisi, endüstriyel yöntemlere uygunluk, yüzey kalitesi ve yüksek çalışma hızı nedeniyle cam için geleneksel işleme yöntemlerine göre bazı avantajlara sahiptir (Nisar ve ark., 2013). Camın, dokunma duyusuyla kontrol edildiğinde sert ve katı bir malzeme olduğu hissedilebilir. Birçok mühendislik malzemelerine göre kırılğan bir yapısı vardır. Mekanik etkilerle karşılaştığında kırılmaya meyillidir. Bu kırılğan yapısına rağmen kimya teriminde “sıvı” olarak adlandırılmaktadır (MEGEP, 2008). Yani sıvıları taşımak için tasarlanmış cam kapların çoğu aslında sıvının kendi formudur. Cam, sertleşmek için soğutulduğunda bu temel nitelikleri üzerinde taşımaktadır. Ancak, ısıtıldığında özellikleri oldukça farklılık göstermektedir. Elastikiyet derecesine kadar yumuşamaya başlar ve eğer yeterli derecede ısıtılırsa normal sıvılar gibi akıcı bir hal almaktadır. Lazer işlemede ise, uyarılmış radyasyon yayınıyla herhangi bir cisme uygulanan ışık kuvvetini küçük bir alanda toplayarak kuvvetin etkisi artırılarak termik etki sonucu malzemeler kesilir veya kazınır. Bu nedenle ısı ve cam etkileşimleri sonucu ortaya çıkabilecek sonuçlar önceden bilinmelidir. Isı iletim katsayısının düşük olması ve gevrek olması sebebiyle, camın endüstriyel yöntemlerle işlenmesi oldukça zor bir iştir. Üretim esnasında gerginlik ve kılcal çatlaklara bağlı çatlama potansiyeli, üretim ve daha sonraki kullanım aşamalarında en aza düşürülmesi gerekmektedir (URL-2).

Bu makale, lazerli cam vitray işleme tekniğinin bir incelemesini sunmaktadır. Özellikle bu tekniğin sınırlamaları ve avantajlarını ortaya koymaya çalışmaktadır. İleriye yönelik lazerle malzeme işleme ve sanatsal araştırmaları kolaylaştıracak bir karşılaştırma çerçevesi oluşturmaktadır. Çalışmada yeni imal edilecek ve kullanımda olan mobilya elamanları üzerine lazer teknolojisi ile vitrayın uygulanabilirliği incelenmiştir.

## MATERYAL VE METOT

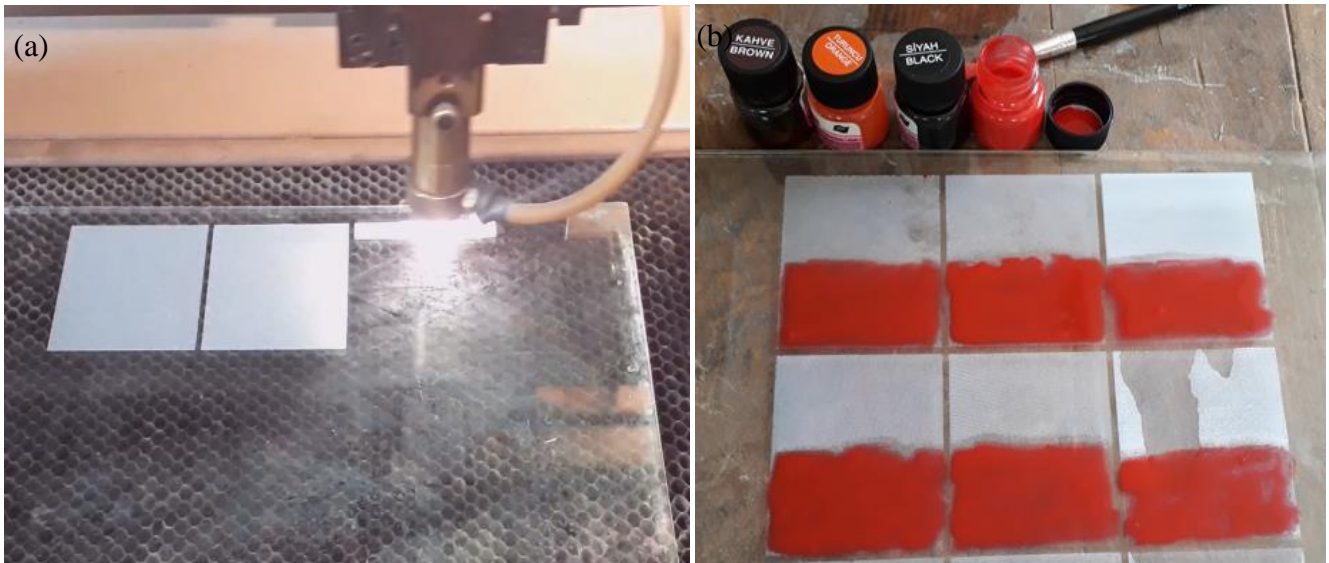
Çalışmada silika kumu, soda külü, kireç taşı ve dolomit bileşenlerini içeren ısıtma-soğutma yöntemi ile üretilmiş 4 mm kalınlığında düz cam kullanılmıştır. Cam yüzeyini işlemede 130 watt güç çıkışlı, karbondioksit gazlı tüp, 2 inch (50.8 mm) odak mesafeli lens donanımına sahip, su soğutmalı, 1,5 mm nozul çaplı ve 10,6 µm dalga boyunda lazer ışığına sahip CNC (Bilgisayarlı sayısal kontrol) lazer makinesi kullanılmıştır.

Bu çalışmada öncelikle lazer işlem gücü ve lazer işlem hızının etki sonuçlarını görmek için laserwork bilgisayar destekli üretim programında (CAM) deney tasarımına göre işlem parametreleri oluşturulmuştur. CNC lazer makinesinde, lazer işlem gücü ve lazer işlem hızı sonuçlar açısından en etkili parametrelerdir. Üretim tasarımı aşağıdaki Şekil 2' de gösterilmiştir.



Şekil 2. CAM Üretim tasarımı aşaması

İlk aşamada cam yüzeyinin işlenmesinde lazer gücü ve lazer hızının etkisini belirlemek için CNC lazer makinesinde, % 30, % 60 ve % 90 oranında lazer gücü, 100, 300 ve 500 mm/s hızlarında kazıma hızı uygulanarak farklı kazıma yüzeyleri elde edilmiştir. Çalışmada lazer merceğindeki odak mesafesi dikkate alınarak nozul yüksekliği 6 mm olarak ayarlanmıştır. İlerleme adımı 0,1 mm çift yönlü olarak hava destekli işlem yapılmıştır. Deney örneğinde 60x75 mm ölçülerinde 9 adet farklı işlem yüzeyi elde edilmiştir. Şekil 3.a' da lazer kazıma deney yüzeyi örneği elde edilme aşaması gösterilmiştir. İkinci aşamada deney kazıma yüzeylerinin yarı kısmı SÜDOR marka kırmızı renkli cam boyası ile boyanmıştır. Cam boyama aşaması Şekil 3.b' de gösterilmiştir. Üçüncü aşamada ise, birinci ve ikinci aşamadaki bulgular doğrultusunda bir dolap kapağına vitray uygulaması yapılmıştır.



Şekil 3. (a) Lazer cam kazıma deney örneği hazırlama (b) Deney örneği boyama aşaması

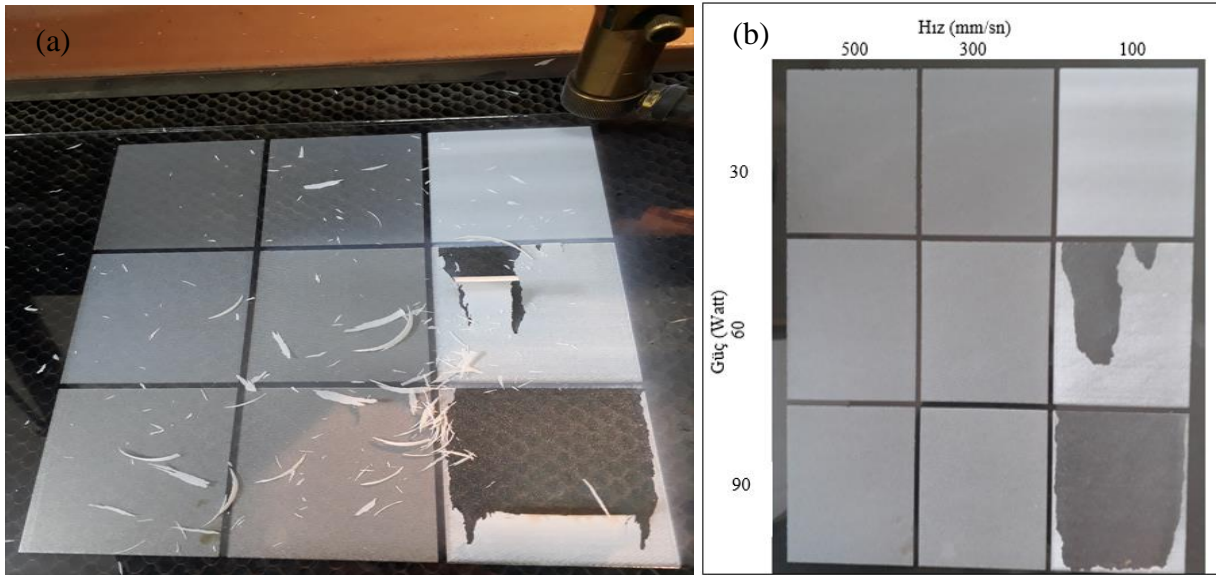
## BULGULAR

İlk aşamada cam yüzeyinin işlenmesinde lazer gücü ve lazer hızının etkisini belirlemek için CNC lazer makinesinde, % 30, % 60 ve % 90 oranında lazer gücü, 100, 300 ve 500 mm/s hızlarında kazıma hızı uygulanarak farklı kazıma yüzeyleri elde edilmiştir. Lazerlerde işlem gücünün artması veya işlem hızının azalması iş parçasının emilebilecek enerji miktarını ve bu enerjiyle çentikte bulunan malzemenin buharlaşma miktarını artırır. Bu nedenle lazer işlemlerde güç/zaman ilişkisi oldukça önemlidir (Açık, 2022). Aşağıda Tablo 1’de çalışmada uygulanan güç/zaman oranları sonucu oluşan bulgular verilmiştir. Bu bulguların üretim çıktılarına yansımaları Aşağıda Şekil 4’de görülmektedir.

**Tablo 1.** Çalışmada uygulanan güç/zaman bulguları

Kazıma gücü (130 W %)	Kazıma hızı (mm/s)		
	500	300	100
30	0,06	0,1	0,3
60	0,12	0,2	0,6
90	0,18	0,3	0,9

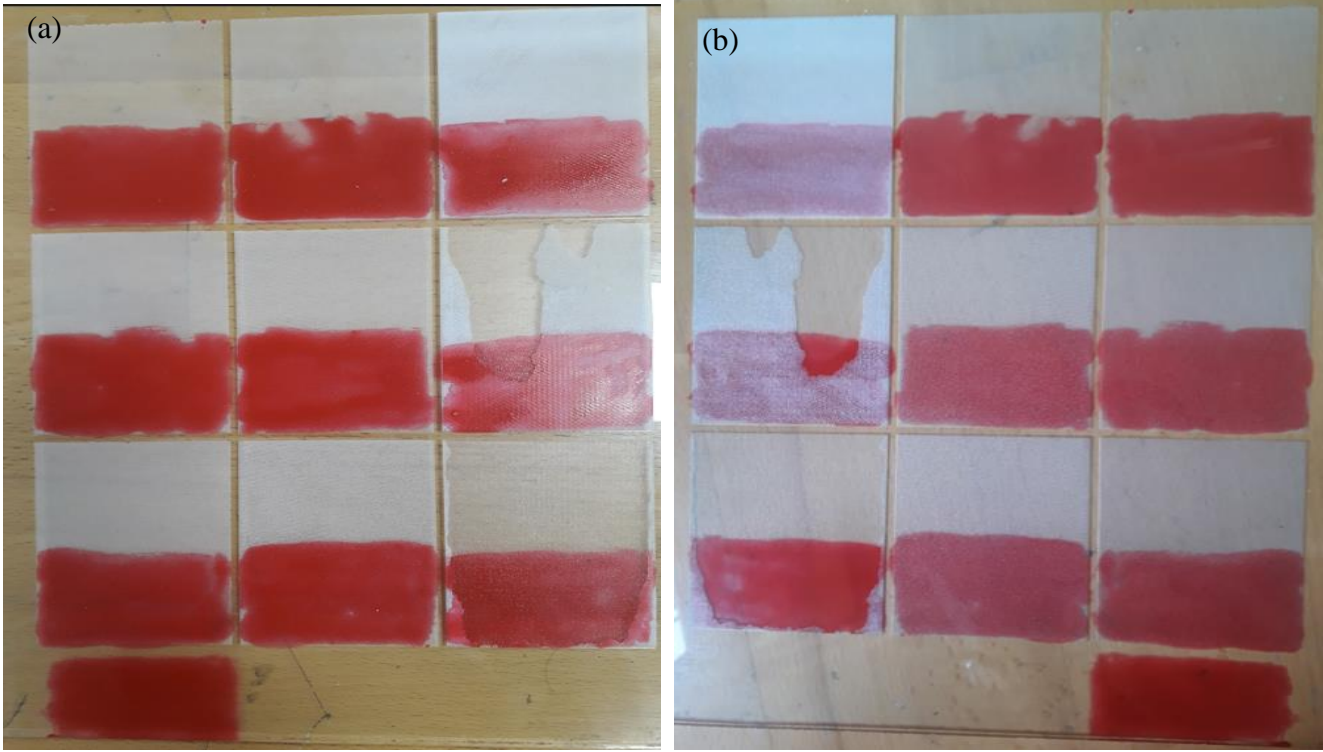
Lazer üretiminin ilk çıktıları aşağıda Şekil 4.a’da gösterilmektedir. Şekil 4.b’de ise çıktıların lazer işleme hızı ve lazer işlem gücü parametrelerine göre temizlenmiş son çıktıları görülmektedir. Bu bulgular Tablo 1’deki veriler ile değerlendirildiğinde cam yüzeylerde lazer işlem hızındaki değişimlerin, lazer işlem gücündeki değişimlerden daha çok etkileme yaptığı görülmektedir. Hızın 100 mm/s’ye düştüğü durumlarda cam yüzeylerinde ince filmler halinde soyulmaların olduğu görülmektedir. Ayrıca bu hız parametrelerinde camın üst yüzey tabakasının kazınarak alttan yeni görüntüler oluşturan başka katmanların oluştuğu görülmektedir. 500 mm/s ve 300 mm/s hız parametrelerinde görsel olarak bir değişiklik görülmemektedir. Ancak lazer gücünün 30 watt’ tan 90 watt’ a çıktığı durumlarda cam yüzeylerindeki kazıma alanlarında renk beyazlaşmalarının arttığı görülmektedir. Öte yandan güç/hız parametresinin 60/100 ve 90/100 olduğu durumlarda cam kazıma yüzeylerinde homojen olmayan katmanlı kazıma yüzeylerinin oluştuğu ve kazıma derinliklerinin 0,4 mm’ye kadar çıktığı görülmektedir. Bu durumlar, camın kırılma katsayısını artıracak ve dezavantajlı görünüm oluşturacaktır. Bu nedenle mobilya elamanlarında kullanılacak cam vitray çalışmaları için sakıncalı olduğu değerlendirilmektedir.



**Şekil 4.** (a) Lazer üretim ilk çıktıları (b) lazer üretim parametre çıktıları

Çalışmada kazıma yüzeylerin cam boyasıyla boyanması sonucu el edilen görüntüler Şekil 5.a’da gösterilmiştir. Kazıma yüzeylerinin boyanmasında, camın kazınmamış yüzeyine göre herhangi bir dezavantajı görülmemiştir.

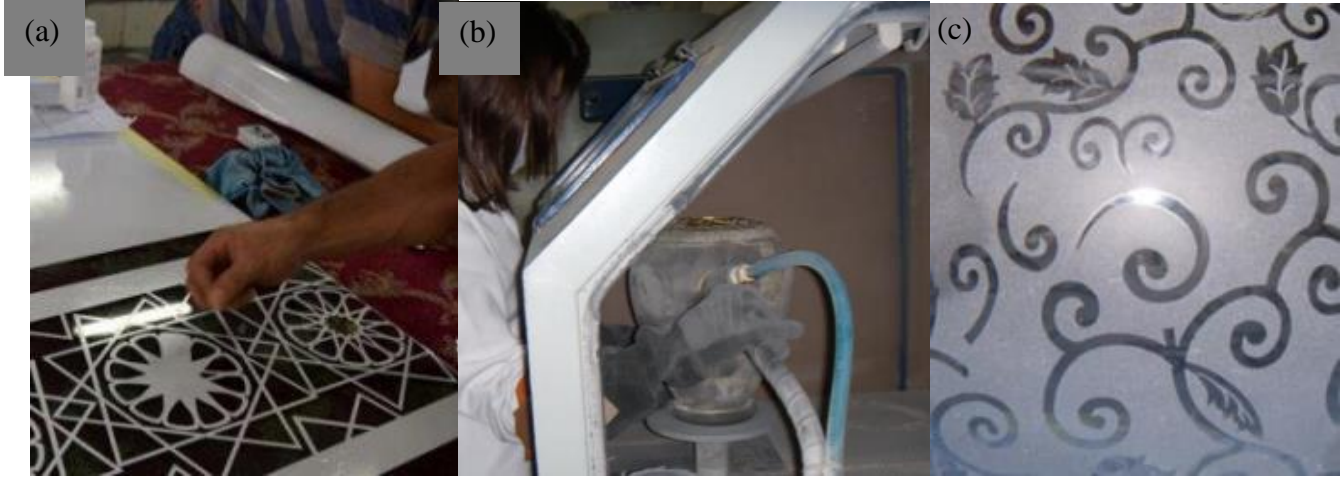
Boyanmış kazıma yüzeylerinin ön taraftan (kazınmamış yüzeyden) görüntüleri aşağıda Şekil 5.b' de gösterilmiştir. Bu bulgular incelendiğinde, kazıma sırasındaki beyaz renkli alanların boyamada daha mat görüntüler oluşturduğu belirlenmiştir. Ayrıca kazıma alanlarında boyama renginin kazınmamış cam yüzeyine göre daha mat bir görüntü oluşturduğu ortaya çıkmıştır. Öte yandan güç/hız parametresinin 60/100 ve 90/100 olduğu durumlarda cam kazıma yüzeylerinde homojen olmayan katmanlı kazıma yüzeylerinin, boyanması durumunda da, özellikle mobilyalarda kullanılan görsel estetiğin önemli olduğu vitray çalışmaları için dezavantajlı değerlendirilebilecek, standart olmayan bir görüntü oluşturdu belirlenmiştir. Literatürde başka bir çalışmada da lazer işlem süresinin kısaltılmasının, ısı üretiminin seviyesini azaltacağı ve lazerden etkilenen cam katman kalınlığının daha iyi kontrol edilmesini sağlayacağı açıklanmıştır (Maingi ve ark. 2022).



**Şekil .5 (a) Kazınmış boyalı yüzeylerin görüntüsü (b) Boyalı yüzeylerin ön taraftan görünüşü**

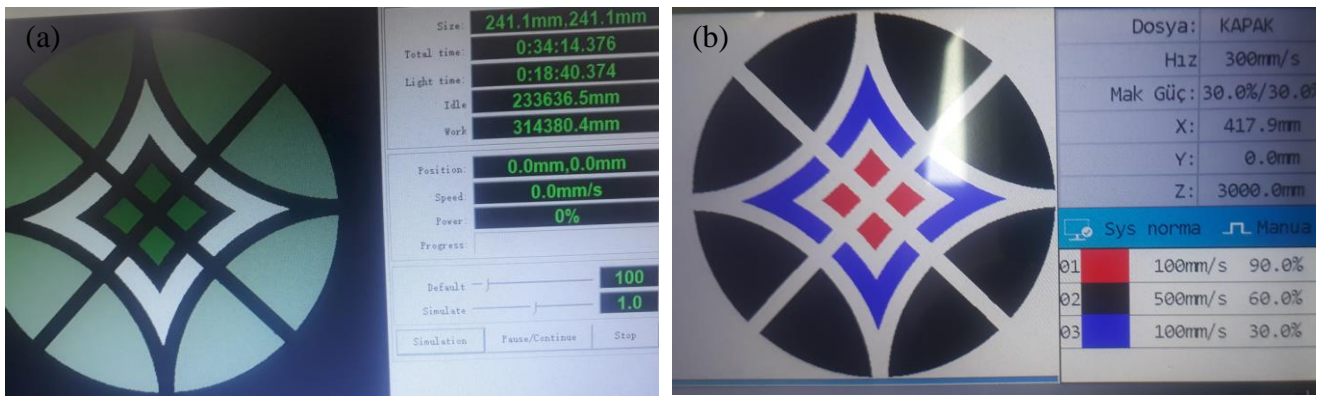
Geleneksel temel vitray teknikleri; kurşunlu vitray tekniği, alçı vitray tekniği, yapıştırma (mozaik) vitray, kumlama aşındırma tekniği, füzyon vitray tekniği, boyama vitray ve tiffany vitray tekniği olarak yedi farklı teknikle sınıflandırılabilir (Dinçol, 2015). Bu çalışmadaki lazer cam vitray (boyanmamış) tekniğinin, geleneksel vitray tekniklerinden kumlama aşındırma vitray tekniği sınıfında bir çalışma olduğu değerlendirilebilir. Kumlama vitray tekniğinde renksiz veya renkli camlara, hava basıncına bağlı bir aparat ile kum püskürtmek suretiyle, yüzeyin pürüzlü bir hal almasıyla işlem tamamlanır. Aşağıda Şekil 6.a' da geleneksel cam kumlama vitrayın desen hazırlama aşaması görülmektedir. Burada kumlama yapılması istenmeyen yerler kâğıtla kapatılmaktadır (Dinçol, 2015). Şekil 6.b' de kumlama kabininde havalı kum püskürtme tabancası ile cam kumlama aşaması görülmektedir. Şekil 6.c' de ise kumlama tamamlanmış bir vitray deseni görülmektedir (Megep, 2008). Lazer vitrayda ise yüzeyin pürüzleştirilmesi kazıma işlemiyle sağlanır. Her iki yöntemde yüzeyin pürüzleştirilmesi esasına dayanır. Mekanik kumlama lazer gravür ile karşılaştırıldığında, lazer oldukça esnek ve hızlıdır. Renkli kaplamaların seçici ablasyonu veya vitreus emayesinin eritilmesi de lazer işaretleyicilerle mümkündür (URL-2). Lazer kazıma, camın özellikleri kaybedilmeden belirgin, hassas ve en önemlisi kalıcı desenler ortaya çıkarma imkânı sağlar. Geleneksel kumlama vitrayın temizlik için oldukça fazla uğraş gerektirmesi, model hazırlığın sürecinde zaman harcanması ve malzemenin zarar görme riski gibi dezavantajları bulunmaktadır. Lazer cam kazımanın avantajı, özellikle bilgisayar kontrollü ve temassız üretimdir. Böylelikle, örnek oluşturmaların, modellerin hazırlık aşaması, folyoların tutturulması, folyo atıklarının bertaraf edilmesi, çalışma alanının temizliği vs. gibi işçilik bakımından ekonomik olmayan aşamalar bertaraf edilmiş olur. Bununla birlikte, filigran detayların ve özellikle çok belirgin resimlerle parlaklık izdüşümlerinin lazer kazıma vitrayı da mümkündür. Bu teknoloji esas kumlama işleminin geldiği son nokta olarak değerlendirilebilir. Lazer cam vitray işleme esnasında cam katmanın yüzeyi işaretlenir ve mat bir görünüm kazandırılır. Böylece, karbondioksit

gazlı tüple çalışan lazerin yüksek hassasiyeti sonucu cam tabakaların üzerine fotoğrafların yanı sıra süsler, harfler ve logolar işlemek de mümkün olmaktadır (URL-3).



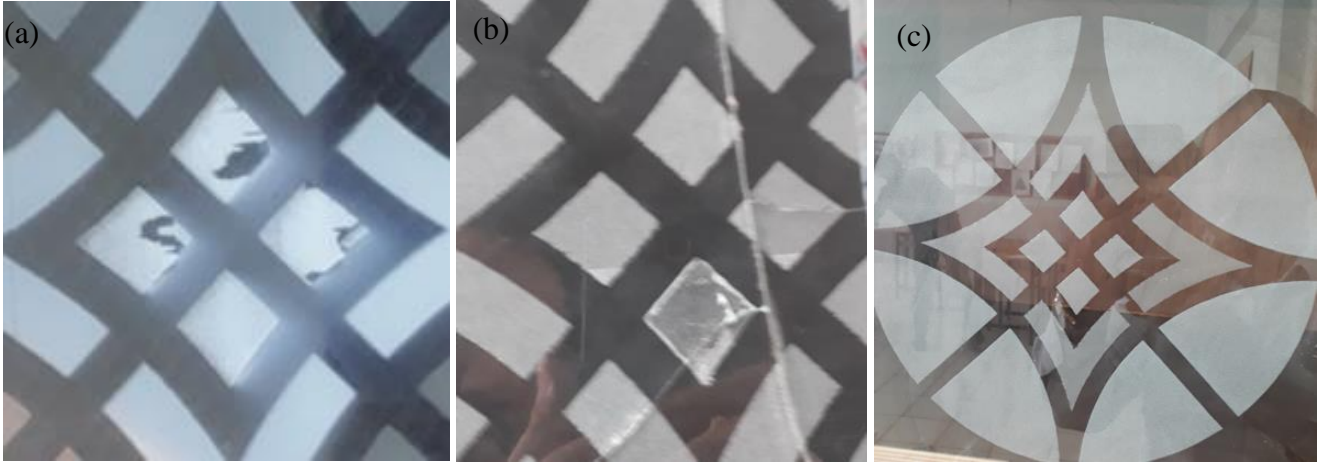
Şekil 6. (a) Geleneksel kumlama vitrayın desen hazırlama aşaması (b) Kumlama aşaması (c) Kumlanmış desen

Bu çalışmadaki boyanmış lazer cam vitray (kazıma) tekniğinin, geleneksel vitray tekniklerinden boyama vitray tekniği sınıfında bir çalışma olduğu değerlendirilebilir. Ancak lazer boyama vitray tekniğinde kazınmış yüzeylere boyama yapıldığından daha mat bir görüntü elde edilmektedir. Geleneksel boyama vitrayın yapılışında cam ve cam boyası, fırça gereklidir. Taslak çizim için taslak camın altına yerleştirilir ve ince bir kontur çizgisi ile belirginleştirilir. Bu kontörlerin arasında kalan kısımlar daha önce belirlenen renklerle boyanır ve işlem sona erer (Hakayık, 2018). Vitray geleneksel olarak daha çok kilise, saray, bazı burjuva evleri gibi yerlerde kullanılmıştır. Endüstriyel devrimlerin ilerlemesiyle birlikte vitray, bu işi yapan kişilerin evlerinde de sıkça kullanılmaya başlamıştır. Böylece vitray geleneksel kullanım alanlarının dışına çıkmış ve iç mekânlarda da kullanılmaya başlanmıştır. Geleneksel vitray kullanım amacı yapının dışarıyla bağlantısını kesecek yüzeylerde uygulanmıştır. Endüstriyel üretimin ilerlemesi ve beğeni tercihlerinin farklılaşması camı da etkilemiştir. Camın uygulama yöntemi olarak çok farklılık göstermesi kullanım alanlarındaki çeşitliliğin zenginliğini artırmıştır. Cam işleme tekniklerinden biri olan vitray tekniğinde, teknolojinin gelişmesi ile kendi içindeki tüm vitray teknikleriyle modern form ve hatların hızlı devreye girmesine neden olmuştur. Cam vitray uygulamalarında farklı tekniklerin ve fikirlerin gelişmesi, yeni buluşlara da kapı açmıştır (Dinçol, 2015). Vitray günümüzde daha çok abajurlarda, duvar panolarında, kapılarda ve iç mimaride kullanılır olmuştur (Tutar, 2021). Lazer vitrayın mobilya camlarında kullanımının kısıtlı olduğu, daha çok lazer vitrayın şarap veya şampanya kadehlerinde, bira bardakları ve şişeleri gibi çeşitli özel kullanımlar için bireysel gravüre sahip hediyelerde kullanıldığı görülmektedir (URL-1). Bu çalışmada elde edilen bulgular yardımıyla daha önce kullanılmış bir kitap dolabı kapağının camına lazer yöntemiyle vitray uygulamaları yapılmıştır. Aşağıda Şekil 7.a' da CAM tasarımı yapılan vitrayın üretim çıktısının ön izlemesi görülmektedir. Şekil 7.b' de ise farklı oranlarda lazer işlem hızı ve lazer işlem gücü parametreleri uygulanarak üretime başlama aşaması görülmektedir.



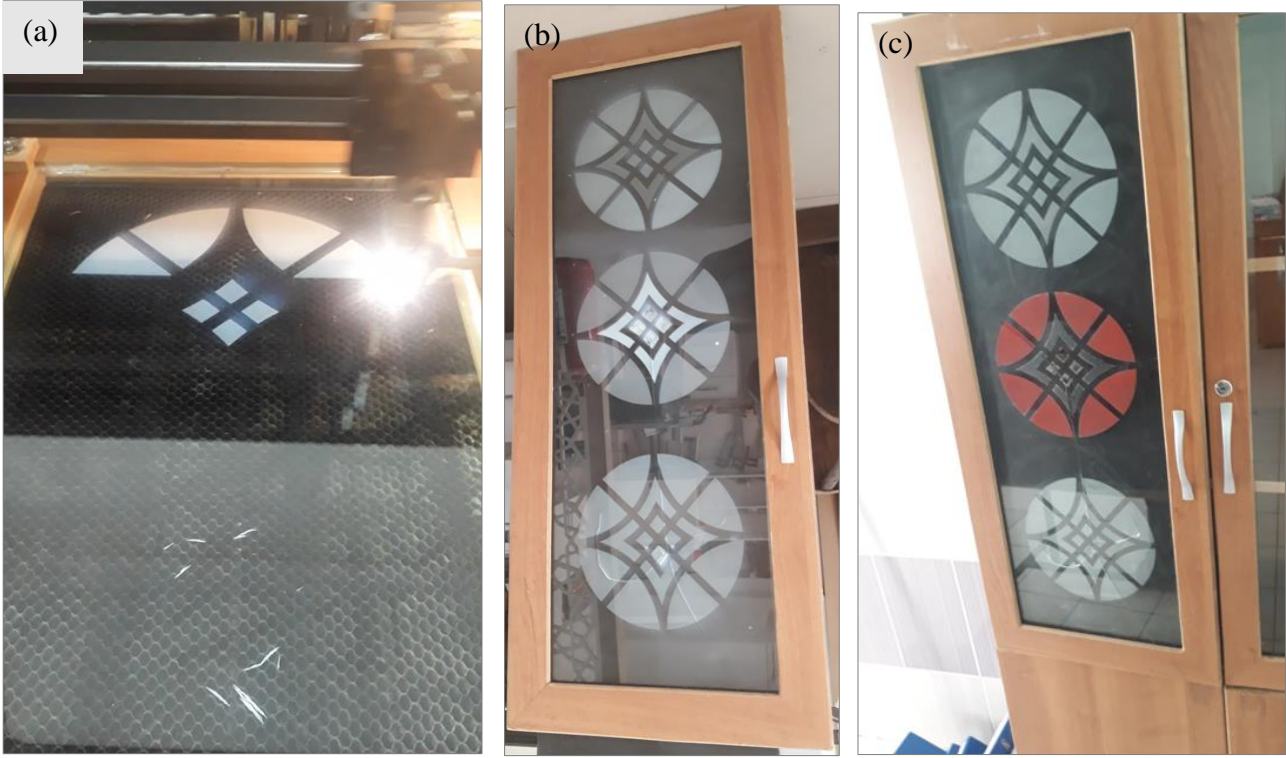
Şekil 7. (a) Vitray üretim çıktısı ön izlemesi (b) Üretim başlama aşaması

CAM tasarımı yapılan vitray motifi yukarıdaki Tablo 1'deki bulgular referans alınarak lazerle mobilya kapağı üzerine işlenmiştir. Yapılan uygulamalarda lazer işleme hızının 100 mm/s seviyesine düştüğü durumlarda, lazer gücü 90 watt civarında yüksek olduğu durumlarda renk tonu farklılığı bakımından motif oluşturmak amacıyla yapılacak işlemlerin, camda katman kalkmalarına neden olduğu saptanmıştır. Bu durum aşağıda Şekil 8.a' da gösterilmektedir. Bunun nedeni cam yüzeyinden fazlaca kazıma yapılarak yüzeydeki mukavemet sağlayan katmanın yok edilmesinden ve camın aşırı ısınmasından kaynaklandığı değerlendirilmektedir. Bu durumun kapak gibi hareketli mobilya elamanlarında daha da dezavantaj oluşturduğu, hatta kullanım esnasında zayıf noktalardan çatlama olduğu görülmektedir (Şekil 8.b). Ancak 100 mm/s lazer işleme hızının uygulandığı parametrelerde cam vitray uygulaması, 30 watt civarında düşük düzey güçlerde başarıyla uygulanabilmektedir. Öte yandan 500 mm/s hızında yapılan işlemlerin 60 watt civarında orta düzey lazer gücünde uygulanması durumunda daha hızlı ve optimum üretim koşulları sağlanmaktadır (Şekil 8.c). Cam lazer vitray çalışmalarında lazer tüpünün gücüne de bağlı kalınarak genel olarak 30 watt' ın üstünde bir güçle çalışılması önerilmektedir (URL-1).



Şekil 8. (a) Katman kalkma görüntüsü (b) Cam çatlama görüntüsü (c) Optimum görüntü

Aşağıda Şekil 9.a' da tasarımı tamamlanmış mobilya kapak üzerine lazer vitrayın CNC makinesinde işleme aşaması gösterilmektedir. Şekil 9.b' de elde edilen bulgulara göre çeşitli parametrelerde renk tonları elde etmek için, üzerinde vitray denemeleri yapılmış bir dolap kapağı görülmektedir. Şekil 9.c' de ise boyama vitray denemesi yapılmış ve yerine montajı yapılmış dolap kapağı görülmektedir. Yapılan lazer işlemleri sonucunda boyama vitray tekniğinin, lazer yöntemiyle uygulanmasının çok fazla bir avantajının olmadığı görülmektedir. Sadece geleneksel boyama vitraya göre biraz daha mat bir görüntü vermektedir. Ancak motifin yüzeye aktarılması bilgisayar destekli tasarımla gerçekleşmesi bakımından oldukça avantajlıdır. Öte yandan geleneksel kumlama vitray tekniğine göre, lazer kazıma vitray yöntemi üretim sürecinde oldukça üstün kolaylıklar sağlamaktadır. Geleneksel kumlama vitray ile alınan sonuçlar, lazer kazıma bilgisayar kontrollü tasarım ve üretim yöntemiyle, daha kısa zamanda, daha çeşitli renk tonlarında ve daha teknolojik olarak alınabilmektedir. CAD/CAM teknolojiyle bireysel tasarım seçenekleriyle daha çok katma değer sağlamaktadır. Hızlı ve dijital yöntemlerle küçük ürün partilerinde bile esnek ve kalıcı kişiselleştirme tasarımları yapılabilmektedir (URL-1).



**Şekil 9. (a)** Lazer cam vitray üretim aşaması **(b)** Farklı parametreler uygulanmış kapak **(c)** Boyama vitray uygulanmış ve montajı yapılmış mobilya kapağı

## SONUÇLAR

Bu çalışmada cam malzemelerin yüzeylerine bilgisayar kontrollü lazer makinelerinde vitray uygulamasında lazer gücü ve işlem hızının cam yüzeyi özelliklerine ve bu yüzeylerdeki boyama üzerine etkileri araştırılmıştır. Lazer cam vitrayların işlenmesinde lazer cihazında düşük lazer çalışma hızlarında çalışma yapıldığında, ısınmadan dolayı camın yapısal karakteristiğinden kaynaklı çatlamlar meydana gelmektedir. Hem düşük lazer hızında, hem de yüksek lazer güçlerinde çalışmaları yapıldığında ise 0.4 mm derinliğinde kazıma gravürleri oluşmakta ve bu gravürler camın mukavemetini zayıflatmaktadır. Bu kazıma alanları özellikle hareketli mobilya elamanlarında ilerleyen sürede çatlaklar oluşturabilmektedir. Mobilya cam aksesuar aksamındaki lazer vitraylarda, düşük lazer gücünde ve yüksek lazer hızlarında işlenmiş vitrayların, başarıyla kullanılabilmesi sonucuna ulaşılmıştır. Lazer vitrayın hem yeni üretilen, hem de kullanımda olan mobilya kapakları, vitrin camları, sehpa camları, kapı camları vb. mobilya elamanları ve aksesuarlarında başarıyla kullanılabilmesi söylenebilir. Öte yandan lazerle işlenmiş cam yüzeylerine boyama vitray uygulaması yapılabilir. Ancak bu uygulamanın geleneksel boyama vitraya göre mobilya elamanlarına daha mat görüntünün dışında estetik anlamda fazla katkısı olmadığı sonucu elde edilmiştir. Bu çalışmadaki bulguların devamı olarak, sonraki çalışmalarda lazer ışınlarının camdaki mukavemet zayıflatıcı olumsuz etkilerinin önlenmesi için çalışmalar yapılabilir. Bu durumda iç mekân donatı elamanlarında daha çok renk tonlarıyla çalışma imkânı sunan çeşitli lazer vitray uygulamalarının yaygınlaşacağı değerlendirilmektedir.

## KAYNAKLAR

Açık, C., (2022). Endüstriyel Ahşap Ürün Tasarımında CNC Lazerle Üretim Parametrelerinin Araştırılması ve Uygulanması. Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Orman Endüstri Mühendisliği Ana Bilim Dalı Doktora tezi. Kahramanmaraş, 250s.

Dinçol, İ., (2015). Cam sanatında vitray teknikleri. Yüksek Lisans Tezi. Dokuz Eylül Üniversitesi Güzel Sanatlar Enstitüsü Seramik ve Cam Anasanat Dalı, İzmir.

Eliri, İ., (2011) Nakışlı Cam Sanatı Vitray (Revzen-İ Menkuş) Ve Süleymaniye Camii'nde Kullanılan Örneklere Plastik Açından Bir Bakış. *Türk-İlâm Medeniyet Akademik Araştırmalar Dergisi*. Sayı: 11, Sayfa: 145-155. <http://ktp.isam.org.tr/detayilhmklzt.php?navdil=tr&midno=42903750&Dergivalkod=0617&YayinTarihi=2011&Sayi=11>



Hakayık,. (2018) Vitray sanatı nedir? *Milli Eğitim Bakanlığı dergisi* Sayfa 21-24.  
25125238\_dergi\_2018\_pages\_deleted\_1.pdf

Işık, Ş. (2016). Vitray sanatı üzerine, *Sanat Çevresi Dergisi*, Sayı:76. s.34. İstanbul  
<https://api.core.ac.uk/oai/oai:earsiv.sehir.edu.tr:11498/40109>

Maingi, E., Alonso, M., Angure,l L., Rahmanb, A., Chapoulic, R., Dubernet S., (2022). German Franciscode la Fuenteb Historical stained-glass window laser preservation: The heat accumulation challenge. *Boletin dela sociedades panolade ceramicay vidrio* 61 (2022) S: 69–82.

MEGEP, (2008). Milli Eğitim Bakanlığı Seramik ve Cam Teknolojisi alanı, Cam yüzeyi aşındırma teknikleri dersi bireysel öğrenme materyalleri. [https://megep.meb.gov.tr/mte\\_program\\_modul/moduller\\_pdf/Kuımlama.pdf](https://megep.meb.gov.tr/mte_program_modul/moduller_pdf/Kuımlama.pdf)

MEGEP, (2014). Milli Eğitim Bakanlığı Seramik ve Cam Teknolojisi alanı, Temel vitray dersi bireysel öğrenme materyalleri. [http://www.megep.meb.gov.tr/mte\\_program\\_modul/moduller\\_pdf/Temel%20Vitray.pdf](http://www.megep.meb.gov.tr/mte_program_modul/moduller_pdf/Temel%20Vitray.pdf)

Nisar, S., Li, L., Sheikh, M.A., (2013). Laser glass cutting techniques-a review. *Journal of laser applications*, Volume 25, Issue 4. <https://doi.org/10.2351/1.4807895>

Tutar, B.,(2021). Cam Güzeli: Vitray. *Genç dergisi*, Sayı:173 S.63. <https://gencdergisi.com/14324-cam-guzeli-vitray.html>

URL-1. <https://www.troteclaser.com/tr/malzemeler/lazerle-cam-kazima> (Erişim: 22.10.2023)

URL-2. <https://www.laseral.com.tr/sektorler/51/cam-isleme> (Erişim: 22.10.2023)

URL-3. <https://www.eurolaser.com/tr/malzemeler/cam> (Erişim: 22.10.2023)



# 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

## TRANSFORMER BASED COVID-19 DETECTION USING CHEST X-RAYS AKCİĞER GÖRÜNTÜLERİNDEN TRANSFORMER TABANLI COVID-19 TESPİTİ

*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

### ABSTRACT

Covid-19 has affected millions globally, leading to substantial illness and mortality. Chest X-rays serve as a rapid and effective means of tracking the progression of Covid-19. However, diagnosing Covid-19 from a chest X-ray can be complex, and even skilled radiologists may not always provide a conclusive diagnosis. In our research, we utilized a dataset comprising X-ray images of Covid-19, lung opacity, viral pneumonia, and healthy patients to assess the efficacy of various vision transformer-based models. A modified version of the Swin Transformer achieved an accuracy of 98.9% and a precision of 99.2% on Covid-19 images in a four-way classification task. Our findings are competitive with cutting-edge techniques for diagnosing Covid-19. This method could aid healthcare professionals in screening patients for Covid-19, thereby enabling quicker treatment and improved health outcomes for those affected by the virus.

**Keywords:** Covid-19, deep learning, transformer.

### ÖZET

Covid-19, küresel olarak milyonlarca kişiyi etkileyerek önemli hastalıklara ve ölümlere yol açmıştır. Akciğer röntgenleri, Covid-19'un ilerlemesini izlemek için hızlı ve etkili bir yöntem olarak hizmet vermektedir. Ancak, bir akciğer röntgeninden Covid-19'u teşhis etmek karmaşık olabilir ve hatta deneyimli radyologlar bile her zaman kesin bir teşhis koyamayabilir. Bu çalışmada, Covid-19, akciğer opasitesi, viral pnömoni ve sağlıklı hastaların X-ray görüntülerinden oluşan bir veri setini kullanarak çeşitli vision transformer tabanlı modellerin etkinliği değerlendirildi. Swin Transformer'ın modifiye edilmiş bir versiyonu, Covid-19 görüntülerinde dört yönlü sınıflandırmada %98.9 doğruluk ve %99.2 hassasiyet elde etti. Bulgularımız, Covid-19 teşhisi için, son teknoloji tekniklerle rekabet edebilecek düzeydedir. Bu yöntem, sağlık profesyonellerinin Covid-19 için hastaları taramasına yardımcı olabilir, böylece daha hızlı tedavi sağlanabilir ve Covid-19 hastaları için daha iyi sağlık sonuçları elde edilebilir.

**Anahtar Kelimeler:** Covid-19, derin öğrenme, transformer.

## INTRODUCTION

COVID-19, an infectious disease caused by the SARS-CoV-2 virus, has had a profound impact on the world (Wang et al., 2020; Gorbalenya et al., 2020; Phelan et al., 2020). Most of those infected will experience mild to moderate respiratory symptoms and recover without needing special care. However, some individuals will become severely ill and require medical intervention. The virus primarily spreads through droplets expelled from the mouth or nose of an infected person. It can also be transmitted by touching surfaces or objects contaminated with the virus. The pandemic has caused widespread sickness, death, and economic disruption. In response, governments and organizations globally have taken steps to control the virus's spread, such as implementing lockdowns, travel restrictions, and social distancing guidelines. The crisis has also spurred extensive research into the virus and its impact on the human body.

The RT-PCR (Reverse Transcription Polymerase Chain Reaction) test is a type of molecular diagnostic test that identifies the genetic material of the SARS-CoV-2 virus, the causative agent of COVID-19 (Kucirka et al., 2020; Khan et al., 2020). It's frequently used to ascertain if a person is presently infected with the virus. The RT-PCR test is highly valued for its precision. When conducted correctly by a healthcare professional, it provides very accurate results and is considered the benchmark for identifying the presence of the infectious virus. Another benefit of the RT-PCR test is its ability to detect the virus in asymptomatic individuals. This is vital for pinpointing and isolating infected individuals to curb the virus's spread. Despite its advantages, the RT-PCR test has some shortcomings. A significant drawback is the extended time it takes to get results. While results can sometimes be obtained within a day or two, there have been instances during the pandemic where it took up to one to two weeks. Another concern with RT-PCR testing is the potential for a high number of false negatives, which can occur if the viral load is low, causing the test to fail to detect the virus.

Considering the limitations of RT-PCR testing, it's essential to consider other diagnostic methods. Medical imaging techniques such as computed tomography (CT) scans and chest X-rays (CXR) can be effective in diagnosing COVID-19. These methods are particularly useful when a patient's RT-PCR test is negative, but there is still a suspicion of infection. CT scans have proven to be more precise than CXR in detecting COVID-19, but they come with their own set of challenges, including higher costs, longer scanning times, increased radiation exposure, and the inability to perform at the patient's bedside. On the other hand, CXR scans are less costly, quicker, and expose patients to less radiation compared to CT scans. However, diagnosing COVID-19 from a CXR scan can be difficult, and even skilled radiologists may not always be able to provide a definitive diagnosis.

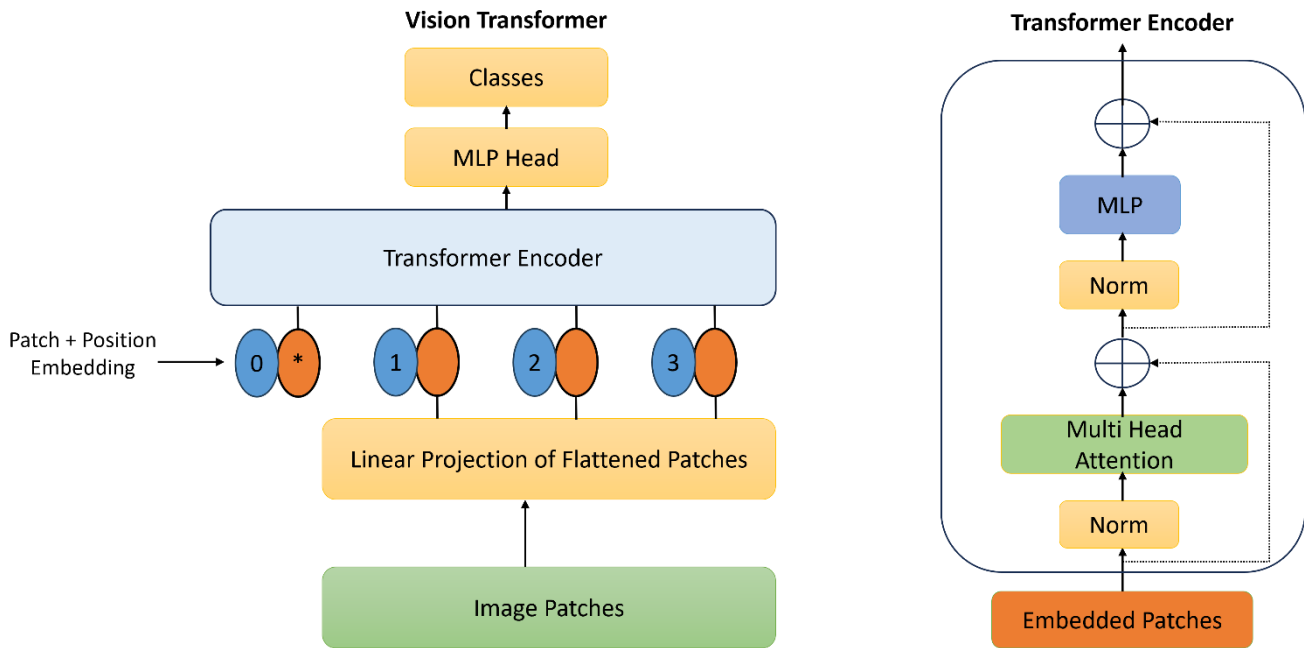
Deep learning (DL) has had a significant impact on the diagnosis of COVID-19 using chest X-rays. DL methods have been widely applied to analyze radiographic images such as Chest X-Rays (CXR) and CT scan images (Apostolopoulos et al., 2020; Wang et al., 2020; Umer et al., 2022). The use of deep learning to analyze X-rays could greatly reduce the time taken to diagnose patients. An AI model can process hundreds of images in the average time taken for a radiologist to analyze one. Furthermore, deep learning technology is a practical and affordable modality that can be deemed a reliable technique for adequately diagnosing the COVID-19 disease.

## PREVIOUS WORK

Vision transformers (ViTs) are a recent type of neural network architecture that has been shown to achieve state-of-the-art results on a variety of computer vision tasks (Vaswani et al., 2017; Dosovitskiy et al., 2020; Wu et al., 2020). ViTs are inspired by the transformer architecture which was originally developed for natural language processing (NLP). One of the key differences between ViTs and convolutional neural networks (CNNs) is that ViTs use self-attention, which allows them to attend to any part of the input image regardless of its spatial location. This makes ViTs more powerful than CNNs at learning long-range dependencies in images. ViTs have shown promising results on a variety of computer vision tasks, including image classification, object detection, and semantic segmentation.

Rahhal et al. utilized a model grounded on the Data-Efficient Image Transformer (DeiT) architecture, an enhanced version of the Vision Transformer (ViT). The model subdivided both original and augmented images into non-overlapping patches, which were then processed through the embedding layer and a Siamese encoder, achieving an accuracy of 94.62% on CXR data. Chetoui et al. conducted a comparative study between several ViT models and CNN models for multi-class classification problems. Their findings revealed that ViT-B32 outperformed CNN architectures in detecting Covid-19 on CXR images and was effective in pinpointing the most significant pathology regions, with an accuracy rate of 96%.

Yang et al. adapted the vision transformer to leverage all outputs from the encoder, yielding superior results than CNNs for Covid-19 diagnosis, with an accuracy of 98.2%. Okolo et al. introduced an architecture based on vision transformer named Input Enhanced ViT (IEViT). Inspired by ResNet skip connections, this approach iteratively added a representation of the original input image to the output of each transformer encoder layer, proving to be more effective than standard ViTs. These studies collectively suggest that transformers hold an edge over CNNs in evaluating Covid-19 Chest X-rays.



**Figure 1.** Structure of the Vision Transformer

## MATERIALS AND METHODS

In this study, the performance of the latest vision transformer based neural net architectures are evaluated and compared for the detection of Covid-19 on one of the most comprehensive Covid-19 public datasets. This work provides a baseline for these models without modification of the underlying network so that a fair assessment can be made on the vanilla models. Only the classification head has been changed for all networks in this study. In a significant part of the literature, parts of the networks have been changed, but these changes and corresponding results are hard to replicate since accompanying source code or hyperparameter values are rarely given. Since the performances of standard open-source networks are evaluated in this study, the results can be replicated by experts in the field. The networks that are benchmarked in this study are: ViT, MaxViT, and Swin Transformer.

### *Transformer Based Models*

Vision Transformer (ViT) is a model that applies the transformer to the image classification task (Dosovitskiy et al., 2020). It emerged as a competitive alternative to CNNs that are currently state-of-the-art in computer vision and widely used for different image recognition tasks. The structure of ViT can be seen in Fig. 1. ViT is a structure that employs self-attention mechanisms for image processing. It is composed of a sequence of transformer blocks. Each block has two layers: a multi-head self-attention layer and a feed-forward layer. The self-attention layer computes attention weights for each pixel in the image. The feed-forward layer applies a non-linear transformation to the self-attention layer's output. The multi-head attention allows the model to focus on different parts of the input sequence at the same time. Additionally, ViT includes a patch embedding layer that splits the image into fixed-size patches and converts each patch into a high-dimensional vector representation. These patch embeddings are then processed further in the transformer blocks. The output of the ViT structure is a class prediction, which is achieved by passing the last transformer block's output through a classification head, typically a single fully connected layer.

MaxViT is a novel vision transformer module (Tu et al., 2020). This paper introduces a multi-axis attention model that is both efficient and scalable. It comprises two components: blocked local attention and dilated global attention. These components enable interactions between global and local spatial aspects on any input resolution, maintaining only linear complexity. Furthermore, the authors introduce a new architectural component that integrates their proposed attention model with convolutions. This leads to the proposal of a straightforward hierarchical vision backbone, achieved by repeating the basic building block across multiple stages.

The Swin Transformer is a vision transformer that functions as a universal backbone for computer vision (Liu et al., 2021). It was developed to overcome the difficulties of applying transformers from language to vision, such as the large-scale variations in visual objects and the high resolution of image pixels compared to text words. To tackle these large scales, the Swin Transformer introduces a hierarchical structure that calculates representations with shifted windows. This shifted windowing approach enhances efficiency by confining self-attention computation to non-overlapping local windows and enables cross-window connection. The hierarchical structure provides the flexibility to model at different scales and maintains linear computational complexity relative to image size. These characteristics make the Swin Transformer suitable for a wide variety of vision tasks, including image classification, object detection, and semantic segmentation.

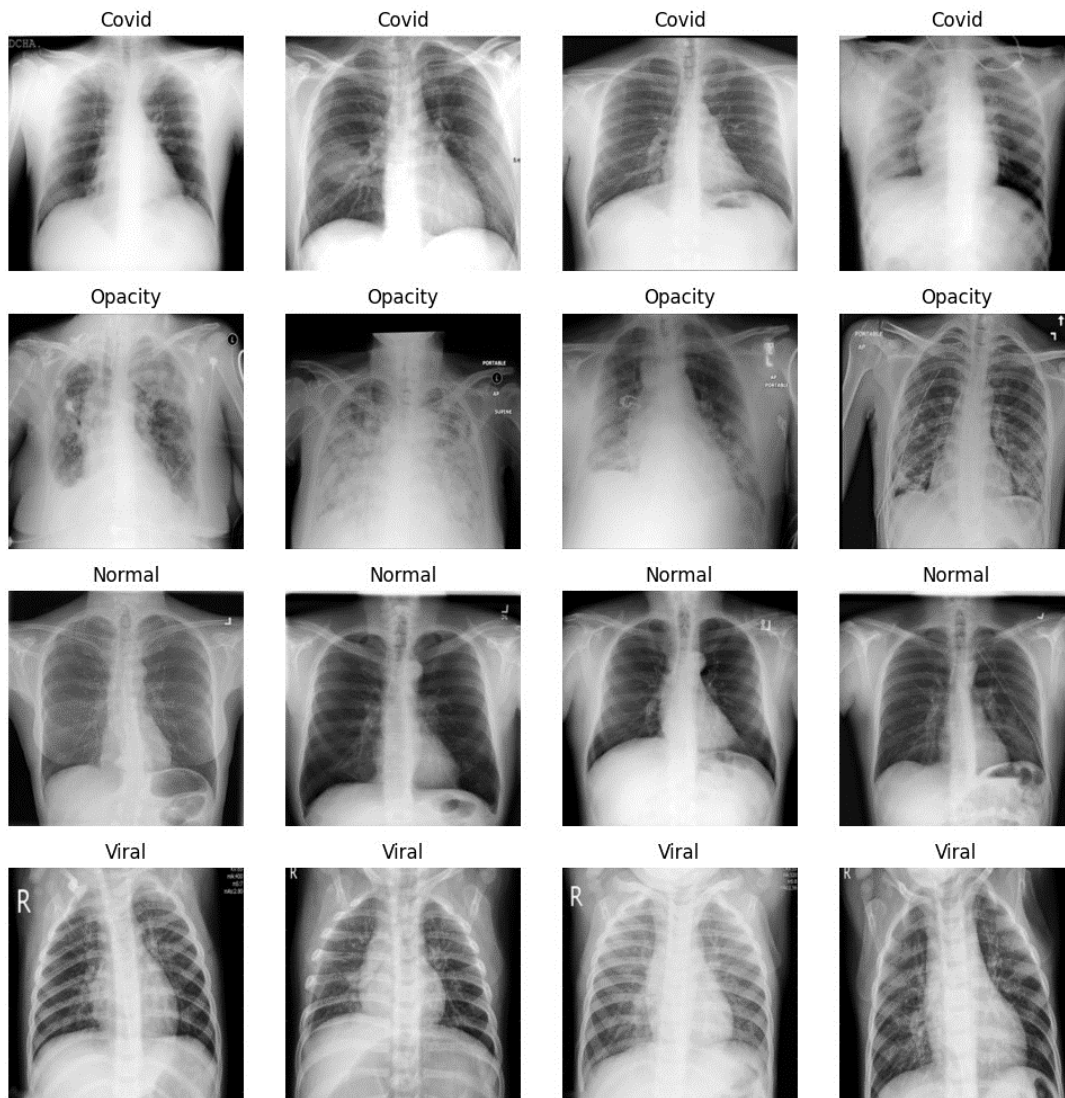


Figure 2. Sample Images in the Dataset with Their Labels

## Dataset

The Covid-19 dataset utilized in this study is composed of Chest X-Ray (CXR) images representing four conditions: Normal, Covid-19, Lung Opacity, and Viral Pneumonia (Chowdhury et al., 2020; Rahman et al., 2021). Lung Opacity refers to non-Covid lung infections. The dataset includes 3616 Covid-19 positive cases, 10,192 Normal cases, 6012 Lung Opacity cases, and 1345 Viral Pneumonia cases, along with corresponding lung masks, totaling 21,165 CXR images. All images have been standardized to a resolution of 299×299. These images were sourced from various medical institutions. Representative images along with their labels are displayed in Fig.2. The dataset was randomly divided into three categories: training, validation, and test. The test dataset consisted of 10% of the dataset while 80% of the rest was assigned to the training dataset and 20% of the rest was held out as the validation dataset.

Data augmentation is a strategy that significantly increases the variety of data available for training models without the need to collect more data. Widely used data augmentation techniques, such as rotation and horizontal flipping, are often employed when training large neural networks. These techniques can be applied individually or in combination. The goal is to create a more robust model by including a wider range of samples in the training data. In this study, the images underwent random rotation and horizontal flipping during the training phase. The rotation angle was limited to a maximum of 10 degrees. Before augmentation, the images were also scaled to match the input resolution of the networks.

## Transfer Learning

Transfer learning is a technique in machine learning where a model, initially developed for one task, is repurposed as the foundation for a model on a different task. This approach is widely used in deep learning where models that have been pre-trained are employed as the starting point for tasks related to computer vision and natural language processing because of the extensive computational and temporal resources needed to develop neural network models from scratch for these problems.

In this study, the output layers of the pre-trained models are removed, and a new classification head, corresponding to the number of classes in this study, is added. The model is then retrained on the dataset, leveraging the pre-trained weights. The classification head comprises a fully connected (FC) layer with an output size of 512, a dropout layer, and a final classification layer for the four classes. The model training was conducted with an initial learning rate of 1e-5, a batch size of 32 images, and over 25 epochs. The optimizer used was AdamW, with a step learning rate decay of 0.1 for every 10 epochs.

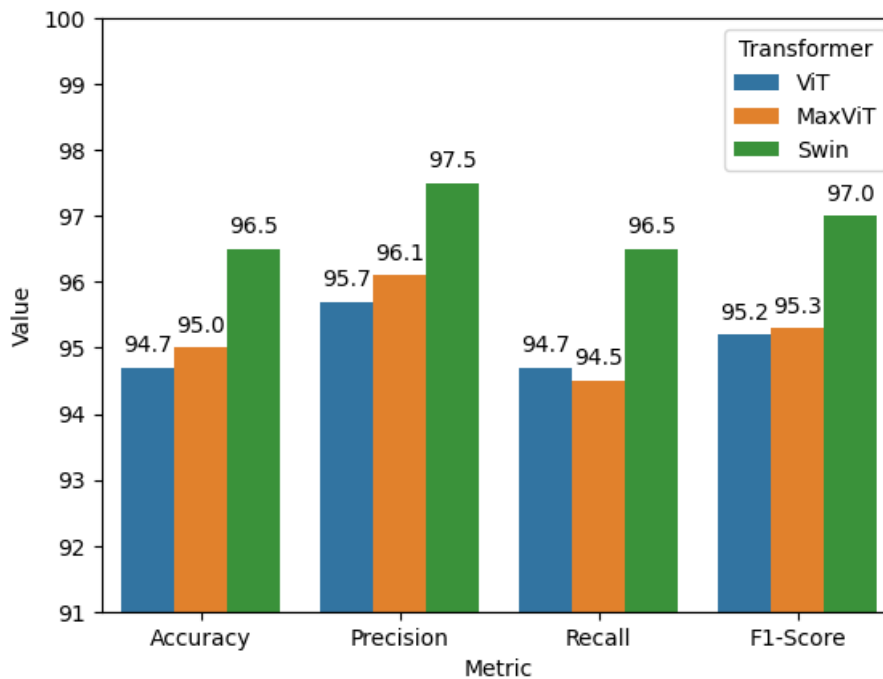


Figure 3. Results for Macro Average Metrics (%)

## RESULTS AND DISCUSSION

In this study, four indicators are used to evaluate the performance of the models. Precision can be represented by Eq. 1.

$$Precision = \frac{TP}{TP+FP} \quad (1)$$

Recall is defined by Eq. 2.

$$Recall = \frac{TP}{TP+FN} \quad (2)$$

Accuracy is represented by Eq. 3.

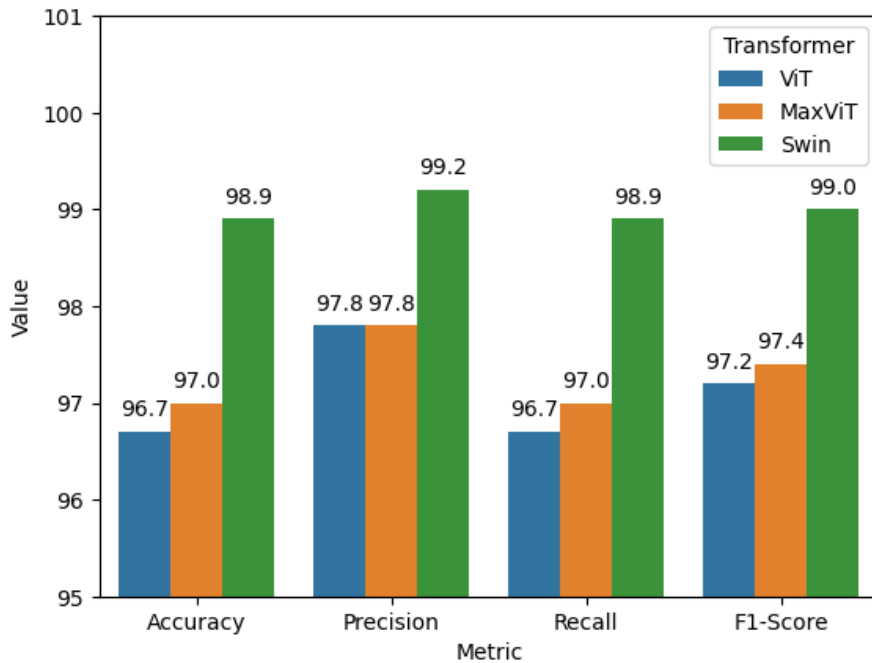
$$Accuracy = \frac{TP+TN}{TP+TN+FP+FN} \quad (3)$$

where TP is the number of true positives, TN is the number of true negatives, FP is the number of false positives and FN is the number of false negatives.

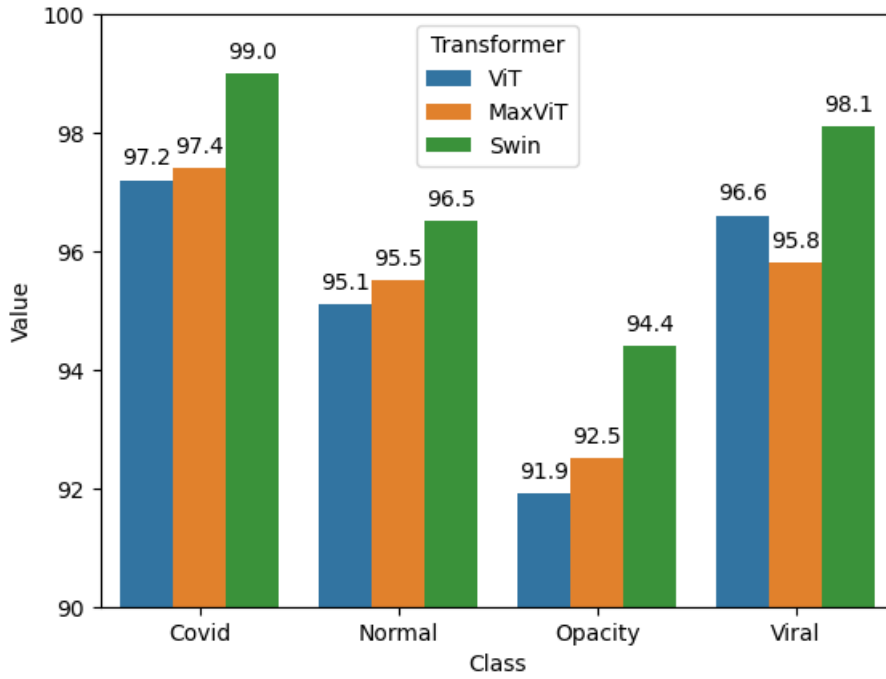
F<sub>1</sub> score is the harmonic average between precision and recall. If we need to find a balance between precision and recall, or if there is an uneven class distribution, then F<sub>1</sub> score is important (Eq. 4).

$$F_1 = \frac{2 \cdot Recall \cdot Precision}{Recall+Precision} \quad (4)$$

The results obtained for macro average metrics are shown in Fig. 3. Macro average is the averaged metric over all 4 classes. All models have metrics between %94 and %98, indicating very good performance for overall detection. Swin Transformer is the best model, making it the obvious choice for diagnosis. The overall recall and precision of the Swin Transformer is above 96.5%, therefore it is good not only for catching true positives but also for minimizing false positives. MaxViT and ViT have very similar metrics with MaxViT being a little better.

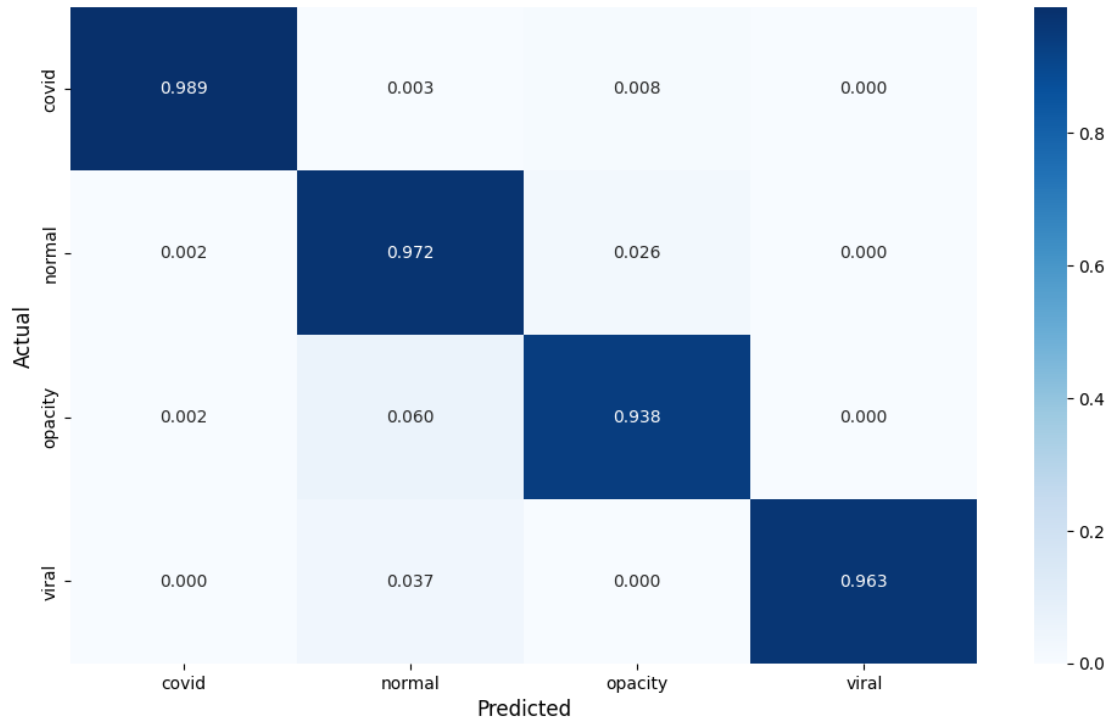


**Figure 4.** Results for Covid-19 Detection Metrics (%)



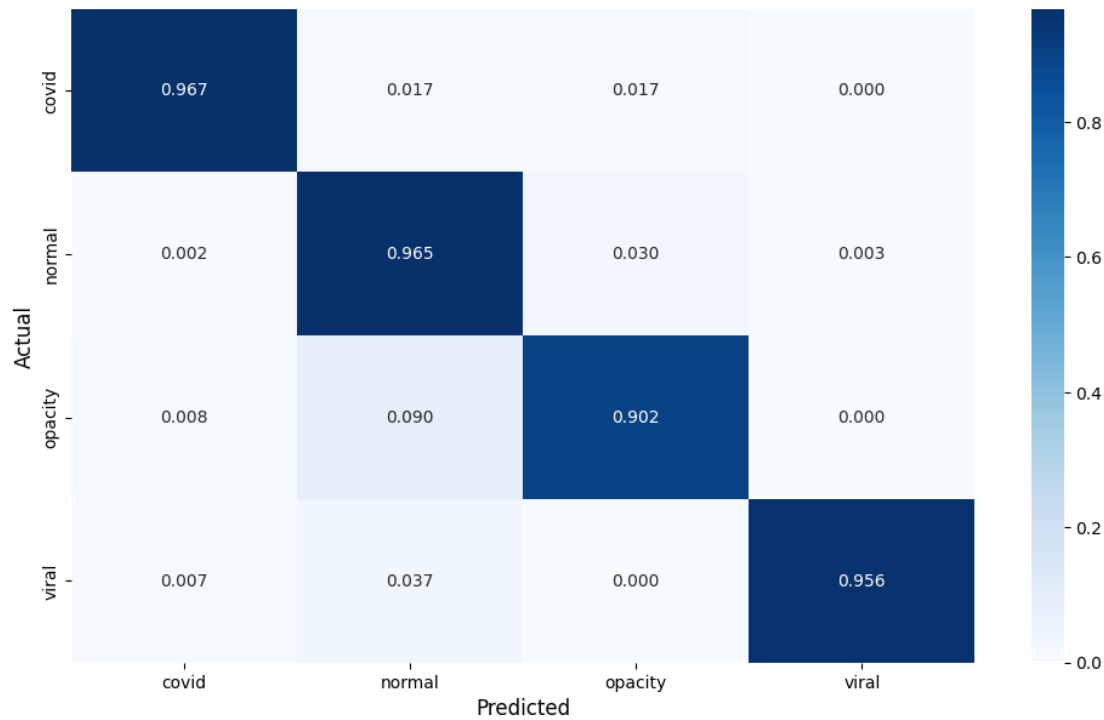
**Figure 5.** F<sub>1</sub> Scores for Each Class and Model (%)

Fig.4 shows the results of the Covid-19 detection metrics. These metrics have been calculated only on the Covid-19 classification performance. Again, the models show very high metrics. Swin Transformer is again the best model out of these three transformer variants, making it the best candidate for Covid-19 diagnosis. The overall scores for the Swin Transformer are around 99%, therefore it is good for detecting both Covid-19 positives and negatives. ViT and MaxViT have similar performances.



**Figure 6.** Swin Transformer Confusion Matrix for 4-Way Classification.





**Figure 7.** ViT Confusion Matrix for 4-Way Classification.

Fig. 5 displays the F<sub>1</sub> scores for each class and each model. Swin Transformer has the highest score for Covid-19 images at 99%. ViT and MaxViT have similar F<sub>1</sub> scores for Covid-19. All models have the lowest score for the Opacity class which makes this class the hardest to detect among these four.

Fig.6 shows the confusion matrix for the Swin Transformer which is the best transformer model. Opacity class has the smallest recall out of the four classes. Most of the confusion is between normal and opacity classes. There is also some confusion between normal and viral classes. Apart from those, there are not significant false negatives or positives between the classes.

Fig. 7 shows the confusion matrix for ViT. There is significant confusion between normal and opacity classes. Viral-normal confusion can also be seen in the figure. False negatives for Covid-19 come mostly from opacity and normal classes whereas false positives are mostly from viral and opacity classes.

## CONCLUSIONS

This study assesses and compares the performance of the latest vision transformer-based neural network architectures for detecting COVID-19 using one of the most comprehensive public COVID-19 datasets. The networks benchmarked include ViT, MaxViT, and Swin Transformer. All models exhibit macro-averaged metrics ranging from 94% to 98%, indicating excellent overall detection performance. Among these three vision transformer variants, the Swin Transformer emerges as the superior model, making it the preferred choice for diagnosis. The Swin Transformer's overall recall and precision exceed 96.5%, making it effective not only in identifying true positives but also in minimizing false positives. With an accuracy of 98.9% for Covid-19, the Swin Transformer achieves one of the highest scores obtained with state-of-the-art techniques for COVID-19 diagnosis.

## REFERENCES

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.

- Chetoui, M., & Akhlouf, M. A. (2022). Explainable vision transformers and radiomics for covid-19 detection in chest x-rays. *J. Clin. Med.* 11, 3013.
- 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., et al. (2020). Can AI help in screening viral and covid-19 pneumonia? <https://arxiv.org/abs/2003.13145>.
- Dosovitskiy, A., Beyer, L., Kolesnikov, A., Weissenborn, D., Zhai, X., Unterthiner, T., Dehghani, M., Minderer, M., Heigold, G., Gelly, S., Uszkoreit, J., & Houlsby, N. (2020). An Image is Worth 16x16 Words: Transformers for Image Recognition at Scale. <https://arxiv.org/abs/2010.11929>.
- 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.
- 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., Lin, Y., Cao, Y., Hu, H., Wei, Y., Zhang, Z., Lin, S., & Guo, B. (2021). Swin Transformer: Hierarchical Vision Transformer using Shifted Windows. <https://arxiv.org/abs/2103.14030>.
- Okolo, G. I., Katsigiannis, S. & Ramzan, N. (2022). Ievit: An enhanced vision transformer architecture for chest x-ray image classification. *Comput. Methods Programs Biomed.* 226, 107141.
- 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.
- Rahhal, A.M.M. et al. (2022). Covid-19 detection in ct/x-ray imagery using vision transformers. *J. Personal. Med.* 12(2), 310.
- 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., et al. (2021). Exploring the Effect of Image Enhancement Techniques on COVID-19 Detection Using Chest X-ray Images. *Computers in Biology and Medicine*, 132, 104319.
- Tu, Z., Talebi, H., Zhang, H., Yang, F., Milanfar, P., Bovik, A., & Li, Y. (2022). MaxViT: Multi-Axis Vision Transformer. <https://arxiv.org/abs/2204.01697>.
- 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.
- Vaswani, A., Shazeer, N., Parmar, N., Uszkoreit, J., Jones, L., Gomez, A.N., Kaiser, L., & Polosukhin, I. (2017). Attention Is All You Need. <https://arxiv.org/abs/1706.03762>.
- 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.
- Wu, B., Xu, C., Dai, X., Wan, A., Zhang, P., Yan, Z., Tomizuka, M., Gonzalez, J., Keutzer, K., & Vajda, P. (2020). Visual Transformers: Token-based Image Representation and Processing for Computer Vision. <https://arxiv.org/abs/2006.03677>.
- Yang, H., Wang, L., Xu, Y., & Liu, X. (2023). Covidvit: A novel neural network with self-attention mechanism to detect covid-19 through x-ray images. *International Journal of Machine Learning and Cybernetics*, 14, 973–987.



# Kahramanmaraş Sutcu Imam University Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 05.12.2023  
Kabul Tarihi : 29.05.2024

Received Date : 05.12.2023  
Accepted Date : 29.05.2024

## INVESTIGATION THE EFFECTS OF SUSTAINABLE COOLING/LUBRICATION CONDITIONS ON THE MACHINABILITY OF Al- 3Gr BASED HYBRID COMPOSITES

### SÜRDÜRÜLEBİLİR SOĞUTMA/YAĞLAMA KOŞULLARININ Al-3Gr ESASLI HİBRİT KOMPOZİTLERİN İŞLENEBİLİRLİĞİ ÜZERİNDEKİ ETKİLERİNİN ARAŞTIRILMASI

Üsame Ali USCA<sup>1</sup> (ORCID: 0000-0001-5160-5526)  
Ünal DEĞİRMENCİ<sup>2</sup> (ORCID: 0000-0003-1480-2488)  
Serhat ŞAP<sup>3\*</sup> (ORCID: 0000-0001-5177-4952)

<sup>1</sup> Department of Mechanical Engineering, Bingöl University, Bingöl, Türkiye

<sup>2</sup> Department of Machinery and Metal Technologies, Bingöl University, Bingöl, Türkiye

<sup>3\*</sup> Department of Electricity and Energy, Bingöl University, Bingöl, Türkiye

\*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Serhat ŞAP, ssap@bingol.edu.tr

#### ABSTRACT

The main purpose of this research is to meticulously evaluate various derivatives resulting from recently developed Al-3Gr-based hybrid composites and to complete the deficiencies for industrial applications, especially focusing on processability. Assessments were conducted using a computer numerical control (CNC) milling apparatus, involving a spectrum of cutting parameters: varying cutting speeds (150-225-300 m/min), feed rates (0.15-0.225-0.3 mm/rev), and diverse cooling/lubrication conditions (dry-minimum quantity lubrication-liquid nitrogen). The experimental framework was meticulously structured based on the Taguchi L<sub>18</sub> orthogonal array, which was further validated through a comprehensive analysis of variance (ANOVA) at a 95% confidence level. Throughout the experimentation, crucial machinability parameters such as cutting temperature, flank wear, and surface roughness were meticulously scrutinized. The optimized test outcomes, demonstrating an impressive precision level of 97%, revealed a reduction in machinability by approximately 18%, accompanied by a noteworthy decrease in cutting temperature by 16%, flank wear values by 16%, and surface roughness by 25%. Overall, the findings elucidate that the cooling/lubrication conditions significantly dictated the machinability parameters during the experimental trials. The empirical evidence extracted from these experiments emphatically suggests the potential utilization of the novel Al-3Gr composites, signifying a promising avenue for their widespread integration within industrial domains.

**Keywords:** Al-3Gr composites, milling, cooling/lubrication, design of experiments, machinability

#### ÖZET

Bu araştırmanın temel amacı, son dönemde geliştirilen Al-3Gr bazlı hibrit kompozitlerden elde edilen çeşitli türevleri titizlikle değerlendirmek ve özellikle işlenebilirlik konusuna odaklanarak endüstriyel uygulamalara yönelik eksiklikleri tamamlamaktır. Değerlendirmeler, çeşitli kesme parametrelerini içeren bir bilgisayar sayısal kontrol (CNC) frezeleme aparatı kullanılarak gerçekleştirildi: değişen kesme hızları (150-225-300 m/dak), ilerleme hızları (0,15-0,225-0,300 mm/dev) ve çeşitli kesme parametreleri soğutma/yağlama koşulları (kuru-minimum miktarda yağlama-sıvı nitrojen). Deneysel çerçeve, % 95 güven seviyesinde kapsamlı bir varyans analizi (ANOVA) yoluyla daha da doğrulanan Taguchi L<sub>18</sub> ortogonal dizisine dayalı olarak titizlikle yapılandırılmıştır. Deney boyunca kesme sıcaklığı, yan aşınma ve yüzey pürüzlülüğü gibi önemli işlenebilirlik parametreleri titizlikle incelendi. % 97'lik etkileyici bir hassasiyet düzeyi sergileyen optimize edilmiş test sonuçları, işlenebilirlikte yaklaşık % 18'lik bir azalmanın yanı sıra kesme sıcaklığında % 16, yan aşınma değerlerinde %16 ve yüzey pürüzlülüğünde % 25 oranında

ToCite: USCA, Ü. A., DEĞİRMENCİ, Ü., & ŞAP, S., (2024). INVESTIGATION THE EFFECTS OF SUSTAINABLE COOLING/LUBRICATION CONDITIONS ON THE MACHINABILITY OF Al-3Gr BASED HYBRID COMPOSITES. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 27(3), 688-705.

kayda değer bir azalma olduğunu ortaya çıkardı. Genel olarak bulgular, soğutma/yağlama koşullarının deneysel denemeler sırasında işlenebilirlik parametrelerini önemli ölçüde belirlediğini ortaya koyuyor. Bu deneylerden elde edilen ampirik kanıtlar, yeni Al-3Gr kompozitlerinin potansiyel kullanımını açıkça ortaya koymakta ve bunların endüstriyel alanlarda yaygın entegrasyonu için umut verici bir yol olduğunu göstermektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Al-3Gr kompozitler, frezeleme, soğutma/yağlama, deney tasarımı, işlenebilirlik

## GİRİŞ

The need for quality products can only be met by using new materials with more functional and advanced features. Today, composite materials with different main matrices meet this advanced material requirement rather than traditional materials. In this context, metal matrix composites (MMC) (Usca et al., 2022; Ramanathan et al., 2019; Taskin, et al., 2008) especially polymer (Tuloup et al., 2019; Benzait & Trabzon, 2018; Maiarù, D'Mello & Waas, 2018) and ceramic matrix composites (Yıldırım et al., 2019; Du et al., 2018) are widely studied by researchers in terms of their structural properties and their use in many fields (Usca et al., 2022; Oguntuyi et al., 2021; Sozhamannan et al., 2018). Among these structures, aluminum-based metal matrix composites (AMMC) significantly appeal to the aerospace, automobile, and defense industries due to their superior properties (Şap, 2023a; Taşkın & Çalgılı, 2006). In this context, AMMCs with interesting properties were produced by adding ceramic and carbon-based reinforcements in various proportions to the main aluminum matrix, and many studies were carried out on their properties and application areas (Trinath et al., 2021; Ande et al., 2019; Sharma et al., 2019; Sozhamannan et al., 2018).

Studies on AMMCs have recently shifted from single-reinforced composite materials to hybrid composite structures with multiple reinforcements (Prasad et al., 2014). With more than one reinforcement added to the aluminum metal matrix composites, besides the good properties added by a single reinforcement, the adverse effects on the structure are eliminated with the second reinforcement. Thus, with hybrid reinforcement, it is possible to improve multiple properties of the matrix, not one-way (Kesarwani et al., 2020; Das et al., 2016; Suresh et al., 2014). Although hybrid AMMCs have interesting and superior properties in terms of mechanical, thermal, and electronic properties, their machinability becomes more difficult and complex due to their complex microstructure (Li & Laghari, 2019; Srivastava et al., 2018; Hakami et al., 2016; Gopalakannan & Senthilvelan, 2013). Numerous investigations within this domain have focused on delineating the output metrics encompassing tool life, tool wear, surface roughness, and cutting temperature after machining Metal Matrix Composites (MMCs). These studies meticulously designate feed rate, cutting speed, depth of cut, and cooling/lubrication conditions as pivotal input parameters for comprehensive analysis (S. Şap et al., 2022; Usca et al., 2022; Cai et al., 2021; Hakami et al., 2016). As an example of these studies, Ozben et al. (2008) investigated the effect of reinforcement ratio on the process parameters and mechanical properties by adding 5%, 10%, and 15% SiC<sub>p</sub> to the aluminum metal matrix. Empirical findings from experiments indicate a direct correlation between the augmentation of reinforcement ratio and enhanced mechanical characteristics, specifically elevating toughness, tensile strength, and hardness. However, this elevation concurrently induces heightened surface roughness and tool wear during machining operations, influenced notably by spindle speed and feed rate adjustments. Similarly, an independent study highlighted the substantial impact of SiC reinforcement volume ratio on tool wear, demonstrating a consistent escalation in wear as the percentage of reinforcement increased (Muthukrishnan & Davim, 2011). As the SiC ratio in the structure increases, it is stated that the particles with high kinetic energy will increase the wear by hitting the tool tip surface due to the increase in the contact surface between the SiC particles and the cutting edge (Bhushan, 2013). In another study, it was stated that SiC<sub>p</sub>-reinforced aluminum composites should be processed at higher cutting speeds to obtain better-machined surface quality (Muthukrishnan et al., 2008).

To obtain a good machined surface quality, it is important to use a good coolant as well as to determine the optimum cutting parameters (Jadhav & Mohanty, 2022). Although some dry machining studies are in the literature, high cutting forces and high temperatures in dry machining limit the application area (Zou et al., 2021). For this reason, cutting fluid is often needed. Cutting fluids serve a dual purpose in machining processes, functioning not solely as coolants but also as agents facilitating friction reduction through lubrication while effectively clearing chips within the cutting zone. This multifaceted role significantly contributes to elongating tool lifespan and enhancing the overall surface quality of machined components (Yıldırım et al., 2019). Choosing the proper cooling/lubrication is very important when using cutting fluid. In machining with conventional cutting fluids, the cutting tool costs cover 2-4% of the total machining cost, while the total costs of cutting fluids in machinability are considerably higher than the cutting tool

(Amiril et al., 2017; Gajrani et al., 2019). For all these reasons, there is a need for new cooling and lubricating fluids that will overcome the disadvantages of traditional cutting fluids, such as high cost, worker and environmental health problems, and problems in dry machining. This requirement is met by cryogenic cooling, minimum quantity lubrication (MQL), and cryogenic minimum quantity lubrication (CMQL), also known as semi-dry machining recently (Mia et al., 2019; Jawahir et al., 2016; Ahmad-Yazid et al., 2010; Dhar et al., 2007; López de Lacalle et al., 2006). In the MQL method, as the name suggests, the minimum amount of cutting fluid consumed compared to the traditional cooling method ensures that the machining is performed with both more economical and better cutting performance (Kim et al., 2016; Fratila & Caizar, 2011). In addition to the costs, the minimal amount of cutting fluid ensures that environmental and human health damage is prevented or minimized (Thepsonthi et al., 2009). While thermal crack formation in the cutting tool is possible in the traditional cooling method, it is rarely seen in the MQL method. Therefore, the tool life is longer (Liao and Lin, 2007). Another important cutting fluid used in this field is cryogenic fluids. The cryogenic cooling media most commonly used as cutting fluid are liquid nitrogen (LN<sub>2</sub>) (S. Şap, 2023b), liquid carbon dioxide (LCO<sub>2</sub>) (Shah et al., 2020), cold air, and supercritical carbon dioxide (scCO<sub>2</sub>). Cryogenic coolants offer a secure, cost-effective, and environmentally conscious cooling solution, presenting ease in preparation and storage at ambient room temperatures. This cooling method ensures safety, affordability, and eco-friendliness while allowing convenient handling and storage without requiring specialized conditions (Yuan et al., 2018). Due to these features, they have been the subject of many studies.

Hence, the primary focus of this study involved an examination of the milling process applied to Al-3Gr-based hybrid reinforced composites, analyzing their response to varied cutting speeds, feed rates, and distinct cooling/lubrication (C/L) conditions. Three different environments were chosen as the cooling/lubricating medium: dry, MQL, and LN<sub>2</sub> cooling techniques. The effects of machinability parameters such as reinforcement ratio, cutting speed, and feed rate on surface roughness, tool wear, and cutting temperature were investigated in detail. In addition, it was aimed to find the optimum machinability parameters (AMMC type, cutting speed, feed rate, and C/L condition) of Al-3Gr-based hybrid reinforced composites. During the process of determining the most effective parameters, machinability assessments were conducted using the Taguchi method. This approach aimed to decrease the number of experiments, eliminate the need for time-consuming trial and error cycles, and lower the expenses associated with conducting experiments. This work aims to find the optimal processing parameters for a novel hybrid AMMC that has not been previously documented in the literature. It will be possible to use it in many industrial areas.

## MATERIAL AND METHODS

### Test Materials

Metal and ceramic powder particles such as Al, Gr, SiC, and BN required for manufacturing composite materials were obtained from Nanokar (Istanbul, Turkey). The powders supplied are of high purity. Some properties of related powders are given in Table 1.

**Table 1.** Characteristics of Powders Utilized in Composite Manufacturing (Şap et al., 2023)

Powders	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Melting temperature (°C)	Particle size (µm)	Purity (%)
Al	2.71	660	45-75	≥ 99.90
Gr	2.26	3652	≤ 44	≥ 98.00
SiC	3.21	2830	45-70	≥ 98.00
BN	2.1	2973	≤ 10	≥ 99.00

After the powders were supplied, six different composites based on Al-3Gr by mixing in the desired ratio were produced under the hot press with the powder metallurgy method. These six composites and their contents are given below, respectively.

- i. Al-3Gr (97 wt.% Al + 3 wt.% Gr),
- ii. Al-3Gr/6SiC (91 wt.% Al + 3 wt.% Gr + 6 wt.% SiC),
- iii. Al-3Gr/6BN (91 wt.% Al + 3 wt.% Gr + 6 wt.% BN),
- iv. Al-3Gr/1.5SiC-1.5BN (94 wt.% Al + 3 wt.% Gr + 1.5 wt.% SiC + 1.5 wt.% BN),
- v. Al-3Gr/3SiC-3BN (91 wt.% Al + 3 wt.% Gr + 3 wt.% SiC + 3 wt.% BN),
- vi. Al-3Gr/6SiC-6BN (85 wt.% Al + 3 wt.% Gr + 6 wt.% SiC + 6 wt.% BN)

The vacuum hot press machine, Zhengzhou Golden Highway, used to produce composites after mixing the relevant powders, is an SMVB80 brand and PLC (Programmable Logic Controller) controlled hot press unit. The pressure and temperature values used during production are 35 MPa and 530 °C, respectively. The dimensions of the composite test specimens obtained after production are 40 mm long, 40 mm wide, and 8 mm thick.

### Machining parameters

The experiments to analyze the machinability of the produced AMMCs were carried out on a DAHLIH MCV-860 model CNC Milling machine. AlTiN-coated ISO 13399 tool bits were used for cutting.

**Table 2.** Some Properties of Cutting Tool

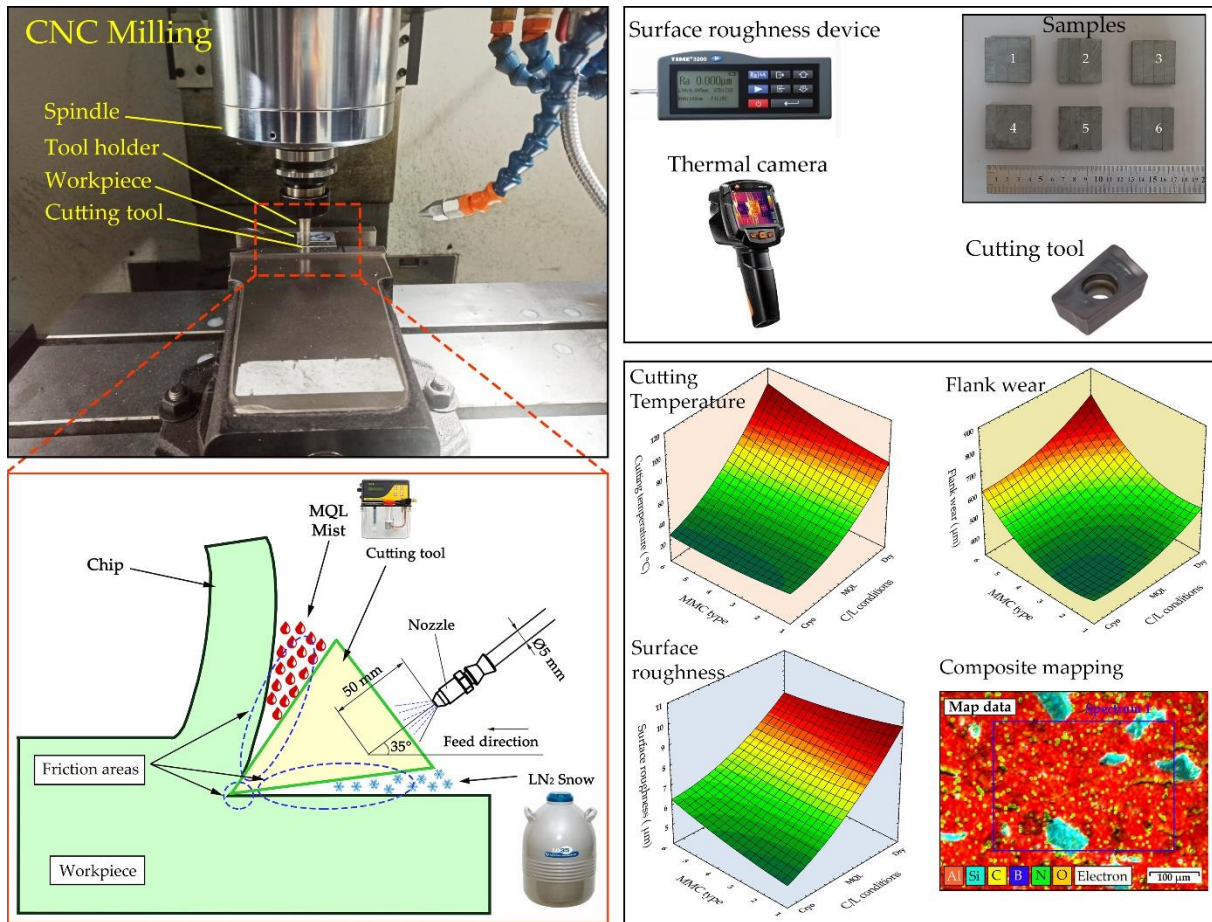
Cutting tool geometry	Cutting tool diameter	Tool clamping length	Number of insert	Insert width	Insert length	Insert radius	Insert materials	Milling type
APKT 1003	12 mm	80 mm	1	6.76 mm	11.45 mm	0.8 mm	Al-Ti-N- W-Co-Cr- Ni	down milling

As cutting parameters, three different cutting speeds and three different feed rates were used as variable parameters, while a fixed value of 0.75 mm was chosen for the cutting depth. Milling was carried out in the experiments by applying a “Zig” toolpath. The cutting parameters were established by taking into account the suggested operating range provided by the manufacturer of the cutting instrument. Details of 6 different composites and three different cooling conditions, cutting speed and feed rate, and test levels used in the experiments are given in Table 3. The experiments were repeated three times to obtain more accurate results.

**Table 3.** Parameters and Tiers of CNC Milling

Milling parameters	A-MMC type	B-Cooling conditions	C-Cutting speed, ( $V_c$ )	D-Feed rate, ( $f$ )	
Unit	-	-	m/min	mm/rev	
Levels	1	(1) Al-3Gr	Dry	150	0.150
	2	(2) Al-3Gr/6SiC	MQL	225	0.225
	3	(3) Al-3Gr/6BN	Cryo	300	0.300
	4	(4) Al-3Gr/1.5SiC-1.5BN	-	-	-
	5	(5) Al-3Gr/3SiC-3BN	-	-	-
	6	(6) Al-3Gr/6SiC-6BN	-	-	-

The study implemented machinability trials under three environmentally-conscious conditions: dry machining, pure Minimum Quantity Lubrication (MQL), and cryogenic liquid nitrogen (cryo-LN<sub>2</sub>) application. The objective centered on assessing the influence of different cooling and lubricating mediums on both the cutting tool and the workpiece throughout the machining process. For the cryogenic cooling procedure, liquid nitrogen stored in a Taylor Wharton LD-35 tank of 35-liter capacity was utilized, maintaining a temperature of -196°C. The spray pressure was calibrated to 8 bar, with a flow rate set at 20 L/h. The MQL approach utilized Cuttux Syn 5 as a cutting fluid, administered onto the cutting tool and workpiece via compressed air through a potentiometer-controlled Werte Micro Stn-15 model system. The MQL liquid is administered in comparable circumstances to the cutting zone in order to provide an accurate comparison with the cryogenic liquid. A 5 mm diameter nozzle facilitated the delivery of pressurized oil into the cutting zone, aligning with the prescribed operating ranges advised by the manufacturer. A schematic depiction exemplifying the intricate details of the experimental setups can be observed in Figure 1.



**Figure 1.** Schematic Representation of The Experimental System

The assessment of cutting temperatures employed the testo-871 model thermal camera, specifically designed to measure temperatures up to 650 °C with a resolution of 240x180 pixels. Measurements were conducted precisely in the final phase before the cutting tool disengaged from the workpiece. Additionally, surface roughness, a pivotal indicator of machined component quality, was gauged using the TIME3200 test device. In the industry, the Ra parameter was generally preferred because it is more preferred in controlling and improving production quality in production processes (Uzun et al., 2022). While performing the measurements, the reference measurement values of the manufacturer were taken into account. Furthermore, the tests were conducted promptly after the machining process, ensuring that the measurement data were not influenced by surface oxidation. Additionally, each sample was subjected to six repeated measurements. Flank wear measurements were conducted using a JEOL JSM 6510 type scanning electron microscope (SEM) instrument. The measurements were conducted according to ISO standards, considering the region of the cutting tool that showed the highest wear.

### **Taguchi Method**

To ascertain the optimal cutting configurations significantly influencing surface roughness, flank wear, and cutting temperature outputs in hybrid AMMC machining, machinability tests were executed utilizing the Taguchi L<sub>18</sub> orthogonal array. The employment of this array methodology markedly reduces the number of requisite tests, thereby curtailing associated expenses and time commitments. Its prevalent application lies in evaluating outcomes stemming from studies featuring designated variables. Taguchi's framework delineates product and process design quality across three discrete phases: system design, parameter design, and tolerance design. The milling parameters, encompassing composite type, cutting speed, feed rate, and cooling/lubrication medium, were precisely determined and detailed in Table 4. Through the experimental settings and levels adopted in this investigation, the evident suitability and efficiency of the Taguchi L<sub>18</sub> orthogonal array emerge as the most optimal choice. The Taguchi method opts for a measurable signal-to-noise (S/N) ratio rather than relying on standard deviation as the primary quality characteristic. This ratio signifies the relationship between the mean (signal) and the standard deviation (noise). Typically, S/N ratio attributes fall into three distinct categories: Lowest best, Highest (large) best, and Nominal best. Within this study, the smallest value best option was utilized for all response parameters. The computation of S/N ratios is facilitated through the utilization of Equation (1).

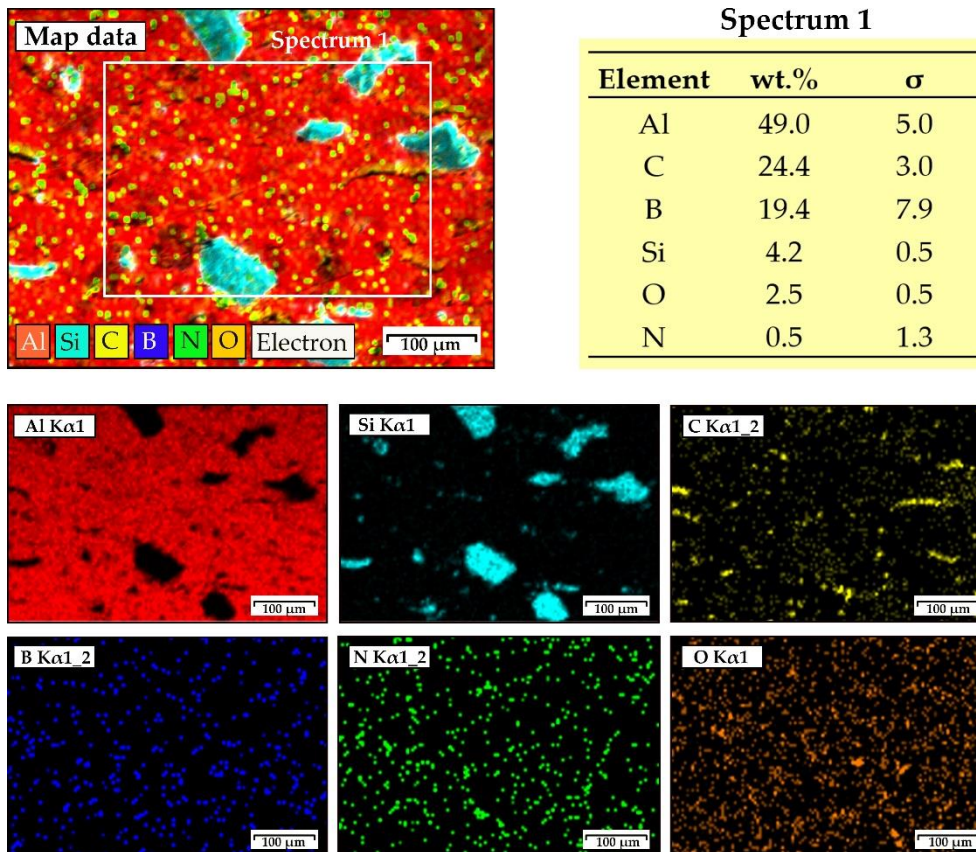
$$\frac{s}{N} = -10 \log \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (z^2) \right) \quad (1)$$

In this context, “z” denotes the response parameters, specifically flank wear, surface roughness, and cutting temperature. “n” signifies the repetition count for the test conditions, while “i” represents the individual repetition instances within this count.

## RESULTS AND DISCUSSION

### Assessment of Composite Fabrication

Al-3Gr hybrid composite and its five different versions were milled in macro size. Figure 2 shows an SEM microstructure and mapping analysis for MMC Type 6. These techniques are critical for understanding and evaluating materials' microstructural properties, performance, and manufacturing processes. Upon examination of the scrutinized microstructure, a uniform dispersion of reinforcement particles within the primary matrix was noted. The red color represents the Al main matrix. Another element of the hybrid main matrix, Gr, is shown in yellow as element C. SiC particles with a coarse structure are indicated in light blue. In BN reinforcements, the B element is dark blue, and the N element is green.



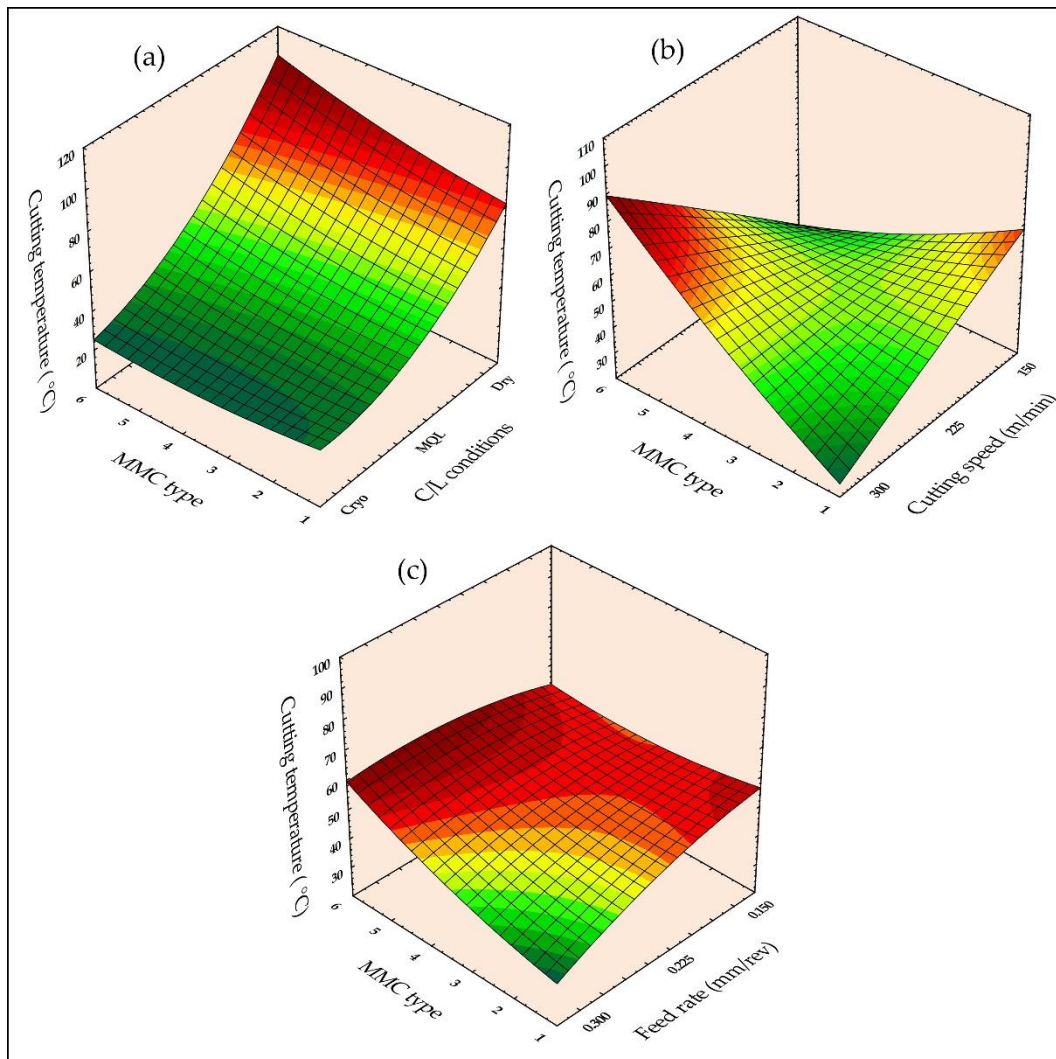
**Figure 2.** SEM Microstructure, EDS, and Mapping Analysis for MMC Type 6

Upon scrutiny of Figure 3, it becomes evident that the reinforcement elements exhibit a homogeneous distribution across the primary matrix. Professional mixing of powder particles before production is very important in this respect. Whether or not the reinforcing elements are distributed homogeneously significantly affects the milling process. It is known that reinforcement elements seriously affect the cutting tool (Şap et al., 2022). Therefore, an inhomogeneous distribution can lead to inaccurate results for the cutting tool and machinability metrics. It can be observed that the amount of porosity in the material is reduced to a minimum with the effect of hot sintering with a vacuum. As a result, the mapping indicates that the material has a uniform distribution and a strong interfacial bond. A study has shown that the homogeneous microstructure of MMC materials contributes to the increase in machinability performance (Değirmenci et al., 2023).



### Assessment of Cutting Temperature

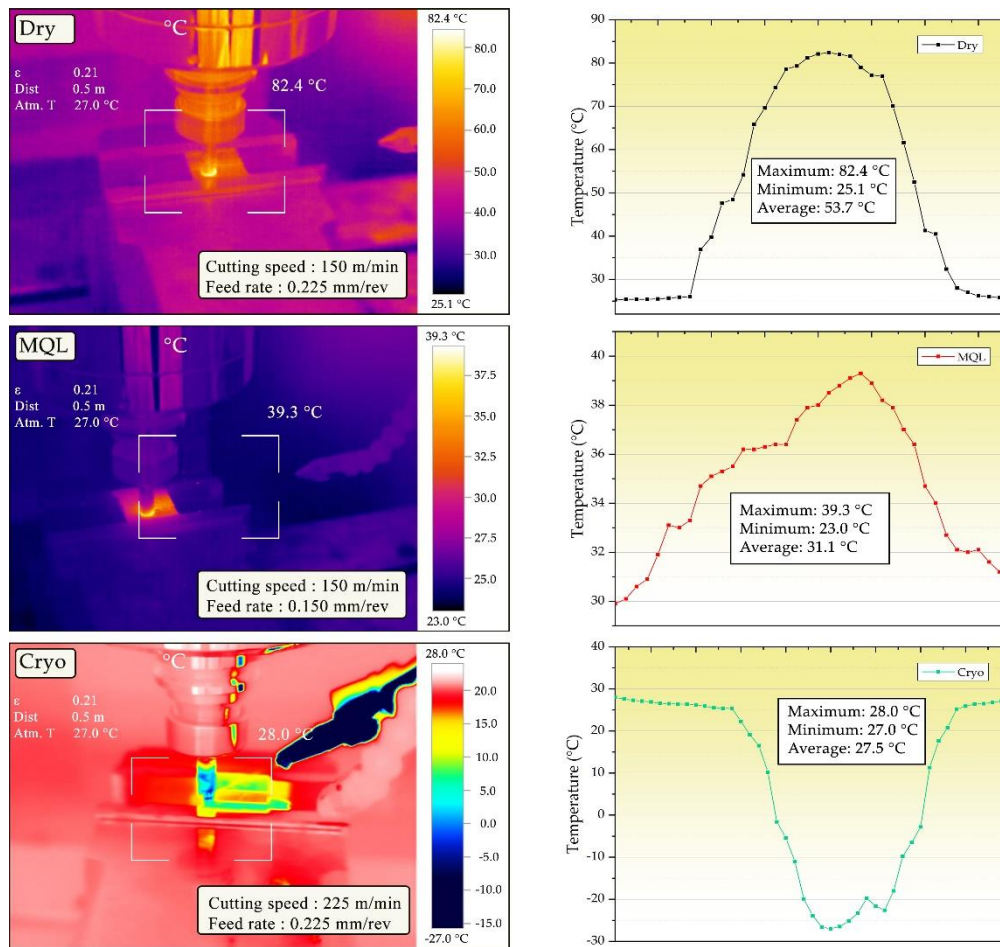
Controlling the cutting temperature is very important in the milling process. Providing the correct cutting temperature can offer significant benefits to outputs such as tool life, workpiece quality, process efficiency, and material performance (Şap et al., 2021). Figure 3 presents the graph of the effects of different cutting parameters ( $V_c$ ,  $f_n$ , and C/L conditions, respectively) on the cutting temperature for each MMC type obtained as a result of the experiments. The cutting temperature outcomes exhibit distinct characteristics corresponding to each type of MMC. An observable trend indicates a decrease in cutting temperature with the escalation of reinforcement components and ratios at lower cutting speeds. However, this pattern reverses at higher cutting speeds. Notably, under high cutting and feed rates, there's a likelihood of surface degradation in the composite material, potentially leading to surface defects. In addition, high cutting speeds can increase plastic deformations in the material. Therefore, there may be an increase in cutting temperatures. (Samy et al., 2017). It was observed that the feed rate, which does not affect the cutting temperature as much as the cutting speed, affects the cutting temperature differently for MMC types, similar to the cutting speed.



**Figure 3.** Effect of Different Parameters on Cutting Temperature for MMC Types

Since milling operations in soft materials are performed better at higher cutting speeds, an easier cutting environment is created for MMC types with no reinforcement component and less reinforcement component ratio. This helps to lower the cutting temperature. Furthermore, it is plausible to assert that augmenting the feed rate contributes to a reduction in cutting temperature by diminishing the duration of contact between the material and the cutting tool (Şap et al., 2022). Finally, C/L environments can be seen to have a standard effect. Thanks to its high cooling capability, it has been observed that cryo LN<sub>2</sub> plays an active role in the milling of all MMC types. In addition, the results showed that the MQL medium could be used during the machinability of hybrid composites. A study has shown that cryogenic cooling can reduce high temperatures to more reasonable levels, thanks to a significantly lower freezing

point than an MQL environment (Hong et al., 2001). Unlike other conditions, high temperatures were obtained for all MMC types in dry milling operations. The importance of cryo LN<sub>2</sub> and MQL environment in the machinability of hybrid MMCs was revealed as a result of the study. Figure 4 presents thermal images and corresponding temperature distribution graphs illustrating samples processed under various C/L conditions.

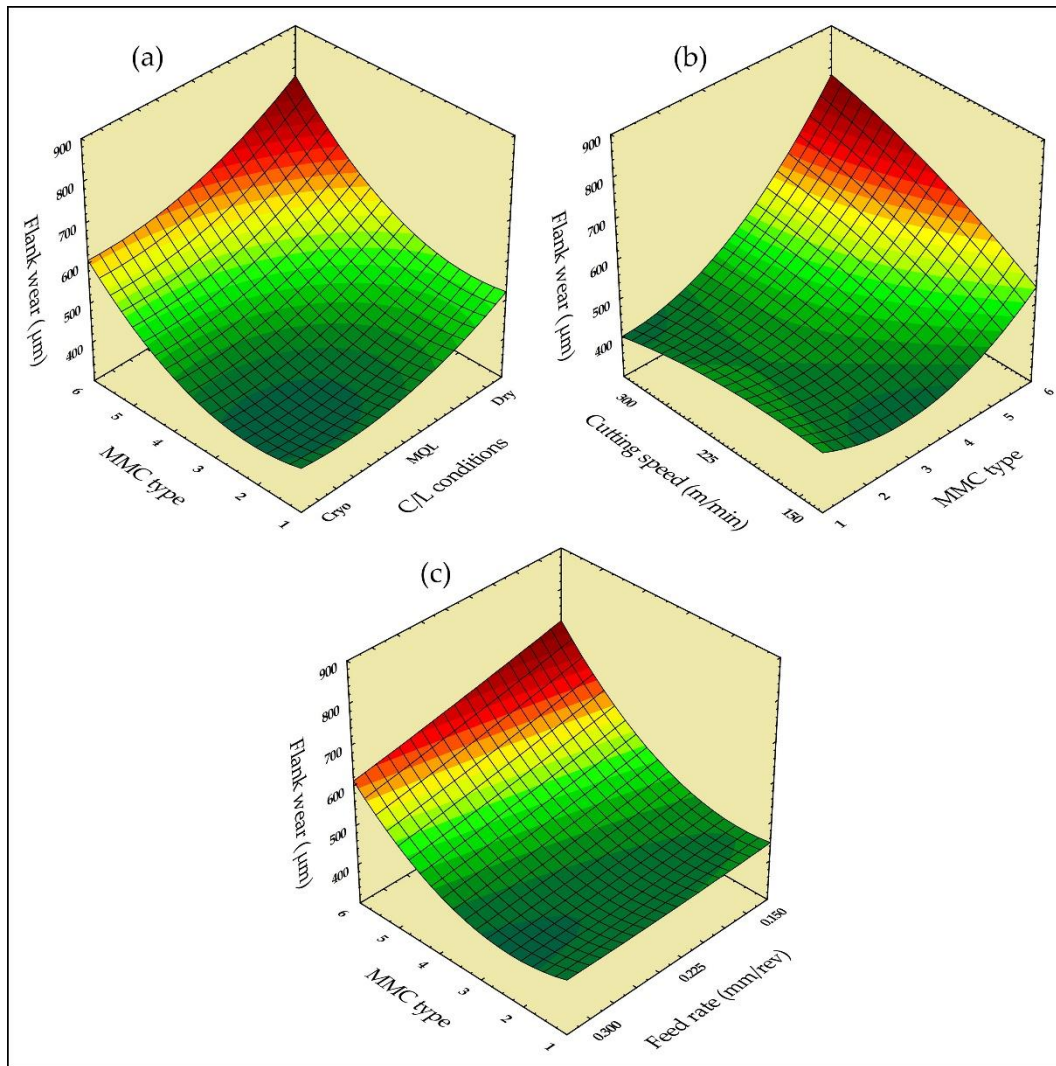


**Figure 4.** The Thermal Images and Temperature Distribution Graphs Depict The Samples Processed under Distinct C/L) Conditions

### Assessment of Cutting Tool Wear

Wear and deformations on the cutting tools during the milling of materials are important factors in workpiece quality and machining performance. This factor is directly related to cutting tool life, machinability metrics, surface quality, and machining cost (Korkmaz & Günay, 2018). Understanding and optimizing wear can increase machining efficiency, improve surface finish, and reduce machining costs (Babu et al., 2022). Figure 5 shows the machinability parameters' effect on the flank wear value according to different composite material types. With an escalation in both reinforcement ratio and type within composite materials, the influence of cutting speed on flank wear becomes more pronounced. Overall, a discernible trend emerged indicating a direct correlation between increased cutting speed and heightened flank wear values. Literature studies have confirmed this phenomenon (Şap et al., 2022). It can be seen in Figure 7 that the highest amount of wear on the cutting tool will occur at high cutting speed and MMC type 6. It was observed that the feed rate change for different MMC types does not significantly affect flank wear. However, although the change in feed rate with increasing type and amount of reinforcement provides a visible change, this is not valid for MMC without supplement and MMC with single reinforcement. In addition, it can be said that there is a slight decrease in  $V_b$  with the increase in the feed rate. Dry-cutting conditions offer lower performance compared to cryogenic and MQL (Laghari et al., 2023). In this study, this conclusion was confirmed for all MMC types. Furthermore, an observation surfaced indicating that as the level of MMC type escalated, the efficacy of cryogenic C/L conditions proved more pronounced in regulating  $V_b$  (flank wear) to a lower magnitude. The utilization of cryogenic cooling, existing in a liquid state at exceptionally low temperatures, evidently plays a substantial role in

mitigating tool wear by minimizing the surface friction coefficient between the cutting tool and the workpiece (Courbon et al., 2013).



**Figure 5.** The Effect of Different Parameters on Flank Wear for MMC Types

It is very important to know the type of wear on the cutting tool in terms of tool life and machining efficiency (Babu et al., 2022). Figure 6 presents an SEM-EDS analysis examining the wear mechanism for inserts from different experiments. In addition, flank wear areas occurring in the cutting tool flank area are also shown openly. In general, chipping, BUE (built-up edge), and adhesive wear tool wear mechanisms were found in cutting tools. Nevertheless, it can be asserted that the predominant wear mechanisms observed are adhesion wear and BUE. Figure 7 represents the baseline mapping analysis for experiment 6. Experiment no. 6 was carried out with Al-3Gr/6SiC material in a dry environment at 300 m/min cutting speed and a feed rate of 0.3 mm/rev. When the cutting tool used for the experiment was examined, adhesive wear and BUE formation were observed. The presence of adhesive wear was revealed by SEM-EDS mapping (Figure 7). At higher cutting speeds, friction increases. This causes soft workpiece material to stick to the tool surface, resulting in adhesion wear. In Figure 6 (Exp. no: 6), W-Co-Ni-V represents the tool base material, Al-Ti-N tool coating, and Al-Si-C represents the elements of the MMC type 2 workpiece. Another mechanism seen in Figure 6 is clearly seen as BUE. High cutting speeds (300 m/min) increase friction, increasing the risk of BUE. In addition, excessive friction and a dry machining environment increase the temperature excessively, which can lead to BUE formation. A study supports the current situation. Experiments 3 and 15 in Figure 6 show that BUE formation can be reduced by using appropriate lubrication and cooling methods.

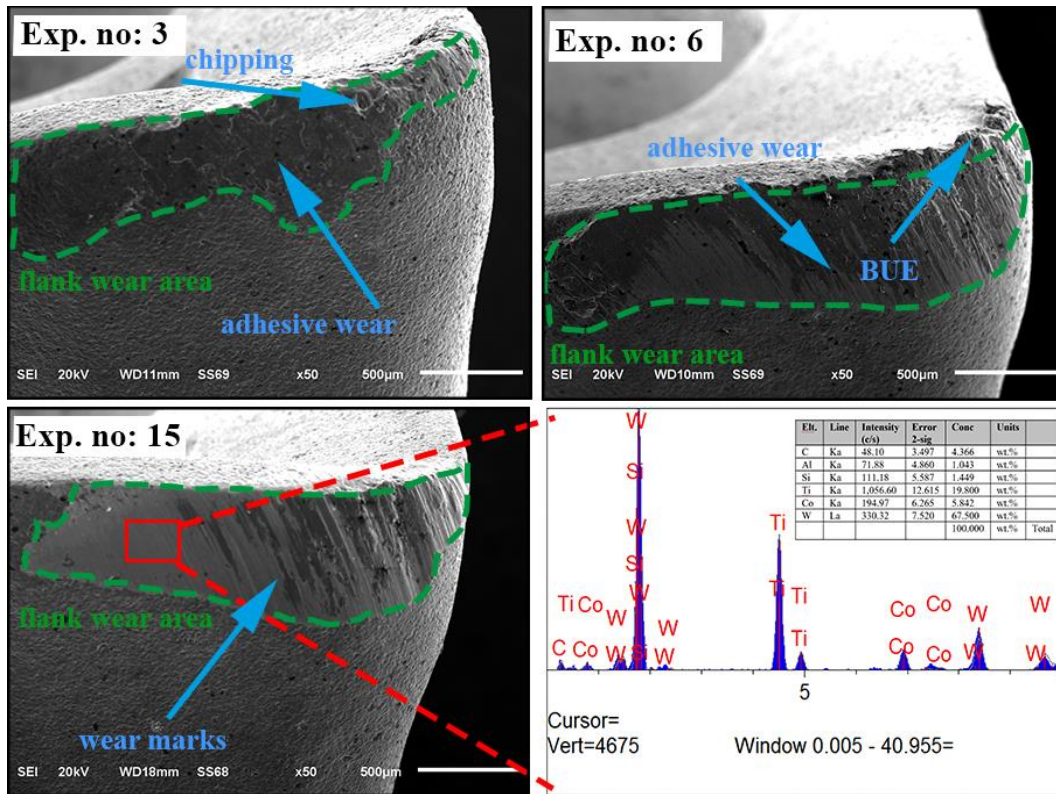


Figure 6. The Effect of Different Parameters on Flank Wear for MMC Types

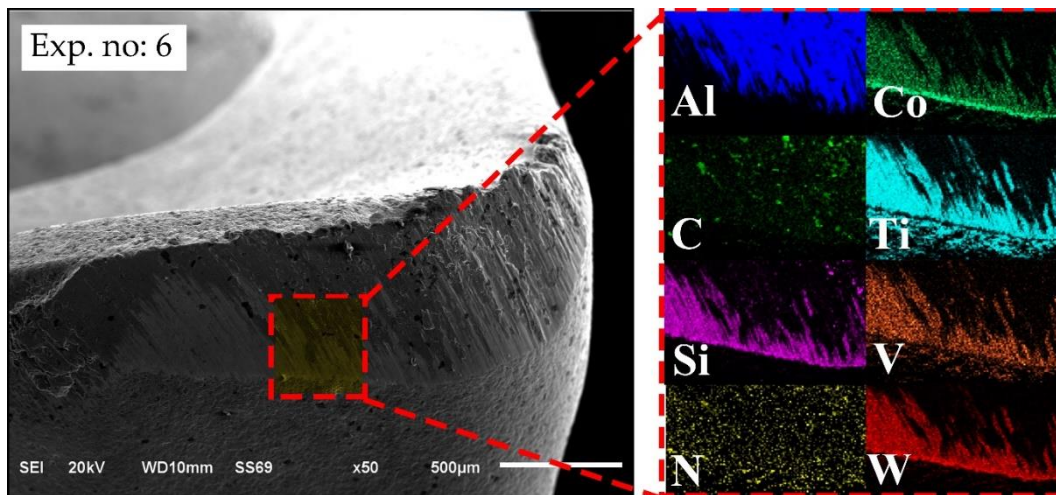
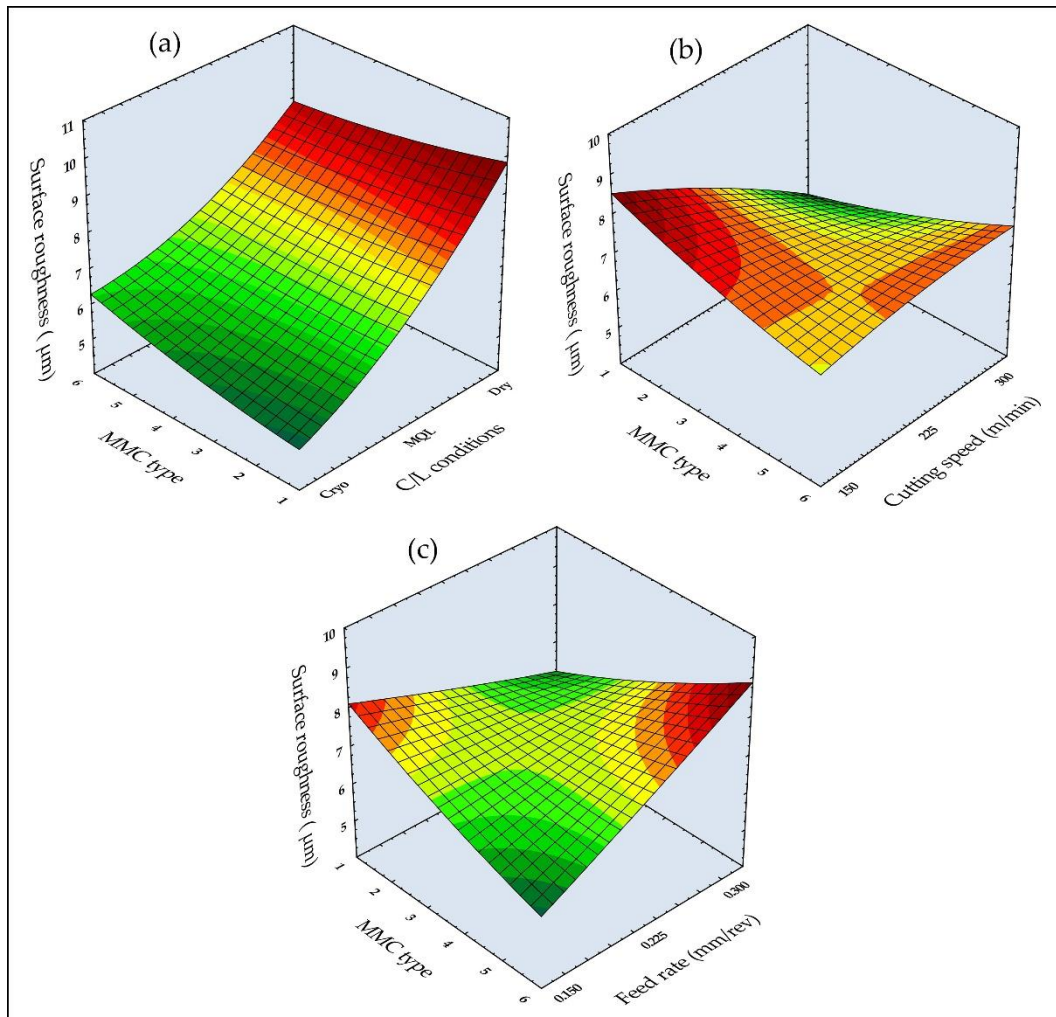


Figure 7. The Effect of Different Parameters on Flank Wear for MMC Types

### Surface Roughness of Workpieces

The surface roughness parameter ( $R_a$ ) stands as a pivotal factor delineating the finished workpiece's surface quality, holding significant importance within the industry, as highlighted in reference (Şap et al., 2021). As depicted in Figure 8, the impact of various machinability parameters on surface roughness concerning MMC types is showcased. Remarkably, the most favorable surface roughness value of  $4.835 \mu\text{m}$  was achieved under specific conditions: high cutting speed (300 m/min), low feed rate (0.15 mm/rev), and machining executed within a cryogenic environment. The escalation in cutting speed notably augmented the temperature within the cutting zone, inducing a softening effect on the composite material. Consequently, the occurrence of BUE on the cutting tool diminished, consequently extending the cutting tool's lifespan, as elucidated in reference (Babu et al., 2022). Consistent with the literature (Binali et al., 2023; Salur, 2022), the progression speed exhibited a corresponding effect on surface roughness, demonstrating a decrease as the feed rate increased. Evidently, the advantage of cryogenic machining in enhancing surface quality across all MMC types was evident. Liquid nitrogen facilitated an endothermic reaction, fostering superior lubrication at the tool-workpiece interface, thereby minimizing friction at adequately lubricated interfaces.

This preventive action against BUE formation further bolstered superior surface quality compared to alternative C/L conditions, aligning with reference (Salvi et al., 2023; Kouam et al., 2015). Moreover, under MQL conditions, milling engenders the formation of a hydrodynamic oil film between the tool and the workpiece, amplifying its active role in milling operations compared to dry machining.



**Figure 8.** Effect of Different Parameters on Surface Roughness for MMC Types

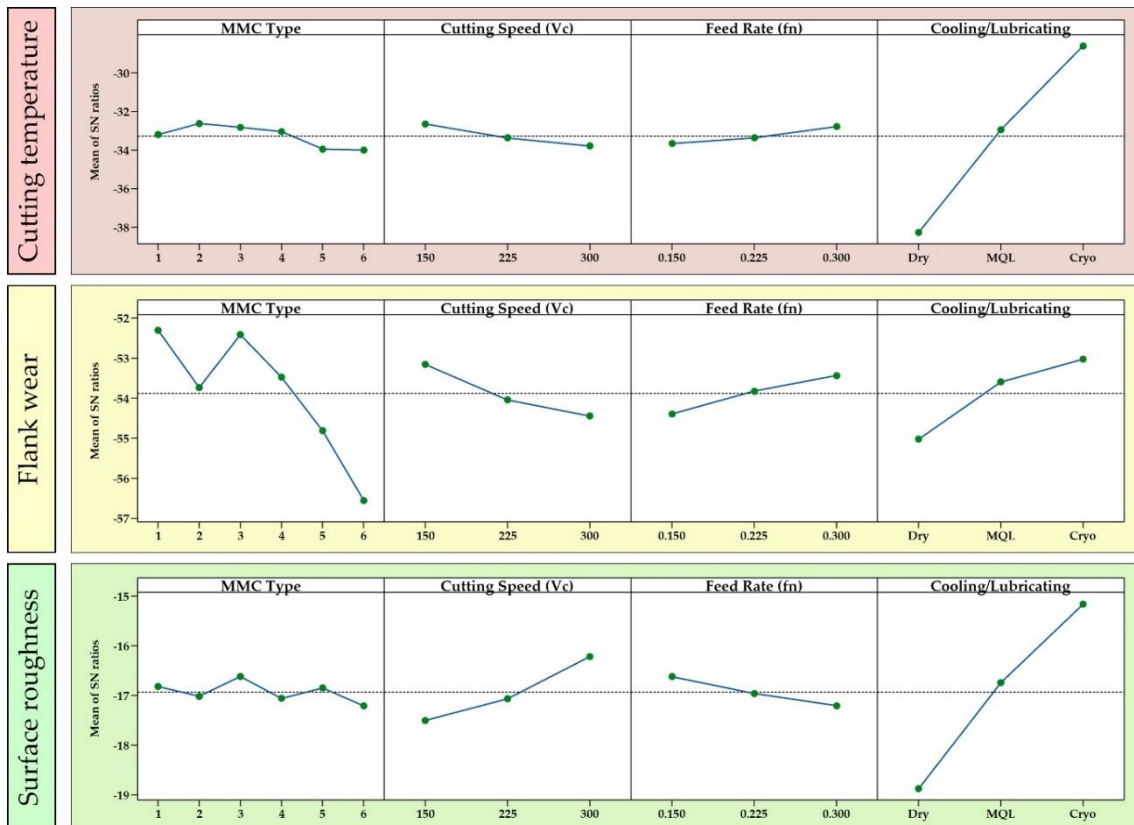
### Statistical Evaluation

The assessment of material machinability metrics was conducted through the application of the Taguchi method, specifically tailored to analyze the experimental materials (Küçük et al., 2017). The preference for the smallest S/N ratio was indicative of superior machinability metrics, hence this criterion was adopted for the examination. To ensure robustness and reproducibility, the experiments were meticulously conducted in triplicate, with subsequent averaging of the attained results. A comprehensive summary of the test outcomes in accordance with the Taguchi  $L_{18}$  design is detailed in Table 4. Figure 9 illustrates the primary effect plots, derived through the transformation of response parameters into the S/N ratio. Upon scrutinizing the conditions conducive to achieving optimal cutting temperature, it became evident that a configuration involving low cutting speed, elevated feed rate, and the implementation of a cryogenic cooling environment was notably effective. Notably, high cutting speeds have been established in the literature (Aslan et al., 2022) as a potential cause for increased cutting temperature. Furthermore, it was observed that MMC type 2 exhibited the lowest cutting temperature, while types 5 and 6, characterized by heightened reinforcement type and quantity, manifested the highest cutting temperatures. The formulation denoted as  $A_2B_1C_3D_3$  yielded the optimum cutting temperature for the fabricated materials, yet it was discerned from the S/N ratios that the cooling/lubrication (C/L) environment emerged as the most influential parameter. Parallel to the cutting temperature, surface roughness analyses revealed that optimal surface roughness values were achievable through high cutting speed, low feed rate, and the utilization of a cryogenic cooling environment. Specifically, MMC type 3 exhibited the lowest surface roughness values among the diverse MMC types. Similar to cutting temperature, the C/L

environment was identified as the parameter exerting the most significant influence on surface roughness values. Consequently, it can be inferred that the most favorable surface roughness formulation corresponds to  $A_3B_3C_1D_3$ .

**Table 4.** Experiment Results for Taguchi  $L_{18}$  Orthogonal Design

Exp. No	MMC Type	C/L condition	Cutting speed, $V_c$ (m/min)	Feed rate, $f_n$ (mm/rev)	Cutting temperature, $T_c$ (°C)	Flank Wear, $V_b$ (mm)	Surface roughness, $R_a$ ( $\mu$ m)
1	1	Dry	150	0.150	74.1	456	9.382
2	1	MQL	225	0.225	44.2	403	6.821
3	1	Cryo	300	0.300	29.2	381	5.215
4	2	MQL	150	0.150	39.3	466	6.768
5	2	Cryo	225	0.225	28.0	431	6.037
6	2	Dry	300	0.300	71.1	572	8.741
7	3	Dry	150	0.225	82.4	442	9.162
8	3	MQL	225	0.300	39.6	384	7.024
9	3	Cryo	300	0.150	25.7	429	4.835
10	4	Cryo	150	0.300	24.6	363	6.417
11	4	Dry	225	0.150	89.3	571	8.496
12	4	MQL	300	0.225	41.2	507	6.654
13	5	Cryo	150	0.225	24.7	460	6.058
14	5	Dry	225	0.300	79.2	624	8.963
15	5	MQL	300	0.150	63.3	581	6.209
16	6	MQL	150	0.300	42.8	565	7.891
17	6	Cryo	225	0.150	29.8	688	5.997
18	6	Dry	300	0.225	98.9	783	8.071



**Figure 9.** S/N Ratios of Different Parameters of Taguchi Analysis

Upon analyzing the flank wear observed in the cutting tool, a distinct trend emerged indicating an escalation in  $V_b$  values under conditions of high cutting speed coupled with low feed rate. The augmentation in cutting speed was noted to contribute to heightened plastic deformation, while the reduced feed rate extended the duration of tool-material interaction. Therefore, an increase in  $V_b$  values can be observed. Optimum wear values were determined in MMC type 1, low cutting speed, high feed rate, and cryogenic C/L environment. Due to the fact that MMC type 1

material does not contain reinforcement particles, it can be said that the amount of wear after milling is lower than other materials. A<sub>1</sub>B<sub>1</sub>C<sub>3</sub>D<sub>3</sub> formulation can be determined as the optimum wear value formulation.

The study scrutinized the influence of machinability parameters on the outcomes through an Analysis of Variance (ANOVA) performed at a 95% confidence level. The P value helps to determine the significance of the data among the factors examined. For a factor to be significant, its P value must be <0.05. ANOVA analysis and Taguchi analysis help to statistically evaluate the effect of factors affecting the machinability of these materials. From this point of view, when Table 5 is examined, it can be said that the most important factor for cutting temperature is C/L conditions (90.84%). When the wear on the cutting tool is examined, it is seen that all machinability parameters are significant for this metric. It can be said that the most significant factors for this metric are MMC type (65.91%), C/L condition (19.81%), cutting speed (9.78%), and feed rate (3.39%). It was observed that there were two significant factors (C/L condition 86.34% and cutting speed 9.12%) in surface roughness, another machinability metric. In general, the most important factor for the surface roughness is expected to be the feed rate, while the C/L condition for these milled composite materials has been.

**Table 5.** Experiment Results for Taguchi L<sub>18</sub> Orthogonal Design

ANOVA for Cutting Temperature							
Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
MMC Type	5	268.4	2.54%	268.4	53.67	0.75	0.61468
Cutting Speed (V <sub>c</sub> )	2	143.8	1.36%	143.8	71.88	1.01	0.42016
Feed Rate (f <sub>n</sub> )	2	128.4	1.21%	128.4	64.22	0.9	0.45576
Cooling/Lubricating	2	9615.8	90.84%	9615.8	4807.9	67.25	0.00007
Error	6	428.9	4.05%	428.9	71.49		
Total	17	10585	100.00%				
ANOVA for Flank Wear							
Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
MMC Type	5	148238	65.91%	148238	29648	71.36	0.00002
Cutting Speed (V <sub>c</sub> )	2	21995	9.78%	21995	10997	26.47	0.00106
Feed Rate (f <sub>n</sub> )	2	7622	3.39%	7622	3811.1	9.17	0.01497
Cooling/Lubricating	2	44550	19.81%	44550	22275	53.62	0.00015
Error	6	2493	1.11%	2493	415.4		
Total	17	224898	100.00%				
ANOVA for Surface Roughness							
Source	DF	Seq SS	Contribution	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
MMC Type	5	0.1717	0.52%	0.1717	0.0343	0.27	0.91480
Cutting Speed (V <sub>c</sub> )	2	2.9982	9.12%	2.9982	1.4991	11.72	0.00847
Feed Rate (f <sub>n</sub> )	2	0.5509	1.68%	0.5509	0.2755	2.15	0.19736
Cooling/Lubricating	2	28.372	86.34%	28.372	14.186	110.86	0.00002
Error	6	0.7678	2.34%	0.7678	0.128		
Total	17	32.86	100.00%				

## CONCLUSION

In this study, a new AMMC that can be used in the automotive industry, which is not included in the literature, has been produced. Six different ratios of composite materials were successfully produced for these materials to examine the machinability properties. Variable parameters including different cutting speeds (150-225-300 m/min), diverse feed rates (0.15-0.225-0.3 mm/rev), and varied cooling/lubrication (C/L) conditions (dry-MQL-cryo) were considered pivotal in assessing the machinability properties of the materials. To mitigate experimental costs, the Taguchi method was strategically employed, conducting experiments structured within the L<sub>18</sub> orthogonal array. Crucial machinability metrics encompassing cutting temperature, flank wear on the cutting tool, and surface roughness were meticulously scrutinized. Consequently, the deductions drawn from the conducted experiments and subsequent analyses are as follows:

The vacuum sintering used during the production of the Al matrix composite materials prevented the formation of slag and provided an excellent macro structure for machinability tests. Thanks to the homogeneous and long-term mixing, it has been determined that there is no serious internal structure defect in the materials, and it has been observed that the gaps and cracks that affect the machinability are at a minimum level.

With the Taguchi experimental design method, machinability tests of composite materials were performed with high accuracy (average 97% for different machinability metrics). It has been proven that the Taguchi method can be used safely in the machinability of AMMCs.

It has been determined that the factor affecting the cutting temperature the most is C/L conditions. C/L conditions are of great importance for cutting temperature control during the milling of AMMCs. In particular, it has been determined that cryogenic cooling has a very important effect on the milling of AMMCs.

The observed impact of composite materials on cutting tool flank wear predominantly hinges upon the specific reinforcement type and its corresponding quantity within the composite. This effect stands out as the most influential factor contributing to flank wear in the machining process. It has been observed that C/L conditions are the most effective parameter affecting flank wear after materials. It was predicted that the lowest wear amount obtained in the experiments was 0.36 mm, which would decrease by 16% with the fulfillment of the optimum conditions.

It has been determined that the most important factor affecting surface quality is C/L conditions. The experiments achieved the best surface quality with 4.835  $\mu\text{m}$  for Al-3Gr/6BN material with high cutting speed, low feed, and cryogenic C/L conditions.

Surface roughness values for the produced composite materials were high due to the different matrix and reinforcement particles they contain. These main features distinguish these composite materials from traditional alloy, metal, and polymer materials.

## REFERENCES

- Ahmad-Yazid, A., Taha, Z., Almanar, I. P., & Essays. (2010). A review of cryogenic cooling in high speed machining (HSM) of mold and die steels. *Scientific Research*, 5(5), 412-427.
- Amiril, S. A. S., Rahim, E. A., & Syahrullail, S. (2017). A review on ionic liquids as sustainable lubricants in manufacturing and engineering: Recent research, performance, and applications. *Journal of Cleaner Production*, 168, 1571-1589. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.03.197>
- Ande, R., Gulati, P., Kumar Shukla, D., & Dhingra, H. (2019). Microstructural and Wear Characteristics of Friction Stir Processed Al-7075/SiC Reinforced Aluminium Composite. *Materials Today: Proceedings*, 18, 4092-4101. doi:<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.07.353>
- Aslan, A., Salur, E., & Kuntoğlu, M. (2022). Evaluation of the Role of Dry and MQL Regimes on Machining and Sustainability Index of Strenx 900 Steel. *Lubricants*, 10(11). doi:10.3390/lubricants10110301
- Babu, M. N., Anandan, V., Yıldırım, Ç. V., Babu, M. D., & Sarıkaya, M. (2022). Investigation of the characteristic properties of graphene-based nanofluid and its effect on the turning performance of Hastelloy C276 alloy. *Wear*, 510-511, 204495. doi:<https://doi.org/10.1016/j.wear.2022.204495>
- Benzait, Z., & Trabzon, L. (2018). A review of recent research on materials used in polymer–matrix composites for body armor application. *Journal of Composite Materials*, 52(23), 3241-3263. doi:10.1177/0021998318764002
- Bhushan, R. K. (2013). Multiresponse Optimization of Al Alloy-SiC Composite Machining Parameters for Minimum Tool Wear and Maximum Metal Removal Rate. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 135(2). doi:10.1115/1.4023454
- Binali, R., Demirpolat, H., Kuntoğlu, M., & Sağlam, H. (2023). Machinability Investigations Based on Tool Wear, Surface Roughness, Cutting Temperature, Chip Morphology and Material Removal Rate during Dry and MQL-Assisted Milling of Nimax Mold Steel. *Lubricants*, 11(3), 101. Retrieved from <https://www.mdpi.com/2075-4442/11/3/101>



- Cai, C., Liang, X., An, Q., Tao, Z., Ming, W., & Chen, M. (2021). Cooling/Lubrication Performance of Dry and Supercritical CO<sub>2</sub>-Based Minimum Quantity Lubrication in Peripheral Milling Ti-6Al-4V. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing Technology*, 8(2), 405-421. doi:10.1007/s40684-020-00194-7
- Courbon, C., Pusavec, F., Dumont, F., Rech, J., & Kopac, J. (2013). Tribological behaviour of Ti6Al4V and Inconel718 under dry and cryogenic conditions—Application to the context of machining with carbide tools. *Tribology International*, 66, 72-82. doi:https://doi.org/10.1016/j.triboint.2013.04.010
- Das, B., Roy, S., Rai, R. N., & Saha, S. C. (2016). Study on machinability of in situ Al-4.5%Cu-TiC metal matrix composite-surface finish, cutting force prediction using ANN. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 12, 67-78. doi:https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2015.10.002
- Değirmenci, Ü., Usca, Ü. A., & Şap, S. (2023). Machining characterization and optimization under different cooling/lubrication conditions of Al-4Gr hybrid composites fabricated by vacuum sintering. *Vacuum*, 208, 111741. doi:https://doi.org/10.1016/j.vacuum.2022.111741
- Dhar, N. R., Ahmed, M. T., & Islam, S. (2007). An experimental investigation on effect of minimum quantity lubrication in machining AISI 1040 steel. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 47(5), 748-753. doi:https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2006.09.017
- Du, J., Ming, W., Ma, J., He, W., Cao, Y., Li, X., & Liu, K. (2018). New observations of the fiber orientations effect on machinability in grinding of C/SiC ceramic matrix composite. *Ceramics International*, 44(12), 13916-13928. doi:https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.04.240
- Fratila, D., & Caizar, C. (2011). Application of Taguchi method to selection of optimal lubrication and cutting conditions in face milling of AlMg3. *Journal of Cleaner Production*, 19(6), 640-645. doi:https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2010.12.007
- Gajrani, K. K., Suvin, P. S., Kailas, S. V., & Sankar, M. R. (2019). Hard machining performance of indigenously developed green cutting fluid using flood cooling and minimum quantity cutting fluid. *Journal of Cleaner Production*, 206, 108-123. doi:https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.09.178
- Gopalakannan, S., & Senthilvelan, T. (2013). EDM of cast Al/SiC metal matrix nanocomposites fabricated by ultrasonic cavitation method. *nt J Adv Manuf Technol*, 67(485-49), 3.
- Hakami, F., Pramanik, A., & Basak, A. K. (2016). Tool wear and surface quality of metal matrix composites due to machining: A review. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 231(5), 739-752. doi:10.1177/0954405416667402
- Hong, S. Y., Markus, I., & Jeong, W.-C. (2001). New cooling approach and tool life improvement in cryogenic machining of titanium alloy Ti-6Al-4V. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 41(15), 2245-2260. doi:https://doi.org/10.1016/S0890-6955(01)00041-4
- Jadhav, P. S., & Mohanty, C. P. (2022). Performance assessment of energy efficient and eco-friendly turning of Nimonic C-263: a comparative study on MQL and cryogenic machining. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 236(8), 1125-1140.
- Jawahir, I. S., Attia, H., Biermann, D., Dufloy, J., Klocke, F., Meyer, D., . . . Umbrello, D. (2016). Cryogenic manufacturing processes. *CIRP Annals*, 65(2), 713-736. doi:https://doi.org/10.1016/j.cirp.2016.06.007
- Kesarwani, S., Niranjana, M. S., & Singh, V. (2020). To study the effect of different reinforcements on various parameters in aluminium matrix composite during CNC turning. *Composites Communications*, 22, 100504. doi:https://doi.org/10.1016/j.coco.2020.100504
- Kim, H.-J., Seo, K.-J., Kang, K. H., & Kim, D.-E. (2016). Nano-lubrication: A review. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 17(6), 829-841. doi:10.1007/s12541-016-0102-0
- Korkmaz, M. E., & Günay, M. (2018). Experimental and Statistical Analysis On Machinability of Nimonic80A Superalloy with PVD Coated Carbide. *Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences*, 36(4), 1141-1152. Retrieved from https://dergipark.org.tr/en/pub/sigma/issue/65501/1013478

- Kouam, J., Songmene, V., Balazinski, M., & Hendrick, P. (2015). Effects of minimum quantity lubricating (MQL) conditions on machining of 7075-T6 aluminum alloy. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 79(5), 1325-1334. doi:10.1007/s00170-015-6940-6
- Küçük, Ö., Elfarah, T. T., Islak, S., & Özorak, C. (2017). Optimization by Using Taguchi Method of the Production of Magnesium-Matrix Carbide Reinforced Composites by Powder Metallurgy Method. *Metals*, 7(9). doi:10.3390/met7090352
- Laghari, R. A., He, N., Jamil, M., Hussain, M. I., Gupta, M. K., & Krolczyk, G. M. (2023). A State-of-the-Art Review on Recently Developed Sustainable and Green Cooling/Lubrication Technologies in Machining Metal Matrix Composites (MMCs). *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*. doi:10.1007/s40684-023-00521-8
- Li, J., & Laghari, R. A. (2019). A review on machining and optimization of particle-reinforced metal matrix composites. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 100(9), 2929-2943. doi:10.1007/s00170-018-2837-5
- Liao, Y. S., & Lin, H. M. (2007). Mechanism of minimum quantity lubrication in high-speed milling of hardened steel. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 47(11), 1660-1666. doi:https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2007.01.007
- López de Lacalle, L. N., Angulo, C., Lamikiz, A., & Sánchez, J. A. (2006). Experimental and numerical investigation of the effect of spray cutting fluids in high speed milling. *Journal of Materials Processing Technology*, 172(1), 11-15. doi:https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2005.08.014
- Maiarù, M., D'Mello, R. J., & Waas, A. M. (2018). Characterization of intralaminar strengths of virtually cured polymer matrix composites. *Composites Part B: Engineering*, 149, 285-295. doi:https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.02.018
- Mia, M., Gupta, M. K., Lozano, J. A., Carou, D., Pimenov, D. Y., Królczyk, G., . . . Dhar, N. R. (2019). Multi-objective optimization and life cycle assessment of eco-friendly cryogenic N<sub>2</sub> assisted turning of Ti-6Al-4V. *Journal of Cleaner Production*, 210, 121-133. doi:https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.334
- Muthukrishnan, N., & Davim, J. P. (2011). An investigation of the effect of work piece reinforcing percentage on the machinability of Al-SiC metal matrix composites. *Journal of Mechanical Engineering Research*, 3(1), 15-24.
- Muthukrishnan, N., Murugan, M., & Prahlada Rao, K. (2008). Machinability issues in turning of Al-SiC (10p) metal matrix composites. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 39(3), 211-218. doi:10.1007/s00170-007-1220-8
- Oguntuyi, S. D., Johnson, O. T., Shongwe, M. B., Jeje, S. O., & Rominiyi, A. L. (2021). The effects of sintering additives on the ceramic matrix composite of ZrO<sub>2</sub>: microstructure, densification, and mechanical properties – a review. *Advances in Applied Ceramics*, 120(5-8), 319-335. doi:10.1080/17436753.2021.1953845
- Ozben, T., Kilickap, E., & Çakır, O. (2008). Investigation of mechanical and machinability properties of SiC particle reinforced Al-MMC. *Journal of Materials Processing Technology*, 198(1), 220-225. doi:https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.06.082
- Prasad, D. S., Shoba, C., & Ramanaiah, N. (2014). Investigations on mechanical properties of aluminum hybrid composites. *Journal of Materials Research and Technology*, 3(1), 79-85. doi:https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2013.11.002
- Ramanathan, A., Krishnan, P. K., & Muraliraja, R. (2019). A review on the production of metal matrix composites through stir casting – Furnace design, properties, challenges, and research opportunities. *Journal of Manufacturing Processes*, 42, 213-245. doi:https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2019.04.017
- Salur, E. (2022). Understandings the tribological mechanism of Inconel 718 alloy machined under different cooling/lubrication conditions. *Tribology International*, 174, 107677. doi:https://doi.org/10.1016/j.triboint.2022.107677

- Salvi, H., Vesuwala, H., Raval, P., Badheka, V., & Khanna, N. (2023). Sustainability analysis of additive + subtractive manufacturing processes for Inconel 625. *Sustainable Materials and Technologies*, 35, e00580. doi:<https://doi.org/10.1016/j.susmat.2023.e00580>
- Samy, G. S., Thirumalai Kumaran, S., & Uthayakumar, M. (2017). An analysis of end milling performance on B4C particle reinforced aluminum composite. *Journal of the Australian Ceramic Society*, 53(2), 373-383. doi:[10.1007/s41779-017-0046-6](https://doi.org/10.1007/s41779-017-0046-6)
- Shah, P., Khanna, N., & Chetan. (2020). Comprehensive machining analysis to establish cryogenic LN2 and LCO2 as sustainable cooling and lubrication techniques. *Tribology International*, 148, 106314. doi:<https://doi.org/10.1016/j.triboint.2020.106314>
- Sharma, R., Singh, A. K., Arora, A., Pati, S., & De, P. S. (2019). Effect of friction stir processing on corrosion of Al-TiB2 based composite in 3.5 wt.% sodium chloride solution. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 29(7), 1383-1392. doi:[https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(19\)65045-4](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(19)65045-4)
- Sozhamannan, C. G., Naveenkumar, K., Mathiarasu, A., Velmurugan, K., & Venkatachalapathy, V. S. K. (2018). Machining characteristics of Al/TiCp/Gr hybrid composites. *Materials Today: Proceedings*, 5(2, Part 1), 5940-5946. doi:<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2017.12.195>
- Srivastava, A. K., Dixit, A. R., & Tiwari, S. (2018). A review on the intensification of metal matrix composites and its nonconventional machining. *Science and Engineering of Composite Materials*, 25(2), 213-228. doi:[doi:10.1515/secm-2015-0287](https://doi.org/10.1515/secm-2015-0287)
- Suresh, P., Marimuthu, K., Ranganathan, S., & Rajmohan, T. (2014). Optimization of machining parameters in turning of Al-SiC-Gr hybrid metal matrix composites using grey-fuzzy algorithm. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 24(9), 2805-2814. doi:[https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(14\)63412-9](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(14)63412-9)
- Şap, E., Usca, U. A., Gupta, M. K., & Kuntoğlu, M. (2021). Tool wear and machinability investigations in dry turning of Cu/Mo-SiCp hybrid composites. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 114(1), 379-396.
- Şap, E., Usca, Ü. A., Gupta, M. K., Kuntoğlu, M., Sarıkaya, M., Pimenov, D. Y., & Mia, M. (2021). Parametric optimization for improving the machining process of cu/mo-sicp composites produced by powder metallurgy. *Materials*, 14(8). doi:[10.3390/ma14081921](https://doi.org/10.3390/ma14081921)
- Şap, S. (2023a). Machining and Energy Aspect Assessment with Sustainable Cutting Fluid Strategies of Al-12Si Based Hybrid Composites. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 11, 33-53. doi:[10.1007/s40684-023-00544-1](https://doi.org/10.1007/s40684-023-00544-1)
- Şap, S. (2023b). Understanding the Machinability and Energy Consumption of Al-Based Hybrid Composites under Sustainable Conditions. *Lubricants*, 11(3), 111. doi:<https://doi.org/10.3390/lubricants11030111>
- Şap, S., Değirmenci, Ü., & Usca, Ü. A. (2023). Impact of boron nitride and silicon carbide on tribological properties of Al-3Gr-based hybrid composites. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 45(10), 510. doi:[10.1007/s40430-023-04448-8](https://doi.org/10.1007/s40430-023-04448-8)
- Şap, S., Usca, Ü. A., Uzun, M., Kuntoğlu, M., Salur, E., & Pimenov, D. Y. (2022). Investigation of the Effects of Cooling and Lubricating Strategies on Tribological Characteristics in Machining of Hybrid Composites. *Lubricants*, 10(4), 63. doi:<https://doi.org/10.3390/lubricants10040063>
- Taskin, M., Caligulu, U., & Gur, A. K. (2008). Modeling adhesive wear resistance of Al-Si-Mg-/SiCp PM compacts fabricated by hot pressing process, by means of ANN. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 37(7), 715-721.
- Taşkın, M., & Çalgülü, U. (2006). Modelling of Microhardness Values by Means of Artificial Neural Networks of Al/SiCp Metal Matrix Composite Material Couples Processed with Diffusion Method. *Mathematical and Computational Applications*, 11(3), 163-172. Retrieved from <https://www.mdpi.com/2297-8747/11/3/163>
- Thepsonthi, T., Hamdi, M., & Mitsui, K. (2009). Investigation into minimal-cutting-fluid application in high-speed milling of hardened steel using carbide mills. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 49(2), 156-162. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2008.09.007>

- Trinath, K., Aepuru, R., Biswas, A., Ramalinga Viswanathan, M., & Manu, R. (2021). Study of self lubrication property of Al/SiC/Graphite hybrid composite during Machining by using artificial neural networks (ANN). *Materials Today: Proceedings*, 44, 3881-3887. doi:<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.927>
- Tuloup, C., Harizi, W., Aboura, Z., Meyer, Y., Khellil, K., & Lachat, R. (2019). On the use of in-situ piezoelectric sensors for the manufacturing and structural health monitoring of polymer-matrix composites: A literature review. *Composite Structures*, 215, 127-149. doi:<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.02.046>
- Usca, Ü. A., Şap, S., & Uzun, M. (2022). Evaluation of Machinability of Cu Matrix Composite Materials by Computer Numerical Control Milling under Cryogenic LN2 and Minimum Quantity Lubrication. *Journal of Materials Engineering and Performance*. doi:10.1007/s11665-022-07262-w
- Usca, Ü. A., Uzun, M., Şap, S., Kuntoğlu, M., Giasin, K., Pimenov, D. Y., & Wojciechowski, S. (2022). Tool wear, surface roughness, cutting temperature and chips morphology evaluation of Al/TiN coated carbide cutting tools in milling of Cu–B–CrC based ceramic matrix composites. *Journal of Materials Research and Technology*, 16, 1243-1259. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.12.063>
- Uzun, M., Usca, Ü. A., Kuntoğlu, M., & Gupta, M. K. (2022). Influence of tool path strategies on machining time, tool wear, and surface roughness during milling of AISI X210Cr12 steel. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 119(3), 2709-2720. doi:10.1007/s00170-021-08365-9
- Yıldırım, Ç. V., Kıvak, T., & Erzincanlı, F. (2019). Influence of Different Cooling Methods on Tool Life, Wear Mechanisms and Surface Roughness in the Milling of Nickel-Based Waspaloy with WC Tools. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 44(9), 7979-7995. doi:10.1007/s13369-019-03963-y
- Yıldırım, Ç. V., Sarıkaya, M., Kıvak, T., & Şirin, Ş. (2019). The effect of addition of hBN nanoparticles to nanofluid-MQL on tool wear patterns, tool life, roughness and temperature in turning of Ni-based Inconel 625. *Tribology International*, 134, 443-456. doi:<https://doi.org/10.1016/j.triboint.2019.02.027>
- Yuan, Y., Wang, C., Yang, J., Zheng, L., & Weiqiang, X. (2018). Performance of supercritical carbon dioxide (scCO<sub>2</sub>) mixed with oil-on-water (OoW) cooling in high-speed milling of 316L stainless steel. *Procedia CIRP*, 77, 391-396. doi:<https://doi.org/10.1016/j.procir.2018.08.301>
- Zou, F., Dang, J., Wang, X., Zhang, H., Sun, X., An, Q., & Chen, M. (2021). Performance and mechanism evaluation during milling of CFRP laminates under cryogenic-based conditions. *Composite Structures*, 277, 114578. doi:<https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.114578>



# Kahramanmaraş Sütçü İmam University Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 27.12.2023  
Kabul Tarihi : 17.02.2024

Received Date : 27.12.2023  
Accepted Date : 17.02.2024

## ÖNERİ SİSTEMLERİNDE KULLANILAN PERFORMANS METRİKLERİNİN FİLTRELEME TEKNOLOJİLERİNE GÖRE DEĞERLENDİRİLMESİ: İŞ ÖNERİ SİSTEMLERİ ALANI ÜZERİNE BİR ARAŞTIRMA ÇALIŞMASI

### EVALUATION OF PERFORMANCE METRICS USED IN RECOMMENDATION SYSTEMS ACCORDING TO FILTERING TECHNOLOGIES: A RESEARCH STUDY ON THE FIELD OF JOB RECOMMENDATION SYSTEMS

*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 Çelik Ertuğrul, duygu.celik@emu.edu.tr

#### ÖZET

Tavsiye Sistemleri (Recommendation Systems—RSs) sayesinde hemen hemen her sektörde (ör. e-ticaret, eğitim, eğlence, sağlık, insan kaynakları, reklamcılık, vb.) mevcut süreçlerin/operasyonların etkin bir biçimde yürütülebilmesi ve kullanıcının ilgisini çekebilecek öğelere öncelik verilmesi mümkün hale gelmiştir. RS'lerin katkısı ile, sektörel süreçlerin/hizmetlerin etkin şekilde yönetilmesi ve kullanıcılara kişiselleştirilmiş sonuçlar üretilmesi mümkündür. Bu çalışmada, RS ile ilgili araştırmaların gözden geçirilmesi, filtreleme teknikleri taksonomisinin ortaya çıkarılması ve geniş çapta rastlanan performans metriklerinin tespiti amaçlanmaktadır. Ayrıca, İnsan Kaynakları (İK) yönetiminin olmazsa olmazı olan İş Tavsiye Sistemleri bu çalışmada, araştırma sahası olarak seçilmiş olup performans metriklerinin ve öğe filtreleme yaklaşımlarının belirlenmesi planlanmıştır. RS mimarisi ve çözümleri üzerine, literatürden 2010-2023 yılları arasında yapılmış çeşitli çalışmalar ilgililik durumuna göre seçilmiş ve incelenmiştir. RS'lerde filtreleme teknikleri hiyerarşik olarak sınıflandırılmış ve performans değerlendirmelerinde kullanılan çoğunluk değerlendirme metrikleri saptanarak kategorize edilmiştir. Ayrıca, RS'lerden öğrenilen kazanımların İş Tavsiye Sistemleri'ndeki yansımaları araştırılmış ve İK alanındaki RS çözümleri/metrikleri ortaya konulmuştur. Son olarak, RS çözümleri üzerinde araştırma, geliştirme ve kalite değerlendirmeleri yapmak isteyen araştırmacılara, bu çalışmamız bir yol haritası niteliğindedir.

**Anahtar Kelimeler:** Tavsiye sistemleri, iş tavsiye sistemleri, taksonomi, filtreleme, performans metrikleri.

#### ABSTRACT

Thanks to Recommendation Systems (RSs), it has become possible to carry out existing processes/operations effectively in almost every sector (e.g. e-commerce, education, entertainment, healthcare, human resources, advertising, etc.) and to prioritize items that may interest the user. With the contribution of RSs, it is possible to effectively manage sectoral processes/services and produce personalized results for users. This study aims to review RS-related research, reveal a taxonomy of filtering techniques, and identify widely encountered performance metrics. In addition, Job Recommendation Systems, which are indispensable for Human Resources (HR) management, were chosen as the research area in this study and it was planned to determine performance metrics and item filtering approaches. Various studies from the literature on RS architecture and solutions, conducted between 2010 and 2023, were selected according to their relevance and reviewed. Filtering techniques in RSs are classified hierarchically and the majority evaluation metrics used in performance evaluations are determined and categorized. Additionally, the reflections of the gains learned from RSs on Job Recommendation Systems were investigated and RS

ToCite: BİTİRİM, S., & ÇELİK ERTUĞRUL, D., (2023). ÖNERİ SİSTEMLERİNDE KULLANILAN PERFORMANS METRİKLERİNİN FİLTRELEME TEKNOLOJİLERİNE GÖRE DEĞERLENDİRİLMESİ: İŞ ÖNERİ SİSTEMLERİ ALANI ÜZERİNE BİR ARAŞTIRMA ÇALIŞMASI. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 27(3), 706-725.

solutions/metrics in the field of HR were presented. Finally, this study serves as a road map for researchers who want to conduct research, development and quality evaluations on RS solutions.

**Keywords:** Recommender systems, job recommender systems, taxonomy, filtering, performance metrics.

## GİRİŞ

Bilgi teknolojilerinin ve Web'in gelişmesiyle birlikte Tavsiye Sistemleri (Recommendation Systems—RS) hayatımızın önemli bir parçası haline gelmiştir. Özellikle karar alma süreçlerinde önemli bir rol oynayan RS'ler, mühendislik, eğitim, işletme, ekonomi, finans, pazarlama, güvenlik, sağlık ve hukuk gibi geniş bir alanda yer edinmeyi başarmıştır. Ayrıca kurumsal şirketlerde, hızla artan veri yığınları ve karmaşık iş süreçleri nedeniyle, çalışanların iş hayatı, yürüttükleri karmaşık operasyonlar nedeniyle daha zorlu hale gelmiştir. Bu nedenle, RS'lerin kullanımı ile, işletmelerdeki enerji tasarrufu, daha az dikkat dağınıklığı, işçilik maliyetlerinde azalma, bulaş riskinin azalması, çalışanların aileleriyle daha fazla vakit geçirmesi, kadın çalışanların çocuklarına daha iyi bakması, işe gidip gelirken harcanan zamandan tasarruf edilmesi, çalışanların sürekli denetlenmesi, iş özerkliğinin sağlanması vb. avantajları da beraberinde getirmiştir (Al-Habaibeh vd., 2021). Bu avantajların yanında, çevrimiçi e-ticaret ortamlarında (ör. Amazon.com, Netflix, Pandora, vb.) RS'ler, kişilerin bireysel özelliklerine ve ihtiyaçlarına göre, işletmelerin mevcut hizmet/ürünlerini öne çıkarma olanağı sağlar ve kişiye daha kısa sürede ona en uygun ürüne erişme olanağı sunar. Böylece, hem üretici tarafında (ör. doğru öğelerin tavsiye edilmesiyle üreticinin gelirini artırmasına) hem de ürünü alacak tarafta (ör. doğru öğe önerileri ile kişilerin yeni ürün kullanımına teşvik edilmesi, belki de hiç keşfedemeyeceği ürünlere öncelik verilmesi, vb.) olumlu sonuçlar ortaya çıkmaktadır. RS'ler, Makine Öğrenimi (ML), veri madenciliği, kullanıcı modelleme, vakaya dayalı akıl yürütme ve kısıtlama tatmini dahil olmak üzere, çok çeşitli Yapay Zekâ (AI) tekniklerini bünyesinde barındırmaktadır. Literatür incelemeleri sonuçlarına göre, RS çözümlerinde 6 farklı filtreleme türünden bahsedilmiş ve kategorize edilmiştir: (1) İşbirlikçi Filtreleme, (2) İçerik Tabanlı Filtreleme, (3) Hibrit Tabanlı Filtreleme, (4) Bilgi Tabanlı Filtreleme, (5) Bağlam Farkındalığına Dayalı Filtreleme ve (6) Diğerleri (Gunawardana vd., 2022; Palomares vd., 2021; Çelik & Elçi, 2020; Mohamed vd., 2019; Poriya vd., 2014; Lü vd., 2012; Park vd., 2012; Martin vd., 2011; Shani & Gunawardana, 2011). RS'lerin doğruluğunu, başarısını ve verimliliğini değerlendirmek için, geniş bir yelpazede metrik yöntemleri kullanılmıştır. Bu çalışmada, literatürdeki RS metrikleri, dört ana kategoride ayrılmış ve incelenmiştir: (1) Tahmine Dayalı Doğruluk Metrikleri, (2) Sınıflandırmaya Dayalı Doğruluk Metrikleri, (3) Sıralamaya Dayalı Doğruluk Metrikleri ve (4) Doğruluğa Dayalı Olmayan Metrikler olarak kategorize edilmiş ve tartışılmıştır.

Ayrıca, 2020 yılında tüm dünyayı etkisi altına alan COVID-19 salgınından sonra sektördeki birçok şirket uzaktan/evden çalışma ve dönüşümlü çalışma modelleri uygulamaya başlamıştır. Bu durum, İnsan Kaynakları Yönetimi (Human Resources Management—HRM) sahasında yürütülen süreçleri de etkilemiş ve HRM alanında çalışanların karar alma ve süreç yönetimi aşamalarında hızlı gelişen RS teknolojileri büyük bir fırsat haline gelmiştir (Vrontis vd., 2022). Bu nedenle, bu çalışmanın son katkısı olarak, JRS uygulamaları bir araştırma sahası olarak seçilmiş ve JRS çözümlerinde kullanılan öğe tavsiye sürecindeki filtreleme teknikleri ve JRS'lerde etkin performans ve kalite değerlendirme metriklerinin belirlenmesi sağlanmıştır.

Çalışmanın geri kalanı şu şekilde ilerleyecektir: Bölüm 2, RS'lerin arka planını sunmaktadır. Bölüm 3, RS'ler de kullanılan performans değerlendirme metriklerine göre kategorize eder, özetler ve sınıflandırır. Bölüm 4, JRS öğe tavsiye sürecindeki filtreleme teknikleri ve performans/kalite metrikleri üzerine yapılan çalışmalar sunulmaktadır. Bölüm 5'te çalışmadan elde edilen sonuçlar sunulmuştur.

## TAVSİYE SİSTEMLERİNİN MİMARİSİ

Bu bölümde, RS'lerin tanımları, genel olarak uygulanan işlem adımları, öğe tavsiye oluşturma sürecindeki filtreleme teknikleri ve hiyerarşik sınıflandırma sonuçları sunulmaktadır. RS'ler, kullanıcının öğe seçeneklerine karşı eylemini tahmin etmeyi amaçlayan yazılım ürünleridir. Teknolojinin ve Web'in gelişmesiyle birlikte, İnternet ortamındaki Web verilerinin hacmi ve tüketimi artmış, bu da RS çözümlerinin ortaya çıkmasına neden olmuştur. RS'ler ilk 1970'ler de tasarlanmış (Goldberg vd., 1992; Negroponte, 1970) ve ilk kez 1990'ların ortalarında uygulanmaya ve ticarileştirilmeye başlanmıştır (Martin vd., 2011). RS'ler, kullanıcıların profil verilerini, demografik/kültürel özelliklerini, geçmiş/mevcut tercihlerini vb. dikkate aldığından, kullanıcının istediği hizmete/ürüne daha hızlı ulaşmasını sağlayabilmektedirler. RS'ler hem tüketiciler hem de şirketler için, kişiselleştirmeye olanak sağladığı ve süreç yönetiminde zaman tasarrufu sağladığı için günümüzde çok önemli yazılım çözümleridir. RS'ler özünde bir

arama motoru gibi davranır ve kullanıcıların tam olarak ne istediğini bilmesine gerek kalmadan, kullanıcıya en uygun tavsiyeleri sunabilir (Birjali vd., 2021). Fakat, kullanıcıların profilleri genel olarak değişmese de, zaman içinde kullanıcı tercihleri ve zevkleri değişebileceğinden, bireyleri değerlendirmek zorlaşabilmektedir. Bu zorlukla birlikte, RS'ler zaman içinde gelişmeye ve farklı endüstrilerde kullanımları popüler hale gelmeye başladığını gözlemlemekteyiz (Wu vd., 2022; Marlowe, 2021; Çelik & Elçi, 2020; Beel vd., 2016; Isinkaye vd., 2015; Lu vd., 2015; Bobadilla vd., 2013; Lü vd., 2012; Park vd., 2012; Adomavicius & Tuzhilin, 2011; Martin vd., 2011). Bu nedenle, RS'lerin zaman içindeki evrimi, güncel AI çözümlerinin RS'lerin temel bileşenlerine entegre edilmesi/uygulanmaya başlanmasıyla sağlanır (Portugal vd., 2018). RS'lerde temel süreçler aşağıda sunulmuştur:

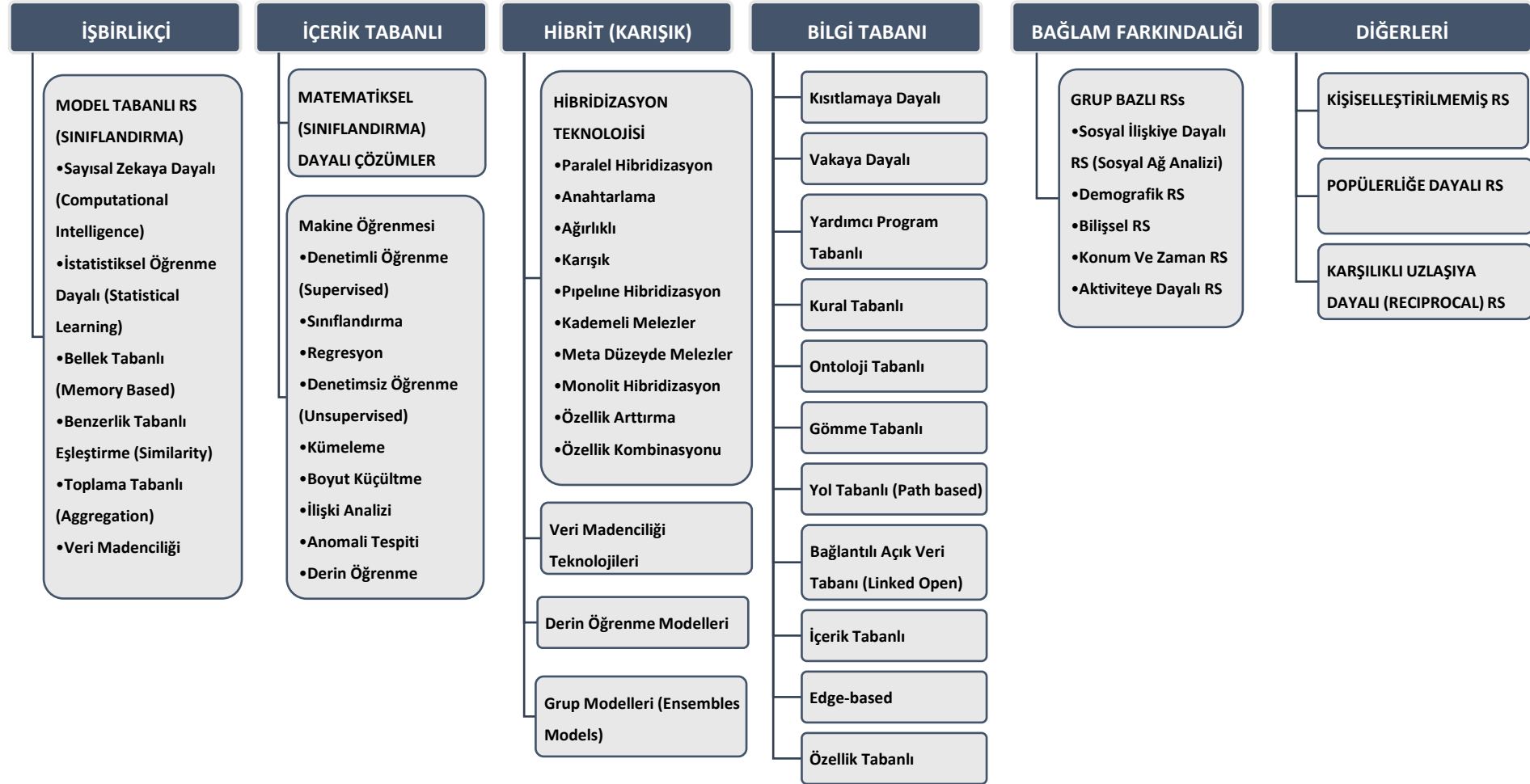
**Veri Toplama:** Kullanıcılar tarafından yapılan her işlem/her hareket RS'ler için birer veridir. Örneğin, kullanıcının arama motorunun kullanarak, ne tür ürünleri araştırdığı ve tıkladığı/tıklamadığı, ne aradığı, bir ürünü ne kadar süre görüntülediği, ürün yorumları, alışveriş sepetine eklenen ürünler, iade edilen ürünler, çalınan/yarıda kesilen müzikler, izlenen/izlenmeyen veya kesintiye uğrayan filmler, hatta hava durumu, vb. her detay, RS'ler için önemli bir kullanıcı verisidir.

**Depolama:** Toplanan veriler daha sonra kullanıcılara bir dizi tavsiye olarak sunulmak üzere saklanır.

**Analiz:** AI veya ML güncel metotları ve algoritmaları kullanılarak, kullanıcıların tüketebileceği bir dizi uygun hizmet/ürün çıkarılması sağlanır (Portugal vd., 2018). Örneğin, ML tabanlı RS çözümlerinde, bir veri kümesi üzerindeki kullanıcı tercih bilgileri analiz edilir ve etkili veri modelleri elde edilerek kullanıcıların tercihleri tahmin edilmeye çalışılır. Sistem daha sonra talepler ve çıkarlar arasındaki korelasyona dayalı olarak en alakalı veya faydalı öğeleri tavsiye olarak üretebilir (Portugal vd., 2018; Isinkaye vd., 2015).

**Filtreleme:** Bu bölümde, RS'nin farklı alanlardaki ana uygulamalarını analiz etmek ve anlamak için, RS çözümlerinde öğe tavsiye sürecinde uygulanan filtreleme teknikleri hakkında sırasıyla bilgi verilmektedir. Literatür incelemeleri sonucunda, RS çözümlerinde kişiye özgü öğe tavsiye süreci için çeşitli filtreleme teknikleri tespit edilmiş ve 6 farklı kategoriye ayrılmıştır: İşbirlikçi Filtreleme, İçerik Tabanlı Filtreleme, Hibrit Tabanlı Filtreleme, Bilgi Tabanlı Filtreleme, Bağlam Farkındalığına Dayalı Filtreleme, ve Diğerleri (Gunawardana vd., 2022; Palomares vd., 2021; Çelik & Elçi, 2020; Mohamed vd., 2019; Al-Shamri, 2016; Poriya vd., 2014; Lü vd., 2012; Martin vd., 2011; Park vd., 2012; Shani & Gunawardana, 2011).

Tespit edilen bu 6 filtreleme teknikleri Şekil 1'de gösterilmiş ve bir taksonomi formatında aşağıda sunulmuştur.



Şekil 1. Önerme Sistemlerinde (Recommender Systems-RS) Uygulanan Öğe Filtreleme ve Geliştirme Metodolojilerin Taksonomisi.



**İşbirlikçi Filtreleme:** İşbirliğine dayalı filtreleme tekniğinde, kullanıcıya belirli bir kullanıcının davranışına ve diğer benzer kullanıcı davranışlarına göre uygun öğeler tavsiye edilir. Bu teknikte, kullanıcının tercihlerine göre veri kümeleri oluşturulur ve bu öneriler kullanıcılara sunulur. İşbirliğine dayalı filtreleme algoritmaları bellek tabanlı ve model tabanlı olmak üzere 2 tipte sınıflandırılmaktadır.

**İçerik Tabanlı Filtreleme:** İçerik bazlı filtreleme tekniğinde, öneriler, yalnızca tek bir kullanıcının davranış verilerinin analiz edilmesi sonucunda üretilir. Bu filtreleme tekniğinde, öğe özellik tanımlamaları ve kullanıcının profili önemli bir rol oynamaktadır. İçerik tabanlı tavsiye sistemlerinin, temel kavramları şu şekilde ifade edilebilir: (1) Belirli tek bir kullanıcının tercih ettiği öğelerin açıklamaları analiz edilerek, bu öğelere işaret edebilecek kullanıcı tercihlerine odaklanılır. Bu tercihler, kullanıcıların profil verileri olarak saklanır. (2) Her öğenin özelliklerini, kullanıcı profilleri ile karşılaştırılır. Böylece yalnızca kullanıcı profili ile yüksek derecede benzerliğe sahip olan, ilgili öğeler söz konusu kullanıcıya tavsiye edilecektir. Yapılan araştırmalara göre, RS çalışmalarında, Şekil 1'de görüldüğü gibi, içerik tabanlı filtreleme tekniklerinde genelde ML'ne dayalı; sınıflandırma, regresyon, denetimsiz/denetimli öğrenme, kümeleme, derin öğrenme gibi çeşitli teknikler uygulanmıştır.

**Hibrit Tabanlı Filtreleme:** Hibrit filtreleme tekniği birden fazla öneri tekniklerini birleşmesiyle ortaya çıkmıştır. Amaç; tek bir algoritmaya göre daha iyi ve daha etkili tavsiyeler verecek olan iki farklı tekniği birleştirmektir. Çünkü bir algoritmanın dezavantajı diğer bir algoritma tarafından aşılması mümkün olabilmektedir (Isinkaye vd., 2015).

**Bilgi Tabanlı Filtreleme:** Bilgi tabanlı filtreleme tekniği, kullanıcılar ve ürünler hakkındaki bilgiyi, bir öneri oluşturmak için bilgiye dayalı bir yaklaşım izlemek ve hangi ürünlerin kullanıcının gereksinimlerini karşıladığını düşünmek için kullanan sistemdir. Bilgi tabanlı RS'ler genelde, kullanıcının derecelendirme geçmişine değil, kullanıcı sorgularına ve bir sistemin etki alanı bilgi bankasına dayalı öneriler sağlar. Kullanıcılarından bir dizi kullanıcı yönergesi, kural, kısıtlama veya bir öğe örneği gibi bazı bilgiler isteyebilir. Sistem, daha sonra öğe veri tabanında arama yapar ve sonuç olarak kullanıcıya en uygun öğeleri sonuç olarak döndürür (Çano & Morisio, 2017; Burke vd., 2011). Yapılan araştırmalar sonucunda, RS çalışmalarında bilgi tabanlı filtreleme, kısıtlamaya/vakaya dayalı, kural tabanlı (ör: ontolojiler), gömme tabanlı, içerik/özellik tabanlı gibi türlere ayrılarak kullanılmıştır.

**Bağlam Farkındalığına Dayalı Filtreleme:** Bağlam farkındalığına dayalı filtreleme teknikleri, sosyal ilişkiye dayalı, demografik, bilişsel, konum/zaman ve aktiviteye dayalı olmak üzere çeşitli filtreleme tekniklerine ayrılmaktadır. RS çalışmalarından en sık uygulanan teknik demografik filtreleme yöntemidir. Demografik filtremeye dayalı RS'ler ile kullanıcıların demografik bilgileri analiz edilir, sınıflandırılır ve buna göre önermeler oluşturulur. Daha doğrusu, tüketicilerin demografik özelliklerine dayanan ve demografik olarak hedef tüketiciye benzeyen tüketicilerden iyi geri bildirimler alan öğelerin bir listesini öneren tavsiye sistemleridir. Yeni bir kullanıcı için, önce hangi kategoriye girdiği tespit edilir ve önerilerde bulunur. Ardından önceki benzer kullanıcıların kümülatif satın alma tercihleri ait olduğu kümeye uygulanmaktadır. İşbirlikçi teknikler gibi, demografik teknikler de "insandan insana" korelasyonlar oluşturur, ancak farklı veriler kullanır. İşbirlikçi ve içerik tabanlı bir RS, demografik yaklaşımın gerektirdiği türden olmayan bir kullanıcı derecelendirme geçmişi gerektirir (Çano & Morisio, 2017; Al-Shamri, 2016).

**Diğer:** RS'lerde uygulanan diğer filtreleme teknikleri; kişiselleştirilmiş, popülerliğe dayalı ve iki yönlü karşılıklı uzlaşya dayalı çeşitli teknikler tespit edilmiştir. Popülerite bazlı RS'ler, kullanıcı davranışlarını analiz etmez, diğer bir deyişle kullanıcının kişisel tercihlerine dayanmayan bir sistemdir. Tercih edilen, popüler/trend, yaygın olarak tüketilen ürünleri önerir.

Kullanıcının ilgi alanlarını genişletmek ve uygulama tercihlerini popüler hale getirmek için bir fırsat olabilir (Kumar vd., 2014). Kişiselleştirilmemiş RS'lerde kullanıcılar veya geçmiş tercihleri hakkında herhangi bir şey bilmeye gerek yoktur. Bu nedenle, RS Web uygulamalarının geliştirilmesi ve güncellenmesi kolaydır. Kişiselleştirilmemiş RS'ler, popülerlik tabanlı RS'lere oldukça benzemektedir. Kişiselleştirilmiş bir RS, bir kullanıcının geçmiş etkileşimlerine (ör. önceki satın alma geçmişine) dayalı olarak öğeler önerirken, kişiselleştirilmemiş bir RS, o zaman diliminde sistem kullanıcıları arasında popüler olan öğeleri önerir (Poriya vd., 2014). Literatürde, RS üzerine yapılan çalışmalarda, bahsi geçen 3 teknik arasından en sık uygulanan; iki yönlü ve karşılıklı uzlaşya dayalı (Reciprocal Recommender Systems—RRS) filtreleme metodudur.

Geleneksel RS'ler de sistem kullanıcılarına önerilen öğeler cansız varlıklar olup, önerinin başarısı sistem tarafından önerilen öğelere yalnızca son kullanıcının verdiği tepkiyle belirlenmektedir. Ancak, karşılıklı öneri sistemlerinde (iki

yönlü ve uzlaşmaya dayalı RS'ler de) bu durum tam tersidir; kullanıcılar, diğer kullanıcılara tavsiye edilen öneriler haline gelir (Palomares vd., 2021). RRS çözümleri, arkadaş/eş bulma, iş bulma, doktor bulma gibi çeşitli eşleştirme Web sitelerinde çevrimiçi hizmetlerde daha yaygın uygulanmaktadır. RRS'ler de bir önerinin başarılı sayılabilmesi için, her iki kullanıcının görüşleri veya memnuniyetleri dikkate alınır. Başka bir deyişle, bir RRS'nin başarılı sayılması için, her iki tarafın da sunulan tekliften memnun olması ve uzlaşmış olması beklenir.

## TAVSIYE SİSTEMLERİNDE KULLANILAN PERFORMANS DEĞERLENDİRME METRİKLERİ

Literatürde, RS'lerin başarısını ve verimliliğini değerlendirmek için çeşitli ölçüm yöntemleri ve metrikler kullanılmıştır. Literatür taramalarından, toplamda 30 adet metrik tespit edilmiş ve bu metrikler dört ana kategoride sınıflandırılmıştır: (1) Tahmine Dayalı Doğruluk Metrikleri (7 metrik), (2) Sınıflandırmaya Dayalı Doğruluk Metrikleri (10 metrik), (3) Sıralamaya Dayalı Doğruluk Metrikleri (8 metrik) ve (4) Doğruluğa Dayalı Olmayan Metrikler (5 metrik) (Gunawardana vd., 2022; Vijaysinh, 2021; Chaaya vd., 2017; Gunawardana & Shani, 2009). Bu metrikler aşağıda detaylandırılmıştır.

### Tahmine Dayalı Doğruluk Metrikleri

Tahmine dayalı doğruluk metrikleri, bir tavsiye veren tahmini puanlarının gerçek kullanıcı puanlarına ne kadar yakın olduğu konusunu ele alan derecelendirme tahmin metrikleri olarak bilinir. Bu ölçü, ikili olmayan derecelendirme ölçümlerini değerlendirmek için yaygın olarak kullanılmaktadır (Vijaysinh, 2021). Tüm öğeler için derecelendirmeleri doğru bir şekilde tahmin etmenin gerekli olduğu durumlar için uygun bir yaklaşımdır.

RS'ler de yaygın olarak kullanılan ve en popüler tahmine dayalı doğruluk metrikleri; Ortalama Karesel Hata, Ortalama Hata Kare Kökü, Ortalama Mutlak Hata, Normalleştirilmiş Ortalama Mutlak Hata, R Kare ve Açıklanan Varyans'tır. Bunlara ek olarak, tavsiye sistemlerinde yapılan eşleştirme görevleri sırasında tahmin için kullanılan birkaç benzerlik tekniğinin olduğunu söylemek mümkündür. Benzerlik teknikleri ve en popüler tahmine dayalı RS doğruluk performans metrikleri aşağıda açıklanmıştır.

**Ortalama Karesel Hata (Mean Squared Error—MSE):** MSE, en popüler metriklerden biridir. MSE, gerçek oran ile tahmin edilen oran arasındaki farkı (hatayı) hesaplayan, karesini alan ve ardından tüm hataların ortalamasını sağlayan basit bir ölçümdür (Örneğin, bir iş ilanında bir iş adayının beklenen yetkinlik gereklilikleriyle, yetkinliklerinin tahmini hatası).

$$MSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (R_i - P_i)^2 \quad (1)$$

**Ortalama Hata Kare Kökü (Root Mean Squared Error—RMSE):** Gerçek derecelendirme ile tahmin edilen derecelendirme arasındaki standart sapmaya dayanır. RMSE, MSE'nin köküdür ve hataların ölçeğini gerçek değerlere yaklaştırarak daha yorumlanabilir hale getirmeye yardımcı olduğu için faydalıdır. Hatalar toplanmadan önce karesini alınır, böylece büyük hatalara daha fazla önem verir. Normalleştirilmiş RMSE, değerlendirme hesaplamaları için kullanılabilir (Gunawardana vd., 2022; Vijaysinh, 2021; Chaaya vd., 2017).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (R_i - P_i)^2}{n}} \quad Normalized(RMSE) = \frac{RMSE}{R_{max} - P_{min}} \quad (2)$$

Burada,  $R_i$ —gerçek verilerdir,  $P_i$ —tahmin edilen verilerdir,  $n$  tahminlerin sayısıdır.

**Ortalama Mutlak Hata (Mean Absolute Error—MAE):** MAE, RMSE'ye benzer, ancak ortalamanın karesini ve kökünü almak yerine mutlak değer kullanır. MAE, tahmin edilen derecelendirme ile kullanıcının gerçek derecelendirmesi arasındaki ortalama mutlak sapmayı ölçer. Başka bir deyişle, MAE, tahmin edilen değerler ile gerçek değerler arasındaki mutlak fark alınarak ve ardından veri kümesi genelinde ortalaması alınarak hesaplanır. RMSE, MAE'ye kıyasla büyük hatalar için daha büyük cezalar uygular. MAE ve RMSE'nin farklılaştırılmış ve normalleştirilmiş versiyonları bulunmaktadır (Chaaya vd., 2017; Gunawardana & Shani, 2009).

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |R_i - P_i|}{n} = \frac{\sum_{i=1}^n |e_i|}{n} \quad (3)$$

**Ortalama Mutlak Kullanıcı Hatası (Mean Absolute User Error—MAUE):** Her bir kullanıcı için MEA bağımsız olarak hesaplanır ve ardından tüm MEA'ların ortalaması alınır. Bu yöntem, MAE'nin hesaplanmasında ortaya çıkan olası önyargıları çözmektedir. Böylece, hesaplama sırasında tüm kullanıcılar aynı ağırlığa sahip olacaktır (Chaaya vd., 2017; Gunawardana & Shani, 2009).

**R Kare (R Squared—R<sup>2</sup>):** Regresyon işlemi sırasında, uygulanan modelin performansını değerlendirmesinde kullanılan istatistiksel bir ölçüttür (Fkih, 2022). Bu nedenle, daha yüksek bir R<sup>2</sup> değeri, modelin uygun olduğunu gösterirken, daha düşük bir R<sup>2</sup> değeri ise modelin uygun olmadığını gösterir. Bu nedenle, R<sup>2</sup> bir hata ölçüsü olarak kabul edilir. Artıkların toplamının ortalamaların toplamına oranı ne kadar küçükse, R<sup>2</sup> o kadar yüksek olacaktır ( $R^2 = SSR / SST$ , burada  $SSR = \{Artıkların\ Toplamı\}$ ,  $SST = \{Ortalamaların\ Toplamı\}$ ). Daha düşük R<sup>2</sup> değeri, modelin daha hatalı tahminler ürettiği anlamına gelir, bu da daha az doğru tahminlerin üretildiği anlamına gelir. Başka bir deyişle, R<sup>2</sup> değeri çok düşükse, sistemin tahminleri daha az kullanışlı ve belirsiz tahminlerdir.

**Açıklanmış Varyans (Explained Variance—EV):** Verilerdeki varyansın ne kadarının model tarafından açıklandığını gösterir. Tahmin edilen hataların varyansı ve gerçek değerlerin varyansına oranı alındıktan sonra 1'in çıkarılmasıdır ( $EV = 1 - Var(Tahmin\ Hataları) / Var(Gerçek\ Değerler)$ ). 1.0'a yakın puanlar oldukça arzu edilir, bu da hataların standart sapmalarının daha iyi karelerini gösterir (Mathur vd., 2019).

**Benzerlik:** Benzerlik ölçüm yöntemleri, kullanıcıdan kullanıcıya veya öğeden öğeye iş birliğine dayalı filtreleme RS'lerin de yaygın olarak kullanılır. Genel olarak, tüm yöntemler, bir çift kullanıcı (veya öğe) arasındaki benzerliği hesaplarken yaygın olarak derecelendirilen öğelerin derecelendirmelerini kullanır. RS'ler, aktif bir kullanıcı/öge için benzer kullanıcıları/öğeleri bulmak için Kosinüs Benzerliği, Pearson Korelasyon Katsayısı, Jaccard Benzerliği, Tanimato vb. gibi çeşitli benzerlik tekniklerini kullanır (Ayub vd., 2018; Mihalcea vd., 2006).

**Kosinüs Benzerliği (Cosine Similarity):** Kosinüs benzerliği, vektörler arası benzerlik metriği ya da iki vektör arasındaki açının kosinüs değerinin hesaplanmasıyla vektörler arası benzerliği ölçmeye yarayan bir mesafe ölçüsü olarak tanımlanabilir (Salton & Buckley, 1997; Salton vd., 1997; Salton & Lesk, 1971) Kosinüs benzerliği hesaplanırken, yalnızca pozitif derecelendirmelerin bir rolü vardır ve negatif derecelendirmeler atılır. Çıkış değeri 0-1 arasında değişir. 1'e yakın bir değer, iki değişken arasında güçlü bir korelasyon olduğunu gösterir. 0'a yakın bir değer, korelasyon olmadığını gösterir.

**Pearson Korelasyon Katsayısı (Pearson Correlation Coefficient—PCC):** PCC, iki kullanıcının ne kadar ilişkili olduğunu, yani ikisi arasındaki doğrusal korelasyonu ölçer. Bellek tabanlı iş birlikçi filtrelemeye dayalı bir yöntem olarak bu algoritma, kullanıcılar tarafından derecelendirilen öğe çiftleri arasındaki veya aynı öğeyi derecelendiren kullanıcı çiftleri arasındaki benzerliği hesaplayarak ölçeklenebilirlik sorununun üstesinden gelir. PCC, ilgilenilen her öğe için tahmini bir puan hesaplayan ve bu tahmin için özel olarak tasarlanmış bir yöntemdir. Bununla birlikte, bu yöntem literatürde tavsiye işlemi için de kullanılmaktadır (Gunawardana & Shani, 2009). Bu durumda, her olası madde için bir puan tahmin edilerek ve daha sonra tahmin edilen puanlar azaltılarak maddeler sıralanarak yapılır (Lü vd., 2012; Gunawardana & Shani, 2009).

**Jaccard Benzerliği:** Jaccard benzerliği, öğe sayısını sayarak iki küme arasındaki benzerliği ölçmenin bir fonksiyonudur. Bir RS tarafından döndürülen tavsiyeler arasında bir benzerlik ölçüsü tanımlayabilir. Döndürülen değer; A ve B kümelerinin benzerliği ile A ve B'nin kesişim boyutunun birleşim boyutlarına oranıdır (Ayub vd., 2018).

**Tanimoto Benzerliği:** Tanimoto ölçüsü, Jaccard ölçüsünün geliştirilmiş bir versiyonu gibidir. Kullanıcı tarafından derecelendirilen ortak öğelerin sayısını alır ve kullanıcılar tarafından sağlanan gerçek derecelendirme değerini yok sayar. Kullanıcılar tarafından derecelendirilen birkaç öğe ile kullanıcılardan herhangi biri tarafından derecelendirilen toplam öğe sayısı arasındaki oranı alır (Selvi & Sivasankar, 2018).

### **Sınıflandırmaya Dayalı Doğruluk Metrikleri**

**Doğruluk (Accuracy):** Doğruluk, bir miktarın gerçek değerine ne kadar yakın olduğunu gösterir. Bir ML modelinin doğruluğunu ölçer ve doğru sınıflandırılmış örneklerin yüzdesini ifade eder (Chaaya vd., 2017; Gunawardana & Shani, 2009).

TN: Doğru sınıflandırılmış negatif öğe sayısı FN: Yanlış bir şekilde negatif olarak sınıflandırılan pozitif öğe sayısı (4)

*TP: Doğru sınıflandırılmış pozitif öge sayısı*      *FP: Doğru şekilde pozitif olarak sınıflandırılan negatif öge sayısı*

$$Accuracy = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN}$$

**Duyarlılık (Precision):** Doğru tahmin edilen pozitif ögelerin tahmin edilen tüm pozitif ögeler arasındaki oranını temsil eder (Chaaya vd, 2017; Gunawardana & Shani, 2011).

$$Precision = \frac{TP}{TP + FP} \quad (5)$$

**Geri Çağırma (Recall):** Doğru tahmin edilen pozitif ögelerin sayısının, gerçek pozitif ögelerin toplam sayısına bölünmesiyle elde edilen orandır (Kang vd., 2019; Gunawardana & Shani, 2009).

$$Recall = \frac{TP}{TP + FN} \quad (6)$$

**Ters Duyarlılık (Inverse Precision):** Bu metrik, önerilmeyen bir ögenin aslında alakasız olma olasılığını verir. Gerçekte alakasız ve tavsiye edilmeyen bir ögenin, tavsiye edilmeyen tüm ögelerin toplam sayısına oranı ile bulunur (Bhat vd., 2022; Chaaya vd., 2017).

**Ters Geri Çağırma (Inverse Recall):** Bu metrik, alakasız bir ögenin aslında önerilmeme olasılığını verir. Gerçekten alakasız ve tavsiye edilmeyen maddelerin toplam alakasız ögelere oranı ile hesaplanır (Bhat vd., 2022; Schröder vd., 2011).

**Alıcı Çalışma Özellikleri (Receiver Operating Characteristics—ROC):** Precision ve Recall arasındaki ayırım göz önünde bulundurularak doğrudan değerlendirilebilir. ROC, bir ML modelinin pozitif ve negatif sınıflarını ayırt etme yeteneğini ifade eder. ROC eğrisi yöntemi bu değerlendirme için idealdir (Shani & Gunawardana, 2011). Precision ve Recall çoğu zaman istenen sonucu vermeyebilir. ROC eğrisi ile Precision ve Recall yöntemlerini kullanmak daha doğru olabilir, ancak her ikisini de ayrı ayrı kullanmak uygun olabilir. Örneğin, bir sistemde kullanıcıya kaç haber önermeniz gerektiği üzerinde çalışıyorsanız, eşik değerini bulmak için bir grafik oluşturmanız gerekir. Bu durumda ROC eğrisinin kullanılması daha uygun olabilir (Althbiti vd., 2021; Isinkaye vd., 2015).

**F1-Ölçümü (F1-Score):** ROC eğrisi ile Precision ve Recall kullanılacaksa, F1-Ölçümü'nün kullanılması uygun olacaktır. Accuracy ve F1-Score ayrı bir metrik olarak uygulanabilir (Kang vd., 2019; Chaaya vd., 2017).

$$F1 = 2 \cdot \frac{Precision \cdot Recall}{Precision + Recall} \quad (7)$$

**Lojistik Kayıp (Logistic Loss, Log-Loss):** Log-Loss, ikili sınıflandırıcılar arasında iyi bilinen bir değerlendirme ölçüsüdür. Bir sınıflandırıcının tahminleri verilen gerçek etiketlerin negatif günlük olasılığı olarak bilinir. Log-Loss bazen Lojistik regresyon ve Sinir Ağları durumunda da optimizasyon hedefidir. Ayrıca, tahminin belirsizliğini, gerçek verilerden ne kadar farklı olduğuna bağlı olarak dikkate alır. Bu bize modelimizin performansı hakkında daha detaylı bir görüş sağlar (Painsky & Wornell, 2018; Xin vd., 2016).

**Eğri Altındaki Alan (Area Under Curve—AUC):** AUC, alıcı çalışma karakteristik eğrisinin altındaki ayrılmaz alandır (Chaaya vd., 2017; Liu vd., 2016; Xin vd., 2016).

**Özgüllük (Specificity—SPE):** Bu metrik, gerçek negatif orana atıfta bulunarak, doğru tahmin edilen gerçek negatif ögeleri gösterir (Wu vd., 2016; Xin vd., 2016; Gunawardana & Shani, 2011; Gunawardana & Shani, 2009).

$$Specificity = \frac{TN}{TN + FP} \quad (8)$$

### **Sıralamaya Dayalı Doğruluk Metrikleri**

İstatistikte, sıralama doğruluğu veya sıralama tahmini metriği olarak kullanılmaktadır. Sistemdeki her kullanıcı için RS, sıralı bir tavsiye listesi oluşturur. RS'ler deki önerilen ögeler arasından, Precision (Duyarlılık) gibi geleneksel sınıflandırma metriklerini kullanarak, kaç tanesinin ilgili bir öneri olduğu bulunabilir. Ancak, Precision, listedeki

öğelerin doğru sırasını veya sıralamasını yakalayamaz. Kullanıcıların sınırlı bir dikkat süresi vardır ve en üstte doğru öğeleri tavsiye etmek çok önemlidir. Bu nedenle, tavsiye sıralamasının korelasyonu ölçülerek, kullanıcının tercihlerine göre önerilen öğelerin doğru sırası tahmin edilebilir (Vijaysinh, 2021; Al-Otaibi & Ykhlef, 2017; McFee & Lanckriet, 2010;).

**Duyarlılık @ k (Precision@k veya P(k)):** "En iyi k tane madde arasında önerilen ilgili öğelerin sayısı" anlamına gelen popüler bir metriktir. Örneğin, bir arama motorunda "plastik cerrahi" araması yaparsanız ve ilk sayfadaki 10 bağlantıdan 7'si "plastik cerrahi" ile ilgiliyse, bu sorgu için P@10 0,7'ye eşittir (Shervin, 2020).

$$Precision@k = \frac{(\# \text{ önerilen öğeler @k alakalı olanlar})}{(\# \text{ tavsiye edilen öğeler @k})} \quad (9)$$

**Ortalama Duyarlılık (Average Precision—AP):** 0 ile 1 arasındaki geri çağırma değeri için ortalama hassasiyet değerini hesaplar. Formülde, k: alınan öğelerin konumundaki sıralamadır, n: seçilen öğelerin sayısıdır, P(k): yukarıda açıklandığı gibi, listedeki k sırasındaki kesinlik değeridir, rel(k): bir gösterge fonksiyonudur, k derecesindeki öğe ilgili bir öğe ise 1'e eşittir, aksi takdirde 0 olacaktır. N<sub>r</sub>: ilgili öğelerin sayısıdır (Shervin, 2020; Shakirova, 2017).

$$AP = \frac{\sum_{k=1}^n P(k) \cdot rel(k)}{N_r} \quad (10)$$

**Mutlak Ortalama Duyarlılık (Mean Average Precision—MAP):** MAP, tüm kullanıcılar üzerinde normalleştirilmiş her kullanıcı için ortalama duyarlılıktır. Önerilen k tane madde varsa, P(k)'nin ortalaması k=1... K, tüm veri noktalarının ortalamasını almaktadır (Shervin, 2020; Chaaya vd., 2017; Shakirova, 2017).

$$MAP = \frac{\sum_{i=1}^I AP_i}{I} \quad (11)$$

burada, I toplam öğe sayısıdır.

**İsabet Oranı (Hit Ratio—HR):** Bir RS'de isabet oranı, L uzunluğundaki öneri listesine, doğru öğe(ler)in dahil edildiği kullanıcıların oranıdır. Formüldeki L ne kadar büyükse, isabet oranının o kadar yüksek olduğu anlamına gelir. Çünkü doğru madde(ler)in öneri listesine alınma şansı daha yüksektir. Bu nedenle, L için uygun bir değer seçmek önemli bir adımdır (Zhang & Feng, 2016).

$$HR = \frac{|U_{hit}^L|}{|U_{all}|} \quad (12)$$

burada,  $|U_{hit}^L|$ , en üstteki L öneri listesinde doğru cevabın yer aldığı kullanıcıların sayısıdır;  $|U_{all}|$ , test veri kümesindeki toplam kullanıcı sayısıdır.

**Ortalama Karşılıklı Sıralama (Mean Reciprocal Rank—MRR):** İstatistik tabanlı bir metriktir ve Ortalama Karşılıklı İsabet Oranı (Average Reciprocal Hit Ratio—ARHR) olarak da bilinir. MRR, bir öneri listesinde keşfedilen ilk ilgili öğenin konumunu ölçer. Sonuçta ortaya çıkan listede birden fazla doğru öğe varsa geçerli değildir. Bir RS, döndürülen sonuç için 6 öğe alırsa ve üçüncü en yüksek noktada ilgili bir öğe olduğu ortaya çıkarsa, MRR yalnızca bunu dikkate alır (Chai vd., 2016; Luo vd., 2014).

$$MRR = \frac{1}{|U_{all}|} \sum_{u=1}^{|U_{all}|} RR(u) \quad (13)$$

$$RR(u) = \sum_{i \leq L} \frac{relevance_i}{rank_i}$$

burada, RR(u) bir u kullanıcısının karşılıklı sıralamasıdır ve karşılıklı sıraya göre ağırlıklandırılan en iyi L öğelerinin alaka düzeyi puanının toplamı ile tanımlanır. MRR, test veri kümesindeki tüm kullanıcıların ortalamasıdır.

**Normalleştirilmiş Mesafeye Dayalı Performans Ölçümü (Normalized Distance-based Performance Measure—NDPM):** Bir diğer sıralama ölçütü NDPM'dir. Kullanıcıya belirli sayıda öneri verilmeyecek durumda, yani

kullanıcıya sayfalar ayrılarak sonraki öğeler sırayla veya kullanıcının isteği üzerine gösterilecekse NDPM kullanılabilir (Lü vd., 2012; Yao, 1995).

**Kazanç (Gain—G):** Sıralama kalitesini anlamak için kullanılan bir metriktir. Bir RS çözümünün sunduğu her tavsiyenin, istenen sonuçla olan ilgisine bağlı olarak, bir geçerlilik puanı vardır. Örneğin, sonuçlar 1 ile 5 arasında derecelendirilebilir ve her tavsiye için ayrı bir ilgililik düzeyi puanı belirlenir. Kümülatif Kazanç (Cumulative Gain—CG), tavsiye kümesindeki tüm derecelendirilmiş ilgililik puanlarının toplamıdır (Shani & Gunawardana, 2011; Gunawardana & Shani, 2009).

$$\text{Cumulative Gain (CG)} = \sum_{i=1}^n \text{relevance score}_i \quad (14)$$

Ancak CG'nin dezavantajı, arama sonuçlarının sırasının önemli olmaması ve iki ayrı listenin farklı ilgililik düzeyi puanlarına sahip olsa bile CG değerinin aynı olabilmesidir. Bu nedenle, İndirgenmiş Kümülatif Kazanç (Discounted Cumulative Gain—DCG) daha kesin bir ölçü olarak önerilmiştir. DCG, en altta yer alan son derece alakalı öğeleri cezalandırmak için modellenmiştir (Lü vd., 2012).

$$\text{DCG} = \sum_{i=1}^n \frac{\text{relevance score}_i}{\log_2(i+1)} \quad (15)$$

DCG, sıralamanın önemini göz önünde bulundurduğu için başlangıçta iyi bir ölçü gibi görünüyor, fakat yine de yeterli değildir. Çeşitli faktörlere bağlı olarak, sunulan önerilerin sayısı her kullanıcı için değişebilir. DCG değeri de buna göre değişecektir. DCG'nin normalleştirilmesi, metriğin farklı uzunluklardaki sıralama listeleriyle karşılaştırılmasına olanak tanır.

$$\text{NDCG} = \frac{\text{DCG}}{\text{iDCG}} \quad (16)$$

Yukarıdaki formülde iDCG, ideal DCG (iDCG) anlamına gelmektedir. Bu ölçüm, DCG ölçümünün bir uzantısıdır ve sıralı listenin içindeki ilgili öğelerin konumunu dikkate alır. Aşağıdaki örnekte, B kümesi'nin ideal olarak sıralandığını görüyoruz. İdeal sıralama, en büyükten en küçüğe alaka düzeyi puanına göre sıralamadır. B Kümesi'nin DCG hesaplaması aynı zamanda iDCG hesaplamasıdır.

Son olarak, iDCG genellikle gerçek DCG birlikte kullanılarak Normalleştirilmiş İndirimli Kümülatif Kazanç (Normalized Discounted Cumulative Gain—NDCG) hesaplamak içinde kullanılabilir. NDCG, DCG'den farklı olarak, farklı uzunluklardaki veri kümelerinin değerlendirilmesinde kullanılabilir. Sunulan önerilerin NDCG ortalamasını hesaplanarak RS çözümlerinin verimliliğini değerlendirmek mümkündür (Shani & Gunawardana, 2011; Gunawardana & Shani, 2009).

**Tablo 1.** Literatürdeki RS değerlendirme metrikleri kıyaslamaları yapılmıştır. 4. sütun metrik türünü belirtirken, 5. sütun hedef değeri gösterir (ör., daha küçük RMSE, daha yüksek sıralama doğruluğu anlamındadır). 6. sütun, değerlendirme kategorilerini gösterirken, son iki sütun, metriğin bir sıralamadan elde edilip edilmediğini ve o metriğin öneri listesinin uzunluğuna ilişkişel olup olmadığını gösterir.

METRİK ADI (TR)	METRİK ADI (ENG)	SEMBOL	TÜR	HEDEF	KAPSAM	RANK	LEN (L)
Ortalama Kare Hatası	Mean Squared Error	MSE	Predictive	Small	Rating Accuracy	No	No
Kök Ortalama Kare Hatası	Root Mean Squared Error	RMSE	Predictive	Small	Rating Accuracy	No	No
Ortalama Mutlak Hata	Mean Absolute Error	MAE	Predictive	Small	Rating Accuracy	No	No
Ortalama Mutlak Kullanıcı Hatası	Mean Absolute User Error	MAUE	Predictive	Small	Rating Accuracy	No	No
R Kare	R Squared	R <sup>2</sup>	Predictive	Large	Rating Accuracy	No	No
Açıklanan Varyans	Explained Variance	EV	Predictive	Large	Rating Accuracy	No	No
Pearson Korelasyon Katsayısı	Pearson Correlation Coefficient	PCC	Predictive	Large	Rating Correlation	No	No
Doğruluk	Accuracy	A(L)	Classification	Large	Classification Accuracy	No	Yes
Duyarlılık	Precision	P(L)	Classification	Large	Classification Accuracy	No	Yes
Geri Çağırma	Recall	R(L)	Classification	Large	Classification Accuracy	No	Yes
Ters Hassasiyet	Inverse Precision	IP(L)	Classification	Small	Classification Accuracy	No	Yes
Ters Geri Çağırma	Inverse Recall	IR(L)	Classification	Small	Classification Accuracy	No	Yes
F1 Ölçümü	F1-Measure	F1(L)	Classification	Large	Classification Accuracy	No	Yes
Ahçı Çalışma Özellikleri	Receiver Operating Characteristics	ROC	Classification	Large	Classification Accuracy	No	Yes
Lojistik Kayıp	Logistic Loss	LOC-Loss	Classification	Small	Classification Accuracy	No	Yes
Eğrinin Altındaki Alan	Area Under Curve	AUC	Classification	Large	Classification Accuracy	No	No
Özgüllük	Specificity	SPE	Classification	Large	Classification Accuracy	No	No
Hassasiyet @ K	Precision @ K	P(k)	Rank	Large	Classification Accuracy	Yes	No
Ortalama Hassasiyet	Average Precision	AP	Rank	Large	Classification Accuracy	Yes	No
Ortalama Averaj Hassasiyet	Mean Average Precision	MAP	Rank	Large	Classification Accuracy	Yes	No
İsabet Oranı	Hit Ratio	HR	Rank	Large	Robustness	No	Yes
Ortalama Karşılıklı Sıralama	Mean Reciprocal Rank	MRR	Rank	Large	Ranking Correlation	Yes	No
Normalleştirilmiş Mesafeye Dayalı Performans Ölçümü	Normalized Distance-Based Performance Measure	NDPM	Rank	Small	Ranking Correlation	Yes	No
Kazanç	Gain	G	Rank	Large	Satisfaction and Precision	Yes	Yes
Kümülatif Kazanç	Cumulative Gain	CG (b, L)	Rank	Large	Satisfaction and Precision	Yes	Yes
İndirimli Kümülatif Kazanç	Discounted Cumulative Gain	DCG (b, L)	Rank	Large	Satisfaction and Precision	Yes	Yes
Normalleştirilmiş İndirgenmiş Kümülatif Kazanç	Normalized Discounted Cumulative Gain	NDCG (b, L)	Rank	Large	Satisfaction and Precision	Yes	Yes
Spearman's Rho	Spearman's Rho	P	Rank	Large	Rating Accuracy	Yes	No
Kendall'in TAU'su	Kendall's Tau	τ	Rank	Large	Rating Accuracy	Yes	No
Sıralama Puanı	Ranking Score	RS	Rank	Small	Ranking Accuracy	Yes	No
Rütbe Tarafı Hassasiyet	Rank-Biased Precision	RBP (p, L)	Rank	Large	Satisfaction and Precision	Yes	Yes
Yenilik	Novelty	NOV	Non-Accuracy	Large	Popularity Ranking, Non-obviousness	Yes	No
Çeşitlilik	Diversity	NA	Non-Accuracy	Small	Intra-list Similarity	No	Yes
Tesadüf	Serendipity	SER	Non-Accuracy	Large	Novelty, Unexpectedness, Utility & Diversity, Non-Obviousness	Yes	No
Kapsama Alanı	Coverage	COV(L)	Non-Accuracy	Large	Coverage and Diversity	No	Yes
Hamming Mesafesi	Hamming Distance	H(L)	Predictive	Large	Intra-Diversity	No	Yes
Benzerlik İçi	Intra-Similarity	I(L)	Predictive	Small	Intra-Diversity	No	Yes
Popülerlik	Popularity	N(L)	Non-Accuracy	Small	Diversity and Novelty	No	Yes
Kendini Tanıma	Self-Information	U(L)	Non-Accuracy	Large	Unexpectedness, Surprisal & Novelty	No	Yes

TR-ENG: Sınıflandırmaya Dayalı (Classification), Tahmine Dayalı (Prediction-based), Kalite (Quality), Sıralamaya Dayalı (Ranking)

Alaka puanına göre örnek 2 öneri kümeleri verilmiş olsun: A= [2, 3, 3, 1, 2], B= [3, 3, 2, 2, 1]  
Beklenen İdeal Sıralama= [3, 3, 2, 2, 1] olmalıdır. Bu öneri kümelerine göre:  
CG, DCG ve NDCG skorları:  
 $CG_A = 2+3+3+1+2=11$ ,  $CG_B = 3+3+2+2+1=11$

$$DCG_A = \sum_{i=1}^n \frac{relevance\ score_i}{\log_2(i+1)} = \frac{2}{\log_2(1+1)} + \frac{3}{\log_2(2+1)} + \frac{3}{\log_2(3+1)} + \frac{1}{\log_2(4+1)} + \frac{2}{\log_2(5+1)} \cong 6.6$$

$$DCG_B = \sum_{i=1}^n \frac{relevance\ score_i}{\log_2(i+1)} = \frac{3}{\log_2(1+1)} + \frac{3}{\log_2(2+1)} + \frac{2}{\log_2(3+1)} + \frac{2}{\log_2(4+1)} + \frac{1}{\log_2(5+1)} \cong 7.14$$

$$NDCG_A = \frac{DCG_A}{iDCG} = 6.6 / 7.14 = 0.92$$

$$NDCG_B = \frac{DCG_B}{iDCG} = 7.14 / 7.14 = 1.0$$

Burada,  $NDCG_B > NDCG_A$  olduğundan dolayı, B kümesinin ideal sıralamaya göre en uygun öneri düzenine sahip olduğu anlaşılmaktadır.

**Spearman's Rho:** İstatistiksel tabanlı sıralama ölçütüdür (Spearman, 1961). Spearman sıra korelasyon katsayısı, iki değişkenin sıraları arasındaki istatistiksel bağımlılığı ölçen parametrik olmayan bir ölçüdür (Lü vd., 2012). Monotonik bir ilişkide, ilk değişkenin değeri değişirse, ikinci değişkenin değeri de değişir, ancak bu oran doğrusal değildir. PCC ile karşılaştırıldığında Spearman katsayısı sıralamaya dayalıdır ve parametre olmayan unsurlardan ve büyüklükten bağımsızdır. PCC, iki değişken arasındaki doğrusal ilişkileri değerlendirirken, Spearman monotonik ilişkilerini değerlendirir (Kang vd., 2019).

### **Doğruluğa Dayalı Olmayan Metrikler**

Bu ölçümler, tahminleri temel doğruluk değerleriyle karşılaştırmaz, bunun yerine tavsiyelerin aşağıdaki özelliklerini değerlendirir ve sistemin kalite kriterlerini irdelerler.

**Çeşitlilik (Diversity):** Bu metrik, bir kümedeki farklı öğelerin birbirlerine göre ne kadar olduğunu ölçer (Silveira vd., 2019; Zhang & Feng, 2016; Avazpour vd., 201; Lü vd., 2012; Shani & Gunawardana, 2011).

**Yenilik (Novelty):** Yenilik, kullanıcılar arasındaki öneri sıklıklarını hesaplayarak yeni öneri öğelerinin nasıl olduğunu ölçer (Silveira vd., 2019; Lü vd., 2012).

$$nov(R_u) = \sum_{i \in R_u} \min_{j \in H_u} d(class(i), class(j)) \quad (17)$$

**Ölçeklenebilirlik (Scalability):** Bu metrik, bir sistemin veya modelin artan iş yükü veya artan kullanıcı taleplerini sürdürme ve bunlarla iyi başa çıkma yeteneğini ifade eder (Lü vd., 2012).

**Tesadüf (Serendipity):** Bu metrik, belirli bir kullanıcı için önerilerin ne kadar şaşırtıcı olduğunu, kullanıcının daha önce etkileşimde bulunduğu öğelerle karşılaştırarak ölçer (Silveira vd., 2019; Avazpour vd., 2014; Shani & Gunawardana, 2011; Gunawardana & Shani, 2009).

**Kapsam (Coverage):** Bu metrik, sistem tarafından önerilen öğelerin dağılımı ile ilgili ölçümlerdir (Pan vd., 2016; Avazpour vd., 2014). RS'ler de kullanılan yukarıda sunulan tüm değerlendirme ölçütleri, performans karşılaştırmalı tercih ilişkisi, kısaltmaları, ve kapsamaları bakımından sınıflandırılması Tablo 1'de sunulmuştur.

### **RS Çözümlerinde Önerme Sürecindeki Rastlanan Zorluklar**

RS veri tabanında bulunan veriler sayısal ve ilişkisel olarak zayıfsa sistem performansı da zayıf olabilir. Bu nedenle, RS'ler de hala çözülmesi gereken birçok zorluk olduğu söylenebilir. Bu sorunların bir kısmı aşağıda irdelenmiştir.

**Tesadüf ve Yenilik:** RS'ler sıra dışı olabilir. RS'ler, kullanıcıya daha önce hiç duyulmamış veya önerilmemiş olağandışı öneriler üretebilir, ancak aynı zamanda şaşırtıcı etkileri de vardır (Mohamed vd., 2019).



**Seyreklik:** Seyreklik, RS'lerde görülen bir diğer önemli sorundur. Bu sorun, bir kullanıcının tercih edilen öğelerden oluşan çok büyük bir matrisi olduğunda ortaya çıkar (Ör, izlenen filmler veya dinlenen şarkılar). Bu durum, kullanıcı tercihlerini derecelendirmediğinde ortaya çıkar. Çünkü RS'ler, kullanıcılarının tercihlerini diğer kullanıcılara önerebilmek için derecelendirme matrislerine ihtiyaç duyarlar (Althbiti vd., 2021; Mohamed vd., 2019).

**Gizlilik:** RS'lerdeki en büyük zorluklardan biri veri gizliliğidir. Kullanıcının tercihlerine/ilgi alanlarına göre uygun öğeler önermek için, RS'lerin kullanıcıları hakkında bazı önemli bilgileri önceden bilmesi gerekir. RS'ler kullanıcılarının bu kişisel bilgilerini saklarken, kullanıcı gizliliği yetkisiz kişilere karşı da korunmalıdır (Mohamed vd., 2019).

**Çeşitlilik:** RS'lerden elde edilen öneri sonuçlarının hepsinin aynı yerden gelmemesi sağlar, tekrar etmesini önler ve çeşitliliği artırır (Mohamed vd., 2019).

**Yorumlanabilirlik:** Günümüzde RS ve yapay zekâ birçok sektörde yüksek talep görmektedir. Bu disiplinlerin veya alt disiplinlerin çoğunda, yalnızca doğru tahminlere sahip olmak değil, aynı zamanda kararın arkasında son kullanıcılar için şeffaf hale getirilebilecek bir gerekçe sağlamak da önemlidir (Fusco vd., 2019; Mohamed vd., 2019). Bu nedenle, bir RS'nin yapısına entegre edilen model yorumlanabilir olmalıdır. Özellikle, model tahminlerinin arkasındaki mantığı açıklamalı ve kullanıcı-öge etkileşimlerinin altında yatan mekanizma hakkında içgörüler sağlamalıdır. Bunu çözmek için, kullanıcı-öge etkileşimlerini işlemek ve kullanıcı/öge özelliklerini korumak için sinir ağı mimarileri uygulanabilir (Fusco vd., 2019; Mohamed vd., 2019).

**Soğuk başlatma:** Yeni bir sistem kullanıcısına öneri sunmanın zorluğunu ifade eder. RS'lerde işbirlikçi filtrelemenin temel sorunlarından biridir. Popüler öğeleri yeni bir kullanıcıya göstererek veya yeni bir öge için bazı kural tabanlı filtreler ekleyerek önlenabilir (Mohamed vd., 2019).

**Ölçeklenebilirlik:** Bir RS'nin tek bir zaman diliminde çok miktarda farklı türde veriyi işleyebilmesi, ölçeklenebilirliğini gösterir. Kullanıcı veya ürün sayısı arttıkça, RS'nin performansına ve etkinliğine zarar vermeden kullanıcılarına uygun ürünü önermesi beklenir. Bu sorun birçok şekilde çözülebilir. Örneğin, veri kümesi çok büyük olduğunda, Hadoop gibi büyük veri sistemlerine geçiş sağlanabilir. Diğer bir çözüm ise örnek küme üzerinde modeller/kurallar oluşturmaktır. Başka bir çözüm, modeli aşamalara ayırmak ve çalıştırmak olacaktır (Mohamed vd., 2019; Lü vd., 2012).

## İŞ TAVSİYE SİSTEMLERİNDE KULLANILAN PERFORMANS METRİKLERİ VE KIYASLANMASI

### *İş Tavsiye Sistemleri (Job Recommender Systems) Arka Planı*

Özgeçmişler, bireylerin iş arama sürecinde kullandıkları kendilerini tanımlayan en önemli belgelerdir. Geçmişten günümüze insanlar iş başvurusunda bulunurken önce özgeçmişlerini oluşturur ve daha sonra şirketlerin İK sistemine veya iş arama sitelerine özgeçmişlerini yüklemektedirler. Özgeçmişler, bireyler tarafından yaratılırken doküman üretme araçları kullanarak yapısız bir formatta sunulabilirken, aynı zamanda iş bulma siteleri üzerinden de daha yapısal bir formatta (İK yazılım çözümlerinin kullanıcı girdi formları/ekranları aracılığıyla) üretilebilmekte ve İK özgeçmiş havuzlarında yükleyebilmektedirler. Özgeçmişler genellikle, “.doc”, “.docx”, “.pdf”, veya “.txt” gibi farklı formatlarda, farklı yazı tiplerinde, renklerde, yazı tipi boyutlarında, vb. gibi yapısal farklılıklar içerebilmekte ve İK personeli tarafından değerlendirilmek üzere İK sistemleri üzerinden yüklenebilmektedirler.

Zaman içerisinde, milyonlarca özgeçmiş biriken İK havuzlarından, İK'nın en önemli süreçlerinden bir olan işe alım sürecinin etkin bir şekilde uygulanması ve doğru adayın belirlenmesi oldukça zorlu bir İK süreci haline gelmiştir. İK uzmanı, önce iş tanımı hazırlar ve daha sonra güncel özgeçmişleri almak için çeşitli iş portalları kullanır. Adayın pozisyona başvurmasını beklemek yerine nitelikli adayların araştırılması, seçilmesi, belirlenmesi ve onlarla iletişime geçilmesi anlamına gelir. Bu noktada, RS teknolojilerinin kullanımı oldukça etkin bir çözüm olduğunu söylemek mümkündür. İş Tavsiye Sistemleri (Job Recommender Systems—JRS), son zamanlarda popüler bir araştırma sahası olmuş ve şirketlerin İK havuzunda/iş portallarında saklanan yapılandırılmamış/yarı yapılandırılmış özgeçmişlerin çeşitli yapay zekâ ve doğa dil işleme teknolojileri, algoritmaları veya modelleri ile işlenmesiyle, bireylerin özgeçmişlerindeki istenen bölümlerin (ör. demografik bilgilerin, iş tecrübelerinin ve eğitim bilgilerinin vb.) çıkarılması kısa zamanda mümkün olmuştur. Ayrıca, JRS çözümleri sayesinde bu sürecin efektif ve önyargısız yönetilmesi mümkün olmuştur. Böylece, hedef pozisyona en uygun personelin daha adaletli ve doğru olarak seçilip atanabilmesi, zaman kayıplarının önlenmesi ve İK departmanlarında iş yükünün azalması etkin JRS çözümleri ile

mümkün olmuştur. Literatürde, çeşitli bu tür JRS çözümlerine (ör. CASPER, ResuMatcher, eRecruiter, FES, vb) rastlanmaktadır (Almalis vd., 2015). Ancak, literatürde Türkçe dilinde JRS çözümlerine yeterince rastlanmamaktadır. İş adaylarına iş fırsatı bulma konusunda rehberlik edecek az sayıda etkin popüler JRS çözümü (ör. Kariyer.Net, Secretec.com, vb.) bulunmaktadır.

Literatür taramalarına göre, JRS çözümlerinde 6 filtreleme türünden bahsedilmiş ve şu şekilde kategorize edilmiştir: (1) İşbirlikçi Filtreleme, (2) İçerik Tabanlı Filtreleme, (3) Hibrit Tabanlı Filtreleme, (4) Bilgi Tabanlı Filtreleme, (5) Bağlam Farkındalığına Dayalı Filtreleme (Demografik JRS'ler), ve (6) İki Yönlü Filtrelemeye (Reciprocal JRS'ler gibi) dayalı çeşitli JRS çalışmalarına rastlanmıştır (Gunawardana vd., 2022; Zhao vd., 2021; Palomares vd., 2021; Çelik & Elçi, 2020; Mohamed vd., 2019; Arita vd., 2017; Al-Shamri vd., 2016; Wenxing vd., 2015; Poriya vd., 2014; Lü vd., 2012; Park vd., 2012; Shani & Gunawardana, 2011; Martin vd., 2011; Yu vd., 2011; Malinowski vd., 2006).

JRS çözümleri, tek taraflı veya çift taraflı (iki yönlü) tavsiyeler yapabilir. Tek taraflı tavsiye sağlayan JRS çözümlerinde, tavsiye isteyen tarafa ya "açık iş pozisyonu ilanı" önerilir ya da açık bir iş pozisyonuna "uygun özgeçmişler" önerilir. Literatürde, tek taraflı tavsiye sağlayan JRS çözümlerinde genelde işbirlikçi, içerik-tabanlı, hibrit, bilgi tabanlı, bağlam farkındalığına dayalı filtreleme JRS çözümlerine rastlanmıştır (Kwieciński vd., 2023; Bothmer & Schlippe, 2022; Prafajar vd., 2022; Liang & Wan, 2022; Zhao vd., 2021; Okfalisa vd., 2021; Palomares vd., 2021; Tamburri vd., 2020; Martinez-Gil vd., 2020; González-Briones vd., 2019; Rimitha vd., 2019; Guan vd., 2019; Arita vd., 2017; Aouadni & Rebai, 2017; Benabderrahmane & Lamolle, 2017; Yi vd., 2016; Wenxing vd., 2015; Almalis vd., 2015; Fang vd., 2013; Malinowski vd., 2006). Ayrıca, iki yönlü tavsiye, diğer deyişle "Reciprocal JRS" çözümlerinde, her iki yönde de tavsiyeler üretilir ve karşılıklı uzlaşma beklenir. Bu sistemlerde, her iki tarafın da uzlaşmasıyla ve yapılan tavsiyeye uygunluk vermesiyle süreç tamamlanır (Palomares vd., 2021; Wenxing vd., 2015; Yu vd., 2011; Malinowski vd., 2006).

Popülerliğe dayalı RS'ler doğası gereği kullanıcı davranışlarını analiz etmez, diğer bir deyişle kullanıcının kişisel tercihlerine dayalı olmayan bir sistemdir. Tercih edilen, popüler/trend, yaygın olarak tüketilen ürünleri önerir. Kullanıcının ilgi alanlarını genişletmek ve uygulama tercihlerini popülerleştirmek için bir fırsat olabilir. Örneğin bir e-ticaret sitesi, Covid-19 pandemisi döneminde çok alakasız bir ürüne bakıyor olsanız bile size maske ya da dezenfektan sunabilmesi şeklinde ifade edilebilir. Bunun nedeni, kullanılan RS'nin aslında popülerliğe dayalı filtreleme içermesidir (Kumar vd., 2014). Ayrıca, kişiselleştirilmiş bir RS, kullanıcının geçmiş etkileşimlerine (ör. önceki satın alma geçmişine) dayalı olarak öğeler önerirken, kişiselleştirilmemiş bir RS, o dönemde sistem kullanıcıları arasında popüler olan öğeleri önerir (Poriya vd., 2014). Literatürde kişiselleştirilmemiş JRS veya popülerliğe dayalı bir JRS çözümüne rastlanmamıştır.

Gelecek bölümde, JRS çözümlerinde kullanılan performans metrikleri hakkında literatür inceleme sonuçları paylaşılmaktadır.

### ***İş Tavsiye Sistemlerinde Tercih Edilen Değerlendirme Metriklerinin Dağılımı ve Yorumlanması***

RS'lerin başarısını ve verimliliğini değerlendirmek için çeşitli ölçüm yöntemleri ve metrikler Bölüm 3'te tartışılmıştır. Toplamda 30 adet metrik tespit edilmiş ve bu metrikler dört ana kategoride sınıflandırılmıştır: (1) Tahmine Dayalı Doğruluk Metrikleri (7 metrik), (2) Sınıflandırmaya Dayalı Doğruluk Metrikleri (10 metrik), (3) Sıralamaya Dayalı Doğruluk Metrikleri (8 metrik) ve (4) Doğruluğa Dayalı Olmayan Metrikler (5 metrik) (Gunawardana vd., 2022; Vijaysinh, 2021; Chaaya vd., 2017; Gunawardana & Shani, 2009;). Bu bölümde, 30 adet RS performans metriklerinin hangileri JRS çözümlerinde uygulanmış ve denenmiş olduğunu ve hangi filtreleme yaklaşımlarında uygulandığına dair tartışmalar yer almaktadır.

Tablo 2'de görüldüğü üzere JRS çözümlerinde filtreleme tekniğine göre en çok uygulanan performans değerlendirme metrikleri sınıflandırmaya dayalıdır (ör. Accuracy, Recall, Precision). Hibrit filtrelemeye dayalı JRS çözümleri genelde sınıflandırma, tavsiye sıralama ve tahminlemeye dayalı çözüm ve metrikleri işlemişlerdir. Takibinde işbirlikçi ve içeriğe-dayalı filtreleme tabanlı JRS çözümlerinde benzer performans kriterlerini işlemişlerdir. Kalite bakımından, diğer deyişle, önerilen tavsiyelerin ne kadar doğru üretildiğine, benzersizliğine, tekrara düşmemesine, kapsamına, vb. nitelik bakımından JRS çözümlerinin değerlendirilmesi neredeyse hiç ele alınmamış olması dikkat çekmiştir. Sadece işbirlikçi, içeriğe-dayalı ve iki yönlü filtrelemeye dayalı JRS çözümlerinde nitelik bakımından bazı değerlendirmelere rastlanmıştır.

**Tablo 2.** JRS Çözümlerindeki Değerlendirme Metriklerine Genel Bakış.

NO	DEĞERLENDİRME METRİKLERİ	METRİK TÜRÜ	Filtreleme Türleri						Kullanım Yüzde
			İşbirliğine Dayalı Filtreleme	İçerik Tabanlı Filtreleme	Hibrit Filtreleme	Bilgiye Dayalı Filtreleme	Bağlama Duyarlı (Demografik Filtreleme)	Karşılıklı Tabanlı Filtreleme	
1	Accuracy	Classification	+	+	+	+	+	+	%100
2	Recall	Classification	+	+	+	+	+	+	%83
3	Precision	Classification	+		+			+	%50
4	NDCG	Ranking	+		+				%33
5	AUC	Classification		+	+				%33
6	F-Score	Classification	+		+				%33
7	MAE/MRE	Prediction-based			+			+	%33
8	MSE/RMSE	Prediction-based	+	+	+				%50
9	Hit-Rate	Ranking	+		+				%33
10	Loss-Func.	Classification				+			%16
11	Reliability	Quality							%0
12	Coverage	Quality			+				%16
13	Security	Quality							%0
14	Robustness	Quality							%0
15	Scalability	Quality	+						%16
16	Consistency Ratio	Quality					+		%16
17	Time	Quality		+					%16
18	Cost	Quality	+	+					%33
19	Karşılıklılık (Reciprocity)	Quality						+	%16
20	Sınırlılık (Limitedness)	Quality						+	%16
21	Pasiflik (Passivity)	Quality						+	%16
22	Sparseness (Seyreklik)	Quality						+	%16

TR-ENG: Sınıflandırmaya Dayalı (Classification), Tahmine Dayalı (Prediction-based), Kalite (Quality), Sıralamaya Dayalı (Ranking)

RS'lerin İK çözümlerine entegrasyonu söz konusu olduğunda, yukarıda belirtilen zorlukların ön plana çıkması kaçınılmazdır. Örneğin, İK çözümlerinde temel kalite ve performans kriterlerinin yetkin bir RS'de sağlanmasının yanı sıra, İK sistemine özgeçmiş yükleyen kullanıcıların gizliliği yetkisiz saldırganlardan korunmalıdır. Şu anda, İK hizmetlerindeki AI tabanlı JRS'ler veya akıllı RS'ler, uygulama, güvenilirlik ve doğruluk açısından yeterince olgun değildir. İK profesyonellerinin bakış açısına göre, JRS'ler doğru eşleşme sonuçları üretebilecek güvenilir ve hızlı tavsiyeler sunma yeteneğine sahip olmalıdır (Isinkaye vd., 2015). İK uzmanları, etkin JRS'ler aracılığıyla iş adaylarının yüklenen özgeçmişlerini uygun iş tanımlarıyla eşleştirebilir, sıralayabilir ve etiketleyebilir. Bu ilişkisel bağlantı ve sıralama, zaman içinde yüksek hacimli derecelendirme matrisleri oluşturabilir, böylece önerilerde yenilik ve çeşitlilik sağlar.

## SONUÇLAR

COVID-19'un etkisiyle birçok sektörde yürütülen iş süreçlerin ve operasyonların teknoloji ile güçlendirilmesi ve uzaktan nihai kullanıcılara, doğru hizmetin ulaştırılması, elzem bir ihtiyaç haline getirmiştir. Günümüzde tavsiye sistemleri, birçok alanda (ör. e-ticaret, eğitim, eğlence, sağlık, insan kaynakları, reklamcılık, vb.) yer edinmeye başlanmıştır. Tavsiye sistemleri sayesinde, kullanıcılara kişiselleştirilmiş sonuçlar üretilmesi ve kullanıcıya en uygun öğelerin önceliklendirilmesi mümkün olabilmektedir. Bu çalışmada, RS mimarisi ve mevcut çözümler üzerine, literatürde 2010-2023 yılları arasında yapılmış çeşitli güncel araştırma makaleleri ilgililik durumuna göre seçilmiş ve incelenmiştir. Yoğun araştırma çalışmaları sonucunda, tavsiye sistemlerinde öğe filtreleme teknikleri geniş çapta araştırılmış ve bir taksonomi yapısında sunulmuştur. Ayrıca, tavsiye sistemlerinde çoğunluk araştırmalarda uygulanan performans değerlendirme metrikleri literatürden tespit edilmiş, kıyaslanmış ve sınıflandırılmıştır. İnceleme çalışmalarının çıktılarına göre, literatürde RS'ler için uygulanan öğe filtreleme mekanizmaları 6 kategoriye ayrılmıştır: (1) İşbirlikçi Filtreleme, (2) İçerik Tabanlı Filtreleme, (3) Hibrit Tabanlı Filtreleme, (4) Bilgi Tabanlı Filtreleme, (5) Bağlam Farkındalığına Dayalı Filtreleme ve (6) Diğerleri. Ayrıca, RS'lerin doğrulama performans değerlendirmelerinde kullanılan, çoğunluk performans/kalite metrikleri saptanarak, şu şekil de sınıflandırılmıştır: (1)

Tahmine Dayalı Doğruluk Metrikleri, (2) Sınıflandırmaya Dayalı Doğruluk Metrikleri, (3) Sıralamaya Dayalı Doğruluk Metrikleri, ve (4) Doğruluğa Dayalı Olmayan Metrikler olarak kategorize edilmiş ve tartışılmıştır.

Son olarak, tavsiye sistemlerinin en çok ihtiyaç duyulduğu sektörlerden biri olan, İnsan Kaynakları sahasındaki süreç/operasyonlarda, tavsiye sistemleri çözümlerinin uygulanması, İş Tavsiye Sistemleri (JRS) olarak bilinmektedir. Bu çalışmanın son katkısı olarak, JRS uygulamaları bir araştırma sahası olarak seçilmiş ve JRS çözümlerinde kullanılan filtreleme teknikleri ve etkin performans/kalite değerlendirme metrikleri tespit edilmiştir. Gelecek çalışmalarda, JRS çözümlerinde kullanan güncel AI ve NLP model ve yaklaşımlarını irdeleyen bir sistematik literatür çalışmasının yapılması planlanmaktadır. İlave, literatürde İngilizce dilinde uygulanmış güncel çözümlerin, Türkçe dilinde çıkarım sağlayabilen yenilikçi JRS çözümlerine entegrasyonu hakkında gerekli bilgi birikiminin elde edilmesi amaçlanmaktadır.

**Fon Kullanımı:** Yazarlar araştırmanın fon desteği olmadığını bildirir.

**Çıkar çatışması:** Yazarlar herhangi bir çıkar çatışması olmadığını beyan ederler.

**Etik onay beyanı:** Bu çalışma için resmi onay gerekli değildir.

**Yazar Katkıları:** Her iki yazar eşit oranda katkı sağlamıştır.

## KAYNAKLAR

- Adomavicius, G., & Tuzhilin, A. (2011). Context-aware recommender systems. In *Recommender systems handbook* (pp. 217-253). Springer, Boston, MA. <https://doi.org/10.1609/aimag.v32i3.2364>
- Al-Habaibeh, A., Watkins, M., Waried, K., & Javareshk, M. B. (2021). Challenges and opportunities of remotely working from home during Covid-19 pandemic. *Global Transitions*, 3, 99-108. <https://doi.org/10.1016/j.glt.2021.11.001>
- Almalis, N. D., Tsihrintzis, G. A., Karagiannis, N., & Strati, A. D. (2015). FoDRA—A new content-based job recommendation algorithm for job seeking and recruiting. In *2015 6th International Conference on Information, Intelligence, Systems and Applications (IISA)* (pp. 1-7). IEEE. <https://doi.org/10.1109/IISA.2015.7388018>
- Al-Otaibi, S., & Ykhlef, M. (2017). Hybrid immunizing solution for job recommender system. *Frontiers of Computer Science*, 11(3), 511-527. <https://doi.org/10.1007/s11704-016-5241-z>
- Al-Shamri, M. Y. H. (2016). User profiling approaches for demographic recommender systems. *Knowledge-Based Systems*, 100, 175-187. <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2016.03.006>
- Althbiti, A., Alshamrani, R., Alghamdi, T., Lee, S., & Ma, X. (2021). Addressing data sparsity in collaborative filtering-based recommender systems using clustering and artificial neural network. In *2021 IEEE 11th Annual Computing and Communication Workshop and Conference (CCWC)* (pp. 0218-0227). IEEE. <https://doi.org/10.1109/CCWC51732.2021.9376008>
- Aouadni, I., & Rebai, A. (2017). Decision support system based on genetic algorithm and multi-criteria satisfaction analysis (MUSA) method for measuring job satisfaction. *Annals of Operations Research*, 256(1), 3-20. <https://doi.org/10.1007/s10479-016-2154-z>
- Arita, S., Hiyama, A., & Hirose, M. (2017). Gber: A social matching app which utilizes time, place, and skills of workers and jobs. In *Companion of the 2017 ACM Conference on Computer Supported Cooperative Work and Social Computing* (pp. 127-130). <https://doi.org/10.1145/3022198.3026316>
- Avazpour, I., Pitakrat, T., Grunske, L., & Grundy, J. (2014). Dimensions and metrics for evaluating recommendation systems. In *Recommendation systems in software engineering* (pp. 245-273). Springer, Berlin, Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-45135-5\\_10](https://doi.org/10.1007/978-3-642-45135-5_10)
- Ayub, M., Ghazanfar, M. A., Maqsood, M., & Saleem, A. (2018). A Jaccard base similarity measure to improve performance of CF based recommender systems. In *2018 International conference on information networking (ICOIN)* (pp. 1-6). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICOIN.2018.8343073>
- Beel, J., Gipp, B., Langer, S., & Breitingner, C. (2016). Paper recommender systems: a literature survey. *International Journal on Digital Libraries*, 17(4), 305-338. <https://doi.org/10.1007/s00799-015-0156-0>
- Benabderrahmane, S., Mellouli, N., & Lamolle, M. (2017). Predicting the users' clickstreams using time series representation, symbolic sequences, and deep learning: application on job offers recommendation tasks. In *2017*

- IEEE International Conference on Information Reuse and Integration (IRI) (pp. 436-443). IEEE. <https://doi.org/10.1109/IRI.2017.54>
- Bhat, S. S., Pranav, P., Shashank, K. V., Raghunandan, A., & Mohan, B. R. (2022). Comparative Performance Evaluation of Web-Based Book Recommender Systems. In 2022 6th International Conference on Trends in Electronics and Informatics (ICOEI) (pp. 985-991). <https://doi.org/IEEE.10.1109/ICOEI53556.2022.9777116>
- Birjali, M., Kasri, M., & Beni-Hssane, A. (2021). A comprehensive survey on sentiment analysis: Approaches, challenges and trends. *Knowledge-Based Systems*, 226, 107134. <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2021.107134>
- Bobadilla, J., Ortega, F., Hernando, A., & Gutiérrez, A. (2013). Recommender systems survey. *Knowledge-based systems*, 46, 109-132. <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2013.03.012>
- Bothmer, K., & Schlippe, T. (2022). Investigating natural language processing techniques for a recommendation system to support employers, job seekers and educational institutions. In *Artificial Intelligence in Education. Posters and Late Breaking Results, Workshops and Tutorials, Industry and Innovation Tracks, Practitioners' and Doctoral Consortium: 23rd International Conference, AIED 2022, Durham, UK, July 27–31, 2022, Proceedings, Part II* (pp. 449-452). Cham: Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-11647-6\\_90](https://doi.org/10.1007/978-3-031-11647-6_90)
- Burke, R., Felfernig, A., & Göker, M. H. (2011). Recommender systems: An overview. *Ai Magazine*, 32(3), 13-18. <https://doi.org/10.1609/aimag.v32i3.2361>
- Çano, E., & Morisio, M. (2017). Hybrid recommender systems: A systematic literature review. *Intelligent data analysis*, 21(6), 1487-152. <https://doi.org/10.3233/IDA-163209>
- Çelik Ertuğrul, D., & Elçi, A. (2020). A survey on semanticized and personalized health recommender systems. *Expert Systems*, 37(4), e12519. <https://doi.org/10.1111/exsy.12519>
- Chaaya, G., Métails, E., Abdo, J. B., Chiky, R., Demerjian, J., & Barbar, K. (2017, December). Evaluating non-personalized single-heuristic active learning strategies for collaborative filtering recommender systems. In 2017 16th IEEE International Conference on Machine Learning and Applications (ICMLA) (pp. 593-600). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICMLA.2017.00-96>
- Chai, Y., Wang, C., Wen, Y., & Yuan, X. (2016). A Hadoop-Based Database Querying Approach for Non-expert Users. In *Asia-Pacific Web Conference* (pp. 449-453). Springer, Cham.
- Fang, D., Varshney, K. R., Wang, J., Ramamurthy, K. N., Mojsilovic, A., & Bauer, J. H. (2013). Quantifying and recommending expertise when new skills emerge. In 2013 IEEE 13th International Conference on Data Mining Workshops (pp. 672-679). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICDMW.2013.33>
- Fkih, F. (2022). Similarity measures for Collaborative Filtering-based Recommender Systems: Review and experimental comparison. *Journal of King Saud University-Computer and Information Sciences*, 34(9), 7645-7669. <https://doi.org/10.1016/j.jksuci.2021.09.014>
- Fusco, F., Vlachos, M., Vasileiadis, V., Wardatzky, K., & Schneider, J. (2019). RecoNet: An Interpretable Neural Architecture for Recommender Systems. In *IJCAI* (pp. 2343-2349). <https://doi.org/10.24963/ijcai.2019/325>
- Goldberg, D., Nichols, D., Oki, B.M. and Terry, D. (1992). Using Collaborative Filtering to Weave an Information Tapestry. *Communications of the ACM*, 35, 61-70. <http://dx.doi.org/10.1145/138859.138867>.
- González-Briones, A., Rivas, A., Chamoso, P., Casado-Vara, R., & Corchado, J. M. (2019). Case-based reasoning and agent-based job offer recommender system. In *International Joint Conference SOCO'18-CISIS'18-ICEUTE'18: San Sebastián, Spain, June 6-8, 2018 Proceedings 13* (pp. 21-33). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-94120-2\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-319-94120-2_3)
- Guan, Z., Yu, B., & Liu, Y. (2019). Recruitment and Recommendation System Based on Intelligent Computing. In *Proceedings of the 2019 5th International Conference on Computing and Data Engineering* (pp. 77-80). <https://doi.org/10.1145/3330530.3330532>
- Gunawardana, A., & Shani, G. (2009). A survey of accuracy evaluation metrics of recommendation tasks. *Journal of Machine Learning Research*, 10(12). <https://doi.org/10.1145/1577069.1755883>
- Gunawardana, A., Shani, G., & Yogev, S. (2022). Evaluating recommender systems. In *Recommender systems handbook* (pp. 547-601). Springer, New York, NY. [https://doi.org/10.1007/978-0-387-85820-3\\_8](https://doi.org/10.1007/978-0-387-85820-3_8)

- Isinkaye, F. O., Folajimi, Y. O., & Ojokoh, B. A. (2015). Recommendation systems: Principles, methods and evaluation. *Egyptian informatics journal*, 16(3), 261-273. <https://doi.org/10.1016/j.eij.2015.06.005>
- Kang, J. S., Shin, D. H., Baek, J. W., & Chung, K. (2019). Activity recommendation model using rank correlation for chronic stress management. *Applied Sciences*, 9(20), 4284. <https://doi.org/10.3390/app9204284>
- Kumar, R., Verma, B. K., & Rastogi, S. S. (2014). Social popularity based SVD++ recommender system. *International Journal of Computer Applications*, 87(14). <https://doi.org/10.5120/15279-4033>
- Kwieciński, R., Melniczak, G., & Górecki, T. (2023). Comparison of Real-Time and Batch Job Recommendations. *IEEE Access*, 11, 20553-20559. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3249356>
- Liang, F., & Wan, X. (2022). Job Matching Analysis Based on Text Mining and Multicriteria Decision-Making. *Mathematical Problems in Engineering*. <https://doi.org/10.1155/2022/9245876>
- Liu, P., Ma, J., Wang, Y., Ma, L., & Huang, S. (2016). A context-aware method for top-k recommendation in smart TV. In *Asia-Pacific Web Conference* (pp. 150-161). Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-45817-5\\_12](https://doi.org/10.1007/978-3-319-45817-5_12)
- Lu, J., Wu, D., Mao, M., Wang, W., & Zhang, G. (2015). Recommender system application developments: a survey. *Decision Support Systems*, 74, 12-32. <https://doi.org/10.1016/j.dss.2015.03.008>
- Lü, L., Medo, M., Yeung, C. H., Zhang, Y. C., Zhang, Z. K., & Zhou, T. (2012). Recommender systems. *Physics reports*, 519(1), 1-49. <https://doi.org/10.1016/j.physrep.2012.02.006>
- Luo, Y., Xu, B., Cai, H., & Bu, F. (2014). A Hybrid User Profile Model for Personalized Recommender System with Linked Open Data. In *2014 Enterprise Systems Conference* (pp. 243-248). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ES.2014.16>
- Malinowski, J., Keim, T., Wendt, O., & Weitzel, T. (2006). Matching people and jobs: A bilateral recommendation approach. In *Proceedings of the 39th Annual Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS'06)* (Vol. 6, pp. 137c-137c). IEEE. <https://doi.org/10.1109/HICSS.2006.266>
- Marlowe, A. N. (2021). Robot Recruiters: How Employers & Governments Must Confront the Discriminatory Effects of AI Hiring. *J. High Tech. L.*, 22, 274.
- Martin, F. J., Donaldson, J., Ashenfelter, A., Torrens, M., & Hangartner, R. (2011). The big promise of recommender systems. *AI Magazine*, 32(3), 19-27. <https://doi.org/10.1609/aimag.v32i3.2360>
- Martinez-Gil, J., Paoletti, A. L., & Pichler, M. (2020). A novel approach for learning how to automatically match job offers and candidate profiles. *Information Systems Frontiers*, 22(6), 1265-1274. <https://doi.org/10.1007/s10796-019-09929-7>
- Mathur, A., Juguru, S. K., & Eirinaki, M. (2019). A graph-based recommender system for food products. In *2019 First International Conference on Graph Computing (GC)* (pp. 83-87). IEEE <https://doi.org/10.1109/GC46384.2019.00020>
- McFee, B., & Lanckriet, G. R. (2010). Metric learning to rank. In *Proceedings of the 27th international conference on machine learning (ICML-10)* (pp. 775-782).
- Mihalcea, R., Corley, C., & Strapparava, C. (2006). Corpus-based and knowledge-based measures of text semantic similarity. In *Aaai* (Vol. 6, No. 2006, pp. 775-780).
- Mohamed, M. H., Khafagy, M. H., & Ibrahim, M. H. (2019). Recommender systems challenges and solutions survey. In *2019 international conference on innovative trends in computer engineering (ITCE)* (pp. 149-155). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ITCE.2019.8646645>
- Negroponte, N. (1970). *The architecture machine: toward a more human environment*. The MIT Press. <https://doi.org/10.7551/mitpress/8269.001.0001>
- Okfalisa, Siburian, R., Vitriani, Y., Rusnedy, H., Saktioto, & Yola, M. (2021). Job Training Recommendation System: Integrated Fuzzy AHP and TOPSIS Approach. In *International Conference of Reliable Information and Communication Technology* (pp. 84-94). Cham: Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-98741-1\\_8](https://doi.org/10.1007/978-3-030-98741-1_8)
- Painsky, A., & Wornell, G. (2018). On the universality of the logistic loss function. In *2018 IEEE International Symposium on Information Theory (ISIT)* (pp. 936-940). IEEE. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1805.03804>

- Palomares, I., Porcel, C., Pizzato, L., Guy, I., & Herrera-Viedma, E. (2021). Reciprocal Recommender Systems: Analysis of state-of-art literature, challenges and opportunities towards social recommendation. *Information Fusion*, 69, 103-127. <https://doi.org/10.1016/j.inffus.2020.12.001>
- Pan, Y., Zhang, Y., & Zhang, R. (2016). Combo-Recommendation Based on Potential Relevance of Items. In *Asia-Pacific Web Conference* (pp. 505-517). Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-45817-5\\_55](https://doi.org/10.1007/978-3-319-45817-5_55)
- Park, D. H., Kim, H. K., Choi, I. Y., & Kim, J. K. (2012). A literature review and classification of recommender systems research. *Expert systems with applications*, 39(11), 10059-10072. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2012.02.038>
- Poriya, A., Bhagat, T., Patel, N., & Sharma, R. (2014). Non-personalized recommender systems and user-based collaborative recommender systems. *Int. J. Appl. Inf. Sys*, 6(9), 22-27. <https://doi.org/10.5120/ijais14-451122>
- Portugal, I., Alencar, P., & Cowan, D. (2018). The use of machine learning algorithms in recommender systems: A systematic review. *Expert Systems with Applications*, 97, 205-227. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2017.12.020>
- Prafajar, K. N., Vallyan, H., Candradewi, N. L. P. A., Edbert, I. S., & Suhartono, D. (2022). Multiclass job recommendation system in the IT field between classification and prediction method. In *2022 International Conference on Green Energy, Computing and Sustainable Technology (GECOST)* (pp. 181-186). IEEE. <https://doi.org/10.1109/GECOST55694.2022.10010659>
- Rimitha, S. R., Abburu, V., Kiranmai, A., Marimuthu, C., & Chandrasekaran, K. (2019). Improving Job Recommendation Using Ontological Modeling and User Profiles. In *2019 Fifteenth Int. Conference on Information Processing (ICINPRO)* (pp. 1-8). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICInPro47689.2019.9092271>
- Salton, G., and Buckley, C. (1997). Term weighting approaches in automatic text retrieval. In *Readings in Information Retrieval*. San Francisco, CA: Morgan Kaufmann Publishers. [https://doi.org/10.1016/0306-4573\(88\)90021-0](https://doi.org/10.1016/0306-4573(88)90021-0)
- Salton, G., and Lesk, M. (1971). Computer evaluation of indexing and text processing. Prentice Hall, Ing. Englewood Cliffs, New Jersey. 143–180. <https://doi.org/10.1145/321439.321441>
- Salton, G., Singhal, A., Mitra, M., & Buckley, C. (1997). Automatic text structuring and summarization. *Information processing & management*, 33(2), 193-207. [https://doi.org/10.1016/S0306-4573\(96\)00062-3](https://doi.org/10.1016/S0306-4573(96)00062-3)
- Schröder, G., Thiele, M., & Lehner, W. (2011). Setting goals and choosing metrics for recommender system evaluations. In *UCERSTI2 workshop at the 5th ACM conference on recommender systems*, Chicago, USA (Vol. 23, p. 53). <https://doi.org/10.1007/s41870-018-0202-4>
- Selvi, C., & Sivasankar, E. (2018). A novel singularity based improved tanimoto similarity measure for effective recommendation using collaborative filtering. In *2018 8th International Conference on Cloud Computing, Data Science & Engineering (Confluence)* (pp. 256-262). IEEE. <https://doi.org/10.1109/CONFLUENCE.2018.8442697>
- Shakirova, E. (2017). Collaborative filtering for music recommender system. In *2017 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIconRus)* (pp. 548-550). IEEE. <https://doi.org/10.1109/EICONRUS.2017.7910613>
- Shani, G., & Gunawardana, A. (2011). Evaluating recommendation systems. In *Recommender systems handbook* (pp. 257-297). Springer, Boston, MA. [https://doi.org/10.1007/978-0-387-85820-3\\_8](https://doi.org/10.1007/978-0-387-85820-3_8)
- Shervin Minaee. (2020). 20 Popular Machine Learning Metrics. Part 2: Ranking, & Statistical Metrics, Web Site: <https://towardsdatascience.com/20-popular-machine-learning-metrics-part-2-ranking-statistical-metrics-22c3e5a937b6>, LVD: 13-01-2023.
- Silveira, T., Zhang, M., Lin, X., Liu, Y., & Ma, S. (2019). How good your recommender system is? A survey on evaluations in recommendation. *International Journal of Machine Learning and Cybernetics*, 10(5), 813-831. <https://doi.org/10.1007/s13042-017-0762-9>
- Spearman, C. (1961). The proof and measurement of association between two things, *The American Journal of Psychology* 15 (1904) 72–101. <https://doi.org/10.1037/11491-005>
- 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/10.48550/arXiv.2104.01966>

- Vijaysinh Lendave. (2021). How to Measure the Success of a Recommendation System?, in Developers Corner, October 24, , Web address: <https://analyticsindiamag.com/how-to-measure-the-success-of-a-recommendation-system/>, LVD: 13-01-2023. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e15108>
- Vrontis, D., Christofi, M., Pereira, V., Tarba, S., Makrides, A., & Trichina, E. (2022). Artificial intelligence, robotics, advanced technologies and human resource management: a systematic review. *The International Journal of Human Resource Management*, 33(6), 1237-1266. <https://doi.org/10.1080/09585192.2020.1871398>
- Wenxing, H., Yiwei, C., Jianwei, Q., & Yin, H. (2015). iHR+: A mobile reciprocal job recommender system. In 2015 10th International Conference on Computer Science & Education (ICCSE) (pp. 492-495). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICCSE.2015.7250296>
- Wu, S., Sun, F., Zhang, W., Xie, X., & Cui, B. (2022). Graph neural networks in recommender systems: a survey. *ACM Computing Surveys*, 55(5), 1-37. <https://doi.org/10.1145/3535101>
- Xin, X., Wang, D., Ding, Y., & Lini, C. (2016). FHSM: factored hybrid similarity methods for top-n recommender systems. In *Asia-Pacific Web Conference* (pp. 98-110). Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-45817-5\\_8](https://doi.org/10.1007/978-3-319-45817-5_8)
- Yao, Y. Y. (1995). Measuring retrieval effectiveness based on user preference of documents. *Journal of the American Society for Information science*, 46(2), 133-145. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-4571\(199503\)46:2<133::AID-ASI6>3.0.CO;2-Z](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-4571(199503)46:2<133::AID-ASI6>3.0.CO;2-Z)
- Yi, P., Yang, C., Li, C., & Zhang, Y. (2016). A job recommendation method optimized by position descriptions and resume information. In 2016 IEEE Advanced Information Management, Communicates, Electronic and Automation Control Conference (IMCEC) (pp. 761-764). IEEE. <https://doi.org/10.1109/IMCEC.2016.7867312>
- Yu, H., Liu, C., & Zhang, F. (2011). Reciprocal recommendation algorithm for the field of recruitment. *Journal of Information & Computational Science*, 8(16), 4061-4068.
- Zhang, B., & Feng, Y. (2016). Improving temporal recommendation accuracy and diversity via long and short-term preference transfer and fusion models. In *Asia-Pacific Web Conference* (pp. 174-185). Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-45817-5\\_14](https://doi.org/10.1007/978-3-319-45817-5_14)
- Zhao, T., Wuyu, C., & Zhixiang, C. (2021). Summer Job Selection Model Based on Job Matching and Comprehensive Evaluation Algorithm. In 2021 2nd International Conference on Artificial Intelligence and Information Systems (pp. 1-5). <https://doi.org/10.1145/3469213.3470394>





# Kahramanmaraş Sütçü İmam University Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 03.01.2024  
Kabul Tarihi : 28.03.2024

Received Date : 03.01.2024  
Accepted Date : 28.03.2024

## MULTILEVEL THRESHOLDING FOR BRAIN MR IMAGE SEGMENTATION USING SWARM-BASED OPTIMIZATION ALGORITHMS

### SÜRÜ ZEKASI TEMELLİ OPTİMİZASYON ALGORİTMALARI KULLANILARAK ÇOK SEVİYELİ EŞİKLEME İLE BEYİN MR GÖRÜNTÜLERİNİN BÖLÜTLENMESİ

Ahmet Nusret TOPRAK<sup>1\*</sup> (ORCID: 0000-0003-4841-9508)

Ömür ŞAHİN<sup>1</sup> (ORCID: 0000-0003-1213-7445)

Rifat KURBAN<sup>2</sup> (ORCID: 0000-0002-0277-2210)

<sup>1</sup> Erciyes Üniversitesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Kayseri, Türkiye

<sup>2</sup> Abdullah Gül Üniversitesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Kayseri, Türkiye

\*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Ahmet Nusret TOPRAK, antoprak@erciyes.edu.tr

#### ABSTRACT

Image segmentation, the process of dividing an image into various sets of pixels called segments, is an essential technique in image processing. Image segmentation reduces the complexity of the image and makes it easier to analyze by dividing the image into segments. One of the simplest yet powerful ways of image segmentation is multilevel thresholding, in which pixels are segmented into multiple regions according to their intensities. This study aims to explore and compare the performance of the well-known swarm-based optimization algorithms on the multilevel thresholding-based image segmentation task using brain MR images. Seven swarm-based optimization algorithms: Particle Swarm Optimization (PSO), Artificial Bee Colony (ABC), Gray Wolf Optimizer (GWO), Moth-Flame Optimization (MFO), Ant Lion Optimization (ALO), Whale Optimization (WOA), and Jellyfish Search Optimizer (JS) algorithms are compared by applying to brain MR images to determine threshold levels. In the experiments carried out with mentioned algorithms, minimum cross-entropy, and between-class variance objective functions were employed. Extensive experiments show that JS, ABC, and PSO algorithms outperform others.

**Keywords:** Image segmentation, multilevel thresholding, swarm-based optimization, minimum cross-entropy, between-class variance.

#### ÖZET

Bir görüntüyü bölüt adı verilen çeşitli piksel kümelerine ayırma işlemi olan görüntü bölütleme, görüntü işlemede önemli bir tekniktir. Görüntü bölütleme, görüntünün karmaşıklığını azaltmakta ve görüntüyü bölütlere ayırarak analiz edilmesini kolaylaştırmaktadır. Görüntü bölütlemenin en basit ancak etkin yollarından biri, piksellerin değerlerine göre birden çok bölgeye ayrıldığı çok düzeyli eşiklemedir. Bu çalışma, yaygın kullanılan sürü tabanlı optimizasyon algoritmalarının beyin MR görüntülerinde çok düzeyli eşikleme tabanlı görüntü bölütleme performansını araştırmayı ve karşılaştırmayı amaçlamaktadır. Yedi sürü zekâsı temelli optimizasyon algoritması: Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO), Yapay Arı Kolonisi (ABC), Gri Kurt Optimize Edici (GWO), Güve Alevi Optimizasyonu (MFO), Karınca Aslanı Optimizasyonu (ALO), Balina Optimizasyonu (WOA) ve Denizanası Arama Optimizasyon (JS) eşik seviyelerini belirlemek üzere beyin MR görüntülerine uygulanarak karşılaştırılmaktadır. Bahsi geçen algoritmalar ile yapılan deneylerde minimum çapraz entropi ve sınıflar arası varyans amaç fonksiyonları kullanılmıştır. Kapsamlı deneyler, JS, ABC ve PSO algoritmalarının daha iyi performans sergilediğini göstermektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Görüntü bölütleme, çok seviyeli eşikleme, sürü zekâsı tabanlı optimizasyon, minimum çapraz entropi, sınıflar arası varyans.

## INTRODUCTION

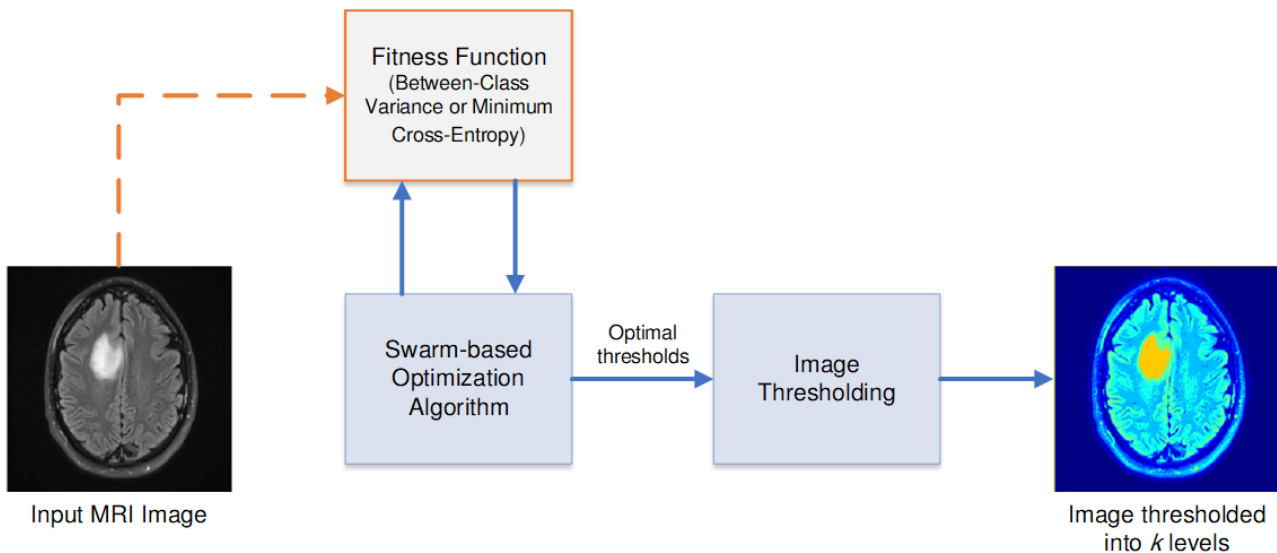
Image segmentation is the process of dividing an image into various sets of pixels called segments based on the characteristics of the pixels. In other words, the image segmentation task can be defined as assigning a label to each pixel in the image so that pixels with certain common characteristics share the same label (Kurban et al., 2021). By dividing an image into segments, the complexity of the image is reduced, and analyzing it becomes easier. Therefore, image segmentation plays an essential role in many areas such as medical diagnosis, object detection, object recognition, remote sensing, and video surveillance (Farshi & Ardabili, 2021).

The proper segmentation of an image is a fundamental and challenging task in the areas mentioned above. In recent years, a considerable amount of literature has been published on image segmentation. These studies can be broadly divided into five categories: thresholding-based methods, clustering-based methods, region-based methods, edge-based methods, and artificial neural network-based methods (Sezgin & Sankur, 2004). Clustering-based image segmentation methods aim to group pixels with similar features like intensity, color, or texture into clusters together and represent them as a single entity. Similarly, region-based segmentation methods aim to obtain segments by dividing the image into sets of pixels with similar properties. These methods are classified into two groups region growing and region splitting. Region-growing methods start with selecting an arbitrary seed pixel in the image and then comparing it with neighboring pixels. Next, similar neighboring pixels are added to the current segment until it cannot grow further. Unlike region-growing methods, region-splitting methods consider the whole image as the region of interest. Then, the image is iteratively divided into regions that share similar characteristics. Edge-based image segmentation techniques aim to detect edges that represent the boundaries of the regions in an image. Edge detection is the process of detecting changes or discontinuities in intensity in an image. Region boundaries and edges in an image are closely related, as region boundaries often have a sharp change in intensity.

One of the simplest yet powerful ways to segment images is thresholding, in which pixels are segmented based on their intensity values. Thresholding methods are divided into two groups based on the number of threshold values: finding a single threshold value (bi-level) or multiple thresholds (multilevel). Bi-level thresholding separates an image into basically two parts; the foreground and background, while multilevel thresholding separates an image into multiple parts according to their intensities (Karakoyun, 2023).

Both bi-level and multilevel thresholding techniques are classified into parametric and nonparametric approaches (Hammouche et al., 2010). Parametric techniques assume that the gray-level distribution of each class is based on a particular distribution, such as a normal distribution. The distribution parameters that best fit the given histogram data are estimated using the least-squares method. Thus, it becomes a nonlinear optimization problem whose solution is more time-consuming and computationally expensive. On the other hand, nonparametric techniques determine the thresholds that optimally divide an image into regions in terms of some statistical criterion or measure of entropy. Compared to parametric methods, nonparametric techniques are more computationally efficient and easier to implement. One of the most well-known statistical criteria-based thresholding algorithms is Otsu's method (Otsu, 1979), in which the threshold is obtained by minimizing within-class variance, or equivalently, by maximizing between-class variance. Some of the most recognized entropy-based thresholding algorithms include Kapur Entropy (Kapur et al., 1985), Tsallis Entropy (Albuquerque et al., 2004), Renyi Entropy (Sahoo et al., 1997), determine the optimal threshold value by maximizing the entropy between classes.

Investigating the optimal threshold values is a challenging task within multilevel thresholding-based segmentation. Since the classical methods rely on extensive search, they can only be effective for two-level thresholding and become computationally costly for multilevel thresholding. However, as powerful search algorithms, metaheuristic optimization algorithms are widely used for multilevel thresholding-based image segmentation applications and offer successful performance (Dhal et al., 2020). For example, the Genetic Algorithm (GA) and modified versions have been applied many times to the multilevel thresholding problem (Hammouche et al., 2008). In addition, Particle Swarm Optimization (PSO) and its variants like fractional-order Darwinian PSO (Ghamisi et al., 2014) and modified PSO (Liu et al., 2015) were also used in the multilevel thresholding field. Cuevas et al. applied the Differential Evolution algorithm to the multilevel thresholding-based segmentation field (Cuevas et al., 2010). The Artificial Bee Colony (ABC) algorithm (Akay, 2013) and its modified versions (Gao et al., 2018) have also been employed and obtained notable performance.



**Figure 1.** The Schematic Diagram of The Brain MRI Segmentation Scheme Using Swarm-Based Optimization Algorithms.

Bakhshali and Shamsi proposed a Bacterial Foraging Optimization (BFO) algorithm-based multilevel thresholding method to segment color lip images (Bakhshali & Shamsi, 2014). Brajevic and Tuba applied Cuckoo Search (CS) and Firefly Algorithm (FA) algorithms to the multilevel thresholding-based image segmentation problem in another work (Brajevic & Tuba, 2014). Ye et al. used a Bat algorithm and fuzzy entropy-based multilevel thresholding method to segment gray-level and infrared images (Ye et al., 2015). El Aziz et al. introduced a model that makes use of the Whale optimization algorithm and Moth-flame optimization algorithms for multilevel thresholding (Aziz et al., 2017). Furthermore, Harmony Search (Oliva et al., 2013), Elephant Herding (Tuba et al., 2017), and Harris Hawk (Rodríguez-Esparza et al., 2020) algorithms have also been used for solving the multilevel image thresholding problem. In another study, Sharma et al. utilized an improved firefly algorithm in multi-level thresholding-based image segmentation (Sharma et al., 2022). Gharehchopogh and Ibrkci proposed a method that uses an African vultures optimization algorithm for a multi-level thresholding determination problem (Gharehchopogh & Ibrkci, 2024). Finally, Guo et al. employed Salp Swarm algorithm for multi-level thresholding on breast pathology images (Guo et al., 2024). In an early work, Kurban et al. conducted a comprehensive study on multilevel thresholding-based color image segmentation using several swarm-based and evolutionary-based optimization algorithms (Kurban et al., 2014). The results of the study revealed that swarm-based algorithms are more accurate and robust than evolutionary algorithms.

In recent decades, there has been an increasing amount of literature on multilevel thresholding-based medical image segmentation. Most of them have been carried out on magnetic resonance (MR) images. For example, Manikandan et al. proposed a Real code Genetic Algorithm based multilevel thresholding approach using Kapur entropy to segment MR brain images (Manikandan et al., 2014). In another study, Kaur et al. presented a multilevel thresholding-based brain tumor MR segmentation method making use of the PSO algorithm and 2D local cross-entropy as an objective criterion (Kaur et al., 2016). Oliva et al. proposed a multilevel thresholding method based on Crow Search Algorithm and Minimum Cross entropy to segment brain MR images (Oliva et al., 2017). Another multilevel thresholding study on brain MR images based on the Adaptive Wind Driven Optimization algorithm was presented by Kotte et al. (Kotte et al., 2018). Tarkhaneh and Shen developed an algorithm called Adaptive Differential Evolution with Lévy Distribution (ALDE) to segment brain MR images and achieve better results than the DE algorithm (Tarkhaneh & Shen, 2019). Jena et al. proposed an approach based on the Attacking Manta-Ray Foraging Optimization algorithm and maximum 3D Tsallis entropy for multilevel thresholding of brain MR images (Jena et al., 2021).

This study aims to explore and compare the performance of the well-known swarm intelligence-based optimization algorithms on the multilevel thresholding-based image segmentation task using a brain MR image dataset. Swarm intelligence-based optimization algorithms are typically composed of individuals interacting with each other and with their environment. They are inspired by the collective behavior of self-organized, decentralized systems (Aslan et al., 2023). The compared swarm-based optimization algorithms include PSO algorithm (Kennedy & Eberhart, 1995),

ABC algorithm (Karaboga & Basturk, 2007), Gray Wolf Optimizer (GWO) algorithm (Mirjalili et al., 2014), Moth-Flame Optimization (MFO) algorithm (Mirjalili, 2015a), Ant Lion Optimization (ALO) algorithm (Mirjalili, 2015b), Whale Optimization algorithm (WOA) (Mirjalili & Lewis, 2016), and Jellyfish Search (JS) Optimizer algorithm (Chou & Truong, 2021).

The contribution of this paper can be summarized as follows:

- We provide a comparison of swarm-based optimization algorithms for the multilevel thresholding problem.
- We compare swarm-based optimization algorithms by using statistical measures: the Mann-Whitney U test and Vargha–Delaney effect size on brain MR image segmentation.

This paper has been divided into five sections, including this introductory section. The next section formulates the multilevel thresholding problem and introduces the minimum cross-entropy and the between-class variance functions. A brief overview of the swarm-based optimization algorithms is provided in the third section. The fourth section gives experimental results and comparisons over a set of brain MR images. Finally, the conclusion section provides a summary and critique of the findings.

## MULTILEVEL IMAGE THRESHOLDING

### *Problem Definition*

Thresholding is dividing an image  $I$  into segments based on the value of a threshold  $t$ . Bi-level thresholding divides an image into two segments. Accordingly, the pixels with a gray level greater than a particular threshold value ( $t$ ) are classified as foreground, and those with less than the threshold are classified as background. Thus, based on the threshold value, bi-level thresholding converts a gray image into a binary image (Hammouche et al., 2010). Let the  $L$  be the number of gray levels; the following equation can express bi-level thresholding:

$$S(x, y) = \begin{cases} 0, & 0 \leq I(x, y) < t \\ 1, & t \leq I(x, y) \leq L \end{cases} \quad (1)$$

where  $x, y$  are the pixel coordinates and  $S$  is the output image. Multilevel thresholding divides an image into multiple segments according to their gray levels by using more than one threshold value as given in the following equation:

$$S(x, y) = \begin{cases} 0, & 0 \leq I(x, y) < t_1 \\ 1, & t_1 \leq I(x, y) < t_2 \\ \vdots & \\ n, & t_n \leq I(x, y) \leq L \end{cases} \quad (2)$$

where  $t_i$  is the  $i$ th threshold value and  $n$  is the number of thresholds.

Calculating a single threshold value for bi-level thresholding can be done computationally efficiently. However, calculating multiple threshold values for multilevel thresholding requires high computational efforts. Notably, the problem becomes more challenging as the number of thresholds increases. The nonparametric techniques determine the thresholds that optimally divide an image into regions in terms of a particular statistical criterion or measure of entropy (Hammouche et al., 2010).

The use of Between-Class Variance (Otsu, 1979) and Minimum Cross-Entropy (Li & Lee, 1993) as two different objective functions in multi-threshold imaging problems is widespread in the literature. Between-Class Variance aims for a clear separation between classes within the image, while Minimum Cross-Entropy attempts to maximize the similarity of the thresholded image to the original. The choice of these methods depends on the requirements and priorities of the application. For example, in medical imaging, where preserving essential anatomical structures is critical, the Minimum Cross-Entropy method may be preferred; however, for a distinct separation of specific features (such as tumors), the Between-Class Variance method is more suitable. Therefore, two of the literature's most widely used functions, minimum cross-entropy and between-class variance, are employed in this study.

### *Minimum Cross-Entropy*

Entropy-based thresholding techniques offer an effective way of segmenting images using the probability distribution of the image histogram. The minimum cross-entropy method is one of the well-known automatic thresholding techniques that select the optimum thresholds based on the cross-entropy of segmented classes (Li & Lee, 1993).

Let  $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$  and  $Q = \{q_1, q_2, \dots, q_n\}$  be two probability distributions, the cross entropy measures the distance between two distributions as follows (Li & Lee, 1993):

$$D(P, Q) = \sum_{i=1}^n p_i \log \frac{p_i}{q_i} \quad (3)$$

The minimum cross-entropy method selects the optimum threshold by minimizing the cross-entropy between the original image and the thresholded image. Let  $I$  be the original image, and then the thresholded image  $S$  is obtained as follows:

$$S(x, y) = \begin{cases} \mu_0, & 0 \leq I(x, y) < t \\ \mu_1, & t \leq I(x, y) \leq L \end{cases} \quad (4)$$

where  $t$  is threshold value,  $L$  is the maximum possible pixel value of the  $I$  and  $\mu_0$  and  $\mu_1$  are:

$$\mu_0 = \frac{\sum_{i=1}^{t-1} ih_i}{\sum_{i=1}^{t-1} h_i}, \quad \mu_1 = \frac{\sum_{i=t}^L ih_i}{\sum_{i=t}^L h_i} \quad (5)$$

The cross-entropy is then calculated by the following equation:

$$\eta(t) = \sum_{i=1}^{t-1} ih_i \log \left( \frac{i}{\mu_0(t)} \right) + \sum_{i=t}^L ih_i \log \left( \frac{i}{\mu_1(t)} \right) \quad (6)$$

where  $h_i$  is the corresponding histogram. The optimal threshold can be obtained by minimizing the cross-entropy:

$$t_{opt} = \arg \min(\eta(t)) \quad (7)$$

### **Between-Class Variance**

Another nonparametric thresholding-based segmentation approach is the between-class variance-based technique. The main idea here is to divide an image histogram into two classes with a threshold obtained by minimizing within-class variance or equivalently by maximizing between-class variance. Otsu defined the between-class variance as given in the following equation (Otsu, 1979):

$$\sigma_0 = \omega_0(\mu_0 - \mu_t)^2, \mu_0 = \sum_{i=0}^{t-1} \frac{ip_i}{\omega_0}, \sigma_1 = \omega_1(\mu_1 - \mu_t)^2, \mu_1 = \sum_{i=t}^{L-1} \frac{ip_i}{\omega_1} \quad (8)$$

The optimal threshold can be computed simply by:

$$t_{opt} = \arg \max(\sigma_0 + \sigma_1) \quad (9)$$

Between-class variance-based technique can be extended for multilevel thresholding as given by the following equation:

$$\begin{aligned} \sigma_0 &= \omega_0(\mu_0 - \mu_t)^2, & \mu_0 &= \sum_{i=0}^{t-1} \frac{ip_i}{\omega_0} \\ \sigma_j &= \omega_j(\mu_j - \mu_t)^2, & \mu_j &= \sum_{i=t_j}^{t_{j+1}-1} \frac{ip_i}{\omega_j} \\ \sigma_n &= \omega_n(\mu_n - \mu_t)^2, & \mu_n &= \sum_{i=t_n}^{L-1} \frac{ip_i}{\omega_n} \end{aligned} \quad (10)$$

The optimal thresholds can then be computed by maximizing the following objective function:

$$\vec{t}_{opt} = \arg \max(\sum_{i=0}^n \sigma_i) \quad (11)$$

## **SWARM-BASED OPTIMIZATION TECHNIQUES**

### **Particle Swarm Optimization**

PSO is a population-based meta-heuristic algorithm that was proposed by Kennedy and Eberhart in 1995 to solve continuous and discrete optimization problems (Kennedy & Eberhart, 1995). To find the global optimum, it models the collective behavior of bird flocking. Each solution in the PSO algorithm is represented by agents called particles. Each particle searches for better positions in the search space of the optimization problem by changing its velocity regarding its individual experience and social experience of the swarm.

The PSO algorithm starts by generating random positions of the particles. The velocity of each particle is calculated by considering the current position of the particle, the best position ever found by itself, and the best position ever found by any particle in the neighborhood of the particle as given in the following equation:

$$\vec{v}(t+1) = \omega \vec{v}(t) + \phi_1 \text{rand}(0,1)(\vec{p}(t) - \vec{x}(t)) + \phi_2 \text{rand}(0,1)(\vec{g}(t) - \vec{x}(t)) \quad (12)$$

The velocities and positions of the particles are iteratively updated until a stopping criterion is met.

### **Artificial Bee Colony**

The ABC is a population-based meta-heuristic algorithm that was proposed by Karaboga in 2005 to solve numerical problems (Karaboga, 2005). It is inspired by the intelligent foraging behavior of honeybee colonies. In the ABC algorithm, honeybee colonies are separated into three types of bees: employed, onlooker, and scout. Employed bees are responsible for exploiting the food sources already discovered and sharing information about these food sources' location and nectar quality with the onlooker bees. According to the information given by the worker bees, onlooker bees prefer a food source and try to find richer food sources within the neighborhood of the preferred food source. On the other hand, scout bees leave the hive to search for undiscovered rich food sources randomly.

The ABC algorithm starts the search process by generating random food sources. Then, employed bees search for new food sources locally having more nectar in the neighborhood of the food source in their memory by using the following equation:

$$x'_{ij} = x_{ij} + \phi_{ij}(x_{ij} - x_{kj}) \quad (13)$$

The employed bees share information about food sources with onlooker bees that are waiting in the hive, and onlooker bees then select their food source based on this information. An onlooker bee selects a food source based on the probability value computed using the fitness values provided by the employer bees as given in Eq. 14:

$$p_i = \frac{\text{fitness}_i}{\sum_{i=1}^{CS} \text{fitness}_i} \quad (14)$$

The employed bee, whose solution cannot be improved during a predetermined number of trials, called the limit, becomes a scout, and its solution is abandoned. Then, the new scout bee starts looking for new random solutions.

### **Gray Wolf Optimizer**

The GWO, which Mirjalili proposed in 2014, is a swarm-based meta-heuristic algorithm inspired by gray wolves' social hierarchy and hunting strategy (Mirjalili et al., 2014). Gray wolves live in highly organized swarms, with numbers in the range of 5-12. There is a leadership team in the mathematical model to manage the swarm, and this team consists of 3 different managers. This leader team is divided into three different groups: alpha ( $\alpha$ ), beta ( $\beta$ ), and delta ( $\delta$ ), respectively. The strongest members among them are alpha. Members outside the leading team are called omega ( $\omega$ ).

The hunting behavior of gray wolves comprises four stages: social hierarchy, encircling prey, hunting, and attacking. To ensure social hierarchy, while the three best solutions are ranked and assigned as  $\alpha$ ,  $\beta$ , and  $\delta$ , respectively, the remaining solutions become  $\omega$ . Thus, the whole search process is carried out with these four different types of gray wolves. Gray wolves encircle during the hunt, and this behavior is modeled as the following equation:

$$\begin{aligned} \vec{D} &= |C \cdot \vec{X}_p(t) - \vec{X}(t)| \\ \vec{X}(t+1) &= \vec{X}_p(t) - A \cdot \vec{D} \end{aligned} \quad (15)$$

Herein, while  $\vec{X}_p$  is the position vector of prey,  $\vec{X}$  is the position vector of a gray wolf. The current iteration of the search is represented by  $t$ .  $A$  and  $C$ , which are calculated in the following equations, are the coefficients:

$$\begin{aligned} A &= 2a \cdot r_1 - a \\ C &= 2r_2 \end{aligned} \quad (16)$$

where  $r_1$  and  $r_2$ , which are selected in the range  $[0, 1]$ , are random numbers, the value of  $a$  is linearly decreased from 2 to 0 during the search. The hunting phase in the GWO is guided by the  $\alpha$ ,  $\beta$ , and  $\delta$  since they have better information than  $\omega$  wolves. This phase is modelled as in Eq. 17 and 18:

$$\begin{aligned} \vec{D}_\alpha &= |C_1 \cdot \vec{X}_\alpha - \vec{X}| \\ \vec{D}_\beta &= |C_1 \cdot \vec{X}_\beta - \vec{X}| \\ \vec{D}_\delta &= |C_1 \cdot \vec{X}_\delta - \vec{X}| \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} \vec{X}_1 &= \vec{X}_\alpha - A_1 \cdot \vec{D}_\alpha \\ \vec{X}_2 &= \vec{X}_\beta - A_2 \cdot \vec{D}_\beta \\ \vec{X}_3 &= \vec{X}_\delta - A_3 \cdot \vec{D}_\delta \end{aligned} \quad (18)$$

where  $\vec{X}_\alpha$ ,  $\vec{X}_\beta$  and  $\vec{X}_\delta$  are the position vectors respectively,  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $A_3$ ,  $C_1$ ,  $C_2$ , and  $C_3$  are the coefficients. The coefficient values are calculated as in the given Eq. 16. The positions are then updated as in the following equation:

$$\vec{X}(t + 1) = (\vec{X}_1 + \vec{X}_2 + \vec{X}_3) / 3 \quad (19)$$

In the GWO, exploration and exploitation are balanced with the value of  $A$ . If  $A < 1$ , exploitation is performed, otherwise exploration is applied. This process is modeled by linearly decreasing the value of  $a$  from 2 to 0 during the search. Thus, the prey will stop, and the gray wolves will attack to complete the hunting phase.

### Moth-Flame Optimization Algorithm

The MFO (Mirjalili, 2015a), which modeled the natural behavior of moths, is a swarm-based meta-heuristic algorithm that was proposed by Mirjalili in 2015. MFO starts by generating a random population of moths within the search space. Then the fitness value of each moth is calculated, and the best position is tagged as flame. After that, the moths' new positions are calculated according to the spiral movement function given in the following equation:

$$M_i = D_i e^{b\theta} \cos(2\pi\theta) + F_j \quad (20)$$

where  $D_i$  indicates the space between the  $i$ th moth and  $j$ th flame,  $b$  is a constant which define the shape of the logarithmic spiral, and  $t$ , is selected in the range  $[-1, 1]$ , is a random number.

While the MFO focuses on exploration at the beginning of the search, it reduces the number of flames to make exploitation more intense later in the search process. Decreasing the number of flames is applied according to the following equation:

$$FlameNumber = round\left(N - t \cdot \frac{N-1}{T}\right) \quad (21)$$

where  $N$  indicates the maximum number of flames,  $t$ , and  $T$  are the current and maximum number of iterations, respectively.

### Ant Lion Optimization Algorithm

The ALO is a meta-heuristic algorithm that simulates the hunting behavior of antlions (Mirjalili, 2015b). The hunting mechanism of the antlions consists of five main steps, including the random walk of ants, setting traps, entrapment of ants in traps, catching prey, and re-setting traps. The algorithm starts with initializing the population of ants in a search space. Then, the position of each ant is updated utilizing a random walk model as follows:

$$x(t) = [0, cumsum(2r(t_1) - 1), cumsum(2r(t_2) - 1), \dots, cumsum(2r(t_n) - 1)] \quad (22)$$

where  $t$  is the iteration index and  $r$  is a random number that can take only the values 0 or 1.

ALO, as a population-based algorithm, employs multiple ants and antlions and stores them in position matrices. In addition, a fitness function is utilized to evaluate each ant and ant lion; and the fitness values are also stored in matrices. In the ALO, ants move within the search space using random walks. The position of the ants is normalized using Eq. 23 to keep the random walks within the search space:

$$X_i^t = \frac{(x_i^t - a_i)(b_i - c_i^t)}{(d_i^t - a_i)} + c_i \quad (23)$$

where  $a_i$  and  $b_i$  are the minimum and maximum random walks of the  $i$ th variable, respectively.  $c_i^t$  and  $d_i^t$  are the minimum and maximum values of the  $i$ th variable at  $t$ th iteration. Traps of the antlions affect the ants, and this assumption is modeled as follows:

$$\begin{aligned} c_i^t &= \text{Antlion}_j^t + c^t \\ d_i^t &= \text{Antlion}_j^t + d^t \end{aligned} \quad (24)$$

where  $c^t$  and  $d^t$  are the minimum and maximum values of all variables at the  $t$ th iteration,  $c_i^t$  and  $d_i^t$  are the minimum and maximum values of all variables for  $i$ th ant.  $\text{Antlion}_j^t$  indicates the position of  $j$ th antlion at the  $t$ th iteration.

In the ALO, two different mechanisms affect the ants. In each iteration, the best antlion so far ( $R_B^t$ ) is saved and made to affect all ants. Also, another antlion ( $R_A^t$ ) is selected by using a roulette wheel. Therefore, each ant randomly walks to the best antlion so far, and a selected antlion by the roulette wheel simultaneously as follows:

$$\text{Ant}_i^t = \frac{R_A^t + R_B^t}{2} \quad (25)$$

### Whale Optimization Algorithm

The WOA is a population-based meta-heuristic algorithm inspired by the bubble-net hunting strategy of humpback whales (Mirjalili & Lewis, 2016). Similar to other population-based algorithms, WOA starts by generating a set of random solutions. It then improves this set over iterations until a predefined criterion is met.

The intelligent foraging behavior of the humpback whales is the main inspiration of the WOA. Humpback whales corral their prey by producing a spiral bubble net. WOA also simulates the encircling behavior of humpback whales. Humpback whales circle their prey to start hunting them using the bubble net. This mechanism is modeled as follows:

$$X(t+1) = \begin{cases} X^*(t) - AD & p < 0.5 \\ D' e^{bl} \cos(2\pi t) + X^*(t) & p \geq 0.5 \end{cases} \quad (26)$$

where  $p$  is a random number in the range of 0 to 1,  $D' = |X^*(t) - X(t)|$  is the distance between  $i$ th whale and the prey,  $b$  is a constant that describes the shape of the spiral,  $l$  is a random number in the range of -1 to 1,  $t$  indicates the current iteration index,  $D = |CX^*(t) - X(t)|$ ,  $A = 2ar - a$ ,  $C = 2r$ ,  $a$  gradually decreases from 2 to 0 over iterations, and  $r$  is a vector of random numbers in the range of 0 to 1. The first element of Eq. 26 mimics the encircling behavior of humpback whales, while the former simulates the bubble net behavior. The random variable  $p$  is used to switch between these elements.

The WOA algorithm starts with a set of random solutions. Then, in each iteration, search agents update their positions regarding either a randomly selected agent or the best solution so far. The parameter  $a$  gradually decreases from 2 to 0 over iterations to guarantee exploration and exploitation. Furthermore, to provide exploration and exploitation, a search agent is randomly selected when  $|A| > 1$  to update the position of the search agents, while the best solution is selected when  $|A| < 1$ .

### Jellyfish Search Optimizer

The JS is a novel meta-heuristic algorithm inspired by the foraging behavior of the jellyfish swarms in the ocean (Chou & Truong, 2021). JS algorithm starts with an exploration stage in which jellyfish follow ocean currents to find the best locations. Then, an exploitation stage is conducted in which a jellyfish swarm is formed, and each jellyfish moves to find a better location in that swarm.

In the JS algorithm, jellyfish have two types of movement: passive and active. Passive movement is the movement of the jellyfish around its own location, and as a result of this movement, its location is updated using the following equation:

$$\vec{X}_i(t+1) = \vec{X}_i(t) + r * \gamma * (u_b - l_b) \quad (27)$$

where  $l_b$  and  $u_b$  are the lower and upper bounds of the search space, respectively;  $r$  is a random number in the range of 0 to 1;  $\gamma > 0$  is the movement coefficient which is related to the length of movement around the current location.



Active movement is the movement of jellyfish toward a better direction to find food in the swarm. For this purpose, a jellyfish other than the one of interest is randomly selected. The direction of the active movement is determined by constructing a vector from the jellyfish of interest to the selected jellyfish. If the amount of food in the location of selected jellyfish is higher, jellyfish of interest move toward selected jellyfish. However, if the amount of food in the location of selected jellyfish is lower, jellyfish of interest move directly away from the location of selected jellyfish. The active movement can be given as follows:

$$\vec{X}_i(t+1) = \vec{X}_i(t) + \vec{r} * \vec{D} \quad (28)$$

where  $\vec{r}$  is a vector of random numbers in the range of 0 to 1 and  $\vec{D}$  is the direction calculated by the following equation:

$$\vec{D} = \begin{cases} \vec{X}_i(t) - \vec{X}_j(t) & f(\vec{X}_i(t)) - f(\vec{X}_j(t)) \\ \vec{X}_j(t) - \vec{X}_i(t) & otherwise \end{cases} \quad (29)$$

where  $j$  is the index of the selected jellyfish, and  $f$  means the fitness function. In the JS algorithm, a time control mechanism is used to regulate the movement of jellyfish and switch among these movements:

$$c(t) = \left(1 - \frac{t}{t_{max}}\right) * (2 * r - 1) \quad (30)$$

where  $t$  is the time specified as the current iteration number,  $t_{max}$  is the maximum number of iterations, and  $r$  is a random number in the range of 0 to 1.

## EXPERIMENTS

### Experimental Setup

In the experiments, ABC, PSO, GWO, WOA, ALO, MFO, and JS algorithms have been investigated to determine performance on the multilevel thresholding of the meta-heuristic algorithms. For a fair comparison, the number of function evaluations is taken into consideration instead of the iteration number as a stopping criterion. The number of function evaluations and the population size of algorithms are selected as 5000 and 30, respectively. Other control parameters of the algorithms are default values, and they are given in Table 1. The initial populations of all algorithms are generated uniformly and randomly among [0, 255].

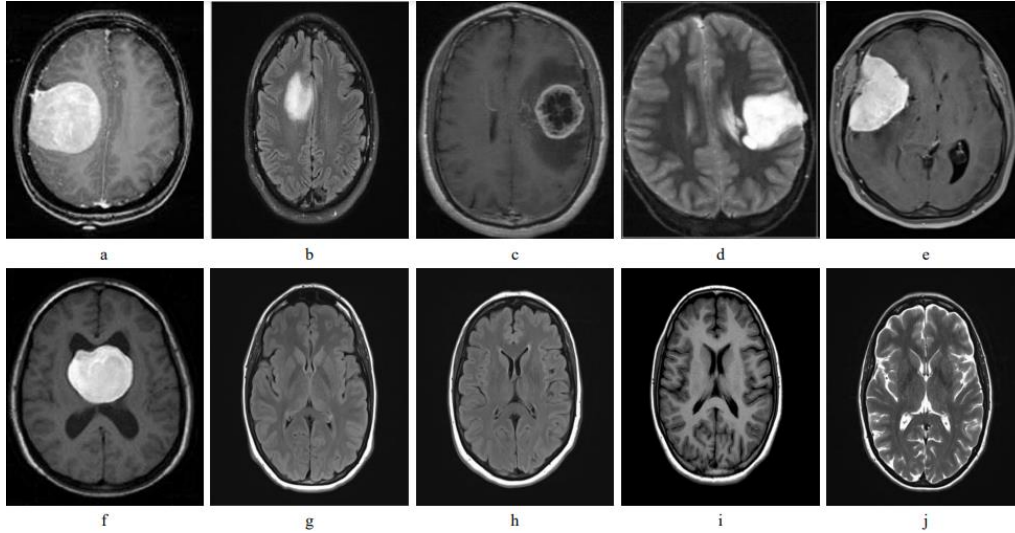
**Table 1.** Control Parameters of The Algorithms Used in Experiments

Algorithm	Control Parameters
ABC	$limit = (NP * D)/2$
PSO	$c_1 = 2, c_2 = 2, w = 0.2-0.9$
GWO	$a = 0-2$
WOA	$a = 0-2$
ALO	-
MFO	-
JS	-

Experiments were carried out for 2, 4, 6, and 8 number of threshold values and each of them was repeated 30 times to perform statistical analysis. Experiments were executed on a computer with an Intel i7 2600 processor clocked at 3.4 GHz and 16 GB of RAM using MATLAB software.

### Image Dataset

Experiments are carried out on brain MR images shown in Fig. 2. For experiments, ten different test images are selected from the "Brain MRI Images for Brain Tumor Detection" dataset (Chakrabarty, 2019). Among them, the first six MR images include tumors while others do not. From the image MR1 to image MR10, the image sizes are as follows: 180×218, 450×446, 230×275, 272×355, 272×331, 238×338, 512×512, 442×442, 728×725, and 442×442.



**Figure 2.** Brain MR Images Used in Experiments: **(a-f).** Images with Tumor **(g-j).** Images with No Tumor

### Objective Quality Metrics

In this study, we employ three different objective image quality assessment metrics to assess the performance of the compared algorithms. These metrics are reference-based Peak Signal-to-Noise Ratio (PSNR) Structural Similarity (SSIM), and non-reference-based Blind/Referenceless Naturalness Image Quality Evaluator (NIQE).

PSNR is the ratio between the maximum possible power of a signal and the power of the distorting noise that affects its quality. PSNR is calculated as a logarithmic quantity in the decibel scale as follows:

$$PSNR = 10 \log_{10} \frac{L^2}{MSE} \quad (31)$$

where  $L$  is the maximum possible pixel value of the image, and MSE is the mean square error calculated as follows:

$$MSE = \frac{1}{mn} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (I_A(i, j) - I_B(i, j))^2 \quad (32)$$

The structural similarity (SSIM) is another reference-based metric that measures the similarity between two given images (Wang et al., 2004). The SSIM is calculated on numerous windows of the image as follows:

$$SSIM(I_A, I_B) = \frac{(2\mu_A\mu_B + C_1)(2\sigma_{AB} + C_2)}{(\mu_A^2 + \mu_B^2 + C_1) + (\sigma_A^2 + \sigma_B^2 + C_2)} \quad (33)$$

where  $C_1 = (k_1L)^2$  and  $C_2 = (k_2L)^2$ ;  $T$  is the dynamic range of the pixel-values and ( $k_1 = 0.01, k_2 = 0.03$ ).

NIQE is a blind image quality assessment metric that uses measurable differences of statistical regularities in the images. First, the quality features are obtained by making use of a simple natural scene statistic (NSS) model. Then, the quality of a given image is computed as the difference between a multivariate Gaussian (MVG) fit of the NSS features that are derived from the image (Mittal et al., 2013).

### Experimental Results

This section presents the results of the experiments conducted to reveal the multilevel thresholding performance of the different meta-heuristic algorithms using minimum cross-entropy and between-class variance methods. The obtained results and their statistical analyses are given in subsections.

#### Evaluation of the Minimum Cross-Entropy Method

In this section, the multilevel thresholding performance of the different meta-heuristic algorithms that make use of the minimum cross-entropy method on brain MR images is investigated. Tables 2-5 provide the mean and standard deviation (std) of the best objective values, PSNR, SSIM, BRISQUE, and NIQE, values of the 30 independent runs in terms of the different threshold values, respectively. Besides, ranks are given in parentheses next to the mean values. Moreover, to make an overall assessment, average rank, standard deviation of rank, and median rank (in parentheses) values are provided in the last row of the tables.

**Table 2.** Comparison of the Best Objective Value Computed of Swarm-Based Optimization Algorithms Using the Minimum Cross-Entropy Objective Function.

Image	nTh	ABC		PSO		GWO		WOA		ALO		MFO		JS	
		mean	std	mean	std	mean	std	mean	std	mean	std	mean	std	mean	std
MRI1	2	3.0916 (4)	0.00	3.0916 (4)	0.00	3.0916 (4)	0.00	3.0916 (4)	0.00	3.0916 (4)	0.00	3.0916 (4)	0.00	3.0916 (4)	0.00
	4	<b>1.0141 (1)</b>	0.00	1.0142 (3)	0.00	1.0145 (7)	0.00	1.0144 (5)	0.00	1.0141 (2)	0.00	1.0145 (6)	0.00	1.0144 (4)	0.00
	6	0.4894 (3)	0.00	0.4921 (4)	0.03	0.4894 (2)	0.00	0.4927 (5)	0.03	0.4999 (7)	0.03	0.4944 (6)	0.03	<b>0.4871 (1)</b>	0.00
	8	0.3314 (4)	0.01	0.3313 (3)	0.02	0.3373 (7)	0.02	0.3322 (6)	0.02	<b>0.3270 (1)</b>	0.01	0.3305 (2)	0.02	0.3314 (5)	0.00
MRI2	2	1.7777 (4)	0.00	1.7777 (4)	0.00	1.7777 (4)	0.00	1.7777 (4)	0.00	1.7777 (4)	0.00	1.7777 (4)	0.00	1.7777 (4)	0.00
	4	<b>0.5300 (1)</b>	0.00	0.5300 (3)	0.00	0.5404 (7)	0.06	0.5300 (6)	0.00	0.5300 (2)	0.00	0.5300 (5)	0.00	0.5300 (4)	0.00
	6	0.2769 (2)	0.00	0.2787 (5)	0.01	0.2826 (6)	0.02	0.2870 (7)	0.03	0.2785 (4)	0.01	0.2770 (3)	0.00	<b>0.2768 (1)</b>	0.00
	8	0.1885 (5)	0.00	0.1857 (2)	0.00	0.1962 (7)	0.02	0.1882 (3)	0.01	0.1882 (4)	0.01	0.1885 (6)	0.01	<b>0.1850 (1)</b>	0.00
MRI3	2	<b>1.3797 (4)</b>	0.00	<b>1.3797 (4)</b>	0.00	<b>1.3797 (4)</b>	0.00	<b>1.3797 (4)</b>	0.00	<b>1.3797 (4)</b>	0.00	<b>1.3797 (4)</b>	0.00	<b>1.3797 (4)</b>	0.00
	4	<b>0.4615 (1)</b>	0.00	0.4686 (5)	0.04	0.4615 (3)	0.00	0.4757 (6)	0.05	0.4827 (7)	0.06	0.4617 (4)	0.00	0.4615 (2)	0.00
	6	0.2543 (2)	0.00	0.2587 (4)	0.02	0.2641 (5)	0.03	0.2644 (6)	0.03	0.2777 (7)	0.04	0.2570 (3)	0.01	<b>0.2541 (1)</b>	0.00
	8	0.1727 (2)	0.01	0.1762 (3)	0.02	0.1881 (7)	0.02	0.1836 (5)	0.02	0.1866 (6)	0.02	0.1771 (4)	0.02	<b>0.1676 (1)</b>	0.00
MRI4	2	<b>3.0400 (4)</b>	0.00	<b>3.0400 (4)</b>	0.00	<b>3.0400 (4)</b>	0.00	<b>3.0400 (4)</b>	0.00	<b>3.0400 (4)</b>	0.00	<b>3.0400 (4)</b>	0.00	<b>3.0400 (4)</b>	0.00
	4	0.8945 (5)	0.00	<b>0.8943 (1)</b>	0.00	0.8945 (4)	0.00	0.8947 (6)	0.00	0.8943 (2)	0.00	0.9011 (7)	0.03	0.8943 (3)	0.00
	6	<b>0.4493 (1.5)</b>	0.00	<b>0.4493 (1.5)</b>	0.00	0.4721 (7)	0.06	0.4698 (6)	0.05	0.4495 (3)	0.00	0.4571 (5)	0.03	0.4495 (4)	0.00
	8	0.3032 (2)	0.01	0.3054 (3)	0.02	0.3133 (6)	0.02	0.3138 (7)	0.03	0.3060 (4)	0.01	0.3060 (5)	0.02	<b>0.3007 (1)</b>	0.00
MRI5	2	<b>2.1409 (4)</b>	0.00	<b>2.1409 (4)</b>	0.00	<b>2.1409 (4)</b>	0.00	<b>2.1409 (4)</b>	0.00	<b>2.1409 (4)</b>	0.00	<b>2.1409 (4)</b>	0.00	<b>2.1409 (4)</b>	0.00
	4	0.7410 (5)	0.00	0.7410 (4)	0.00	0.7410 (3)	0.00	0.7544 (7)	0.07	<b>0.7410 (1.5)</b>	0.00	0.7410 (6)	0.00	<b>0.7410 (1.5)</b>	0.00
	6	0.3905 (2)	0.00	0.3944 (6)	0.02	0.3927 (5)	0.01	0.4097 (7)	0.04	0.3914 (3)	0.01	0.3920 (4)	0.01	<b>0.3904 (1)</b>	0.00
	8	0.2598 (5)	0.01	0.2596 (4)	0.02	0.2557 (3)	0.01	0.2644 (7)	0.03	0.2528 (2)	0.01	0.2611 (6)	0.02	<b>0.2497 (1)</b>	0.00
MRI6	2	<b>2.7510 (4)</b>	0.00	<b>2.7510 (4)</b>	0.00	<b>2.7510 (4)</b>	0.00	<b>2.7510 (4)</b>	0.00	<b>2.7510 (4)</b>	0.00	<b>2.7510 (4)</b>	0.00	<b>2.7510 (4)</b>	0.00
	4	<b>0.8779 (2)</b>	0.00	<b>0.8779 (2)</b>	0.00	0.8780 (6)	0.00	0.8891 (7)	0.03	<b>0.8779 (2)</b>	0.00	0.8780 (5)	0.00	0.8779 (4)	0.00
	6	0.4535 (3)	0.00	<b>0.4523 (1)</b>	0.00	0.4560 (5)	0.00	0.4583 (7)	0.03	0.4569 (6)	0.02	0.4550 (4)	0.01	0.4534 (2)	0.00
	8	0.3158 (7)	0.02	0.2997 (4)	0.03	0.2906 (2)	0.01	<b>0.2895 (1)</b>	0.03	0.3088 (6)	0.03	0.3003 (5)	0.03	0.2932 (3)	0.02
MRI7	2	<b>1.1153 (4)</b>	0.00	<b>1.1153 (4)</b>	0.00	<b>1.1153 (4)</b>	0.00	<b>1.1153 (4)</b>	0.00	<b>1.1153 (4)</b>	0.00	<b>1.1153 (4)</b>	0.00	<b>1.1153 (4)</b>	0.00
	4	<b>0.3453 (2)</b>	0.00	<b>0.3453 (2)</b>	0.00	0.3453 (4)	0.00	0.3533 (7)	0.04	<b>0.3453 (2)</b>	0.00	0.3453 (6)	0.00	0.3453 (5)	0.00
	6	<b>0.1973 (1)</b>	0.00	0.1991 (3)	0.00	0.2034 (6)	0.02	0.2066 (7)	0.03	0.2002 (5)	0.00	0.1999 (4)	0.00	0.1989 (2)	0.00
	8	0.1173 (2)	0.00	<b>0.1172 (1)</b>	0.00	0.1254 (7)	0.01	0.1253 (6)	0.02	0.1192 (4)	0.00	0.1206 (5)	0.01	0.1185 (3)	0.00
MRI8	2	<b>0.9900 (4)</b>	0.00	<b>0.9900 (4)</b>	0.00	<b>0.9900 (4)</b>	0.00	<b>0.9900 (4)</b>	0.00	<b>0.9900 (4)</b>	0.00	<b>0.9900 (4)</b>	0.00	<b>0.9900 (4)</b>	0.00
	4	<b>0.3242 (1.5)</b>	0.00	<b>0.3242 (1.5)</b>	0.00	0.3291 (6.5)	0.03	0.3291 (6.5)	0.03	0.3242 (3)	0.00	0.3242 (5)	0.00	0.3242 (4)	0.00
	6	<b>0.1679 (1)</b>	0.00	0.1698 (5)	0.01	0.1756 (6)	0.02	0.1790 (7)	0.02	0.1681 (3)	0.00	0.1681 (4)	0.00	0.1680 (2)	0.00
	8	0.1086 (3)	0.00	<b>0.1075 (1)</b>	0.00	0.1251 (7)	0.01	0.1211 (6)	0.01	0.1106 (5)	0.00	0.1098 (4)	0.00	0.1078 (2)	0.00
MRI9	2	<b>0.9715 (4)</b>	0.00	<b>0.9715 (4)</b>	0.00	<b>0.9715 (4)</b>	0.00	<b>0.9715 (4)</b>	0.00	<b>0.9715 (4)</b>	0.00	<b>0.9715 (4)</b>	0.00	<b>0.9715 (4)</b>	0.00
	4	0.3227 (2)	0.00	0.3683 (6.5)	0.08	0.3229 (3)	0.00	0.3292 (5)	0.04	0.3683 (6.5)	0.08	0.3237 (4)	0.00	<b>0.3227 (1)</b>	0.00
	6	0.1602 (2)	0.01	0.1992 (6)	0.04	0.1654 (4)	0.02	0.1665 (5)	0.02	0.2118 (7)	0.06	0.1644 (3)	0.02	<b>0.1579 (1)</b>	0.00
	8	0.0989 (2)	0.01	0.1245 (6)	0.04	0.1029 (4)	0.01	0.1061 (5)	0.02	0.1342 (7)	0.03	0.1008 (3)	0.01	<b>0.0914 (1)</b>	0.01
MRI10	2	<b>1.3727 (4)</b>	0.00	<b>1.3727 (4)</b>	0.00	<b>1.3727 (4)</b>	0.00	<b>1.3727 (4)</b>	0.00	<b>1.3727 (4)</b>	0.00	<b>1.3727 (4)</b>	0.00	<b>1.3727 (4)</b>	0.00
	4	0.5341 (2)	0.00	0.5343 (4)	0.00	0.5424 (6)	0.04	0.5425 (7)	0.04	<b>0.5341 (1)</b>	0.00	0.5351 (5)	0.00	0.5343 (3)	0.00
	6	0.2705 (3)	0.00	0.2726 (5)	0.01	0.2766 (6)	0.02	0.2839 (7)	0.03	<b>0.2703 (1)</b>	0.00	0.2708 (4)	0.00	0.2704 (2)	0.00
	8	0.1646 (4)	0.00	<b>0.1637 (1)</b>	0.00	0.1715 (6)	0.02	0.1795 (7)	0.02	0.1639 (2)	0.00	0.1650 (5)	0.00	0.1642 (3)	0.00
Av. Rank		2.98±1.44 (3)		3.51±1.5 (4)		4.94±1.52 (4.5)		5.49±1.46 (6)		3.9±1.83 (4)		4.45±1.04 (4)		<b>2.74±1.36 (3)</b>	

It can be seen from the data in Table 2 that the most successful algorithm is the JS in terms of minimum cross-entropy fitness value, and the JS is followed by ABC, PSO, ALO, MFO, GWO, and WOA, respectively. While all the algorithms find the same fitness value for 2-level thresholding, as the threshold levels increase, the results of the algorithms diverge, and the performance of the JS, ABC, and PSO algorithms becomes more prominent.

In Table 3, a comparison of various algorithms based on their PSNR values at different threshold levels is presented. The algorithms are ranked according to their performance from highest to lowest, with ABC being the top-performing algorithm, followed by PSO, JS, MFO, ALO, WOA, and GWO.



**Table 4.** Comparison of SSIM Values of Swarm-Based Optimization Algorithms Using the Minimum Cross-Entropy Objective Function.

Image	nTh	ABC		PSO		GWO		WOA		ALO		MFO		JS	
		mean	std	mean	std	mean	std	mean	std	mean	std	mean	std	mean	std
MRI1	2	<b>0.3912 (4)</b>	0.00	<b>0.3912 (4)</b>	0.00	<b>0.3912 (4)</b>	0.00	<b>0.3912 (4)</b>	0.00	<b>0.3912 (4)</b>	0.00	<b>0.3912 (4)</b>	0.00	<b>0.3912 (4)</b>	0.00
	4	0.5893 (5)	0.00	0.5893 (3)	0.00	0.5891 (7)	0.00	0.5892 (6)	0.00	0.5893 (4)	0.00	<b>0.5894 (1)</b>	0.00	0.5893 (2)	0.00
	6	0.7086 (4)	0.00	0.7075 (5)	0.01	<b>0.7112 (1)</b>	0.00	0.7095 (2)	0.01	0.7038 (7)	0.01	0.7060 (6)	0.01	0.7094 (3)	0.00
	8	0.7618 (5)	0.01	0.7607 (6)	0.01	<b>0.8035 (1)</b>	0.02	0.7816 (2)	0.02	0.7638 (4)	0.01	0.7658 (3)	0.01	0.7561 (7)	0.01
MRI2	2	<b>0.2484 (4)</b>	0.00	<b>0.2484 (4)</b>	0.00	<b>0.2484 (4)</b>	0.00	<b>0.2484 (4)</b>	0.00	<b>0.2484 (4)</b>	0.00	<b>0.2484 (4)</b>	0.00	<b>0.2484 (4)</b>	0.00
	4	0.3783 (7)	0.00	0.3787 (2)	0.00	<b>0.3801 (1)</b>	0.01	0.3787 (3)	0.00	0.3784 (6)	0.00	0.3786 (4)	0.00	0.3786 (5)	0.00
	6	0.4440 (7)	0.00	0.4452 (5)	0.00	0.4533 (2)	0.01	<b>0.4723 (1)</b>	0.08	0.4452 (6)	0.00	0.4465 (4)	0.00	0.4472 (3)	0.00
	8	0.4899 (4)	0.02	0.4884 (6)	0.02	<b>0.5388 (1)</b>	0.02	0.5266 (2)	0.07	0.4885 (5)	0.02	0.4840 (7)	0.01	0.4990 (3)	0.02
MRI3	2	0.5267 (4)	0.00	0.5267 (4)	0.00	0.5267 (4)	0.00	0.5267 (4)	0.00	0.5267 (4)	0.00	0.5267 (4)	0.00	0.5267 (4)	0.00
	4	0.6618 (5)	0.00	0.6606 (6)	0.00	0.6623 (4)	0.00	<b>0.6633 (1)</b>	0.00	0.6591 (7)	0.01	0.6628 (2)	0.00	0.6624 (3)	0.00
	6	0.7266 (6)	0.00	0.7268 (4)	0.01	0.7270 (2)	0.00	0.7269 (3)	0.00	0.7180 (7)	0.02	<b>0.7290 (1)</b>	0.01	0.7267 (5)	0.00
	8	0.7865 (4)	0.02	0.7807 (7)	0.02	<b>0.8179 (1)</b>	0.01	0.7999 (2)	0.02	0.7823 (6)	0.02	0.7864 (5)	0.02	0.7893 (3)	0.00
MRI4	2	<b>0.4288 (4)</b>	0.00	<b>0.4288 (4)</b>	0.00	<b>0.4288 (4)</b>	0.00	<b>0.4288 (4)</b>	0.00	<b>0.4288 (4)</b>	0.00	<b>0.4288 (4)</b>	0.00	<b>0.4288 (4)</b>	0.00
	4	0.6281 (4)	0.00	0.6281 (5)	0.00	0.6289 (2)	0.00	<b>0.6290 (1)</b>	0.00	0.6281 (6)	0.00	0.6259 (7)	0.01	0.6282 (3)	0.00
	6	0.6884 (6.5)	0.00	0.6884 (6.5)	0.00	0.6906 (3)	0.01	<b>0.6988 (1)</b>	0.03	0.6887 (5)	0.00	0.6913 (2)	0.01	0.6887 (4)	0.00
	8	0.7503 (7)	0.02	0.7636 (4)	0.03	0.7578 (6)	0.01	<b>0.7768 (1)</b>	0.04	0.7682 (2)	0.04	0.7598 (5)	0.03	0.7670 (3)	0.04
MRI5	2	<b>0.4498 (4)</b>	0.00	<b>0.4498 (4)</b>	0.00	<b>0.4498 (4)</b>	0.00	<b>0.4498 (4)</b>	0.00	<b>0.4498 (4)</b>	0.00	<b>0.4498 (4)</b>	0.00	<b>0.4498 (4)</b>	0.00
	4	0.6232 (6)	0.00	0.6232 (5)	0.00	0.6232 (4)	0.00	<b>0.6253 (1)</b>	0.01	0.6232 (2.5)	0.00	0.6231 (7)	0.00	0.6232 (2.5)	0.00
	6	0.6921 (3)	0.00	0.6907 (7)	0.01	0.6907 (6)	0.00	<b>0.6978 (1)</b>	0.01	0.6910 (5)	0.00	0.6931 (2)	0.01	0.6912 (4)	0.00
	8	0.7500 (7)	0.03	0.7561 (5)	0.03	<b>0.7779 (1)</b>	0.01	0.7748 (2)	0.02	0.7703 (3)	0.01	0.7505 (6)	0.03	0.7699 (4)	0.01
MRI6	2	<b>0.5547 (4)</b>	0.00	<b>0.5547 (4)</b>	0.00	<b>0.5547 (4)</b>	0.00	<b>0.5547 (4)</b>	0.00	<b>0.5547 (4)</b>	0.00	<b>0.5547 (4)</b>	0.00	<b>0.5547 (4)</b>	0.00
	4	0.7320 (6)	0.00	0.7320 (6)	0.00	0.7320 (4)	0.00	<b>0.7360 (1)</b>	0.01	0.7320 (6)	0.00	0.7322 (3)	0.00	0.7322 (2)	0.00
	6	0.8070 (4)	0.00	0.8068 (5)	0.00	<b>0.8090 (1)</b>	0.00	0.8066 (7)	0.00	0.8084 (2)	0.01	0.8077 (3)	0.00	0.8067 (6)	0.00
	8	0.8497 (7)	0.01	0.8607 (5)	0.01	<b>0.8722 (1)</b>	0.01	0.8694 (2)	0.01	0.8532 (6)	0.02	0.8612 (4)	0.01	0.8619 (3)	0.01
MRI7	2	<b>0.3012 (4)</b>	0.00	<b>0.3012 (4)</b>	0.00	<b>0.3012 (4)</b>	0.00	<b>0.3012 (4)</b>	0.00	<b>0.3012 (4)</b>	0.00	<b>0.3012 (4)</b>	0.00	<b>0.3012 (4)</b>	0.00
	4	0.3756 (3)	0.00	0.3756 (3)	0.00	0.3756 (6)	0.00	<b>0.3774 (1)</b>	0.01	0.3756 (3)	0.00	0.3756 (5)	0.00	0.3755 (7)	0.00
	6	0.4146 (2)	0.00	0.4134 (4)	0.00	<b>0.4196 (1)</b>	0.01	0.4144 (3)	0.01	0.4123 (6)	0.00	0.4123 (7)	0.00	0.4128 (5)	0.00
	8	0.4395 (6)	0.00	0.4409 (4)	0.00	0.4553 (2)	0.02	<b>0.4846 (1)</b>	0.11	0.4393 (7)	0.00	0.4487 (3)	0.02	0.4406 (5)	0.00
MRI8	2	<b>0.2784 (4)</b>	0.00	<b>0.2784 (4)</b>	0.00	<b>0.2784 (4)</b>	0.00	<b>0.2784 (4)</b>	0.00	<b>0.2784 (4)</b>	0.00	<b>0.2784 (4)</b>	0.00	<b>0.2784 (4)</b>	0.00
	4	0.3520 (3.5)	0.00	0.3520 (3.5)	0.00	0.3542 (2)	0.01	<b>0.3616 (1)</b>	0.05	0.3520 (5)	0.00	0.3519 (7)	0.00	0.3519 (6)	0.00
	6	0.3947 (5)	0.00	0.3965 (3)	0.01	0.4016 (2)	0.02	<b>0.4210 (1)</b>	0.08	0.3949 (4)	0.00	0.3947 (6)	0.00	0.3945 (7)	0.00
	8	0.4240 (6)	0.00	0.4241 (5)	0.00	0.4522 (2)	0.02	<b>0.4755 (1)</b>	0.11	0.4245 (4)	0.01	0.4275 (3)	0.01	0.4232 (7)	0.00
MRI9	2	<b>0.8342 (4)</b>	0.00	<b>0.8342 (4)</b>	0.00	<b>0.8342 (4)</b>	0.00	<b>0.8342 (4)</b>	0.00	<b>0.8342 (4)</b>	0.00	<b>0.8342 (4)</b>	0.00	<b>0.8342 (4)</b>	0.00
	4	0.9311 (2)	0.00	0.9224 (6.5)	0.02	0.9309 (3)	0.00	0.9299 (5)	0.01	0.9224 (6.5)	0.02	0.9308 (4)	0.00	<b>0.9312 (1)</b>	0.00
	6	0.9590 (2)	0.00	0.9540 (6)	0.01	0.9578 (5)	0.00	0.9589 (3)	0.00	0.9498 (7)	0.01	0.9588 (4)	0.00	<b>0.9593 (1)</b>	0.00
	8	0.9762 (2)	0.00	0.9695 (6)	0.01	0.9718 (5)	0.00	0.9734 (4)	0.01	0.9667 (7)	0.01	0.9753 (3)	0.00	<b>0.9765 (1)</b>	0.00
MRI10	2	<b>0.2830 (4)</b>	0.00	<b>0.2830 (4)</b>	0.00	<b>0.2830 (4)</b>	0.00	<b>0.2830 (4)</b>	0.00	<b>0.2830 (4)</b>	0.00	<b>0.2830 (4)</b>	0.00	<b>0.2830 (4)</b>	0.00
	4	0.3408 (7)	0.00	0.3415 (5)	0.00	0.3430 (3)	0.01	<b>0.3439 (1)</b>	0.01	0.3410 (6)	0.00	0.3436 (2)	0.01	0.3416 (4)	0.00
	6	0.3983 (6)	0.00	0.3982 (7)	0.00	0.4024 (2)	0.02	<b>0.4094 (1)</b>	0.02	0.3987 (3)	0.00	0.3983 (4)	0.00	0.3983 (5)	0.00
	8	0.4383 (7)	0.00	0.4391 (6)	0.00	0.4527 (2)	0.02	<b>0.4757 (1)</b>	0.07	0.4398 (5)	0.00	0.4404 (4)	0.01	0.4408 (3)	0.00
Av Rank		4.72±1.56 (4)		4.79±1.23 (5)		3.08±1.67 (3)		<b>2.55±1.62 (2)</b>		4.83±1.46 (4.5)		4.1±1.6 (4)		3.94±1.56 (4)	

### Evaluation of the Between-Class Variance Method

This section is concerned with the multilevel thresholding performance of the different meta-heuristic algorithms that use the between-class variance method on brain MR images. As in the previous section, Tables 6-9 provide the mean and standard deviation (std) of the best objective values, PSNR, SSIM, and NIQE values of the 30 independent runs in terms of the different numbers of the threshold value, respectively. Besides, ranks are provided in parenthesis next to the mean values. The average rank, the standard deviation, and median rank (in parenthesis) values are also given in the last row of the tables to make an overall assessment.













and both are statistically better than WOA according to mean fitness value. However, Vargha–Delaney effect size  $\widehat{A}_{12}$  results show that WOA is superior to ABC and JS algorithms in most of the runs. This indicates that the WOA algorithm performs quite poorly in some runs and is not robust. In other words, WOA has higher standard deviation than the ABC in 30 runs. On the other hand, PSO and ALO are statistically better than both ABC and JS, while GWO is not better than any algorithms.

For the MRI2 image in the same table, JS and WOA outperform ABC, GWO, ALO, and MFO algorithms, while PSO is better than ABC, ALO, and MFO. For the MRI3 image, JS algorithm is statistically better than all algorithms except PSO, and PSO is better than GWO, WOA, and ALO. The results for the MRI4 image show that both PSO and JS algorithms perform better than GWO and WOA, while ABC, ALO, and MFO are better than just GWO. For the MRI5 image, JS and ALO algorithms are superior to ABC and GWO, while GWO is better than PSO and WOA. Herein WOA has the same characteristics as in the MRI1 image, showing that it is not robust.

From the results of the MRI6 image in Table 10, it can be seen that WOA statistically performs better than ABC, GWO, ALO, and JS. It must be noted that the ABC algorithm has the worst performance. For the images MRI7 and MRI8, the PSO algorithm statistically outperforms other algorithms, while GWO is worse than the others. It can be seen from the results of MRI9; that the JS algorithm is statistically more successful than other algorithms except for WOA. On the other hand, the ALO algorithm has the worst performance. For the MRI10 image, the PSO algorithm is statistically better than all the other algorithms, while GWO is worse than the others except for WOA.

Table 11 provides the statistical analysis of the compared algorithms for 8-levels of threshold using the between-class variance method. As can be seen from the table for the MRI1 image, the PSO and ALO algorithms are statistically more successful than GWO, MFO, and JS. On the other hand, GWO shows the poorest performance. For the MRI2 image, ABC is statistically better than GWO, ALO, and MFO, while JS is better than ABC, GWO, and MFO. Again, as in the MRI1 image, GWO has the poorest performance. From the results of the MRI3 image, the JS algorithm is statistically more successful than other algorithms except for PSO. Besides, there is no statistically significant difference between the GWO, WOA, and ALO algorithms.

For the MRI4 image, ABC, ALO, MFO, and JS algorithms statistically have a better performance than PSO and GWO algorithms. On the other hand, the GWO algorithm has the worst performance. The results of the MRI5 image in the same table show that while all other algorithms outperform the GWO algorithm, the JS algorithm surpasses the MFO algorithm along with GWO.

For the MRI6 image, ABC, ALO, and JS algorithms are statistically better than PSO, GWO, WOA, and MFO. Besides, GWO shows the poorest performance. It can be seen from the results of the MRI7 image that ABC is superior to GWO, WOA, MFO, and JS, whereas PSO surpasses GWO, WOA, MFO, and ALO algorithms. From the results of the MRI8 image, it can be said that both ALO and JS algorithms are statistically better than PSO, GWO, WOA, and MFO algorithms. According to Vargha–Delaney effect size  $\widehat{A}_{12}$  results, PSO is better than ABC, ALO, and JS algorithms in most of the runs, which reveals that the PSO algorithm performs poorly in some runs, and it is not robust. For the MRI9 image, the JS algorithm is statistically more successful than all other algorithms. Besides, ABC and WOA have better performance than PSO, GWO, and ALO algorithms. Finally, for the MRI10 image, the PSO algorithm is statistically better than other algorithms except for WOA, while the GWO algorithm shows the worst performance.

Overall, these results indicate that GWO performs poorly, while ABC, PSO, and JS algorithms perform better than others. However, the performances of the algorithms significantly differ according to the different images and threshold levels. This can be explained by the no-free-lunch theorem (Wolpert & Macready, 1997).

**Table 10.** Mann–Whitney U-Test Results ( $p < 0.05$ ) of Swarm-Based Optimization Algorithms and Its Corresponding Vargha–Delaney Effect Size  $\hat{A}_{12}$  Results (in Parentheses) That Given in the "Better Than" Column For 8-Level Threshold and Minimum Cross-Entropy Objective Function.

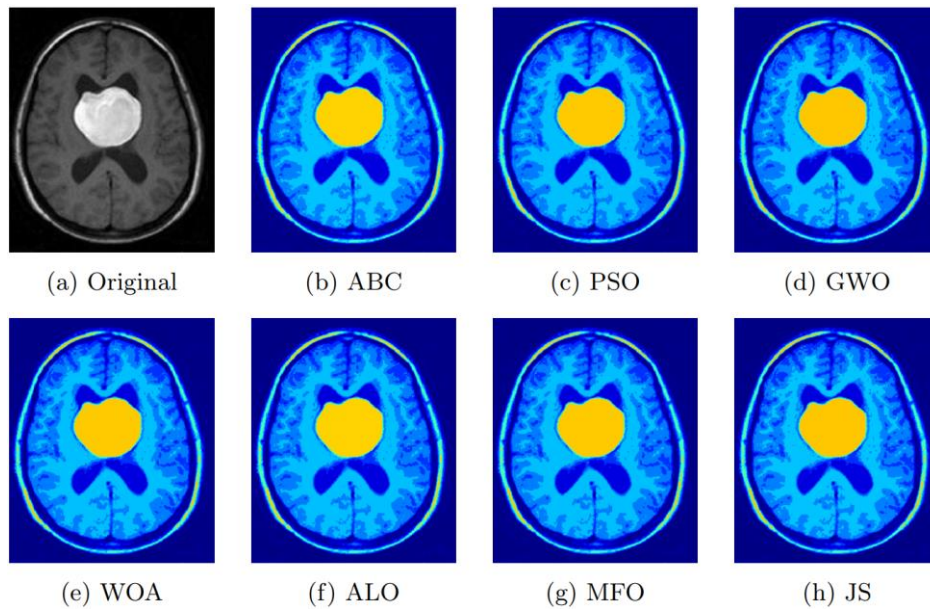
Image	Algorithm	Fitness	Better than
MRI1	ABC	0.3314	WOA (0.2489)
	PSO	0.3313	ABC (0.7556) JS (0.8217)
	GWO	0.3373	
	WOA	0.3322	GWO (0.6889)
	ALO	0.3270	ABC (0.6533) JS (0.6517)
	MFO	0.3305	JS (0.6500)
	JS	0.3314	WOA (0.2244)
MRI2	ABC	0.1885	
	PSO	0.1857	ABC (0.7394) ALO (0.6694) MFO (0.6939)
	GWO	0.1962	
	WOA	0.1882	ABC (0.7789) GWO (0.7689) ALO (0.6994) MFO (0.7889)
	ALO	0.1882	
	MFO	0.1885	
	JS	0.1850	ABC (0.7700) GWO (0.6633) ALO (0.6700) MFO (0.7417)
MRI3	ABC	0.1727	PSO (0.3211) GWO (0.6822)
	PSO	0.1762	GWO (0.7183) WOA (0.6800) ALO (0.6783)
	GWO	0.1881	
	WOA	0.1836	
	ALO	0.1866	
	MFO	0.1771	GWO (0.6733)
	JS	0.1676	ABC (0.7861) GWO (0.7933) WOA (0.7083) ALO (0.7328) MFO (0.6678)
MRI4	ABC	0.3032	GWO (0.8900)
	PSO	0.3054	GWO (0.8667) WOA (0.6639)
	GWO	0.3133	WOA (0.2322)
	WOA	0.3138	
	ALO	0.3060	GWO (0.8356)
	MFO	0.3060	GWO (0.8211)
	JS	0.3007	GWO (0.9622) WOA (0.6778)
MRI5	ABC	0.2598	WOA (0.2789)
	PSO	0.2596	ABC (0.7111)
	GWO	0.2557	PSO (0.3367) WOA (0.2822)
	WOA	0.2644	
	ALO	0.2528	ABC (0.7739) GWO (0.7756)
	MFO	0.2611	
	JS	0.2497	ABC (0.8822) GWO (0.9267)
MRI6	ABC	0.3158	
	PSO	0.2997	ABC (0.7333) ALO (0.6494)
	GWO	0.2906	ABC (0.8167)
	WOA	0.2895	ABC (0.8167) GWO (0.7567) ALO (0.7528) JS (0.6567)
	ALO	0.3088	ABC (0.6478)
	MFO	0.3003	ABC (0.7000)
	JS	0.2932	ABC (0.8267) ALO (0.6833)
MRI7	ABC	0.1173	GWO (0.9311) MFO (0.6511) JS (0.6756)
	PSO	0.1172	ABC (0.7933) GWO (0.9389) WOA (0.7950) ALO (0.8306) MFO (0.8167) JS (0.8478)
	GWO	0.1254	
	WOA	0.1253	GWO (0.7067)
	ALO	0.1192	GWO (0.7733)
	MFO	0.1206	GWO (0.7400)
	JS	0.1185	GWO (0.8044)
MRI8	ABC	0.1086	GWO (0.8583) WOA (0.7011)
	PSO	0.1075	ABC (0.9211) GWO (1.0000) WOA (0.9061) ALO (0.8456) MFO (0.8333) JS (0.8428)
	GWO	0.1251	
	WOA	0.1211	GWO (0.7006)
	ALO	0.1106	GWO (0.8233) WOA (0.7172)
	MFO	0.1098	GWO (0.8122) WOA (0.6967)
	JS	0.1078	ABC (0.6950) GWO (0.9511) WOA (0.7933)
MRI9	ABC	0.0989	PSO (0.6833) GWO (0.6822) ALO (0.8394)
	PSO	0.1245	ALO (0.6567)
	GWO	0.1029	ALO (0.7656)
	WOA	0.1061	PSO (0.6989) ALO (0.8222)
	ALO	0.1342	
	MFO	0.1008	ALO (0.7950)
	JS	0.0914	ABC (0.9133) PSO (0.7944) GWO (0.9611) ALO (0.9500) MFO (0.8772)
MRI10	ABC	0.1646	GWO (0.7411)
	PSO	0.1637	ABC (0.9206) GWO (0.9956) WOA (0.8344) ALO (0.8167) MFO (0.7961) JS (0.9178)
	GWO	0.1715	WOA (0.3222)
	WOA	0.1795	
	ALO	0.1639	ABC (0.8056) GWO (0.9778) JS (0.7728)
	MFO	0.1650	GWO (0.7822)
	JS	0.1642	GWO (0.8656)

**Table 11.** Mann–Whitney U-Test Results ( $p < 0.05$ ) of Swarm-Based Optimization Algorithms and Its Corresponding Vargha–Delaney Effect Size  $\hat{A}_{12}$  Results (in Parentheses) That Given in the "Better Than" Column For 8-level Threshold and Between-Class Variance Objective Function.

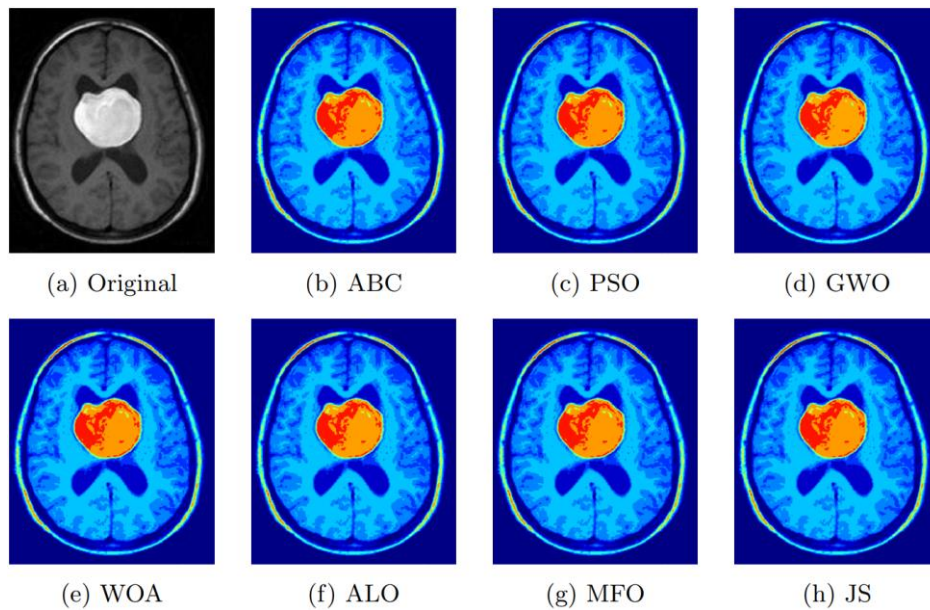
Image	Algorithm	Fitness	Better than
MRI1	ABC	4789.1538	PSO (0.6522) GWO (0.0744)
	PSO	4788.9420	GWO (0.1044) MFO (0.2689) JS (0.3139)
	GWO	4785.0889	
	WOA	4787.7008	GWO (0.1611)
	ALO	4788.7323	GWO (0.1444) MFO (0.3211) JS (0.3350)
	MFO	4788.3045	GWO (0.2167)
	JS	4788.7195	GWO (0.1478)
MRI2	ABC	2504.8737	GWO (0.0078) ALO (0.7444) MFO (0.1922)
	PSO	2504.7017	GWO (0.0833) MFO (0.2506)
	GWO	2502.0579	
	WOA	2503.3205	GWO (0.1767)
	ALO	2504.8229	GWO (0.0211) MFO (0.1483)
	MFO	2504.4935	GWO (0.2067)
	JS	2504.8855	ABC (0.3506) GWO (0.0078) MFO (0.1578)
MRI3	ABC	1240.3945	PSO (0.6933) MFO (0.6622)
	PSO	1240.1530	GWO (0.2356) WOA (0.3256) ALO (0.2578)
	GWO	1239.0510	
	WOA	1238.8258	
	ALO	1237.7775	
	MFO	1239.8529	GWO (0.2556)
	JS	1241.0314	ABC (0.0817) GWO (0.0522) WOA (0.3306) ALO (0.2867) MFO (0.3239)
MRI4	ABC	3087.1361	PSO (0.7439) GWO (0.0056)
	PSO	3086.8467	GWO (0.0444) WOA (0.2261)
	GWO	3083.7930	
	WOA	3085.4550	GWO (0.2044)
	ALO	3087.1285	PSO (0.7889) GWO (0.0056)
	MFO	3087.0622	PSO (0.7344) GWO (0.0322)
	JS	3087.1427	PSO (0.8317) GWO (0.0000)
MRI5	ABC	3031.2010	GWO (0.0000)
	PSO	3030.7024	GWO (0.0900)
	GWO	3028.8021	
	WOA	3030.2742	GWO (0.1322)
	ALO	3030.9397	GWO (0.0600)
	MFO	3030.3694	GWO (0.1367)
	JS	3031.1965	GWO (0.0067) MFO (0.3089)
MRI6	ABC	3084.5953	PSO (0.6922) GWO (0.0044) WOA (0.1611) MFO (0.1922)
	PSO	3084.3652	GWO (0.0356) WOA (0.1550) MFO (0.2433)
	GWO	3081.6150	
	WOA	3083.1328	GWO (0.2189)
	ALO	3084.4014	PSO (0.7094) GWO (0.0389) WOA (0.1922) MFO (0.2844)
	MFO	3083.9624	GWO (0.1022) WOA (0.3489)
	JS	3084.5361	PSO (0.6833) GWO (0.0133) WOA (0.1533) MFO (0.2111)
MRI7	ABC	2555.3314	GWO (0.0289) WOA (0.2922) MFO (0.3517) JS (0.2667)
	PSO	2555.2039	GWO (0.0233) WOA (0.2111) ALO (0.3372) MFO (0.2700)
	GWO	2553.7412	WOA (0.6756)
	WOA	2553.2087	
	ALO	2555.1843	GWO (0.0322) WOA (0.3122)
	MFO	2555.1172	GWO (0.1433)
	JS	2555.2831	PSO (0.8728) GWO (0.0900) ALO (0.7100)
MRI8	ABC	2842.7372	PSO (0.8017) GWO (0.0189) WOA (0.1489)
	PSO	2842.6980	GWO (0.0333) WOA (0.0628) MFO (0.1956)
	GWO	2840.5944	
	WOA	2840.1082	
	ALO	2842.7446	PSO (0.7606) GWO (0.0078) WOA (0.1456) MFO (0.3417)
	MFO	2842.2292	GWO (0.1433) WOA (0.2461)
	JS	2842.7542	PSO (0.7611) GWO (0.0044) WOA (0.1106) MFO (0.3022)
MRI9	ABC	539.9905	PSO (0.3389) GWO (0.2456) ALO (0.2583)
	PSO	538.6416	
	GWO	539.6719	ALO (0.2844)
	WOA	539.6833	PSO (0.3372) GWO (0.3144) ALO (0.2528)
	ALO	538.4992	
	MFO	539.7868	GWO (0.3244) ALO (0.2828)
	JS	540.2493	ABC (0.2228) PSO (0.2439) GWO (0.1056) WOA (0.3033) ALO (0.1072) MFO (0.2067)
MRI10	ABC	3219.4032	GWO (0.0844) WOA (0.6922)
	PSO	3219.5013	ABC (0.1356) GWO (0.0078) ALO (0.2006) MFO (0.2750) JS (0.2717)
	GWO	3216.8426	
	WOA	3218.0689	GWO (0.1522)
	ALO	3219.4860	ABC (0.2572) GWO (0.0067)
	MFO	3219.4321	GWO (0.0656)
	JS	3219.4869	ABC (0.2444) GWO (0.0089)







**Fig. 3** The Thresholded Images with 8-level Using Minimum Cross-Entropy for MRI6 Image.



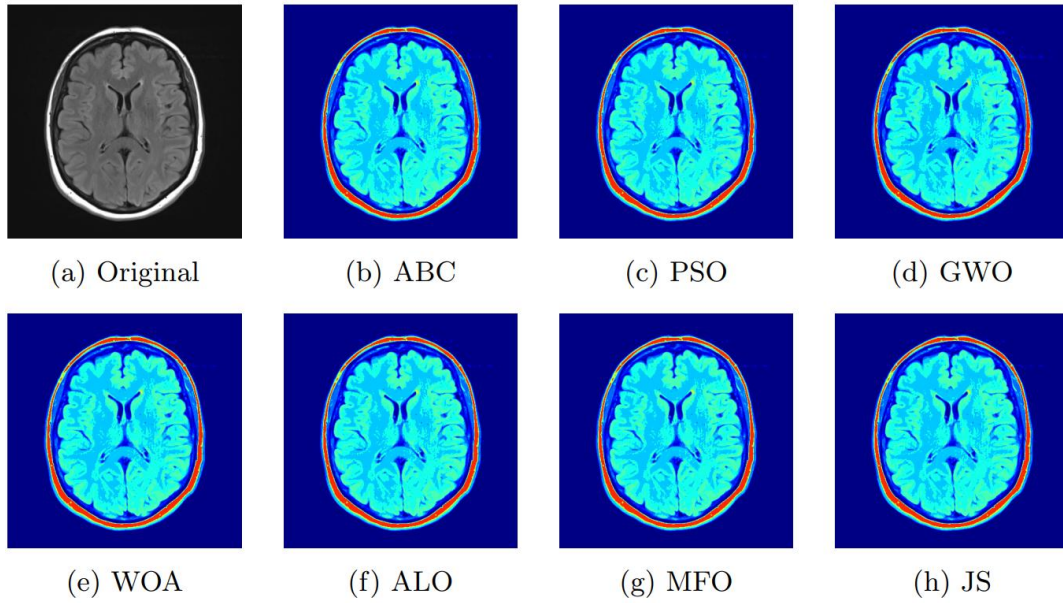
**Fig. 4** The Thresholded Images with 8-level Using Between-Class Variance for MRI6 image.

Figs. 5 and 6 show the thresholded images of the MRI8 image for the best 8-level threshold values of the swarm-based optimization algorithms using minimum cross-entropy and between-class variance objective functions, respectively. From the figures, it is seen that thresholded images of the algorithms produced using the best threshold values are very similar.

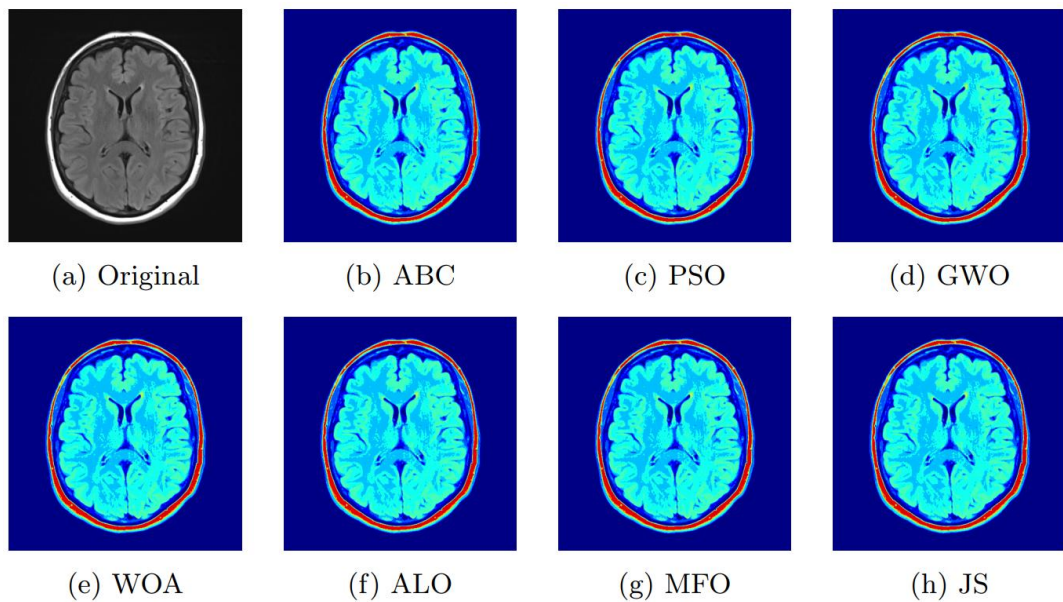
## CONCLUSION

In this study, the performances of the seven popular swarm-based optimization algorithms on the multilevel image thresholding problem, which is a widely used technique in many image processing applications for image segmentation, have been investigated in detail. The main contribution of this study is to objectively compare the performance of PSO, ABC, GWO, MFO, ALO, WOA, and JS algorithms for multilevel thresholding in brain MR image segmentation. Additionally, two popular objective functions for optimal multilevel thresholding-based image segmentation were compared: minimum cross-entropy and between-class variance. The performance of the optimization algorithms and objective functions were compared both quantitatively and qualitatively.





**Fig. 5** The Thresholded Images with 8-level Using Minimum Cross-Entropy for MRI8 Image.



**Fig. 6** The Thresholded Images with 8-level Using Between-Class Variance for MRI8 Image.

The performance of the algorithms was compared quantitatively using reference-based PSNR and SSIM and non-reference-based BRISQUE and NIQE metrics. In terms of fitness and PSNR metric values, JS, ABC, and PSO show the best performance. The results reveal that there is a positive correlation between fitness values and the PSNR metric. On the other hand, GWO, WOA, and MFO are superior to other algorithms considering SSIM. According to BRISQUE and NIQE metrics, different algorithms produced the best results for different image and objective functions. Experimental results show that BRISQUE and NIQE metrics are surprisingly inconsistent and not correlated with fitness values. This is because BRISQUE and NIQE are non-reference-based metrics.

The Mann-Whitney U test was also applied to the fitness values of the optimization algorithms to verify their numerical metric results. From the results, the JS, PSO, and ABC algorithms were statistically more successful than other algorithms, while GWO showed the poorest performance. It must also be noted that Vargha–Delaney effect size  $\widehat{A}_{12}$  results showed WOA performed better in most of the runs for some images and threshold values, where it performed poorly according to the mean fitness value. This indicates that the WOA algorithm performs relatively poorly in some runs and is not robust.

In the experiments, we also examined the time complexity of the algorithms considering their CPU time consumption under the same number of function evaluation criteria. The results of computational time analysis set out that WOA is the most efficient algorithm, followed by GWO, MFO, JS, and ABC, while ALO and PSO were the slowest.

## REFERENCES

- Akay, B. (2013). A study on particle swarm optimization and artificial bee colony algorithms for multilevel thresholding. *Applied Soft Computing Journal*, 13(6). <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2012.03.072>
- Aslan, S., Demirci, S., Oktay, T., & Yesilbas, E. (2023). Percentile-Based Adaptive Immune Plasma Algorithm and Its Application to Engineering Optimization. *Biomimetics*, 8(6), 486.
- Aziz, M. A. El, Ewees, A. A., & Hassanien, A. E. (2017). Whale Optimization Algorithm and Moth-Flame Optimization for multilevel thresholding image segmentation. *Expert Systems with Applications*, 83. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2017.04.023>
- Bakhshali, M. A., & Shamsi, M. (2014). Segmentation of color lip images by optimal thresholding using bacterial foraging optimization (BFO). *Journal of Computational Science*, 5(2). <https://doi.org/10.1016/j.jocs.2013.07.001>
- Brajevic, I., & Tuba, M. (2014). Cuckoo search and firefly algorithm applied to multilevel image thresholding. *Studies in Computational Intelligence*, 516. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-02141-6\\_6](https://doi.org/10.1007/978-3-319-02141-6_6)
- Chakrabarty, N. (2019). Brain MRI Images for Brain Tumor Detection. Retrieved from <https://www.kaggle.com/datasets/navoneel/brain-mri-images-for-brain-tumor-detection>
- Chou, J.-S., & Truong, D.-N. (2021). A novel metaheuristic optimizer inspired by behavior of jellyfish in ocean. *Applied Mathematics and Computation*, 389, 125535. <https://doi.org/10.1016/j.amc.2020.125535>
- Cuevas, E., Zaldivar, D., & Pérez-Cisneros, M. (2010). A novel multi-threshold segmentation approach based on differential evolution optimization. *Expert Systems with Applications*, 37(7). <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2010.01.013>
- Dhal, K. G., Das, A., Ray, S., Gálvez, J., & Das, S. (2020). Nature-Inspired Optimization Algorithms and Their Application in Multi-Thresholding Image Segmentation. In *Archives of Computational Methods in Engineering* (Vol. 27). Springer Netherlands. <https://doi.org/10.1007/s11831-019-09334-y>
- Gao, H., Fu, Z., Pun, C. M., Hu, H., & Lan, R. (2018). A multi-level thresholding image segmentation based on an improved artificial bee colony algorithm. *Computers and Electrical Engineering*, 70. <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2017.12.037>
- Ghamisi, P., Couceiro, M. S., Martins, F. M. L., & Benediktsson, J. A. (2014). Multilevel image segmentation based on fractional-order darwinian particle swarm optimization. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 52(5). <https://doi.org/10.1109/TGRS.2013.2260552>
- Gharehchopogh, F. S., & Ibrikci, T. (2024). An improved African vultures optimization algorithm using different fitness functions for multi-level thresholding image segmentation. *Multimedia Tools and Applications*, 83(6). <https://doi.org/10.1007/s11042-023-16300-1>
- Guo, H., Li, M., Liu, H., Chen, X., Cheng, Z., Li, X., ... He, Q. (2024). Multi-threshold Image Segmentation based on an improved Salp Swarm Algorithm: Case study of breast cancer pathology images. *Computers in Biology and Medicine*, 168(August 2023), 107769. <https://doi.org/10.1016/j.combiomed.2023.107769>
- Hammouche, K., Diaf, M., & Siarry, P. (2008). A multilevel automatic thresholding method based on a genetic algorithm for a fast image segmentation. *Computer Vision and Image Understanding*, 109(2). <https://doi.org/10.1016/j.cviu.2007.09.001>

Hammouche, K., Diaf, M., & Siarry, P. (2010). A comparative study of various meta-heuristic techniques applied to the multilevel thresholding problem. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 23(5), 676–688. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2009.09.011>

Jena, B., Naik, M. K., Panda, R., & Abraham, A. (2021). Maximum 3D Tsallis entropy based multilevel thresholding of brain MR image using attacking Manta Ray foraging optimization. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 103(April), 104293. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2021.104293>

Kapur, J. N., Sahoo, P. K., & Wong, A. K. C. (1985). A new method for gray-level picture thresholding using the entropy of the histogram. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, 29(3), 273–285. [https://doi.org/10.1016/0734-189X\(85\)90125-2](https://doi.org/10.1016/0734-189X(85)90125-2)

Karaboga, D. (2005). *An idea based on honey bee swarm for numerical optimization*.

Karaboga, D., & Basturk, B. (2007). A powerful and efficient algorithm for numerical function optimization: artificial bee colony (ABC) algorithm. *Journal of Global Optimization*, 39(3), 459–471. <https://doi.org/10.1007/s10898-007-9149-x>

Karakoyun, M. (2023). The Comparison Of The Effects Of Thresholding Methods On Segmentation Using The Moth Flame Optimization Algorithm. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 26(2). <https://doi.org/10.17780/ksujes.1222041>

Kaur, T., Saini, B. S., & Gupta, S. (2016). Optimized multi threshold brain tumor image segmentation using two dimensional minimum cross entropy based on co-occurrence matrix. In *Studies in Computational Intelligence* (Vol. 651). [https://doi.org/10.1007/978-3-319-33793-7\\_20](https://doi.org/10.1007/978-3-319-33793-7_20)

Kennedy, J., & Eberhart, R. (1995). Particle swarm optimization. *Proceedings of ICNN'95 - International Conference on Neural Networks*, 4, 1942–1948. IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICNN.1995.488968>

Kotte, S., Pullakura, R. K., & Injeti, S. K. (2018). Optimal multilevel thresholding selection for brain MRI image segmentation based on adaptive wind driven optimization. *Measurement*, 130, 340–361. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.08.007>

Kurban, R., Durmus, A., & Karakose, E. (2021). A comparison of novel metaheuristic algorithms on color aerial image multilevel thresholding. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 105(July), 104410. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2021.104410>

Kurban, T., Civicioglu, P., Kurban, R., & Besdok, E. (2014). Comparison of evolutionary and swarm based computational techniques for multilevel color image thresholding. *Applied Soft Computing Journal*, 23. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2014.05.037>

Li, C. H., & Lee, C. K. (1993). Minimum cross entropy thresholding. *Pattern Recognition*, 26(4), 617–625. [https://doi.org/10.1016/0031-3203\(93\)90115-D](https://doi.org/10.1016/0031-3203(93)90115-D)

Liu, Y., Mu, C., Kou, W., & Liu, J. (2015). Modified particle swarm optimization-based multilevel thresholding for image segmentation. *Soft Computing*, 19(5). <https://doi.org/10.1007/s00500-014-1345-2>

Manikandan, S., Ramar, K., Willjuice Iruthayarajan, M., & Srinivasagan, K. G. (2014). Multilevel thresholding for segmentation of medical brain images using real coded genetic algorithm. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 47(1). <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2013.09.031>

Mann, H. B., & Whitney, D. R. (1947). On a test of whether one of two random variables is stochastically larger than the other. *The Annals of Mathematical Statistics*, 50–60.

- Mirjalili, S. (2015a). 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. (2015b). The Ant Lion Optimizer. *Advances in Engineering Software*, 83, 80–98. <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2015.01.010>
- Mirjalili, S., & Lewis, A. (2016). The Whale Optimization Algorithm. *Advances in Engineering Software*, 95, 51–67. <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2016.01.008>
- 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>
- Mittal, A., Soundararajan, R., & Bovik, A. C. (2013). Making a “completely blind” image quality analyzer. *IEEE Signal Processing Letters*, 20(3). <https://doi.org/10.1109/LSP.2012.2227726>
- Oliva, D., Cuevas, E., Pajares, G., Zaldivar, D., & Perez-Cisneros, M. (2013). Multilevel thresholding segmentation based on harmony search optimization. *Journal of Applied Mathematics*, 2013. <https://doi.org/10.1155/2013/575414>
- Oliva, D., Hinojosa, S., Cuevas, E., Pajares, G., Avalos, O., & Gálvez, J. (2017). Cross entropy based thresholding for magnetic resonance brain images using Crow Search Algorithm. *Expert Systems with Applications*, 79, 164–180. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2017.02.042>
- Otsu, N. (1979). A threshold selection method from gray-level histograms. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 9(1), 62–66.
- Portes de Albuquerque, M., Esquef, I. A., Gesualdi Mello, A. R., & Portes de Albuquerque, M. (2004). Image thresholding using Tsallis entropy. *Pattern Recognition Letters*, 25(9), 1059–1065. <https://doi.org/10.1016/j.patrec.2004.03.003>
- Rahkar Farshi, T., & K. Ardabili, A. (2021). A hybrid firefly and particle swarm optimization algorithm applied to multilevel image thresholding. *Multimedia Systems*, 27(1), 125–142. <https://doi.org/10.1007/s00530-020-00716-y>
- Rodríguez-Esparza, E., Zanella-Calzada, L. A., Oliva, D., Heidari, A. A., Zaldivar, D., Pérez-Cisneros, M., & Foong, L. K. (2020). An efficient Harris hawks-inspired image segmentation method. *Expert Systems with Applications*, 155. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2020.113428>
- Sahoo, P., Wilkins, C., & Yeager, J. (1997). Threshold selection using Renyi’s entropy. *Pattern Recognition*, 30(1), 71–84. [https://doi.org/10.1016/S0031-3203\(96\)00065-9](https://doi.org/10.1016/S0031-3203(96)00065-9)
- Sezgin, M., & Sankur, B. (2004). Survey over image thresholding techniques and quantitative performance evaluation. *Journal of Electronic Imaging*, 13(1), 146–165. <https://doi.org/10.1117/1.1631316>
- Sharma, A., Chaturvedi, R., & Bhargava, A. (2022). A novel opposition based improved firefly algorithm for multilevel image segmentation. *Multimedia Tools and Applications*, 81(11). <https://doi.org/10.1007/s11042-022-12303-6>
- Tarkhaneh, O., & Shen, H. (2019). An adaptive differential evolution algorithm to optimal multi-level thresholding for MRI brain image segmentation. *Expert Systems with Applications*, 138. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2019.07.037>
- Tuba, E., Alihodzic, A., & Tuba, M. (2017). Multilevel image thresholding using elephant herding optimization algorithm. *2017 14th International Conference on Engineering of Modern Electric Systems, EMES 2017*. <https://doi.org/10.1109/EMES.2017.7980424>
- Wang, Z., Bovik, A. C., Sheikh, H. R., & Simoncelli, E. P. (2004). Image quality assessment: From error visibility to structural similarity. *IEEE Transactions on Image Processing*, 13(4). <https://doi.org/10.1109/TIP.2003.819861>

Wolpert, D. H., & Macready, W. G. (1997). No free lunch theorems for optimization. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 1(1), 67–82. <https://doi.org/10.1109/4235.585893>

Ye, Z. W., Wang, M. W., Liu, W., & Chen, S. Bin. (2015). Fuzzy entropy based optimal thresholding using bat algorithm. *Applied Soft Computing Journal*, 31. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2015.02.012>



# Kahramanmaraş Sütçü İmam University Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 11.01.2024  
Kabul Tarihi : 26.04.2024

Received Date : 11.01.2024  
Accepted Date : 26.04.2024

## TOZ METALURJİSİYLE ÜRETİLEN NiTi'NİN MİKROSERTLİK VE MİKROYAPI DAVRANIŞI

### MICROHARDNESS AND MICROSTRUCTURE BEHAVIOR OF NITI MANUFACTURED BY POWDER METALLURGY

Gül TOSUN<sup>1</sup> \* (ORCID: 0000-0001-8828-827X)

Tuncay KAYMAK<sup>2</sup> (ORCID: 0000-0002-1646-1050)

Nihat TOSUN<sup>3</sup> (ORCID: 0000-0002-6211-5044)

<sup>1</sup> Fırat Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Elazığ, Türkiye

<sup>2</sup> Kredi ve Yurtlar Müdürlüğü Elazığ, Türkiye

<sup>3</sup> Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Elazığ, Türkiye

\*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Gül TOSUN, gultosun@firat.edu.tr

#### ÖZET

Bu çalışmada, biyomalzeme olan NiTi alaşımının toz metalürjisi yöntemiyle üretimi yapılmıştır. Üretim parametreleri 200, 400 MPa presleme basıncı, 800, 1100°C sinterleme sıcaklığı ve 60, 90, 120 dakika sinterleme süresidir. Gözenekli yapıya sahip NiTi'nin üretim parametrelerine bağlı olarak mikrosertlik ve mikroyapı karakterizasyonu incelenmiştir. Yapılan incelemeler sonucunda, üretim parametrelerinin değiştirilmesiyle birlikte hem mikrosertlikte hem de mikroyapıda önemli değişimlerin olduğu görülmüştür. En yüksek sertlik 811,33 HV olarak ölçülürken en düşük sertlik ise 232 HV olarak ölçülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** NiTi, toz metalürjisi, mikrosertlik, mikroyapı.

#### ABSTRACT

In this study, the biomaterial NiTi alloy was produced by the powder metallurgy method. Production parameters are 200, 400 MPa pressing pressure, 800, 1100°C sintering temperature and 60, 90, 120 minutes sintering time. Microhardness and microstructure characterization of NiTi, which has a porous structure, was examined depending on the production parameters. As a result of the examinations, it was observed that there were significant changes in both microhardness and microstructure by changing the production parameters. The highest hardness was measured as 811.33 HV, while the lowest hardness was measured as 232 HV.

**Keywords:** NiTi, powder metallurgy, microhardness, microstructure.

## GİRİŞ

NiTi metal köpükler yüksek mukavemete ve düşük yoğunluğa sahip porozlu malzemelerdir ve bu özellikleri sayesinde yüksek darbe sönümlenme yeteneğine sahiptirler (Tüfekçi, 2008). Ayrıca, NiTi alaşımlar, biçim bellekli etki, süper elastisite ve yüksek buharlaşma kapasitesi gibi eşsiz özelliklerinden dolayı tıbbi cihazlar, uçaklar, mimari yapılarda kullanılmaktadırlar, özellikle tıbbi cihazlar, implant ve protezde kullanılan önemli biyomateryallerdir (Huang vd. 2024, Lu vd., 2023, Kapanen vd., 2002).

Tıbbi ve biyomedikal mühendisliğinin bugün üzerinde en çok çalıştığı konulardan biri olan hastalıkların tedavisinde kullanılan uygun malzeme seçme, oluşturma ve malzemeleri kullanım alanına uygun hale getirme çabalarıdır. Kullanılacak malzeme yerini aldığı organın fonksiyonunu üstlenebilecek özellikte olmalıdır. Vücut koşulları içinde korozyona dayanıklı, biyoyumlu, dokularda toksik reaksiyon oluşturmaması, vücut ağırlığı göz önüne alındığında fiziksel olarak basma dayanımlarının vücut tarafından iletilen yükleri taşıyacak dayanımda olması gerekmektedir. Canlı doku için kullanılan malzeme, insan vücudu göz önünde tutulduğunda, 37 °C'de ve 7.25 pH'lık bir değerde özelliklerini kaybetmeden temasta bulunduğu dokuya zıt bir reaksiyon göstermeden, mekanik kuvvetlere karşı deformasyona uğramadan, eğilip bükülmeden direnç göstermesi gerekmektedir (Khorasani vd., 2015). İnsan kemiğinin basma mukavemeti, test yönünün kemik eksenine paralel olması durumunda 170-193 MPa ve test yönünün kemik eksenine dik olması durumunda ise 133 MPa'dır. İnsandaki süngerimsi (trabeküler) kemiğin basma mukavemeti yaklaşık 50 MPa'dır (Tüfekçi, 2008). Üretilen implantların mekanik özelliklerinin yukarıda bahsedilen kriterlere yakın olacak şekilde üretilmesi talep edilir.

Ayrıca, canlı dokuda bir organın görevine destek olmak ve hasarlı dokunun görevini yerine getirmek amacıyla kullanılan biyomalzemelerde aranan ilk şart kullanılan biyomalzemenin biyoyumlu olmasıdır. Biyoyumluluk vücut ile uyuşabilirliktir. Başka bir ifadeyle biyoyumluluk; canlı vücut ile temas halinde olan bir metaryalin kendisini çevreleyen dokuların fonksiyonel yapılarına engel olmadan ve herhangi bir olumsuz etkiye (iltihaplanma, pıhtı oluşumu vb.) sebep olmadan kullanım amacına uygun fonksiyonel özellik gösterme kabiliyetidir. Biyoyumluluğu etkileyen faktörler: Malzemenin fiziksel ve kimyasal yapısı, doku ile temas şekli, dokunun özellikleri ve kullanım yeridir. Biyomalzeme hasarlı bir organın yerine kullanıldığında organın görevlerini ne kadar iyi yerine getirebilirse ve çevresi ile iyi uyumluysa o kadar iyi biyoyumludur demektir (Korsacılar, 2012).

Son yıllarda içerisinde toz metalürjisi yöntemi düşük enerji tüketimi ve kısa süreli işlem gibi avantajlarından dolayı birçok araştırmacı tarafından ilgi görmektedir (Ma vd., 2019). Kendi kendine ilerleyen sentezleme yöntemi, mikrodalga sinterleme, plazma sinterleme, vakum sinterleme, sıcak izostatik sinterleme, metal enjeksiyon kalıplama, katmanlı imalat gibi birçok toz metalürjisi yöntemleri NiTi imalatı için kullanılmaktadır (Li vd., 2023). Üretilen NiTi, gözenekli bir yapıya sahiptir. Yapıdaki gözenek oranı ve şekli üretim parametreleri ile kontrol edilir (Patel vd., 2023). Ayrıca, NiTi üretimi esnasında meydana gelebilecek istenmeyen ikincil fazlar ve empürilerin varlığı, Ni ve Ti arasındaki reaksiyonun tamamlanabilmesi de seçilen üretim parametrelerine bağlıdır (Akbarpour vd., 2021).

Yapılan bu çalışmada, toz metalürji yöntemi kullanılarak şimdiye kadar kullanılmamış farklı presleme basıncı, sinterleme sıcaklığı ve sinterleme süresi gibi farklı üretim parametreleri kullanılarak gözenekli NiTi üretilmiştir. Üretilen NiTi'nin mikroyapısal ve mikrosertlik değişimleri incelenerek değerlendirilmiştir. Bu değerlendirmeler ışığında kemik yapısına en uyumlu mukavemeti yüksek NiTi 'un elde edildiği optimum üretim parametreleri belirlenmiştir.

## MATERYAL VE YÖNTEM

Bu çalışmada, 30 mikron boyutunda, %99 saflıkta ve küresel morfolojiye sahip Nikel ve Titanyum tozları hazır olarak Nanografi firmasından temin edilmiştir. Aynı ayrı temin edilen elemental tozlar atomik olarak %53Ni oranındaki NiTi toz karışımı homojen bir yapı elde etmek için, karıştırma aparatında 16 d/dak devirle 24 saat boyunca torna tezgâhına bağlanarak harmanlanmıştır. 6 gr olarak hazırlanan toz karışımları, tek eksenli olarak 200 ve 400 MPa basınç altında Özyıldız marka hidrolik pres (15 ton, 400bar ) kullanılarak 10 mm çapında 50 mm yüksekliğinde bir kalıba preslenmiştir. Preslenmiş numuneler 60, 90 ve 120 dak sürelerde Heraeus marka yüksek sıcaklıklara dayanıklı sinterleme fırını (max. 1400°C, 220 v, 50Hz, 6,5 A) kullanılarak 800°C ve 1100°C sıcaklıklarda kontrollü atmosfer ortamında (Argon gazı) sinterleme işlemine tabi tutulmuştur. Sinterlenen numunelerin mikroyapı incelemelerini yapabilmek için 200, 400, 600, 800, 1000, 1200 meshlik zımparalar ile parlatma işlemi yapılmıştır. Parlatılan

numuneler daha sonra 3 mikronluk pasta kullanılarak son parlatma aşamasına tabi tutulduktan sonra yüzeyler % 65 Nitrik asit ile dağlanmıştır.

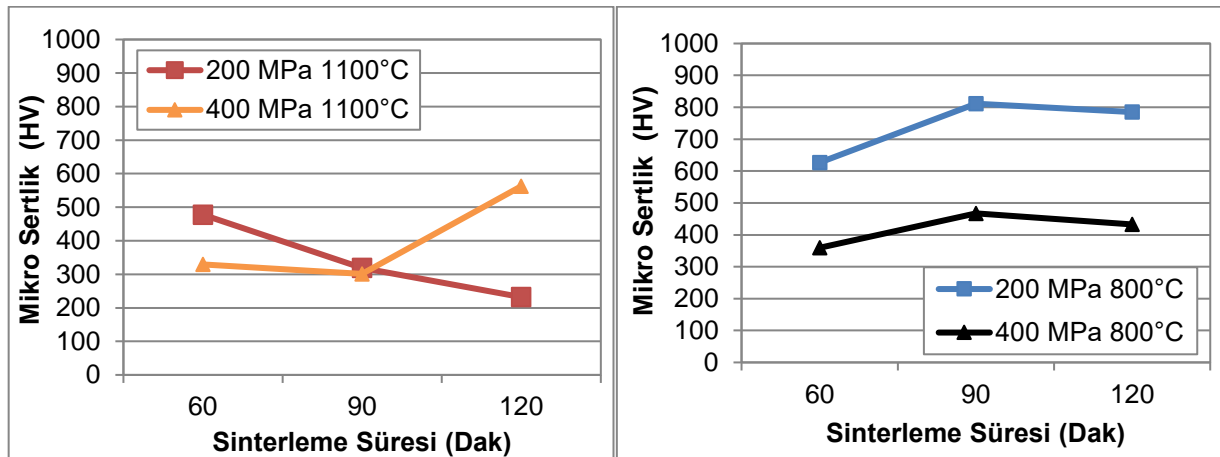
Üretilen NiTi'lerin mikrosertlik değerlerini ölçmek için Emco marka deney test cihazı kullanıldı (Şekil 1). Her bir numuneden 5 adet ölçüm alınmıştır, elde edilen ölçümlerin ortalaması alınarak mikrosertlik değerleri elde edildi. Gözenekli yapıya sahip NiTi'nin mikroyapı karakterizasyonu ise optik (Nikon MA 200), mikroskop kullanılarak yapıldı. Gözenek oranları ise Arşimed metodu kullanılarak ölçülmüştür.



Şekil 1. Mikro Sertlik Ölçüm Cihazı

## BULGULAR

Üretilen NiTi'lerin mikrosertlik ölçümleri sonucu (Şekil 2) elde edilen grafik incelendiği zaman, 800°C sinterleme sıcaklığında üretilen tüm numunelerde basınç arttıkça sertlik değerleri düştüğü görülmüştür. Oysa basınç arttıkça ölçülen mikrosertlik değerlerinin artması beklenmektedir. Çünkü presleme basıncının artırılmasıyla, preslenen tozlar arası mesafe kısalmış ve gözenek oranı düşük bir ham numune elde edilir. Daha az gözenek yapısına sahip olan numunenin sinterlenmesi durumunda ise daha yüksek sertliğe sahip, daha yoğun bir numunenin elde edilir. Beklenin aksine, mikrosertlikteki elde edilen düşüşün sebebi olarak mikro yapıda gözlemlenen ikincil fazların varlığına bağlanmıştır. 800°C sinterleme sıcaklığında üretilen numunelerin mikroyapı görüntüleri incelenecek olursa, genel olarak (Şekil 3 ve Şekil 4) NiTi fazının hakim olduğu, ancak bu fazın yanısıra Ni<sub>4</sub>Ti<sub>3</sub>, Ni<sub>3</sub>Ti<sub>2</sub>, Ni<sub>4</sub>Ti gibi ikincil fazların ve reaksiyona girmemiş Titanyum ve Nikelin mevcut olduğu görülmüştür. Reaksiyona girmemiş Ni ve Ti'nin varlığı sinterlenmenin tamamlanmadığı anlamına gelmektedir (Parvizi vd., 2021).



Şekil 2. Mikrosertlik Değişim Grafiği

Sinterleme süresi açısından değerlendirme yapılacak olunursa, 800°C'de sinterlenen numunelerde sinterleme süresinin 60 dakikadan 90 dakikaya çıkarıldığı zaman mikrosertlikte artışın gerçekleştiği, 90 dakikadan daha uzun sürelerdeki artışlarda ise mikrosertlikte düşüşün meydana geldiği görüldü. Aynı zamanda yapıdaki mukavemeti etkileyen gözenek oranlarına bakıldığında, 200 MPa presleme basıncı, 800°C sinterleme sıcaklığında 60 dakika



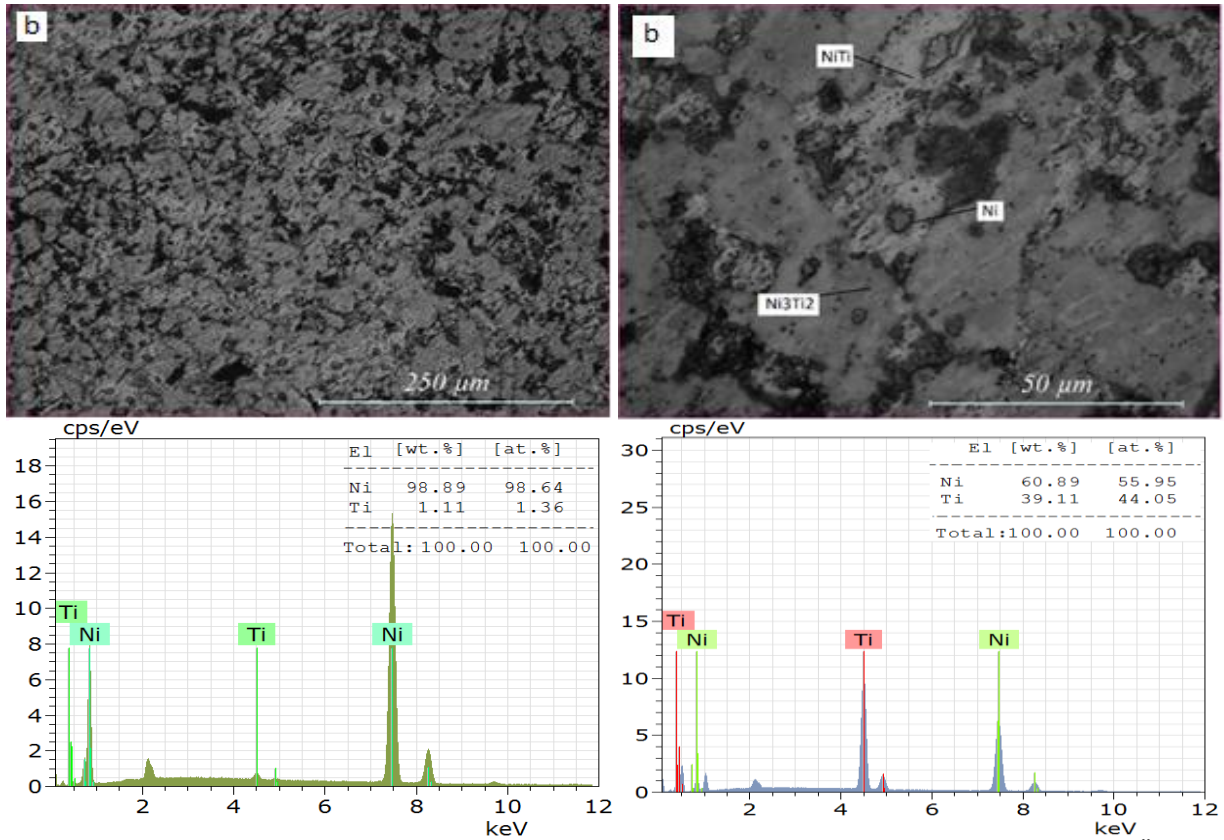
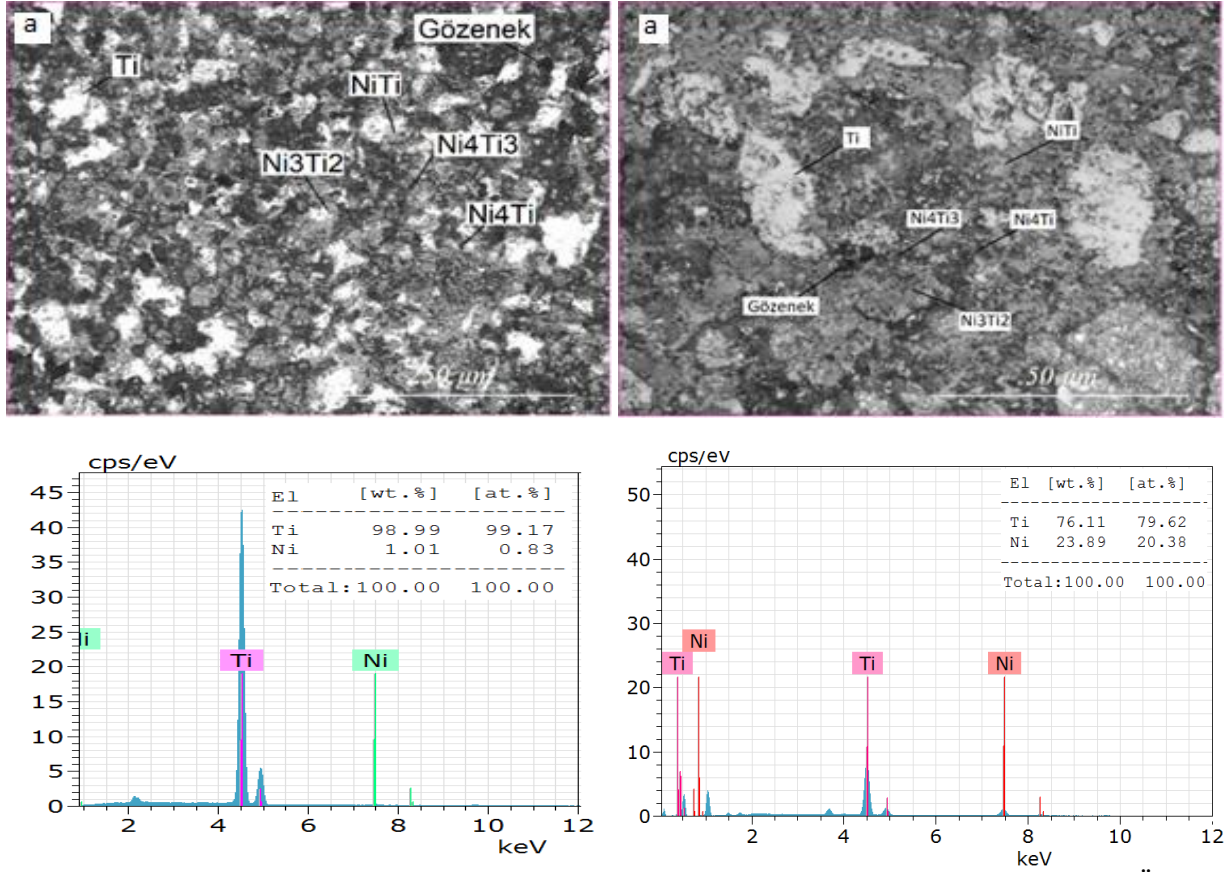
süredeki gözenek %80,67 iken 90 dakika sinterleme süresinde %80,68 ve 120 dakika sinterleme süresinde ise %80,61 olarak ölçülmüş ve elde edilen dataların ise mikrosertlik ile paralel olduğu görülmüştür. Presleme işlemi esnasında mekanik olarak birbirine bağlanan tozlar arasındaki kimyasal bağ sinterleme işlemi esnasında oluşur. Optimum sinterleme süresinde ham numunedeki tozlararası bağlanma ideal şekilde gerçekleşir. Dolayısıyla elde edilen numunenin sertliği ham numuneden daha fazla olur. Basınç ve sinterleme sıcaklığına da bağlı olarak sinterleme süresinin uzun tutulmasıyla beraber yapı içerisinde mikrosertliği olumsuz etkileyecek ikincil fazlar ve tane büyümesinin meydana geldiği görülür. Dolayısıyla sinterleme süresine bağlı olarak her malzemenin eşik sinterleme süresi mevcuttur. Yapılan bu çalışmada ise 90 dakikalık sinterleme süresinin eşik sinterleme süresi olduğu görülmüştür.

1100°C'de sinterlenen numunelerde ise presleme basıncının değişmesiyle beraber sinterleme süresinin mikrosertlik üzerindeki etkisinin değiştiği görüldü. 200 MPa presleme basıncında preslenen numunelerde sinterleme süresi arttıkça mikrosertlik %51,4 düştü. 400 MPa'da da 90 dakikalık sinterleme süresinin eşik sinterleme süresi olduğu görülmüştür. Sinterleme süresinin 60 dakikadan 90 dakikaya çıkmasıyla beraber mikrosertliğin % 8,5 düştüğü sürenin 120 dakikaya çıkmasıyla beraber mikrosertlikte % 86,7 artmıştır.

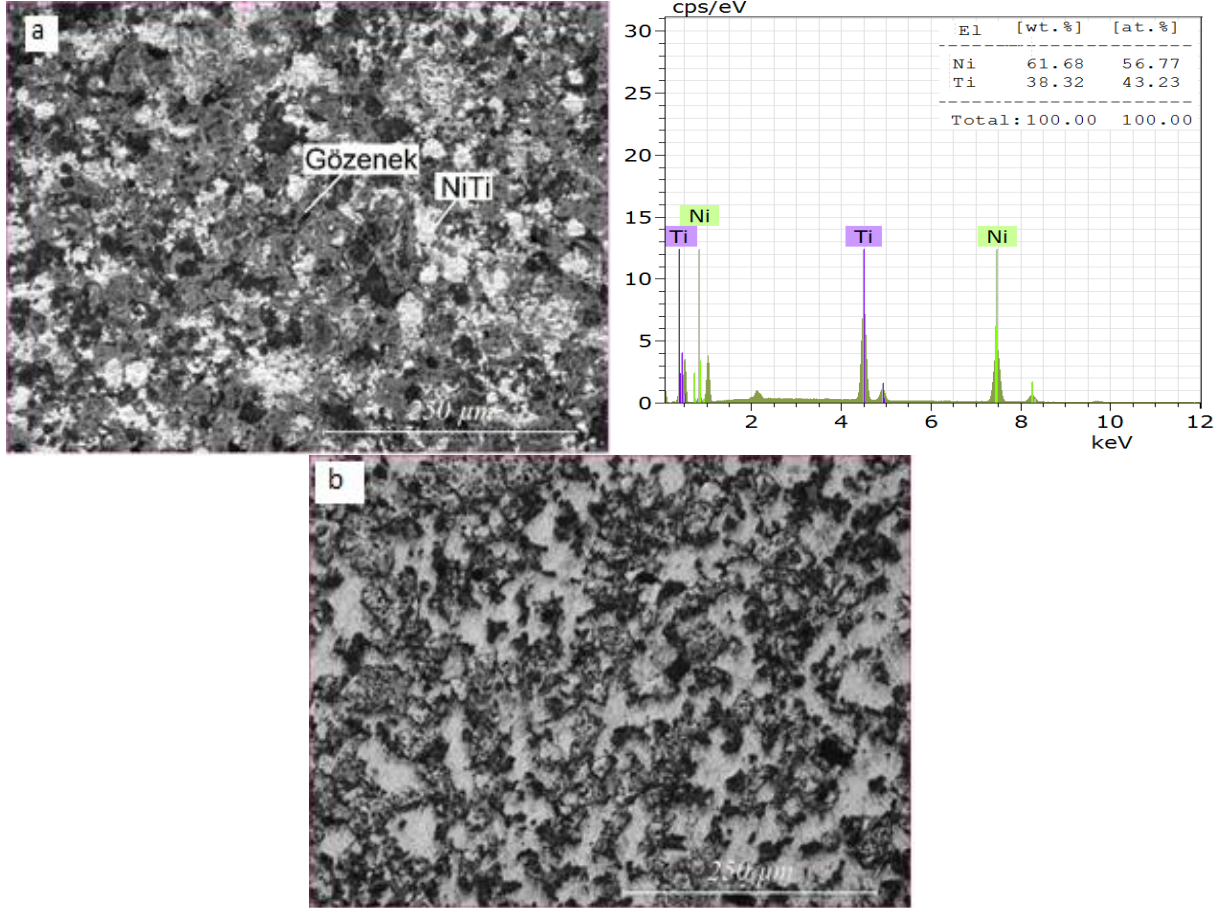
En yüksek mikrosertlik ise 200 MPa presleme basıncı, 800°C sinterleme sıcaklığı ve 90 dakika sinterleme süresinde üretilen numunelerde 811,33 Hv olarak ölçülürken, en düşük mikrosertlik ise 200 MPa presleme basıncı, 1100°C sinterleme sıcaklığı ve 120 dakika sinterleme süresinde üretilen numunelerde 232 Hv olarak ölçülmüştür. Huang vd. (2024) tarafından yapılan çalışmada elde edilen en yüksek NiTi sertliğinin 531 Hv olduğu belirtilmiştir. Han vd. (2022) tarafından yapılan çalışmada ise max. NiTi sertliği 575,9 Hv olarak ölçülmüştür. Yapılan bu çalışmada ise literatürdeki çalışmalarda daha yüksek sertliğe dolayısıyla daha yüksek mukavemete sahip NiTi üretiminin yapıldığı görülmüştür.

Akbarpour vd. (2021) yaptıkları çalışmada alaşımın mikrosertliğini gözeneklilik, tane boyutu, Ni<sub>3</sub>Ti gibi daha sert fazların türü ve miktarı gibi faktörler etkilediğini belirlemişler. Ni<sub>3</sub>Ti fazı, mevcut diğer tüm intermetalik bileşiklerden çok daha yüksek bir sertlik değerine sahiptir. Dolayısıyla mikroyapı incelemeleri esnasında tespit edilen fazlar, sertlik ile elde edilen sonuçlarla ilişkilendirilmeye çalışılmıştır.

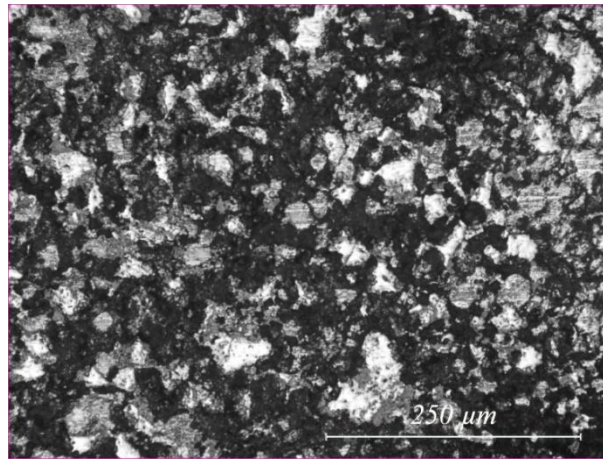
Mikroyapı açısından değerlendirme yapılırsa (Şekil 3 ve Şekil 4), 200 MPa presleme basıncı ve 800°C sinterleme sıcaklığında üretilen numunelerde sinterleme süresinin 60 dakikadan 90 dakikaya sonrasında ise 120 dakikaya artmasıyla beraber NiTi bölgelerinin arttığı bununla beraber reaksiyona girmemiş Ti'nin genellikle gözeneklerin etrafında mevcut olduğu ve ikincil fazların ise azaldığı görülmüştür. Gözlemlenen ikincil fazlar Ni<sub>4</sub>Ti<sub>3</sub>, Ni<sub>3</sub>Ti<sub>2</sub>, Ni<sub>4</sub>Ti fazlarıdır. Bu fazların varlığı mukavemet düşüşüne neden olur, bu sebeple bu fazların elimine edilmesi gerekir. İkincil fazların bulunduğu bölgelerin merkezinde ise reaksiyona girmemiş Ni mevcuttur. Biyomalzeme olarak kullanılması amaçlanan NiTi'nin yapısı içerisinde Ni'nin bulunması istenmez çünkü Nikelin zehirleyici etkisinin olduğu ve hücrelerin yaşam sürelerinin azalttığı bilinmektedir (Güven, 2014). Ni<sub>4</sub>Ti<sub>3</sub> fazları matristeki Ni içeriğini ve martenzitik dönüşüm (Östenitten martenzite olan dönüşüm) özelliklerini etkiler. Tang vd. (2011) göre sinterleme esnasında meydana gelen katı hal reaksiyonunda birincil reaksiyon da NiTi'nin oluşması mümkün değildir. NiTi ancak NiTi<sub>2</sub>, Ni<sub>3</sub>Ti, Ni ve Ti arasındaki ikincil reaksiyonlar ile meydana gelir. Bu reaksiyonlar ise zayıf reaksiyonlardır. NiTi'nin çözünürlük sınırını aştığında Nikel açısından zengin Ni<sub>4</sub>Ti<sub>3</sub> fazı oluşur. Tamamlanmamış reaksiyondan dolayı NiTi<sub>2</sub>, Ni<sub>3</sub>Ti, ve NiTi'nin fazlarının bir arada bulunacağı düşünülür. İkincil fazlar oluşurken Nikel açısından zengin fazlar oluşarak yapıdaki Nikeli tükettiği, bu yüzden yapıda reaksiyona girmemiş Ti mevcut olduğu görülmüştür. Yapıda reaksiyona girmemiş Ti'nin bulunması biyoyumluluk açısından olumsuz etkilememektedir. Sinterleme süresinin artması sinterleme işleminin tamamlanmasına ve reaksiyona girmemiş Ni'nin ve Ti'nin azalmasına neden oldu. İkincil fazlardan sert olan (Jiang, 2023) NiTi<sub>2</sub> fazının yerine düşük sertliğe sahip olan Ni<sub>3</sub>Ti<sub>2</sub> fazının meydana geldiği görülmüştür. Mikroyapıda gözlemlenen bu ikinci fazlar mikrosertliğin düşmesinin sebebi olarak gösterilebilir.



400 MPa presleme basıncı ve 60 dakikalık sinterleme süresinde sinterleme sıcaklığının 800°C'den 1100°C'ye artırıldığı zaman ise yapıda NiTi anafazı, NiTi<sub>3</sub> ikincil fazı ve yapıda reaksiyona girmemiş Ni mevcuttur (Şekil 5). Elde edilen bu veriler, belirtilen şartlarda sinterleme işleminin tam olarak gerçekleşmediği anlamına gelmektedir. Sinterleme sıcaklığı 90 dakika üretilen numunelerin mikroyapılarında ise ana faz NiTi'nin arttığı ve NiTi<sub>2</sub>, ve NiTi<sub>3</sub> ikincil fazları ve reaksiyona girmemiş Ni mevcut olduğu görülmüştür (Şekil 6). Sinterleme süresi 120 dakikaya çıkarıldığında ise NiTi anafazı daha çok artmış ancak yapıda ikincil fazların azaldığı Nikelin tüketilmiş olduğu ancak reaksiyona girmemiş Ti'nin varlığı görülmüştür. İkincil fazların varlığı mikro yapıyı etkilemekte ve sertlik değerinin düşmesine sebep olmaktadır.



Şekil 5. 1100°C Sinterleme Sıcaklığı, 90 dak Sinterleme Süresinde a. 200 MPa b. 400 MPa Presleme Basıncında Üretilen Numunelerin Mikroyapı Görüntüleri ve EDX Analizleri



Şekil 6. 200 MPa Presleme Basıncı, 800°C Sinterleme Sıcaklığı ve 90 Dakika Sinterleme Süresinde Üretilen Numunenin Mikroyapı Görüntüsü

## TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu çalışmada toz metalürjisi yöntemi ile üretilen %53Ni oranındaki NiTi'nin mikrosertlik ve mikro yapı incelemeleri yapılmıştır. Bu incelemeler sonucunda;

- 800°C sinterleme sıcaklığında üretilen tüm numunelerde basınç arttıkça sertlik değerleri düştüğü görülmüştür.
- En yüksek mikrosertlik ise 200 Mpa presleme basıncı, 800°C sinterleme sıcaklığı ve 90 dakika sinterleme süresinde üretilen numunelerde 811,33 Hv olarak ölçülmüştür.
- En düşük mikrosertlik ise 200 MPa presleme basıncı, 1100°C sinterleme sıcaklığı ve 120 dakika sinterleme süresinde üretilen numunelerde 232 Hv olarak ölçülmüştür.
- 800°C sinterleme sıcaklığında üretilen numunelerin mikroyapı görüntülerinde NiTi fazının hâkim olduğu, ancak bu fazın yanısıra Ni<sub>4</sub>Ti<sub>3</sub>, Ni<sub>3</sub>Ti<sub>2</sub>, Ni<sub>4</sub>Ti gibi ikincil fazların ve reaksiyona girmemiş Titanyum ve Nikelin mevcut olduğu görülmüştür.
- Elde edilen numunelerin hem mikrosertlik açısından literatüre göre daha yüksek sertliğin elde edilmesinden dolayı hemde mikroyapı açısından ikincil fazların yanısıra anafazın NiTi fazı olmasından dolayı implant olarak kullanımının uygun olduğu kanaatine varılmıştır.

## TEŞEKKÜR

Bu çalışması Fırat Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi (FÜBAP) tarafından TEKF.18.19 nolu proje olarak desteklenmiştir. Desteklerinden dolayı FÜBAP'a teşekkür ederiz.

## KAYNAKLAR

- Akbarpour, M.R., Alipour, S., Najafi, M., Ebadzadeh, T., Kim, H.S. (2021). Microstructural characterization and enhanced hardness of nanostructured Ni<sub>3</sub>Ti–NiTi (B2) intermetallic alloy produced by mechanical alloying and fast microwave-assisted sintering process. *Intermetallics*, 131, 107119, <https://doi.org/10.1016/j.intermet.2021.107119>
- Albayrak, O., Oncel, C., Tefek, M., & Altıntaş, S. (2007). Effects of Calcination on Electrochemical Deposition of Naturally Derived and Chemically Synthesized Hydroxyapatite. *Review Advanced Material Science*, 15, 10-15.
- Bogdanovicene, I., Beganskiene, A., Tonsuaadu, K., Glaser, J., Meyer, H.J., & Kareiva, A. (2006). Calcium hydroxyapatite, Ca<sub>10</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>6</sub>(OH)<sub>2</sub> ceramics prepared by aqueous sol-gel processing. *Materials Research Bulletin*, 41, 1754-1762, <https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2006.02.016>
- Güven, Ş. Y. (2014) Biyouumluluk ve Biyomalzemelerin Seçimi. Süleyman Demirel Üniversitesi Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi, 2(3), ÖS:BiyoMekanik, 303-311, 2014 ISSN: 1308-669.
- Han J., Chen X., Zhang G., Lu L., Xin Y., Liu B., Cai Y., Zhang X., Tian Y.(2022). Microstructure and mechanical properties of Ni<sub>50.8</sub>Ti<sub>49.2</sub> and Ni<sub>53</sub>Ti<sub>47</sub> alloys prepared in situ by wire-arc additive manufacturing. *Journal of Materials Processing Tech.* 306,117631. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2022.117631>.
- Huang, Y., Xin, D., Chen, X. (2024). Microstructure and properties of NiTi shape memory alloy fabricated by double-wire plasma arc additive manufacturing with a nearly equal atomic ratio. *Materials Letters*, 354, 135406. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2023.135406>
- Jiang P.F., Nie M.H., Zong X.M., Wang X.B., Chen Z.K., Liu C.Z., Teng J.Z., Zhang Z.H.(2023). Microstructure and mechanical properties of TC4/NiTi bionic gradient heterogeneous alloy prepared by multi-wire arc additive manufacturing. *Materials Science and Engineering: A*, 144678. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2023.144678>
- Kapanen, A., Ilvesaro, J., Danilov, A., Ryhanen, J., Lehenkari, P., & Tuukkanen, J. (2002). Behaviour of Nitinol in osteoblast-like ROS-17 cell cultures. *Biomaterials*, 23, 645–650. [https://doi.org/10.1016/S0142-9612\(01\)00143-0](https://doi.org/10.1016/S0142-9612(01)00143-0)
- Khorasani, A.M., Goldberg, M., Doeven, E.H., & Littlefair, G. (2015). Titanium in Biomedica Applications-Properties and Fabrication: A Review. *Journal of Biomaterials and Tissue Engineering*, 5, 593-619. DOI: 10.1166/jbt.2015.1361
- Korsacılar, D. (2012). Metalik implant malzeme yüzeylerinin elektropolimerizasyon yöntemi ile sentetik hidrojel polimerlerle kaplanarak biyouyumluluğunun araştırılması. Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir. 73

- Li, D., Du, C., He, Z., Li, Y., Luo, F., He, H. (2023). High-strength porous NiTi shape memory alloys with stable cyclic recovery properties fabricated using elemental powders. *Materials Science & Engineering A*, 886, 145682. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2023.145682>
- Lu, H.Z., Liu, L.H., Luo, X., Ma, H.W., Cai, W.S., Lupoi, R., Yin, S., Yang, C. (2023). Formation mechanism of heterogeneous microstructures and shape memory effect in NiTi shape memory alloy fabricated via laser powder bed fusion. *Materials & Design*, 232, 11107, <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2023.112107>
- Ma, X., Wang, H., Xie, H., Qu, J., Chen, X., Chen, F., Song, Q., Yin, H. (2019). Engineering the porosity and superelastic behaviors of NiTi alloys prepared by an electro-assisted powder metallurgical route in molten salts. *Journal of Alloys and Compounds*. 794, 455-464, <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.04.16>
- Parvizi, S., Hashami, S. M., Asgarinia, F., Nematollahi, M., & Elahinia, M. (2021). Effective parameters on the final properties of NiTi- based alloys manufactured by powder metallurgy methods: A review. *Progress Material Science*, 117, 100739, <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2020.100739>
- Patel, S. K., Dubey, P., Roshan, R., Beher, A. (2023). Elastic and transformation behaviour of equiatomic NiTi shape memory alloys fabricated at different sintering temperatures. *Materials Today Communications*, 37,107203, <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2023.107203>
- Tang, C.Y.; Zhang, L.N.; Wong, C.T.; Chan, K.C.; Yue, T.M. (2011). Fabrication and characteristics of porous NiTi shape memory alloy synthesized by microwave sintering, *Materials Science and Engineering: A*, C. 528, Sayı 18, 6006-6011. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2011.04.040>
- Tüfekçi, K. (2008). Gerinin Hızının Kortikal Kemik Mekanik Özellikleri Üzerindeki Etkisinin İncelenmesi, Doktora Tezi, Süleyman Demirel Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Qin, R., Jiang, F., Cao, M., Li, Y., Zhang, H., Guo, C., Wang, Z. (2022). Preparation, microstructure and compressive property of NiTi alloy hollow spheres fabricated by powder metallurgy. *Materials Today Communications*, 30, 103039. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2021.103039>
- Yavaş, U.D. (2017). Ti6Al4V İmplantların Elektroforetik Biriktirme Yöntemi ile Hidroksiapatit Kaplanması Yüksek Lisans Tezi. Kocaeli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli.84



# Kahramanmaraş Sütçü İmam University Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 14.01.2024  
Kabul Tarihi : 26.03.2024

Received Date : 14.01.2024  
Accepted Date : 26.03.2024

## METALLERİN YAPIŞTIRMA BAĞLANTILARININ FARKLI MODELLEME YAKLAŞIMLARI KULLANARAK SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE KARŞILAŞTIRMALI STATİK YÜKLEME ANALİZİ

### COMPARATIVE FINITE ELEMENT ANALYSIS OF STATICALLY LOADED ADHESIVELY BONDED METALLIC STRUCTURES USING DIFFERENT MODELLING APPROACHES

Faik Fatih KORKMAZ<sup>1\*</sup> (ORCID: 0000-0003-3664-0328)  
Kadir ÇAVDAR<sup>2</sup> (ORCID: 0000-0001-9126-0315)

<sup>1</sup> Bursa Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa, Türkiye

<sup>2</sup> Bursa Uludağ Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Bursa, Türkiye

\*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Faik Fatih KORKMAZ, 502010076@ogr.uludag.edu.tr

#### ÖZET

Yapışma bağlantıları hafiflik, estetik nihai ürün, titreşim sönümlenme, malzeme çeşitliliği ve kolay kullanım gibi avantajlar ile ön plana çıkmaktadır. Yapışma bağındaki yük dağılımını ve dayanımını hesaplamak için kullanılan yöntemlerden biri sonlu elemanlar yöntemidir. Sonlu elemanlar yöntemi mühendislik problemlerinin çözümünde, karmaşık yapıların gerçeğe yakın analizlerinde ve tasarım optimizasyonu çalışmalarında kullanılan bir sayısal yöntemdir. Havacılık, otomotiv, savunma ve inşaat sektörleri gibi birçok endüstride yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu çalışma daha az sayıda düğüm noktası kullanarak bir çift bindirmeli yapışma bağındaki gerilme dağılımını hesaplamayı amaçlamaktadır. Bu kapsamda yapışma bağlantısının statik yükleme analizleri farklı modelleme yaklaşımları ile analiz edilmiştir. Öncelikle yakınsama analizi yapılarak eleman sayısının etkisi incelenmiştir. Sonuçlar doğrultusunda tek boyutlu, iki boyutlu, üç boyutlu ve hibrit eleman yaklaşımlarını içeren 5 farklı model aynı sınır koşulu ve yükleme durumu için karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak, 50 kat daha az sayıda düğüm noktası kullanarak gerilme dağılımları %2,6 bağıl fark ile benzer hesaplanmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Yapışma bağı, sonlu elemanlar yöntemi, SEY, statik yükleme analizi

#### ABSTRACT

Adhesion joints stand out with advantages such as lightness, aesthetic final product, vibration damping, material diversity, and easy use. One of the methods used to calculate load distribution and strength of the adhesive bond is the finite element method. The finite element method is a numerical method used in solving engineering problems, realistic analysis of complex structures, and design optimization studies. It is widely used in many industries such as aerospace, automotive, defense, and civil engineering. This study aims to calculate the stress distribution in a double-lap adhesive bond using fewer finite elements and nodes. In this scope, static loading analyses of the adhesion joint have been analyzed with different modeling approaches. First, convergence analysis has been performed. Next, 5 different models including approaches that use one-dimensional, two-dimensional, three-dimensional, and hybrid elements have been compared for the same boundary and loading condition. Finally, by using a 50 times reduced number of nodes, stress distributions have been calculated similarly with a relative difference of 2.6%.

**Keywords:** Adhesive bonding, finite element method, FEM, static loading analysis

ToCite: KORKMAZ F. F., & ÇAVDAR, K., (2024). METALLERİN YAPIŞTIRMA BAĞLANTILARININ FARKLI MODELLEME YAKLAŞIMLARI KULLANARAK SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ İLE KARŞILAŞTIRMALI STATİK YÜKLEME ANALİZİ. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 27(3), 763-778.

## GİRİŞ

Yapıştırıcı ile yapıştırma, çeşitli ürünlerin imalatında ve onarımında kullanılan bir birleştirme ve montaj tekniğidir. Bu teknikte, bileşenler yapıştırıcılar kullanılarak birbirine yapıştırılır. Mevcut yapıştırıcı türleri araçlar, cep telefonları, kişisel bakım ürünleri, binalar, bilgisayarlar ve tıbbi cihazlar gibi çeşitli ürünlerde çok sayıda malzemenin birbirine yapıştırılmasına olanak tanır (FEICA - European Association of the Adhesive ve Sealant Industry). Günümüz endüstrisinde yapıştırma otomotiv, yarı iletken levhası, tıp, ev uygulamaları ve paketleme gibi farklı sektörlerde kullanılmaktadır.

Yapıştırma tekniği yüzyıllardır geleneksel bir birleştirme yöntemi olarak kullanılmıştır. Son 80 yılda bu teknik önemli ölçüde ilerlemiştir. Örneğin 2009 yılına kadar otomobil yapıştırıcılarına olan talep çok hızlı artmış ve araç başına kullanılan yapıştırıcı maddesi 20 kg civarına ulaşmıştır. Havacılık endüstrisinde, Boeing 787 ve Airbus A350 uçaklarında giderek daha fazla yapıştırıcı kullanılmıştır (He, 2011). Uygulama kolaylığı, zaman ve maliyet tasarrufu, korozyon ve yorulma direnci, çatlama geciktiriciliği ve iyi sönümlenme özellikleri sebebiyle yapıştırma tekniği yaygın kullanıma sahiptir (He, 2011).

Yapışma bağının davranışını, yük dağılımını ve dayanımını hesaplamak için kullanılan yöntemlerden biri sonlu elemanlar yöntemidir (SEY). SEY kullanılarak gerçekleştirilen yapısal analiz çalışmalarında, geometri çok sayıda küçük sonlu elemanlara ayrılır. Bu elemanlar birbirlerine ortak düğüm noktaları ile bağlıdır. Her bir elemanın komşu eleman ile ilişkisi lineer denklemler ile ifade edilir. Tüm denklemler birleştirildiğinde ise serbestlik derecesi kadar bilinmeyen bulunan bir lineer denklem sistemi elde edilir. Burada serbestlik derecesi, her bir düğüm noktasının ötelenme ve dönme değerleridir. Lineer denklem sistemi, sayısal yöntemler ile hesaplanarak geometrinin sınır koşulları altındaki davranışı belirlenmiş olur (Logan, 2002; Günay, 1993). Yapısal analiz, bir yükü desteklemek için kullanılan parçaların veya bağlantılı parça sistemlerinin emniyet ve hizmet verilebilirlik hesaplamalarında kullanılır (Hibbeler & Tan 2006). Bu yapılara binalar, köprüler, otomobiller ve basınçlı kaplar gibi örnekler verilebilir. Mühendislik faaliyetlerinde yapısal analiz, tasarımın mekanik davranışını simüle eder ve test yapmadan yapının dayanımını öngörmeyi sağlar (Chang, 2015). Bir yapı tasarlanırken ekonomik ve çevresel şartlar göz önünde bulundurularak yapısal analiz faaliyetleri gerçekleştirilmelidir.

Bir yapısal analizin çalışması için gerekli girdiler şu şekilde sıralanabilir: analiz türü, malzeme modeli, sınır koşulları ve sonlu elemanların oluşturulması. Bu girdiler ilerleyen paragraflarda ayrı ayrı ele alınmıştır.

Analizin amacı ve analiz sonucunda değerlendirilecek çıktılar doğrultusunda her bir girdinin doğru seçilmesi gerekir. Örneğin sıcaklığın değişimi sonucunda yapıdaki gerilme dağılımını incelemek için malzemenin sıcaklığa bağlı özelliklerini tanımlayan bir malzeme modeli tercih edilmelidir. Literatürdeki çalışmalar dikkate alınarak yapışma bağlantılarında kullanılan analiz türleri ve analiz çıktıları Tablo 1’de derlenmiştir.

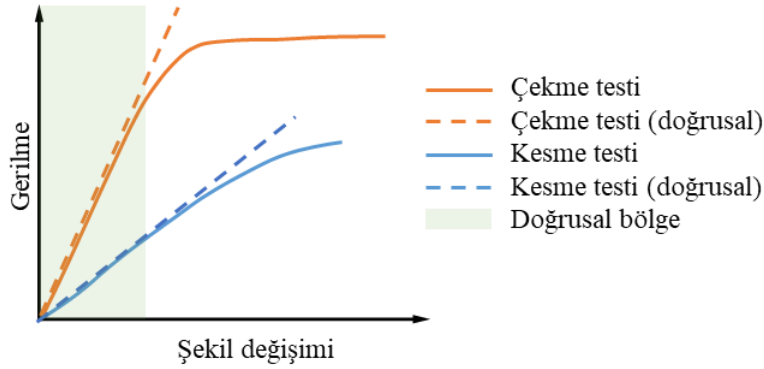
**Tablo 1.** Analiz Türüne Göre Analiz Çıktısı (He, 2011)

Analiz Türü	Açıklama	Analizin Çıktısı
Statik Yükleme	Yapının belirli yükleri taşıması gereklidir. Statik yükleme analizinde bu davranış incelenir.	Gerilme – uzama ilişkisi, gerilme dağılımı, bağlantı mukavemeti
	Kırılma ve hasar analizi çatlak başlangıcı ve yayılmasını inceler.	Çatlak ilerlemesi, plastik deformasyon, bağlantının ayrılması ve hasar durumu
Çevresel Davranış	Yapışma bağlantısı çevre şartları ve zamanla farklı davranış sergiler.	Nemin etkisi, sıcaklık etkisi
Yorulma Analizi	Değişken yükleme altındaki yapışma bağının davranışını inceler.	Yorulma mukavemeti, hasar tahmini
Dinamik Analiz	Bağlantılardaki titreşim tepkisini ve dinamik davranışı inceler.	Sönümlenme, doğal frekans, mod şekilleri, çarpışma

Yapışma bağında SEY, literatürde aşağıdaki çalışmalarda kullanılmıştır.

- Farklı konstrüksiyonların statik yüklem analizlerinde: bindirme bağlantıları (Pereira vd., 2010; Zhao & Lu, 2009; Banea & da Silva, 2009; da Silva vd., 2009), boru bağlantıları (Adams & Peppiatt, 1977), ek parçalı bağlantılar (Adams, Coppendale & Peppiatt, 1978), açılı kenar bindirme
- Farklı analiz türlerinde: statik, çatlak ilerleme (Hadavinia vd., 2006; Wang & Zhang, 2009), yoruma (Pereira vd., 2009; Wang vd., 2005), titreşim (Apalak & Yildirim, 2007), impakt (Vaidya vd., 2006)
- Çevre koşullarının etkisinin incelenmesinde: sıcaklık (Aydın, Temiz & Özel, 2007; Grant, Adams & da Silva, 2009; Zhang, Vassilopoulos & Keller, 2010), nem (Liljedahl vd., 2006)

SEY'in diğer girdi parametrelerinden biri malzeme modelidir. Malzeme özelliklerinin yöne göre değişkenliği, gerilme altındaki doğrusal veya doğrusal olmayan davranışı, sıcaklık farkından etkilenmesi gibi kriterler malzeme modeli seçimini belirler. Statik yüklem analizi için en temel malzeme özelliği şekil değişimi-gerilme ilişkisidir. Bunun için çekme testi ve kesme testi uygulanarak elastisite değerlerinin belirlenmesi gerekir. Literatürdeki yapışma bağı testleri incelendiğinde, malzemenin doğrusal davranış gösterdiği yüklem bölgesinin bulunduğu görülür (Kadioglu, Adams & Guild, 2000; Loureiro vd., 2010; Tomblin vd., 2002). Yapışma bağının türüne göre test sonuçları değişmekle birlikte tipik malzeme davranışı Şekil 1'deki gibidir. Malzemenin davranışı elastik, plastik ve hasar başlangıcı olarak gözlemlenebilir (García vd., 2011). Sıcaklık ve visko-elastik etkilerin incelenmediği analizlerde, malzemenin doğrusal bölgedeki yüklemeleri için temel Hook yasası uygulanabilir (Dean & Crocker, 2023; García vd., 2011).



Şekil 1. Yapıştırıcıların Tipik Genleme-Gerilme Eğrisi Ve Doğrusal Malzeme Yaklaşımı (García vd., 2011)

Yüklem ve sınır koşulları diğer bir SEY girdi parametresidir. Yapıştırılarak birleştirilmiş eklemelerin mekanik davranışı sadece eklemelerin geometrisi tarafından değil, aynı zamanda farklı sınır koşulları tarafından da etkilenir (He, 2011). Literatürde sınır koşullarının yük dağılımına etkisinin incelendiği çalışmalar (Guo, Dillard & Plaut, 2006; He, 2014; Zhao, Adams & da Silva, 2010) mevcut olsa da çalışmalar genellikle yük koşulları üzerine yapılmıştır. (He, 2014)'de yapılan karşılaştırmalı çalışmaya göre, sınır koşuluna göre yapışma bağındaki gerilme konsantrasyonu % 15- %56 arasında değişebilmektedir.

Eleman türü ve sonlu elemanlar modeli diğer bir SEY girdi parametresidir. Yapışma bağı, yapıştırılan parçaların kalınlıklarına kıyasla çok küçük olduğu için SEY ile analiz yapılırken karşılaşılan problemlerden bir tanesi yapışma bağının küçük elemanlarla modellenmesidir (He, 2011). Bu gereksinim modelleme ve çözüm süresini olumsuz etkiler. Eleman sayısı veya boyutu (1D, 2D veya 3D) modeldeki toplam düğüm sayısını belirler. Her bir düğüm noktasındaki öteleme ve dönme değerleri hesaplanması gerektiği için çözüm süresi de artmaktadır. Literatürde yapışma bağının modellenmesinde prizma şekilli elemanlar yerine, özel tanımlanmış sonlu elemanların kullanıldığı çalışmalar mevcuttur (Andruet vd., 2001). Bu türden çalışmalar benzer sonuçları daha az eleman sayısı ve düğüm noktası kullanarak hesaplayabilir (Andruet vd., 2001). Ayrıca, yapışma bağı ve yapıştırılan yüzeyler arasındaki yük akışı literatürde farklı yollarla modellenmiştir. Öte yandan yük aktarımı ortak düğüm noktalarının kullanımı veya ara elemanlar eklenmesi ile sağlanabilmektedir (Andruet, Dillard & Holzer, 2001; Apalak, Ekici & Yildirim, 2008; Banea vd., 2018; He, 2011; Ishai, Peretz & Gali, 1977).

Bu çalışmanın amacı çift bindirmeli yapışma bağlantısındaki gerilme dağılımını daha az sayıda düğüm noktası kullanarak hesaplamaktır. İlk olarak yapışma bağının eleman sayısı ve düğüm noktası sayısına olan bağlılığı yakınsama analizi ile incelenecektir. Yakınsama analizinden elde edilen çıktılar değerlendirilerek tek boyutlu, iki



boyutlu, üç boyutlu ve hibrit elemanların kullanıldığı 5 farklı yapışma bağı modeli oluşturulacaktır. Modellerin sınır ve yükleme koşulları aynıdır. Son olarak bu modeller analiz edilerek sonuçlar literatürde paylaşılan veriler kullanılarak incelenecektir.

## YÖNTEM

Bu başlıkta sonlu elemanlar modelinde kullanılan temel yaklaşımlara, yakınsama analizi detayına ve analiz edilen modellerin detaylarına yer verilmiştir.

### *Temel Yaklaşımlar*

Bir sonlu elemanlar modelinde, modelin büyüklüğünü belirleyen temel parametreler analiz türü, toplam eleman sayısı, eleman türü ve toplam düğüm noktası sayısıdır. Çalışmada kıyaslama parametresi olarak eleman türünün ve sayısının dahil edildiği serbestlik derecelerinin toplam sayısı (total number of degrees of freedom) seçilmiştir. Bu parametre, modelin çözümü için gerekli olan tüm bilinmeyenlerin toplam sayısıdır. Örneğin 3 boyutlu dikdörtgen prizma elemanın (HEX8) toplam düğüm noktası sayısı 8'dir. Her bir noktanın 3 yönde ötelenme ve 3 yönde dönme serbestliği bulunmaktadır. Bu eleman için serbestlik derecelerinin toplam sayısı  $8 \times (3 + 3) = 48$ 'dir. Diğer bir hesaplama örneği 1 boyutlu kiriş eleman (BEAM) için yapılabilir. İki düğüm noktası barındırdığı için serbestlik derecelerinin toplam sayısı 12'dir. Serbestlik derecelerinin toplam sayısı ile çözüm süresi doğrudan ilişkilidir.

Sonlu elemanlar modelleri Hypermesh 2021 Student Edition programı ile oluşturulmuştur. Hypermesh yazılımı tasarım verisi kullanarak sonlu elemanlar oluşturmak, düzenlemek, farklı SEY çözümleri için model dosyaları oluşturmak (pre-processing) ve analiz sonuçlarını görüntülemek (post-processing) için kullanılan bilgisayar destekli mühendislik yazılımıdır. Sonlu elemanlar modelinin çözümü için bir çözücü gereklidir. Çözücü olarak Optistruct 2021 Student Edition programı kullanılmıştır. Optistruct, Hypermesh ile entegre çalışabilen yapısal analiz ve yapısal optimizasyon çözücüsüdür. Grafiksel bir arayüze sahip değildir bu nedenle sonuçları görüntülemek için Hypermesh programı kullanılmıştır.

Metalik malzeme olarak alüminyum alaşımı kullanılmıştır. Alüminyumun mekanik özellikleri alaşımın türüne, üretim metoduna, kütük ölçüsüne, hadde yönüne ve ısıtılma göre değişmektedir. Bu çalışmada levha, sac, çubuk ve boru gibi farklı şekillerde tedarik edilebilen, yüksek dayanımlı ve korozyon direnci yüksek olan Alüminyum 7050 (DIN: AlZn6CuMgZr) alaşımının elastik özellikleri kullanılmıştır (Rice vd., 2003). Haddeleme veya ekstrüzyon gibi üretim yöntemleri Alüminyum 7050 alaşımlarına anizotropik özellik kazandırabiliyor olsa da (Tajally & Emadoddin, 2011) akma dayanımının altındaki yüklemelerde malzeme izotropik davranış gösterir (Yoon vd., 2004). Çalışma kapsamında yapılan statik yükleme analizleri akma dayanımının altında olduğu için Tablo 2'de verilen özellikler kullanılmıştır.

Yapıştırıcıların mekanik özellikleri üretici firmanın paylaştığı veriler veya standart test metotları ile belirlenmektedir. Metalik parçaların aksine, yapıştırıcıların mekanik özelliklerini derleyen bir veri tabanına literatürde ulaşılabilmiştir. Bunun sebebi yapışma bağına mekanik davranışını birçok parametrenin etkilemesi ve farklı hasar senaryolarını barındırmasıdır. Bu parametrelere örnek olarak yapıştırıcı malzemesi, yapışma şekli, yapışma bağına kalınlığı, yapıştırılan yüzeylerin pürüzlülük değerleri, nem ve sıcaklık verilebilir.

Çalışmada yapıştırılan metal plakalar ve yapışma bağı lineer, sıcaklık bağımsız ve izotropik malzemeler için kullanılan MAT1 malzeme kartı ile modellenmiştir (Altair Engineering Inc., 2021-b). Malzeme özellikleri Tablo 2'de verilmiştir.

**Tablo 2.** Malzeme Özellikleri (Kaufman, 2000; Ishai vd., 1977)

Malzeme	Elastisite Modülü (MPa)	Kayma Modülü (MPa)	Poisson Oranı
Alüminyum	70000	26923	0,30
Yapışma bağı	2500	900	0,39

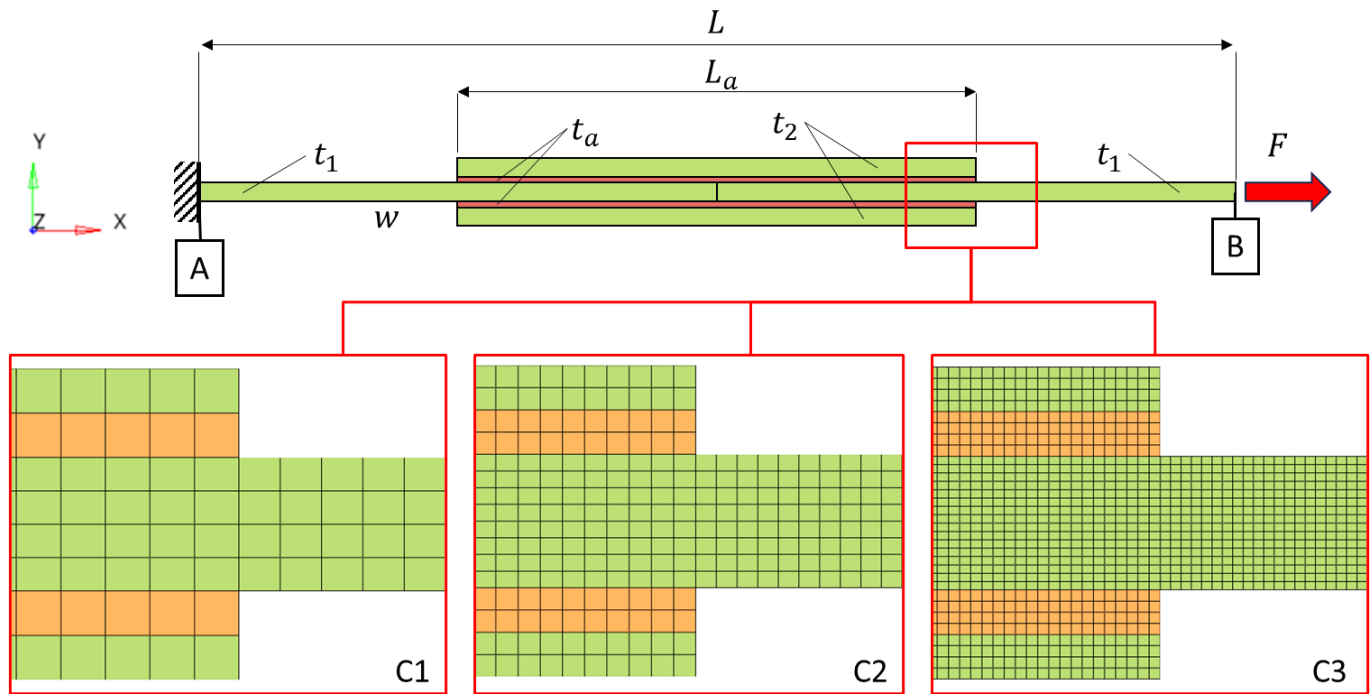
### *Yakınsama Analizi*

SEY, karmaşık yapıların davranışlarını modellenmesine ve analiz edilmesine olanak tanır. Yöntem yapıyı küçük parçalara böler ve her bir parçayı matematiksel olarak modeller. Bu parçaların davranışları toplu olarak incelenerek yapı üzerindeki gerilme, genleşme ve deformasyon gibi fiziksel olayların analizi yapılır. Yakınsama analizi,

kullanılan sonlu elemanlar modelinin gerçek yapıyı ne kadar doğru bir şekilde temsil ettiğini belirlemeyi amaçlar. Bu analiz, sonlu elemanlar modelinde kullanılan eleman sayısının yeterli olup olmadığını ve sonuçların istenen hassasiyette olup olmadığını değerlendirir. Model doğruluğunu belirlemede önemli bir adımdır.

Bu çalışmada, farklı modelleme yaklaşımları karşılaştırılmadan önce yakınsama analizi çalışması yapılacaktır. Yakınsama analizi ile eleman sayısı sistemli olarak artırılarak analiz sonuçlarının belli bir değere yakınsayıp yakınsamadığı incelenir. Eğer incelenen bölgedeki sonuçlar eleman sayısı arttıkça değişmiyor ise bu bölge eleman sayısından bağımsızdır. Öte yandan sonuçlar belli bir değere yakınsamıyor ve eleman sayısı değiştikçe artan sonuçlar elde ediliyor ise bu bölge eleman sayısına bağımlıdır. Yakınsama analizi çalışmasında toplam kayma miktarının, yapışma bağındaki normal gerilme dağılımının ve yapışma bağındaki kayma gerilmesi dağılımının eleman sayısı ile ilişkisi incelenecektir.

Yakınsama analizinde kullanılan model detayları Şekil 2 ve Tablo 3'te özetlenmiştir. Yapışma bağı A noktasında kartezyen koordinat sistemine göre tüm serbestliklerde kısıtlanarak ankastre mesnet koşulu tanımlanmıştır. Bu koşul, yapının bu noktasında hem öteleme değerlerini hem de dönme değerlerini kısıtlar. B noktasından +x yönünde F yüküyle yüklenmiştir. Yapışma bağı ile plakalar arasındaki yük aktarımı ortak düğüm noktalarının kullanımı ile sağlanmıştır.



Şekil 2. Yakınsama Çalışmasına Kullanılan Modelin Görseli Ve Eleman Boyutlarına Göre Yapışma Bağı Görüntüleri

Tablo 3. Yakınsama Çalışması, Model Parametreleri

	$t_1$ (mm)	$t_2$ (mm)	$t_a$ (mm)	$L_a$ (mm)	$L$ (mm)	$w$ (mm)	$F$ (N)
Değer	3	1	1	130	260	1	200
Açıklama	Plaka kalınlıkları	Plaka kalınlıkları	Yapışma bağı kalınlığı	Yapışma bağı uzunluğu	Toplam uzunluk	Genişlik	Yük

Yapışma bağı sırasıyla 1, 2, 4 ve 8 sıra eleman ile modellenmiştir (Şekil 2). Böylece incelenen bölgedeki eleman boyutu yarıya indirilerek eleman sayısının üstel artışı sağlanmıştır. Yakınsama analizinde kullanılan dört modelin temel parametreleri Tablo 4’te özetlenmiştir.

**Tablo 4.** Yakınsama Çalışması, Model Parametreleri

Model No.	Eleman türü	Eleman boyutu (mm)	Yapışma bağında eleman sıra sayısı	Modeldeki serbestlik derecelerinin toplam değeri
C1	2D	1	1	11019
C2	2D	0,5	2	17535
C3	2D	0,25	4	43071
C4	2D	0,125	8	141843

Tablo 4’teki serbestlik derecelerinin toplam değeri Optistruct yazılımının çözüm dosyalarından alınmıştır. Sadece yapışma bağı olmayıp tüm modelin büyüklüğünü ifade etmektedir. Yapışma bağından uzaktaki bölgelerde eleman boyutu arttırıldığı için modeldeki toplam serbestlik derecesi üstel artış göstermemiştir. Yakınsama analizinin sonuçları bulgular ve yorumlar kısmında tartışılacaktır.

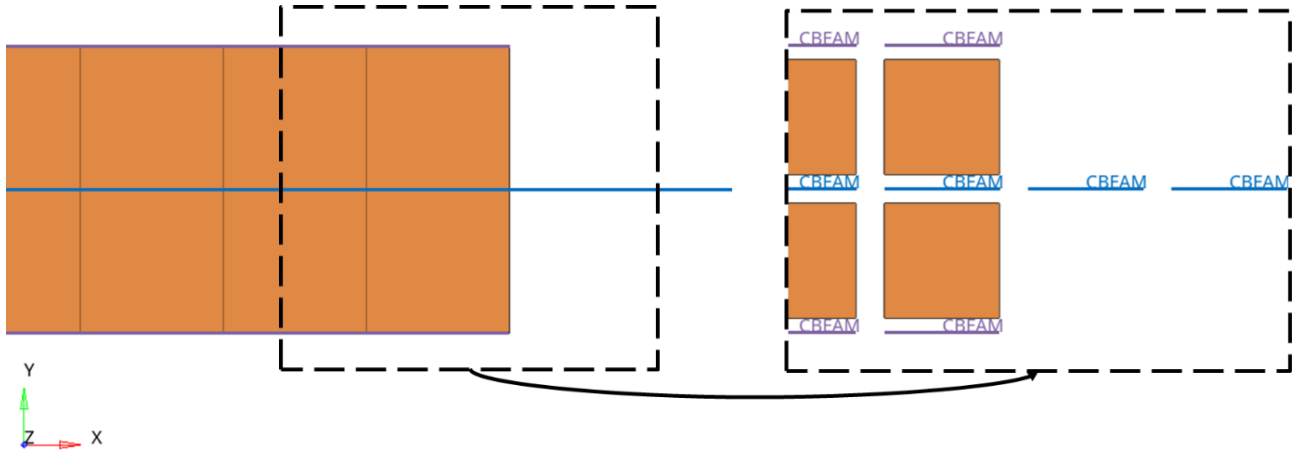
### **Yapışma Bağı Analiz Modelleri**

Çalışmada karşılaştırması sunulan modeller Tablo 5’te özetlenmiştir. Bu modeller, genel olarak eleman sayısı ve model karmaşıklığı az olandan çok olana doğru sıralanmıştır.

**Tablo 5.** Modelleme Çalışması, Model Parametreleri

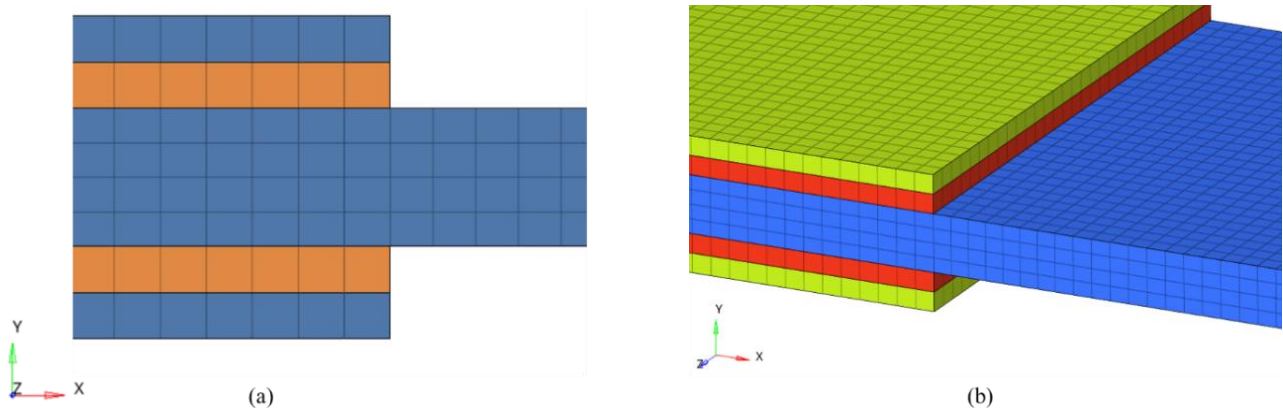
Model No.	Yapışma Bağı Eleman Türü	Plaka Eleman Türü	Yapışma Bölgesi Modeli	Analiz Türü
1	2D	1D	Ortak düğüm noktaları	Doğrusal statik
2	2D	2D	Ortak düğüm noktaları	Doğrusal statik
3	3D	3D	Ortak düğüm noktaları	Doğrusal statik
4	3D	2D	Ortak düğüm noktaları	Doğrusal statik
5	3D	2D	Rijit 1D elemanlar	Doğrusal statik

Model 1’de yapıştırılan plakalar tek boyutlu BEAM elemanlar ile modellenmiştir. Yapışma bağı 2 boyutlu QUAD4 elemanlar ile modellenerek plakalar ile ortak düğüm noktaları üzerinden tanımlanmıştır. Yapışma bağı ile plakalar arasındaki yük akışı bu ortak düğüm noktaları üzerinden gerçekleşir. Z yönündeki kesit uzunlukları ve yapışma bağı kalınlıkları 1 mm kabul edilerek 200 N ile yüklenmiştir. Yapışma bağından üst plakaya akan yükün moment etkisinin hesaplanabilmesi için üst ve alt plakalara kalınlık değerlerinin yarısı mertebesinde ofset uygulanmıştır (Altair Engineering Inc., 2021-a). Model 1’in görsel özeti Şekil 3’te verilmiştir.



Şekil 3. Model 1'de Kullanılan Eleman Türü

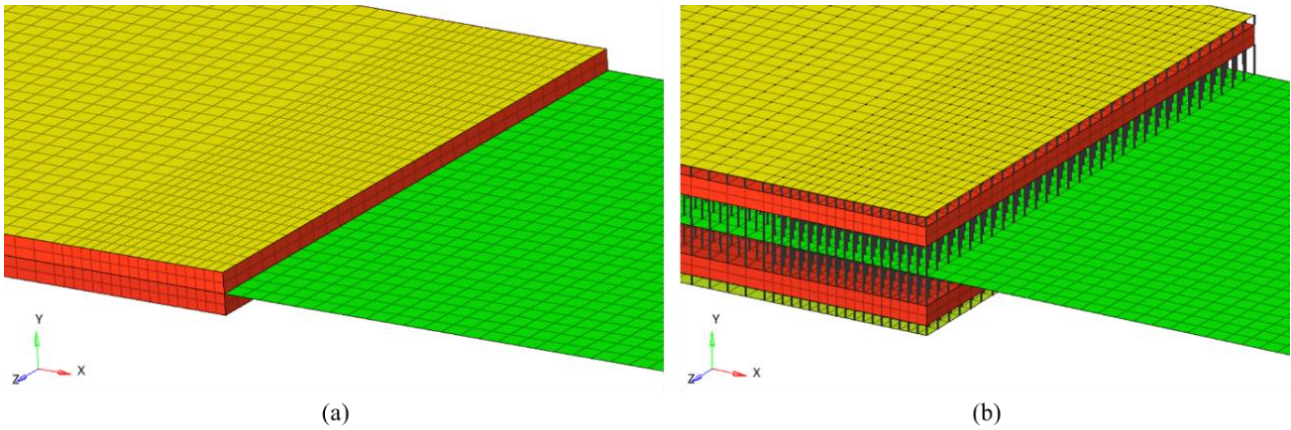
Model 2'de yapışma bağı ve yapıştırılan plakalar 2 boyutlu QUAD4 elemanlar ile modellenmiştir. Bu modelde yapının Z eksenindeki davranışı ihmal edilmiştir (Şekil 4a). Z yönlü tüm kalınlıklar 1 mm kabul edilerek 200 N yük ile yüklenmiştir. Model 3'te ise 3 boyutlu HEX8 elemanlar kullanılmıştır (Şekil 4b). Literatürde en sık rastlanan modelleme yöntemi Model 2 ve Model 3'tür. Bu modellerde yapışma bağı ile plakalar arasındaki yük akışı ortak düğüm noktaları ile sağlanmıştır. Bu yaklaşım, eklemnin elastik davranış gösterdiği yüklerde adeziv yapışma mekanizmasını simüle etmektedir. Yapışma bağı her iki modelde de tek sıra eleman ile temsil edilmiştir. Bunun gerekçeleri yakınsama analizi sonucu bölümünde detaylı ele alınacağı için burada açıklanmamıştır.



Şekil 4. Model 2'de (a) Ve Model 3'te (b) Kullanılan Modelleme Yöntemi

Model 3, yapıştırılan plakaların ve yapışma bağının üç boyutlu elemanlar ile modellenmesini zorunlu kılmaktadır. Ancak yapıştırılan plakaların karmaşık geometriye sahip olduğu durumlar bunu zorlaştırır. Ayrıca modelin üstel büyümesine neden olur. Model 2'de ise yapının Z eksenindeki davranışı ihmal edildiği için Z yönlü uygulanan yüklemelerdeki yük dağılımı hesaplanamaz. Bu sebeple hem Z eksenindeki davranışı analize dahil etmek hem de yapıştırılan plakaları daha az sayıda düğüm noktası kullanarak modelleyebilmek için Model 4 ve Model 5 önerilmiştir.

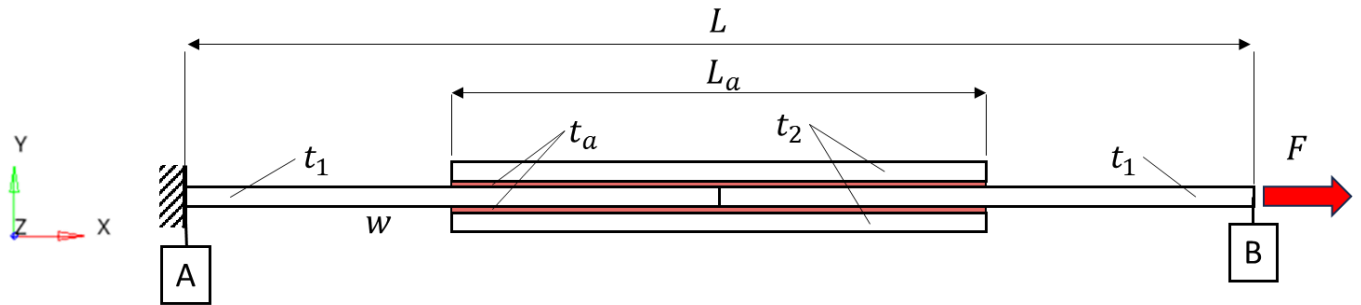
Model 4 ve Model 5'te yapıştırılan plakaların eleman türü 2 boyutlu QUAD4 seçilmiştir. Bu sayede plakalardaki serbestlik derecelerinin toplam sayısı azalır. Yapışma bağı 3 boyutlu HEX8 elemanlar kullanarak iki sıra eleman ile modellenmiştir. Model 4 ortak düğüm noktalarını kullanmaktadır (Şekil 5a). Bu durum yapışma bağının ve plakaların aynı düğüm noktası dağılımına sahip olmasını zorunlu kılar. Diğer bir deyişle aynı eleman boyutu ve şekli kullanılması gerekir. Plakaların tasarımına bağlı olarak bunu sağlamak her zaman mümkün değildir. Bu sebeple Model 5'te ara eleman kullanımı önerilmiştir. Yapışma bağı ve plakalar arasındaki yük aktarımı tüm serbestlik derecelerinde rijit davranış gösteren RBE2 elemanları ile sağlanmıştır (Şekil 5b). Bu elemanlar bağlı oldukları noktalar arasındaki mesafeleri rijit olacak şekilde korurlar. Böylece yük aktarımı şeklin korunması ile sağlanır. Model 4'te yük akışı plakanın kesit merkezinde olmadığı için kalınlığın yarısı kadar eleman offseti tanımlanmıştır. Ara eleman kullanıldığı için Model 5'te offset tanımlama gereksinimi yoktur.



Şekil 5. Model 4'te (a) Ve Model 5'te (b) Kullanılan Modelleme Yöntemi

Model 1-2-3-4-5 çift bindirmeli bağlantılar için farklı yaklaşımların bir karşılaştırmasını sunar. Modelleme süresi, basitliği ve çözüm süresi avantajları ile Model 1 ve Model 2 ön plandadır. Tüm davranışın simüle edildiği Model 3 ve Model 4 tüm eksenlerdeki davranışı analiz eder. Model 5 ise Model 4'teki offset problemini ve eleman kısıtlarını ortadan kaldırır.

Modellerde analiz edilen eklem ait ölçüler, sınır koşulları ve yük yönü Şekil 6'da gösterilmiştir. Ölçüler yakınsama analizinde kullanılan değerler ile aynıdır (Tablo 3). Yapışma bağı A noktasında kartezyen koordinat sistemine göre tüm serbestliklerde kısıtlanarak ankastre mesnet koşulu tanımlanmıştır. Yük uygulama noktası B'dir ve tüm yüklemeler +x yönündedir. Model 1-2'de Z eksenini ihmal edildiği için 200 N ile yüklenmiştir. Üç boyutlu modellerde eşdeğer yükleme yapmak amacıyla Model 3-4-5 Z eksenini boyunca 200 N/mm yük akışı ile yüklenmiştir.



Şekil 6. Model 1 – 5 Arasındaki Modellerde Analiz Edilen Çift Bindirmeli Bağlantı

Şekil 6'daki yükleme durumunda yapışma bağında ve plakalarda XY düzlemine göre tüm yönlerde gerilme bileşenleri oluşur. Yapışma bağındaki kayma gerilmeleri üst ve alt plakalarda moment meydana getirir. Bu da plakaları Z eksenini etrafında dönmeye zorlar. XZ düzlemine göre eklem simetrik olduğu için bu etkiler de simetriktir. Dolayısıyla yükleme sonucunda yapıda eğilme öngörülmemektedir. Yüksek değerlikli dönme değerleri olmadığı için statik doğrusal analiz türü tercih edilmiştir. Literatürde de çift bindirmeli bağlantıların doğrusal olmayan analizinin sonucu çok etkilemeyeceğine dair görüşler mevcuttur (Al-Ramahi, Joffe & Varna, 2019).

## BULGULAR VE YORUMLAR

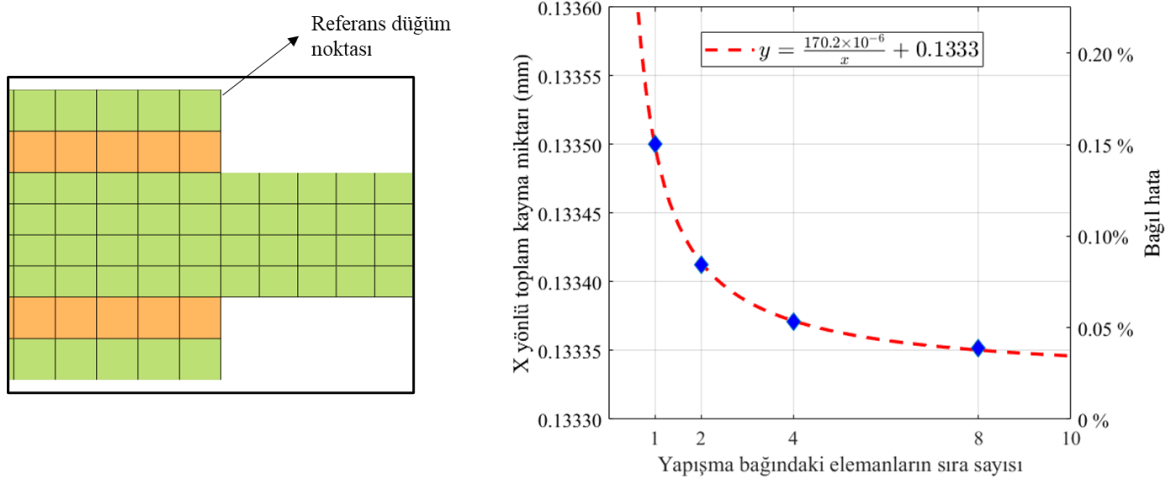
Bu bölümde, yöntem bölümünde açıklamaları verilen modellerin çözümlerine ve analiz sonuçlarına yer verilmiştir. İlk olarak Yakınsama Analizi bölümünde detayları verilen modelin çözümleri incelenmiştir. Yapışma bağlantısındaki eleman sayısına bağımlı ve eleman sayısından bağımsız bölgeler değerlendirilerek uygun eleman sayısı belirlenmiştir. İkinci olarak Yapışma Bağı Analiz Modelleri başlığında detayları verilen modellerin çözümleri incelenmiştir.

### Yakınsama Analizi Sonucu

Yakınsama Analizi bölümünde detayları verilen modellerin çözümleri bu başlıkta derlenmiş ve tartışılmıştır. Yakınsama analizi sonucu üç parametre karşılaştırılmıştır:

- Üst plakadaki X yönlü yer değiştirme miktarı
- Yapışma bağındaki kayma gerilmesi dağılımı ( $\sigma_{xy}$ )
- Yapışma bağındaki normal gerilme dağılımı ( $\sigma_{yy}$ )

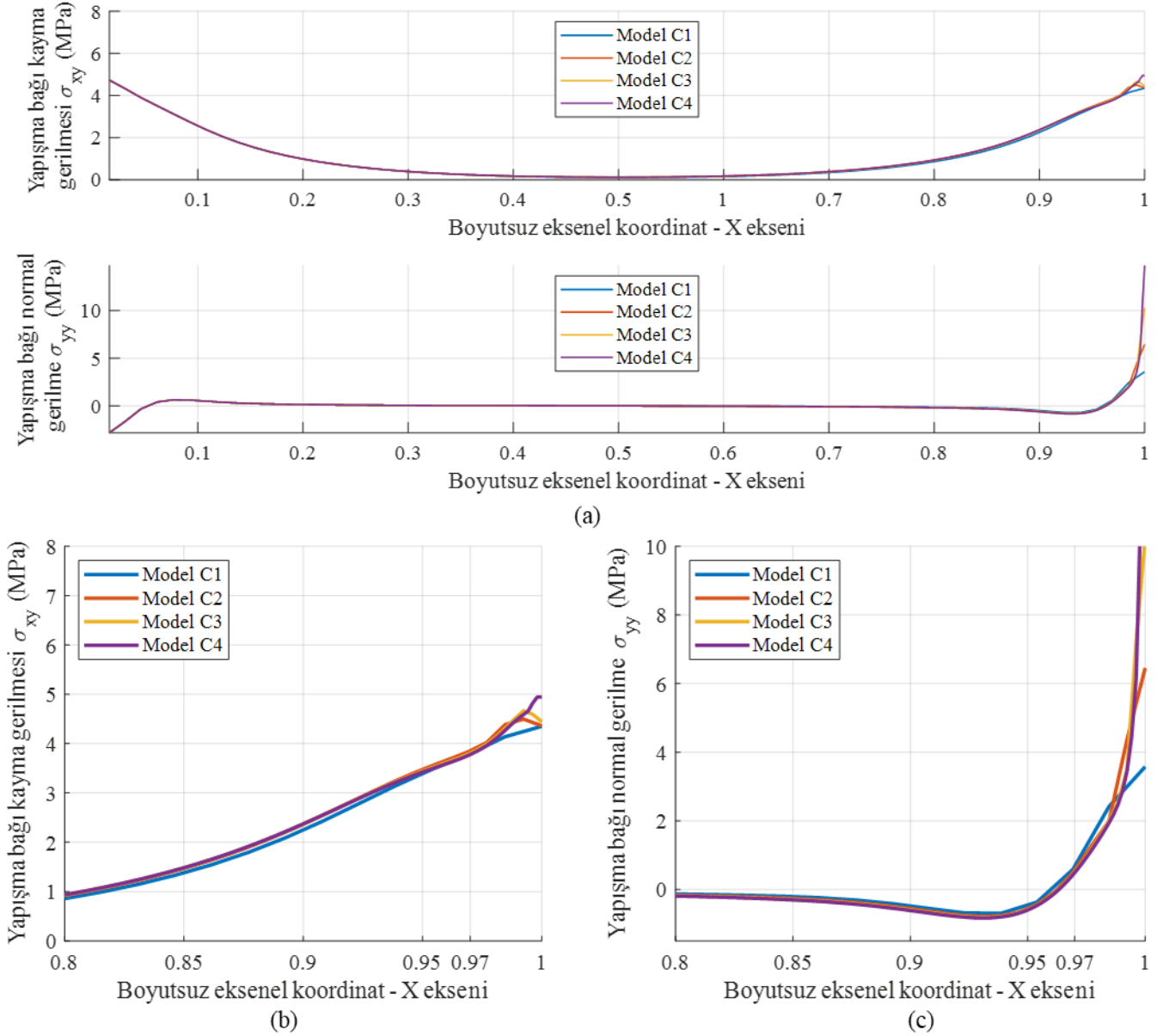
Üst plakadaki X yönlü yer değiştirme miktarının eleman sayısı ile ilişkisi Şekil 7’de grafik haline getirilmiştir. Sonsuz eleman sayısı için,  $y = a/x + b$  fonksiyonuna eğri uydurma çalışması yapılarak yakınsanan değer tahmin edilmiştir. Bu eğrinin değeri  $x$ 'in sonsuz limiti durumunda  $b$  değerine yakınsar. Yakınsanan değer doğru varsayılarak, hesaplanan yer değiştirme miktarları bağıl hata cinsinden verilmiştir.



Şekil 7. Yer Değiştirme Değeri İçin Yakınsama Analizi

Şekil 7’ye göre yapışma bağı en az 4 sıra eleman ile modellendiğinde eleman sayısından bağımsız hale geldiği söylenebilir. Yapıştırıcı üreticilerinin verileri ve literatürdeki uygulamalar dikkate alındığında yapışma bağına kalınlığının genellikle 0,1 ile 1 mm aralığında olduğu görülür. Bu durum da modelde çok sayıda eleman kullanılması problemine sebep olur. Yapışma bağına tek sıra eleman içeren Model C1 için bağıl hata %0,15 ile sınırlıdır. Bu hata miktarı kabul edilebilir bir seviyededir. Toplam kayma miktarına göre tek sıra eleman kullanımı kabul edilebilirdir.

Yakınsama analizi için oluşturulan 4 model (Model C1 – C4) ile yapışma bağına hesaplanan gerilme dağılımları Şekil 8a’da gösterilmiştir. Burada boyutsuz aksenal koordinat ( $x^*$ ), 0 değeri eklemin orta noktasını ifade etmek üzere, yapışma bağına toplam uzunluğuna oranlanarak verilmiştir. Ayrıca,  $0,8 < x^* < 1,0$  için detaylı grafikler Şekil 8b ve Şekil 8c’de verilmiştir.



Şekil 8. Yapışma Bağı Gerilme Sonuçlarının Yakınsama Çalışması Modellerine Göre Karşılaştırması

Gerilme değerlerinin eleman sayısı ile olan ilişkisi incelendiğinde  $0 < x^* < 0,95$  bölgesi için tüm modellerin benzer sonuçlar hesapladığı görülmektedir (Şekil 8a). Gerilme bileşenleri  $x^* < 0,95$  bölgesinde eleman boyutundan bağımsız olarak birbiri ile uyumludur. Öte yandan, yapışma bağı köşe bölgelerinde  $x^* > 0,97$  eleman sayısı arttıkça gerilme değerleri farklı hesaplanmıştır. Yapışma bağı köşe ve sınır elemanlarında literatürde tekillik olarak bilinen fenomen görülmüştür (He, 2014).

$x^*$ 'in 0,97 ve 1 olduğu durumlar için gerilme bileşenlerinin değerleri Tablo 6'da karşılaştırılmıştır.

**Tablo 6.** Yakınsama Çalışması Sonucu  $x^*$ 'in 0,97 Ve 1,0 Konumlarındaki Gerilme Değerleri

Model No.	Eleman boyutu (mm)	Yapışma bağında eleman sıra sayısı	Kayma Gerilmesi (MPa)		Normal Gerilme (MPa)	
			$x^* = 1$	$x^* = 0,97$	$x^* = 1$	$x^* = 0,97$
C1	1	1	4,35	3,78	3,58	0,58
C2	0,5	2	4,36	3,84	6,46	0,49
C3	0,25	4	4,44	3,79	10,27	0,45
C4	0,125	8	4,94	3,76	14,73	0,43

Tablo 6 incelendiğinde C3 ve C4 modellerinde elde edilen gerilme değerleri, her iki  $x^*$  değeri için de eleman sayısı arttıkça değerleri artmaktadır. Bu durum kenar bölgedeki elemanlardan okunan gerilme değerlerinin eleman boyutundan bağımsız olmadığını göstermektedir ve eleman sayısındaki artışla birlikte  $x^* = 1$  konumundaki değerleri artmaktadır. Bu problemi çözmek için ortalama gerilme değerleri de dikkate alınacaktır.

Gerilme değerlerinin tahmininde  $x^*$  değerinin 1 ve 0,97 olduğu durumlar için basit ortalama değerleri Tablo 7'de verilmiştir. Ortalama gerilme değerleri incelendiğinde kayma gerilmesinin %6 fark ile çok değişmediği görülür. Normal gerilme bileşeni ise bu durumun aksine eleman boyutundan etkilenmektedir. Eleman sayısı ile birlikte artış gösterdiği için eleman boyutu seçimine girdi sağlamak üzere kullanılmayacaktır.

**Tablo 7.** Yakınsama Çalışması Sonucu  $x^*$ 'in 0,97 Ve 1,0 Konumlarındaki Ortalama Gerilme Değerleri

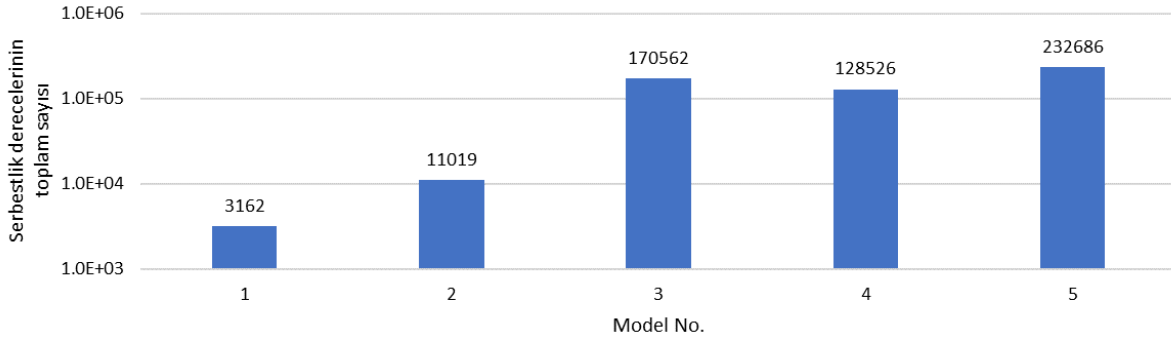
Model No.	Kayma Gerilmesi (MPa)			Normal Gerilme (MPa)		
	$x^* = 1$	$x^* = 0,97$	Ortalama	$x^* = 1$	$x^* = 0,97$	Ortalama
C1	4,35	3,78	4,07	3,58	0,58	2,08
C2	4,36	3,84	4,10	6,46	0,49	3,47
C3	4,44	3,79	4,12	10,27	0,45	5,36
C4	4,94	3,76	4,35	14,73	0,43	7,58

Analiz sonuçlarında gözlemlenen tekillik problemi SEY'in bilinen bir fenomenidir ve bu duruma literatürde farklı şekillerde çözümler getirilmiştir. Sonlu eleman düzenlemeleri, geometrik iyileştirmeler ve malzeme modelinde iyileştirmeler gibi yöntemler izlenmiştir (He, 2011, 2014; Zhao, Adams & da Silva 2011a, 2011b). Öte yandan, sınır bölgedeki gerilme değerlerini doğrudan dikkate almak yerine ortalama gerilme değeri dikkate alındığında, Model C1 ile hesaplanan değerlerin sonucu öngörmede kullanılabileceği görülmüştür. Yakınsama analizi ve literatürdeki sonuçlar göz önüne alınığında yapışma bağının tek sıra veya iki sıra eleman ile modellenmesinin yeterli olduğu sonucuna ulaşılmıştır.



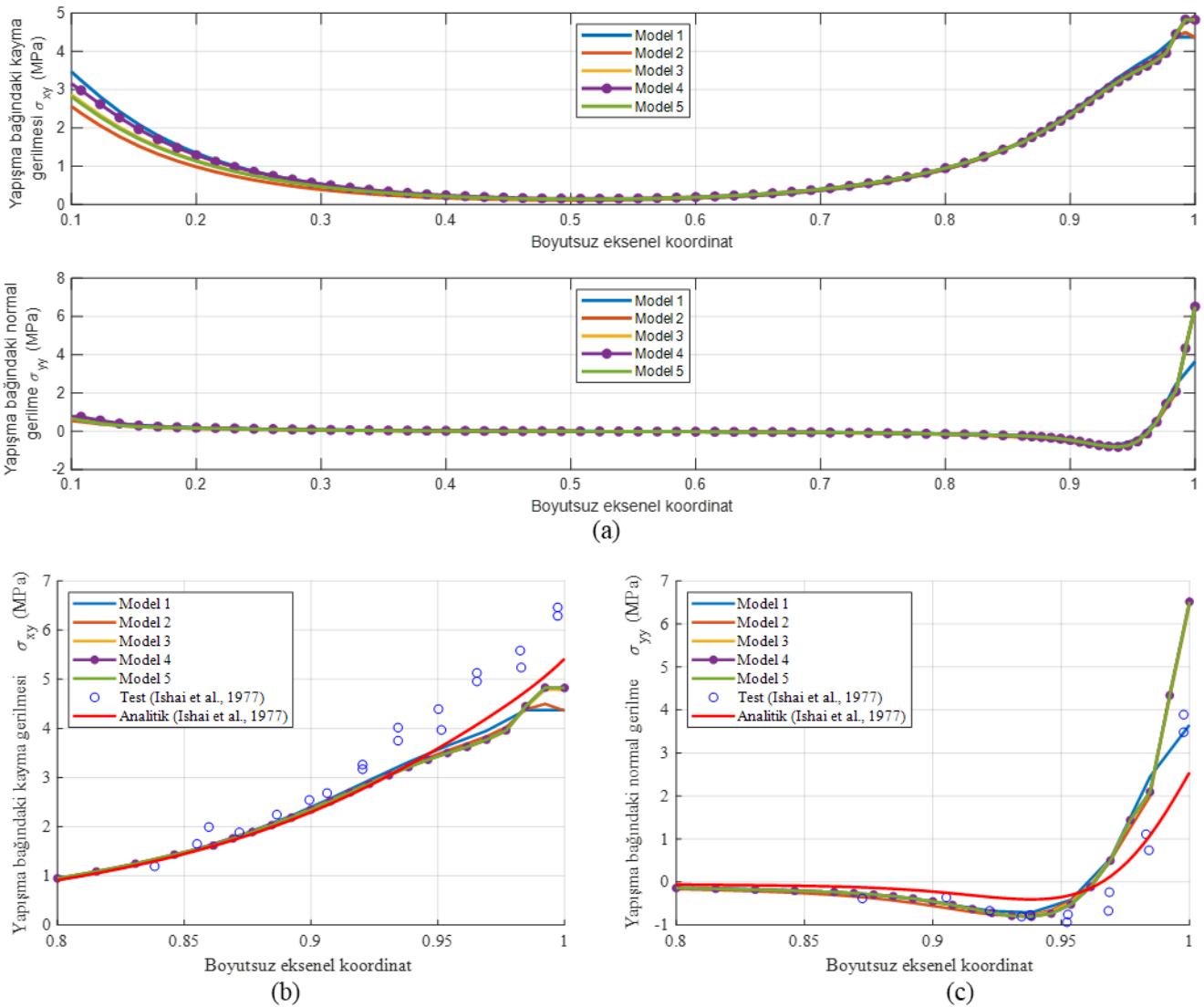
### Yapışma Bağı Modellerinin Analiz Sonuçları

Yapışma Bağı Analiz Modelleri başlığında açıklanan modellerin (Tablo 5) geometri, malzeme, yük, sınır koşulları ve analiz türleri ortaktır. Yapışma bağının ve yapıştırılan plakaların modellenme yöntemindeki farklılıklar modellerin serbestlik derecelerinin toplam sayısını değiştirmiştir. Şekil 9’da modellerin toplam serbestlik derecesi karşılaştırılmıştır. Veriler Optistruct çözüm çıktı dosyalarından elde edilmiştir.



Şekil 9. Tablo 5’teki Modellerin Serbestlik Derecelerinin Toplam Sayısının Karşılaştırılması

Modellerin çözümü ile elde edilen yapışma bağı gerilme değerleri Şekil 10’da verilmiştir.



Şekil 10. Yapışma Bağı Gerilme Dağılımlarının Karşılaştırılması

Şekil 10a incelendiğinde, yük dağılımının literatürdeki çalışmalarda gözlemlenen tipik yapışma bağı yük dağılımı olduğu görülmektedir (He, 2011; Pereira vd., 2010; Zhao & Lu, 2009). Yakınsama analizinde eleman sayısından bağımsız olduğu gösterilmiş olan  $0 < x^* < 0,95$  bölgesi benzer şekilde modelleme yaklaşımlarından da bağımsızdır. Ayrıca, ortak düğüm noktalarının kullanıldığı Model 4 ve yapışma bağınyı 1D elemanlar ile temsil eden Model 5 arasında farklılık görülmemiştir.

Literatürde paylaşılan verilerle (Ishai vd., 1977) birlikte  $0,8 < x^* < 1,0$  aralığı için gerilme dağılımın detayı Şekil 10b ve Şekil 10c'de verilmiştir. Tüm modelleme yaklaşımları bu aralık için literatür verisi ile örtüşür. Eleman boyutuna bağımlı olduğu gösterilmiş olan  $x^* > 0,95$  bölgesinde, modellerin hesapladığı sonuçlar arasında farklılık bulunmaktadır. Literatürdeki veriler ile en yüksek farklılık bu bölgede gözlemlenmektedir. Bunun sebebi tüm modellerde bu bölgenin keskin köşe barındırması ve tekillik içermesidir.

Tekillik barındıran bölgedeki gerilme değerleri tahmini için ortalama gerilme değerleri incelenmiştir. Ortalama değerlerler  $x^*$  değerinin 1 ve 0,97 olduğu durumlar için Tablo 8'da verilmiştir.

**Tablo 8.** Analiz Modellerinin  $x^*$ 'in 0,97 Ve 1,0 Konumlarındaki Gerilme Değerleri Karşılaştırması

Model No.	Kayma Gerilmesi (MPa)			Normal Gerilme (MPa)		
	$x^* = 1$	$x^* = 0,97$	Ortalama	$x^* = 1$	$x^* = 0,97$	Ortalama
Model 1	4,37	3,95	4,16	3,65	0,54	2,10
Model 2	4,36	3,84	4,10	6,46	0,49	3,47
Model 3	4,78	3,76	4,27	6,43	0,54	3,48
Model 4	4,82	3,77	4,30	6,52	0,50	3,51
Model 5	4,82	3,77	4,30	6,52	0,50	3,51

Modellerin yapışma bağı kenarındaki ortalama kayma gerilme değeri incelendiğinde birbirlerine yakın değerler elde edildiği görülmektedir (Tablo 8). En düşük eleman sayısına sahip olan Model 1, tüm elemanların üç boyutlu modellendiği Model 3'ten 50 kat daha az serbestlik dereceleri toplamına sahiptir. Ancak ortalama kayma gerilmesi değerini %2,6 bağıl farkla benzer hesaplamıştır.

Model 1'in diğer modellere göre normal gerilmeyi düşük hesaplamıştır. Bunun sebebi yapışma bağınyın bu bölgesini en az eleman sayısı ile temsil eden modelin Model 1 olmasıdır. Benzer durum yakınsama analizinde de görülmüştür. Model 2-3-4-5 ortalama normal gerilme değerini %1 fark ile benzer hesaplamıştır. Model 2'nin Model 3'ten 15 kat daha az toplam serbestlik derecesine sahip olduğu göz önüne alınırsa Model 2'nin ortalama normal gerilme değerini tahmin etmede başarılı olduğu görülür.

Sonuç olarak yapışma bağınyın sınır ve köşeden uzak bölgelerinde tüm yaklaşımların kabul edilebilir mertebelerde sonuçlar verdiği görülmüştür. Sınır bölgedeki sonuçlar tekillik problemi sebebiyle modele ve eleman sayısına göre değişmektedir. Bu bölgelerdeki eleman gerilme değeri yerine, komşu bölgedeki ortalama kayma gerilme değeri dikkate alındığında modellerin uyumlu sonuçlar hesapladığı görülmüştür. Buradan, tek boyutlu yükleme koşulunda problemin tek boyuta (Model 1) ve iki boyuta (Model 2) indirgenmesi yük dağılımını öngörmede başarılı olduğu çıkarılabilir.

## SONUÇLAR

Bu çalışmada, metallerin yapışma bağının SEY ile analizinde model büyüklüğünün etkisi karşılaştırmalı modeller kullanarak incelenmiştir. Çok sayıda düğüm noktası kullanılarak gerçekleştirilen analiz sonuçlarının, daha az sayıda düğüm noktası kullanılarak da elde edilebileceği analiz sonuçları üzerinden gösterilmiştir.

Yapışma bağının eleman sayısındaki artış deplasman sonuçlarını belli bir değere yakınsatmaktadır. Toplam düğüm noktası sayısı 64 kat düşürüldüğünde toplam kayma miktarındaki fark bağıl olarak %0,15 ile sınırlıdır. Yapışma bağındaki kritik gerilme bölgesi eklemenin sınır bölgelerinde gözlemlenir. Sonlu elemanlar ile incelendiğinde bu bölgeler tekillik içermektedir. Eleman sayısındaki artış tekil bölgedeki elemanlarda hesaplanan gerilme değerinde de artış ile sonuçlanmıştır. Toplam düğüm sayısı 64 kat artırıldığında maksimum normal gerilme değeri 4 kat artmıştır. Bu nedenle, sınır bölgelerde ortalama gerilme değeri dikkate alınması benzer sonuçların elde edilmesini sağlamış ve literatürde paylaşılan test sonuçları ile örtüşmüştür.

Yapışma bağı analizi tek boyutlu ve iki boyutlu sonlu elemanlarla modellenerek hesaplama süresi ve modelin serbestlik derecelerinin toplam sayısı büyük ölçüde düşürülmüştür. Model 1'deki serbestlik derecelerinin toplam sayısı, Model 5'e göre 70 kat daha düşüktür. Öte yandan elde edilen gerilme değerleri en fazla %10 farklılık içermektedir. Bu farklılığın sebebi yapışma bağındaki keskin köşelerde ve sınır bölgelerdeki elemanların tekillik içermesidir. Tekil bölge için komşu elemanlar arasında ortalama kayma gerilme değeri dikkate alındığında ise bu fark %2,6'ya düşmektedir. Bu durum, daha az sayıda düğüm noktası kullanılarak da benzer sonuçlar elde edilebileceğini göstermiştir.

Yapışma bağının SEY ile analizinde karşılaşılan problemlerden bir tanesi yapışma bağının çok sayıda sonlu eleman ile modellenmesi gereksinimidir. Bu gereksinim sebebiyle modeldeki düğüm noktası sayısı ve serbestlik derecelerinin toplam sayısı artmaktadır. Bu çalışmada, daha az düğüm noktası sayısına sahip modeller kullanılarak yapışma bağındaki gerilme dağılımları, daha çok düğüm noktasına sahip modellere %2,6 mertebesinde yakınlıkla hesaplanmıştır. Bu sonuç basit çekme yüklemesi uygulanan yapılar için modelleme süresini ve hesaplama maliyetini düşürmüştür.

## KAYNAKLAR

- Adams, R. D., J. Cappendale, and N. A. Peppiatt. (1978). "Stress Analysis of Axisymmetric Butt Joints Loaded in Torsion and Tension." *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design* 13(1):1–10. doi: 10.1243/03093247V131001.
- Adams, R. D., and N. A. Peppiatt. (1977). "Stress Analysis of Adhesive Bonded Tubular Lap Joints." *The Journal of Adhesion* 9(1):1–18. doi: 10.1080/00218467708075095.
- Al-Ramahi, Nawres J., Roberts Joffe, and Janis Varna. (2019). "Numerical Stress Analysis in Adhesive Joints under Thermo-Mechanical Load Using Model with Special Boundary Conditions." *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 518(3):032061. doi: 10.1088/1757-899X/518/3/032061.
- Altair Engineering Inc. 2021-a. "CBEAM." Retrieved January 1, 2024 ([https://2021.help.altair.com/2021/hwsolvers/os/topics/solvers/os/cbeam\\_bulk\\_r.htm](https://2021.help.altair.com/2021/hwsolvers/os/topics/solvers/os/cbeam_bulk_r.htm)).
- Altair Engineering Inc. 2021-b. "MAT1." Retrieved December 26, 2023 ([https://2021.help.altair.com/2021/hwsolvers/os/topics/solvers/os/mat1\\_bulk\\_r.htm](https://2021.help.altair.com/2021/hwsolvers/os/topics/solvers/os/mat1_bulk_r.htm)).
- Andruet, Raul H., David A. Dillard, and Siegfried M. Holzer. (2001). "Two- and Three-Dimensional Geometrical Nonlinear Finite Elements for Analysis of Adhesive Joints." *International Journal of Adhesion and Adhesives* 21(1):17–34. doi: 10.1016/S0143-7496(00)00024-5.
- Apalak, M. Kemal, Recep Ekici, and Mustafa Yildirim. (2008). "Free Vibration Analysis and Optimal Design of an Adhesively Bonded Double Containment Cantilever Joint."
- Apalak, M. Kemal, and Mustafa Yildirim. (2007). "Optimal Vibration Attenuation of an Adhesively-Bonded Cantilevered Single-Lap Joint." *Journal of Adhesion Science and Technology* 21(3–4):267–86. doi: 10.1163/156856107780684639.
- ASTM. n.d. "Adhesive Standards." Retrieved December 26, 2023 (<https://www.astm.org/products-services/standards-and-publications/standards/adhesive-standards.html>).

- Aydın, Murat Demir, Şemsettin Temiz, and Adnan Özel. (2007). "Effect of Curing Pressure on the Strength of Adhesively Bonded Joints." *The Journal of Adhesion* 83(6):553–71. doi: 10.1080/00218460701453536.
- Banea, M. D., M. Rosioara, R. J. C. Carbas, and L. F. M. da Silva. (2018). "Multi-Material Adhesive Joints for Automotive Industry." *Composites Part B: Engineering* 151:71–77. doi: 10.1016/j.compositesb.2018.06.009.
- Banea, M. D., and L. F. M. da Silva. (2009). "Adhesively Bonded Joints in Composite Materials: An Overview." *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications* 223(1):1–18. doi: 10.1243/14644207JMDA219.
- Chang, Kuang-Hua. (2015). "Chapter 7-Structural Analysis." *E-Design* 325–90.
- Dean, G. D., and L. E. Crocker. (2023). "The Use of Finite Element Methods for Design with Adhesives."
- FEICA - European Association of the Adhesive and Sealant Industry. n.d. "History of Bonding and Adhesives." Retrieved January 1, 2024 (<https://www.feica.eu/>).
- García, J. A., A. Chiminelli, B. García, M. Lizaranzu, and M. A. Jiménez. (2011). "Characterization and Material Model Definition of Toughened Adhesives for Finite Element Analysis." *International Journal of Adhesion and Adhesives* 31(4):182–92. doi: 10.1016/j.ijadhadh.2010.12.006.
- Grant, L. D. R., R. D. Adams, and Lucas F. M. da Silva. (2009). "Effect of the Temperature on the Strength of Adhesively Bonded Single Lap and T Joints for the Automotive Industry." *International Journal of Adhesion and Adhesives* 29(5):535–42. doi: 10.1016/j.ijadhadh.2009.01.002.
- Guo, Shu, David A. Dillard, and Raymond H. Plaut. (2006). "Effect of Boundary Conditions and Spacers on Single-Lap Joints Loaded in Tension or Compression." *International Journal of Adhesion and Adhesives* 26(8):629–38. doi: 10.1016/j.ijadhadh.2005.09.005.
- Günay, D. (1993). *Mühendisler için sonlu elemanlar metodunun temelleri*. Sakarya Üniversitesi.
- Hadavinia, H., L. Kawashita, A. J. Kinloch, D. R. Moore, and J. G. Williams. (2006). "A Numerical Analysis of the Elastic-Plastic Peel Test." *Engineering Fracture Mechanics* 73(16):2324–35. doi: 10.1016/j.engfracmech.2006.04.022.
- He, Xiacong. (2011). "A Review of Finite Element Analysis of Adhesively Bonded Joints." *International Journal of Adhesion and Adhesives* 31(4):248–64. doi: 10.1016/j.ijadhadh.2011.01.006.
- He, Xiacong. (2014). "Influence of Boundary Conditions on Stress Distributions in a Single-Lap Adhesively Bonded Joint." *International Journal of Adhesion and Adhesives* 53:34–43. doi: 10.1016/j.ijadhadh.2014.01.009.
- Hibbeler, R. C., and K. H. Tan. (2006). *Structural Analysis*. Upper Saddle River: Pearson Prentice Hall.
- Ishai, O., D. Peretz, and S. Gali. (1977). "Direct Determination of Interlaminar Stresses in Polymeric Adhesive Layer." *Experimental Mechanics* 17:265–70. doi: <https://doi.org/10.1007/BF02324841>.
- Kadioglu, F., R. D. Adams, and F. J. Guild. (2000). "The Shear Stress–Strain Behaviour of Low-Modulus Structural Adhesives." *The Journal of Adhesion* 73(2–3):117–33. doi: 10.1080/00218460008029302.
- Kaufman, J. G. (2000). *Introduction to aluminum alloys and tempers*. ASM International, Metals Park, OH
- Liljedahl, C. D. M., A. D. Crocombe, M. A. Wahab, and I. A. Ashcroft. (2006). "Modelling the Environmental Degradation of the Interface in Adhesively Bonded Joints Using a Cohesive Zone Approach." *The Journal of Adhesion* 82(11):1061–89. doi: 10.1080/00218460600948495.
- Logan, Daryl L. (2002). *A First Course in the Finite Element Method*. Vol. 4. Thomson.
- Loureiro, A. L., Lucas F. M. da Silva, Chiaki Sato, and M. A. V. Figueiredo. (2010). "Comparison of the Mechanical Behaviour Between Stiff and Flexible Adhesive Joints for the Automotive Industry." *The Journal of Adhesion* 86(7):765–87. doi: 10.1080/00218464.2010.482440.
- Pereira, A. M., J. M. Ferreira, F. V. Antunes, and P. J. Bártolo. (2009). "Study on the Fatigue Strength of AA 6082-T6 Adhesive Lap Joints." *International Journal of Adhesion and Adhesives* 29(6):633–38. doi: 10.1016/j.ijadhadh.2009.02.009.

- Pereira, A. M., J. M. Ferreira, F. V. Antunes, and P. J. Bártolo. (2010). "Analysis of Manufacturing Parameters on the Shear Strength of Aluminium Adhesive Single-Lap Joints." *Journal of Materials Processing Technology* 210(4):610–17. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2009.11.006.
- Rice, Richard C., R. Goode, J. Bakuckas, and S. Thompson. (2003). "Development of MMPDS Handbook Aircraft Design Allowables." in 7th Joint DOD/FAA/NASA Conference on Aging Aircraft.
- da Silva, Lucas F. M., Paulo J. C. das Neves, R. D. Adams, and J. K. Spelt. (2009). "Analytical Models of Adhesively Bonded Joints—Part I: Literature Survey." *International Journal of Adhesion and Adhesives* 29(3):319–30. doi: 10.1016/j.ijadhadh.2008.06.005.
- Tajally, Mohammad, and Esmail Emadoddin. (2011). "Mechanical and Anisotropic Behaviors of 7075 Aluminum Alloy Sheets." *Materials & Design* 32(3):1594–99. doi: 10.1016/j.matdes.2010.09.001.
- Tomblin, John, Waruna Seneviratne, Paulo Escobar, and Yap Yoon-Khian. (2002). "Shear Stress-Strain Data for Structural Adhesives." US Department of Transportation Federal Aviation Administration Office of Aviation Research, Washington, DC, Rapport Technique DOT/FAA/AR-02/97.
- Vaidya, Uday K., Abhay R. S. Gautam, Mahesh Hosur, and Piyush Dutta. (2006). "Experimental–Numerical Studies of Transverse Impact Response of Adhesively Bonded Lap Joints in Composite Structures." *International Journal of Adhesion and Adhesives* 26(3):184–98. doi: 10.1016/j.ijadhadh.2005.03.013.
- Wang, J., A. N. Rider, M. Heller, and R. Kaye. (2005). "Theoretical and Experimental Research into Optimal Edge Taper of Bonded Repair Patches Subject to Fatigue Loadings." *International Journal of Adhesion and Adhesives* 25(5):410–26. doi: 10.1016/j.ijadhadh.2004.11.007.
- Wang, Jialai, and Chao Zhang. (2009). "Energy Release Rate and Phase Angle of Delamination in Sandwich Beams and Symmetric Adhesively Bonded Joints." *International Journal of Solids and Structures* 46(25–26):4409–18. doi: 10.1016/j.ijsolstr.2009.09.003.
- Yoon, Jeong-Whan, Frédéric Barlat, Robert E. Dick, Kwansoo Chung, and Tae Jin Kang. (2004). "Plane Stress Yield Function for Aluminum Alloy Sheets—Part II: FE Formulation and Its Implementation." *International Journal of Plasticity* 20(3):495–522. doi: 10.1016/S0749-6419(03)00099-8.
- Zhang, Ye, Anastasios P. Vassilopoulos, and Thomas Keller. (2010). "Effects of Low and High Temperatures on Tensile Behavior of Adhesively-Bonded GFRP Joints." *Composite Structures* 92(7):1631–39. doi: 10.1016/j.compstruct.2009.11.028.
- Zhao, Bo, and Zhen-Hua Lu. (2009). "A Two-Dimensional Approach of Single-Lap Adhesive Bonded Joints." *Mechanics of Advanced Materials and Structures* 16(2):130–59. doi: 10.1080/15376490802625464.
- Zhao, X., R. D. Adams, and L. F. M. da Silva. 2011a. "Single Lap Joints with Rounded Adherend Corners: Experimental Results and Strength Prediction." *Journal of Adhesion Science and Technology* 25(8):837–56. doi: 10.1163/016942410X520880.
- Zhao, X., R. D. Adams, and L. F. M. da Silva. 2011b. "Single Lap Joints with Rounded Adherend Corners: Stress and Strain Analysis." *Journal of Adhesion Science and Technology* 25(8):819–36. doi: 10.1163/016942410X520871.
- Zhao, X., R. D. Adams, and Lucas F. M. da Silva. (2010). "A New Method for the Determination of Bending Moments in Single Lap Joints." *International Journal of Adhesion and Adhesives* 30(2):63–71. doi: 10.1016/j.ijadhadh.2009.09.001.



# Kahramanmaraş Sütçü İmam University Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 16.01.2024  
Kabul Tarihi : 31.07.2024

Received Date : 16.01.2024  
Accepted Date : 31.07.2024

## CLASSIFICATION OF CUSTOMER SENTIMENTS BASED ON ONLINE REVIEWS: COMPARATIVE ANALYSIS OF MACHINE LEARNING AND DEEP LEARNING ALGORITHMS

### ÇEVİRİMİÇİ DEĞERLENDİRMELER ÜZERİNDEN MÜŞTERİ DUYGULARININ SINIFLANDIRILMASI: MAKİNE ÖĞRENMESİ VE DERİN ÖĞRENME ALGORİTMALARININ KARŞILAŞTIRMALI ANALİZİ

Vahid SINAP<sup>1\*</sup> (ORCID: 0000-0002-8734-9509)

<sup>1</sup> Ufuk University, Department of Management Information Systems, Ankara, Türkiye

\*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Vahid SINAP, vahidsinap@gmail.com

#### ABSTRACT

E-commerce's transformation of consumer behavior has increased the importance of understanding customer emotions, especially in the transition from traditional retail models to online platforms. The proliferation of online shopping has fundamentally changed not only shopping habits but also consumer interactions and purchase decisions. This research aims to compare and analyze the performance of various text mining and machine learning algorithms in the context of sentiment analysis and online review data. For this purpose, analyses were performed with a total of five supervised classification algorithms including Logistic Regression, Naive Bayes, Support Vector Machine, Random Forest, AdaBoost, and a deep learning model, CNN Model. The dataset used in the study includes customer reviews obtained from a women's clothing e-commerce platform. The missing data were completed by pre-processing the dataset. Count Vectorizer and TF-IDF vectorization were performed to transform the textual data. In addition, various text preprocessing steps were applied. According to the findings obtained from the research, AdaBoost and Naive Bayes algorithms were the most effective algorithms in terms of classifying customer sentiments. No significant difference was detected in terms of the vectorization method used. Although the CNN Model showed high performance, the generalizability of the model was considered low because overfitting was detected during the training of the model.

**Keywords:** Natural language processing, sentiment analysis, text mining, machine learning, deep learning

#### ÖZET

Geleneksel perakende modellerinden çevrimiçi platformlara geçişte e-ticaretin tüketici davranışlarını dönüştürücü etkisi müşteri duygularını anlamının önemini artırmıştır. Bu araştırma, çeşitli metin madenciliği ve makine öğrenmesi algoritmalarının duygu analizi ve çevrimiçi değerlendirme verileri bağlamında performanslarını karşılaştırmayı amaçlamaktadır. Bu amaç doğrultusunda Lojistik Regresyon, Naive Bayes, Destek Vektör Makinesi, Rastgele Orman ve AdaBoost olmak üzere toplam beş denetimli sınıflandırma algoritması ve bir derin öğrenme modeli olan CNN Model ile analizler gerçekleştirilmiştir. Çalışmada kullanılan veri seti, bir kadın giyim e-ticaret platformundan elde edilen müşteri değerlendirmelerini içermektedir. Veri setinde ön işlemler gerçekleştirilerek eksik veriler tamamlanmıştır. Count Vectorizer ve TF-IDF vektörizasyonları yapılarak metinsel verilerin dönüşümü sağlanmıştır. Bunlara ek olarak çeşitli metin ön işleme adımları uygulanmıştır. Araştırmadan elde edilen bulgulara göre müşteri duygularını sınıflandırma bağlamında en etkili algoritmalar AdaBoost ve Naive Bayes algoritmaları olmuştur. Kullanılan vektörizasyon yöntemi açısından önemli bir farklılık tespit edilmemiştir. CNN Model yüksek performans gösterse de modelin eğitimi sırasında aşırı öğrenme tespit edildiği için modelin genellenebilirliği düşük kabul edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Doğal dil işleme, duygu analizi, metin madenciliği, makine öğrenmesi, derin öğrenme

ToCite: SINAP, V., (2024). CLASSIFICATION OF CUSTOMER SENTIMENTS BASED ON ONLINE REVIEWS: COMPARATIVE ANALYSIS OF MACHINE LEARNING AND DEEP LEARNING ALGORITHMS. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 27(3), 779-799.

## INTRODUCTION

The widespread use of e-commerce has led to a transformation in consumer behavior. Online commerce, which replaces traditional retail shopping models, has the potential to offer consumers a wider range of products and a more comprehensive shopping experience. This transformation has an impact on many aspects from shopping habits to preferences. Consumers now prefer online platforms more than physical store visits when purchasing products and services (Shanthi & Desti, 2015), and this situation fundamentally changes the shape and dynamics of shopping. This online shopping trend enables consumers to examine product reviews on various platforms and interact with other consumers through these reviews before purchasing products (Rosário and Raimundo, 2021). In this context, it has placed a significant emphasis on the review of products on online platforms and the exchange of reviews. While consumers guide other consumers by sharing their experiences, companies have the opportunity to improve their products and services by evaluating customer reviews (Singh et al., 2017). This interaction has become a powerful factor in shaping consumers' purchasing decisions (Mariani and Borghi, 2021). This shift can be attributed to significant advances in technology and the increased connectivity and social interaction offered by modern digital environments. Effective handling of customer experience and sentiments is important for achieving long-term business success in the ever-changing digital commerce space (Kamal and Himel, 2023). Therefore, understanding the dynamics of customer sentiments in the context of online reviews plays an important role in shaping brand success and marketing strategies.

According to the diffusion of innovations theory, the introduction of new products is closely related to social dynamics (Wani and Ali, 2015). Early adopters have a significant influence in shaping mainstream markets through positive word-of-mouth publicity and fostering a socially favorable environment for the introduction of innovative products (Carrigan et al., 2011). Analyzing how this theory applies to the current environment of online reviews and consumer behavior is important for understanding the interaction between customer sentiment and purchase decisions. Online reviews provide a platform for consumers to evaluate new products and share their experiences (Singh et al., 2017). This platform serves as a tool especially for early adopters, as this group is often the first to discover and start using innovative products. By sharing their positive experiences, these users can leave a positive impact on other consumers on social networks and online platforms. This shows how positive word-of-mouth promotion, one of the basic principles of diffusion of innovations, plays a role in the online environment (Hennig-Thurau et al., 2015).

Diffusion of innovations states that the social environment plays a critical role in the process of product adoption by consumers (Chandrasekaran and Tellis, 2017). In this process, consumers, especially early adopters, learn about the product through social interactions, recommendations, and online reviews. Therefore, online reviews are an important source for understanding social interactions as part of innovation diffusion and the factors influencing the product adoption process.

As e-commerce expands with the proliferation of products and rapid technological advances, customers struggle with the challenge of navigating a diverse marketplace (Chawla and Kumar, 2022). Understanding and effectively managing consumer sentiment in this evolving digital environment is an important issue that needs to be addressed. Traditional metrics such as online review scores and volume, while informative, fail to capture the subtle nuances of customer emotions (Lian et al., 2023). Firstly, online review scores are important in terms of expressing customer satisfaction; however, these reviews are often left by extremely satisfied or dissatisfied consumers (Han and Anderson, 2020). Therefore, average online review scores may contain excessive bias. This bias becomes more pronounced for popular brands such as Apple and Samsung, where online review ratings tend to cluster at the extremes, impeding marketers from acquiring a comprehensive understanding of overall customer sentiment (Kapoor and Banerjee, 2021). Secondly, although the volume of online reviews usually indicates how much attention a product has received, the number of reviews is not directly related to the future success of a product (Zhuang et al., 2018). The number of reviews about the product can increase the popularity of a product. However, this does not mean that the product will be received positively or will sell more in the future (Racherla and Friske, 2012). Therefore, the volume of online reviews does not provide much information on customer opinions. Thus, the mentioned measure may be insufficient to ensure success in the diffusion of innovation. These limitations show that traditional measures are incomplete in capturing all aspects of customer sentiment. To overcome these limitations, advanced analytical approaches including text mining, natural language processing (NLP) and machine learning (ML) are emerging as powerful tools to unravel the complexity of consumer sentiments (Hartmann and Netzer, 2023). However, the application of these advanced techniques presents its own challenges and complexities that require critical scrutiny

to guarantee a comprehensive understanding of the complex interplay between consumer sentiments and e-commerce dynamics.

To effectively apply techniques such as text mining, NLP, and ML, large and qualified datasets are needed. There should be enough in-depth reviews on a particular product or service category (Zhang et al., 2019). In addition, to successfully apply these techniques, people who are skilled in data science, analytics, and programming, which is a field that requires expertise, are needed. Besides, techniques such as text mining and NLP need to be appropriately adapted to the complexity and diversity of language to fully recognize sentimental nuances (Mohammad, 2016). Different forms of expression, wordplay, and emotional tones across languages are important factors that need to be considered for these techniques to work correctly.

Text mining, NLP, and ML also have certain differences and limitations of use. Text mining is considered effective in analyzing large text data. It also has the ability to identify patterns and extract basic statistical information. However, it may be limited in complex tasks such as sentiment analysis and may have difficulty in fully understanding emotional nuances and subtexts of language (Qaiser and Ali, 2018). NLP is designed to understand more complex aspects of language. It has the capabilities of inferring meaning, understanding emotional tones, and analyzing word context (Guo, 2022). However, it may require more training and data to adapt to the complexity of language. Performance may be degraded, especially when multiple languages are used. Although NLP is more advanced than text mining, it is sometimes insufficient to fully understand and decode complex emotional content. ML is a powerful tool for analyzing large datasets and learning patterns (Alexopoulou et al., 2017). However, it needs a large and representative dataset to obtain accurate results. It can also be susceptible to problems such as overlearning or lack of data training. All three methods come with their own advantages and limitations. Therefore, choosing the most appropriate one in the context of an application depends on the complexity of the subject matter and the desired results.

The main objective of this research is to compare and analyze the performance of various text mining and ML algorithms. By identifying the different advantages, disadvantages, and limitations of these algorithms, the research aims to evaluate their effectiveness, especially on sentiment analysis and online review data. In line with the results obtained, it is aimed to determine the best performing method and to understand the effectiveness of these algorithms in specific usage scenarios. In addition, the research is expected to be a guide to better understand the competition between algorithms used in sentiment analysis and similar tasks and to select the most appropriate algorithm in the context of the application.

### ***Related Work***

In the field of text mining and sentiment analysis, there are important studies that deal with various aspects of the subject. These studies are categorized into four main areas: fundamental sentiment analysis methods including aspect-based sentiment analysis and supervised learning approaches, advanced NLP and deep learning models, comparative analyses and techniques such as sentiment analysis on movie reviews and comparative studies on sentiment analysis, and methods for handling big data and specialized datasets including social media sentiment analysis and ML techniques for online customer reviews.

Various studies have explored fundamental sentiment analysis methods across different domains. Li et al. (2023) employed aspect-based sentiment analysis (ABSA) to predict restaurant survival, emphasizing its use in categorizing reviews by specific aspects like location and service. Hossain and Rahman (2023) utilized ML techniques, including AFINN and VADER algorithms, to classify sentiment in insurance reviews, highlighting logistic regression's effectiveness. Zhang et al. (2021) proposed a hybrid approach integrating word embedding and dependency parsing for hotel review sentiment analysis. In an evaluation, the proposed hybrid approach was found to be superior to individual techniques in terms of sentiment classification performance. Rain (2013) assessed sentiment limitations using Likert scales in Amazon product reviews. According to the results of the study, it was found that this type of evaluation tool allows limited expression of sentiments, leads to inadequate expression of language and cultural differences, and the review may go beyond the characteristics of the product. Hu et al. (2010) applied SentiWordNet for sentiment analysis of product features. Angulakshmi and ManickaChezian (2014) outlined opinion mining tools for sentiment classification.

In NLP and deep learning models for sentiment analysis, Patel et al. (2023) explored the Airline reviews dataset using ML algorithms like Naïve Bayes (NB), Support Vector Machine (SVM), and Decision Tree (DT), with Google's



BERT demonstrating superior performance across metrics. Barik et al. (2023) integrated LSTM with grey wolf optimization (DGWO) and BERT for word embedding, achieving high accuracy in product review sentiment analysis. Zhao et al. (2021) introduced LSIBA-ENN, an optimized ML algorithm, showing enhanced recall rates in sentiment analysis. Poomka et al. (2021) investigated customer satisfaction through sentiment analysis of Amazon book reviews, highlighting LSTM and gated iterative units' effectiveness. Pradhan et al. (2016) conducted a comprehensive study on supervised learning approaches, emphasizing sensitivity and recall metrics. Alantari et al. (2022) compared methods for linking consumer ratings with text-based reviews, highlighting pre-trained neural networks' predictive accuracy over topic models. Demirbilek and Demirbilek (2023) conducted a sentiment analysis on Google comments about a state university in Central Anatolia. They used machine learning methods like Logistic Regression (LR), Gaussian Naive Bayes, SVM, and CatBoost, as well as LSTM and AWS Comprehend. All methods achieved over 80% success, with AWS Comprehend excelling in all metrics except sensitivity, demonstrating the effectiveness of these techniques for sentiment analysis.

In comparative analyses and techniques, Tran et al. (2022) performed sentiment analysis on movie reviews using RF, NB, SVM, blending, voting, and RNN techniques, proposing frameworks that outperform Stanford CoreNLP in predictive accuracy, particularly with voting and RNN models. Dey et al. (2020) compared SVM and NB for sentiment analysis of Amazon product reviews, with SVM demonstrating consistent performance. Ramadhan et al.'s (2023) study compared NB and SVM classifiers for sentiment analysis on wireless headphone reviews from Tokopedia, highlighting the NB classifier's superior accuracy, recall, and F-measure, and the SVM classifier's high precision.

Advancements in big data analytics have facilitated innovative approaches to sentiment analysis. Researchers like Biradar et al. (2022) and Obiedat et al. (2022) have developed methods leveraging advanced algorithms to extract insights from real-time social media and review datasets. Biradar et al. (2022) focused on developing big data technologies to process real-time social media data for sentiment analysis, emphasizing dataset preprocessing, domain-specific clustering, and feature extraction using n-gram models and TF-IDF vectors. Their approach integrates unsupervised clustering for domain-specific insights and supervised ML for efficient Twitter data processing, achieving a reported 80% accuracy and enhancing computational efficiency compared to traditional methods. Obiedat et al. (2022) introduced a hybrid method combining SVM with Particle Swarm Optimization (PSO) and various oversampling techniques to address data imbalance in sentiment analysis of restaurant reviews from Jeeran, a platform featuring Arabic reviews. The study highlights the PSO-SVM approach's effectiveness in optimizing feature weights and improving classification accuracy, F-score, G-mean, and Area Under the Curve (AUC) across different dataset versions, underscoring its superiority over alternative classification methods. These studies exemplify advancements in applying advanced algorithms to big data for enhancing sentiment analysis and data-driven decision-making processes.

This study offers a different perspective from previous studies by evaluating the performance of sentiment analysis and classification algorithms in the e-commerce domain in depth. In particular, the focus on customer reviews obtained from women's clothing e-commerce platforms is a unique feature of the study. Unlike sentiment analysis studies in the existing literature, which are usually conducted on general product categories, this research targets a specific niche and addresses industry-specific challenges and opportunities. Moreover, the effective completion of missing values and the methodologically innovative implementation of text preprocessing steps enhance the capacity of this study to produce well-founded conclusions. In addition, the research evaluates in detail the performance of various classification algorithms in sentiment analysis as well as the deep learning model CNN Model and demonstrates how effective these models are in e-commerce customer reviews. Besides, the problems inherent to ML techniques that occur during the procedure followed in building the model are reported in the research, and suggestions are made to solve the problems instead of being solved in the background. The unique contribution of this study is to guide e-commerce companies to understand customer feedback more effectively and successfully integrate this understanding into their strategic decision-making processes. Therefore, it constitutes an important resource for decision makers, marketers, and researchers in the industry.

## **MATERIAL AND METHOD**

In this section, explanations of the ML algorithms used in the research, performance criteria used in the comparison of algorithms, features of the dataset, and information about the data preparation process are given.

### Algorithms Utilized

ML is a sub-branch of artificial intelligence and involves computers making intelligent decisions by learning from data. ML is divided into various methods according to the nature of the data and the purposes of the analysis. In this context, three main categories stand out: (1) Supervised Learning, (2) Unsupervised Learning, and (3) Reinforcement Learning (Sarker, 2021). Supervised learning is an approach in which an ML model tries to understand the relationship between a given input and a target output. This approach is divided into two main subcategories: classification and regression. Classification is used to determine whether an input belongs to a certain category or not. Classification algorithms learn patterns in the dataset and use these patterns to classify new and unknown data into specific categories. In the context of customer sentiment analysis, supervised classification algorithms play an important role in analyzing customer reviews quickly and effectively. These algorithms can analyze customer reviews and categorize them into positive and negative sentiments. The algorithms evaluate customer expressions based on certain features and classify sentiment based on the learned patterns. The main advantages of supervised classification algorithms are fast execution, the ability to process large datasets, and their learning capabilities. However, they also have some challenges, such as the need for correctly labeled datasets and the need to be trained to perform well in a given context (Zhou et al., 2017).

In this research, a total of five supervised classification algorithms, namely LR, NB, SVM, RF, and AdaBoost, were used to examine customers' reviews and perform sentiment classification. In addition, Convolutional Neural Networks (CNN) Model, which is a deep learning (DL) model, was also used in the analysis.

### Logistic Regression

LR is a statistical modeling technique used to estimate the probability that a dependent variable belongs to one of two categories. It is especially used in classification problems. It is named after the logit function in mathematics (Das, 2021). Basically, LR is an extended form of linear regression. However, the output of LR is probability values, which are converted into log odds ratio using a logit transformation. This process is used to express probabilities between 0 and 1. The formula for LR is given in Equation 1.

$$P(Y = 1) = \frac{1}{1 + e^{-(b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + \dots + b_k X_k)}} \quad (1)$$

When the formula in Equation 1 is analyzed:

- $P(Y = 1)$  is the probability that the dependent variable belongs to category 1.
- $e$  is the Euler number.
- $b_0, b_1, b_2, \dots, b_k$  are the learned coefficients of the model.
- $X_1, X_2, \dots, X_k$  are the independent variables.

### Naive Bayes

NB is a probabilistic ML algorithm used especially in text classification problems. It is based on Bayes' Theorem and takes its name from the "naive" (pure, simple) assumption in this theorem. The assumption suggests that each feature in the model is independent of the others (Berrar, 2018). The formula of NB is given in Equation 2.

$$P(C | X) = \frac{P(X | C) \cdot P(C)}{P(X)} \quad (2)$$

In the formula in Equation 2:

- $P(C | X)$  denotes the probability of belonging to a given class ( $C$ ),
- $P(X | C)$ , the probability of observed traits ( $X$ ) belonging to class ( $C$ ),
- $P(C)$  denotes the probability of belonging to class ( $C$ ) in general.
- $P(X)$  is the overall probability of the observed features.

### Support Vector Machine

SVM is an algorithm used in ML for classification and regression problems. Basically, it works by creating a hyperplane to separate data points into two classes. In creating this hyperplane, SVM focuses on maximizing the margin between classes (Pisner and Schnyer, 2020). SVM is successful with linearly separable datasets but can be

extended for non-linearly separable datasets by using kernel functions. Kernel functions provide linear separability by transforming the data into another space (Cervantes et al., 2020). In this way, SVM can also be used for multi-class problems and regression problems. The SVM decision function is given in Equation 3.

$$f(x) = \text{sign}(\mathbf{w} \cdot \mathbf{x} + b) \quad (3)$$

Looking at Equation 3,  $f(x)$  is the function representing the classification decision.  $\mathbf{w}$  is the weight vector, important parameters that determine the hyperplane.  $\mathbf{x}$  is the weight vector, important parameters that determine the hyperplane.  $b$  is the bias term. If  $f(x)$  is positive or negative, it is assigned to a class. This decision function is used to classify the data points, allowing to evaluate the performance of the learned model. The SVM learning process involves optimizing this decision function and finding the optimal hyperplane.

### **Random Forest**

RF is an ensemble-based learning model. It is a powerful tool for classification and regression tasks. The algorithm builds a more generalizable model by assembling a set of decision trees. Each decision tree independently performs classification or regression based on features. These trees are usually deeply split and focused on different subgroups. RF combines the predictions of these trees into a more reliable and higher performing model (Dogru and Subasi, 2018). The "randomness" feature of the algorithm involves training each tree on a different subset, which increases its generalization ability and provides resistance to overfitting (Sylvester et al., 2018). Although it does not have a specific formulaic equation, it is a model in which predictions are generated by a combination of partitions and decision mechanisms within each tree.

### **AdaBoost**

AdaBoost is an ensemble learning algorithm that combines weak learners to form a strong learner. It can be used in classification or regression tasks and is specifically designed to improve performance in successive iterative stages. In each iteration, a new weak learner is added, focusing on examples that were misclassified in previous stages of the model. In this way, the weight of the incorrectly predicted examples is increased, and the model adapts to better classify these examples (Li et al., 2008). The basic formula of AdaBoost includes a combination where the weight of each weak learner is related to the prediction accuracy. This relationship is expressed using the weighted error rate. AdaBoost is combined with simple models such as decision trees and applies an adaptive weighting strategy to increase the power of each learner. The mathematical formula of the algorithm is expressed in Equation 4.

$$F(x) = \sum_{t=1}^T \alpha_t f_t(x) \quad (4)$$

In this formula:

- $F(x)$  is the total learners,
- $T$  denotes each weak learner iteration of AdaBoost.
- $\alpha_t$  is the coefficient assigned weight to the  $t$ -th weakest learner.
- $f_t(x)$  is the prediction function of the  $t$ -th weakest learner.

In each iteration, the AdaBoost algorithm gives weight to data points, taking into account the errors of previous iterations. It emphasizes previously misclassified examples more and trains the next weaker learner by combining these weighted learners together. The coefficients ( $\alpha_t$ ) determine the importance of each weak learner and give more weight to correct classification.

### **Deep Learning based CNN Model**

DL is a sub-branch of ML used to solve complex problems and automate learning processes. DL models are usually multilayer neural networks and therefore have a "sequential" structure. CNN Model is a structure that combines the layers of a neural network in a sequential manner (Zhou and Troyanskaya, 2015). The CNN Model can include different types of layers such as convolutional layers, fully connected layers, and activation layers. The characteristic of this model is that the layers are connected sequentially and these connections are optimized in a learning process (Li et al., 2018). DL is often applied in areas such as visual and NLP, as it can learn complex patterns in large datasets.

### **Performance Metrics**

Evaluating the effectiveness of ML models is a critical element for their successful design and implementation. The evaluation of models is important to understand how well the algorithms are compatible with real-world data. In this context, performance metrics are used to evaluate the accuracy, precision, sensitivity, and overall performance of the model. Metrics derived from basic measures such as True Positive (TP), True Negative (TN), False Positive (FP), and False Negative (FN) help to understand the classification capabilities and overall performance of the model (Carvalho et al., 2019). TP represents the number of times the model correctly identifies a positive situation. TN represents the number of times the model correctly identifies a negative case. FP represents the number of times the model incorrectly identifies a negative state as positive. FN refers to the number of times the model incorrectly identifies a positive state as negative. Furthermore, tools such as AUC scores, confusion matrices, and F1-Score combine different metrics to provide a more comprehensive assessment. The correct interpretation of these metrics is critical for understanding the reliability and overall effectiveness of the model.

**Accuracy:** It refers to the proportion of instances correctly predicted by a classification model. It is calculated by dividing the number of correctly predicted samples by the total number of samples. Its formula is given in Equation 5.

$$Accuracy = \frac{TP + TN}{TP + FP + TN + FN} \quad (5)$$

**Precision:** Measures the probability that samples predicted as positive are actually positive. It focuses on reducing FP predictions. Its formula is given in Equation 6.

$$Precision = \frac{TP}{TP + FP} \quad (6)$$

**Recall:** Measures the proportion of truly positive samples that are correctly predicted. It focuses on reducing false negative predictions. Its formula is given in Equation 7.

$$Recall = \frac{TP}{TP + FN} \quad (7)$$

**F1-Score:** Provides a balanced performance measure by combining precision and recall metrics. It uses the harmonic mean between the two. Its formula is given in Equation 8.

$$F1 = 2 * \frac{(precision * recall)}{(precision + recall)} \quad (8)$$

**Receiver Operating Characteristic Curve (ROC):** An important tool used to evaluate the performance of classification models. The curve shows the relationship between two key metrics, sensitivity (True Positive Rate) and specificity (True Negative Rate). Sensitivity represents the true positive rate, i.e. the proportion of true positives out of total positive cases, while specificity represents the true negative rate, i.e. the proportion of true negatives out of total negative cases (Carter et al., 2016). The curve is plotted using the metrics False Positive Rate (FPR), shown in Equation 9 on the horizontal axis, and True Positive Rate (TPR), formulated in Equation 10, on the vertical axis. In an ideal model, the ROC curve passes through the upper left corner. In this case, the model provides high sensitivity and high specificity.

$$TPR = \frac{TP}{TP + FN} \quad (9)$$

$$FPR = \frac{FP}{FP + TN} \quad (10)$$

AUC (Area Under the Curve): Refers to the area under the ROC curve. For an ideal classifier, the AUC will approach 1, while for a randomly estimated model, the AUC will be 0.5. AUC is the model's ability to discriminate between the positive and negative classes.

### Dataset

The dataset used in the research consists of customer reviews from a women's clothing e-commerce platform (Brooks, 2018). The dataset consists of 23.486 records and 10 columns. Each row represents one customer review. Each entry contains a written comment and additional customer information. The data is anonymized to protect confidentiality. Company references in the review text and body have been replaced with the term "retailer". The features present in the dataset and their descriptions are given below.

- Clothing ID: Integer categorical variable that refers to the specific product being reviewed.
- Age: Age of the reviewer, positive integer variable.
- Title: Text variable containing the title of the review.
- Review Text: Text variable containing the text of the review.
- Rating: Product rating given by the customer, positive ordinal integer variable ranging from 1 worst to 5 bests.
- Recommended IND: Binary variable indicating whether the customer recommends the product; 1 recommended, 0 not recommended.
- Positive Feedback Count: Positive integer indicating the number of times other customers found this review positive.
- Division Name: Categorical name indicating the general division of the product.
- Department Name: Categorical name indicating the department name of the product.
- Class Name: Categorical name indicating the class name of the product.

There are missing values in the dataset. There are 3.810 missing values in the "Title" column, 845 in the "Review Text" column, and 14 missing values in each of the "Division Name", "Department Name", "Class Name" columns (Figure 1). The presence of missing values can make it difficult to fully utilize the dataset and affect the analysis results. In addition, it can be more difficult to detect missing values in textual features, especially if an empty string is entered as a textual expression. In this case, strategies for dealing with missing values should be identified and their potential impact on the analysis should be evaluated.

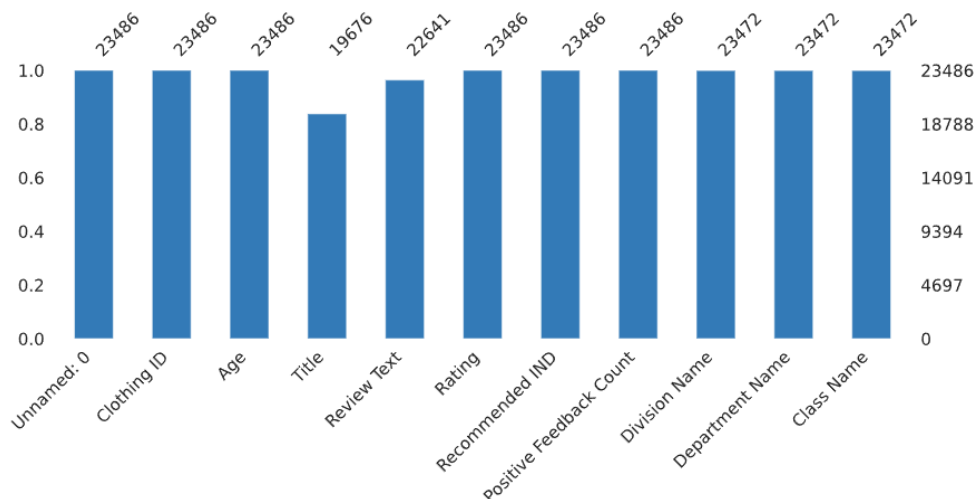


Figure 1. Missing Values

### Data Preparation

Data preprocessing steps were performed to eliminate the deficiencies in the dataset and to obtain more reliable results in the analysis. First, missing 'Title' values were changed to 'No Title' to ensure consistency in the analysis and to avoid problems caused by missing values. This ensures that the missing values in the 'Title' column are filled with a meaningful value. Subsequently, rows with missing 'Review Text' values were removed to ensure that the underlying data used in text-based analyses is complete. To increase the accuracy of the analysis and add credibility to the results, a dataset free of missing 'Review Text' values was obtained. Finally, duplicate values were deleted to remove unnecessary repetitions in the dataset and reduce inconsistencies in the analysis. These processes contribute to making the dataset more organized and homogeneous.

### **Text Vectorization**

ML algorithms take numerical feature vectors as input. Therefore, when working with textual data, it is necessary to convert each data into a numeric vector (Weiss et al., 2010). This process is referred to as “vectorization” in the literature (Jararweh et al., 2019). Two different vectorization methods were used in this study. The first one is the "Count Vectorizer" vectorization approach where each text is represented as a vector of word counts.

Count Vectorizer is a tool for converting text data into a matrix of token counts, a numerical representation. In the research, the text collection was converted into a predefined set of tokens (words), and a matrix was obtained for each token, showing how many times it occurs in a given document (Turki and Roy, 2022). According to the Count Vectorizer's logic, each token forms a column, and each document (text sample) forms a row. Each cell of the matrix indicates the number of times a particular word occurs in a given document. This allows text data to be represented in a numerical format.

The second text vectorization method used in the research is called TF-IDF (Term Frequency-Inverse Document Frequency). TF-IDF is a measure used to determine the importance of a word in a document (Aizawa, 2003). This measure combines the frequency of a word in a document and the overall frequency of that word in all documents. Term Frequency (TF) refers to the frequency of a word in a document. That is, it shows how many times a word occurs in a document. However, it only measures the absolute frequency of the word in the document and therefore this value does not take into account the relative importance of a word within a document (Bafna et al., 2016).

$$TF(t, d) = \frac{\text{Number of times term } t \text{ appears in document } d}{\text{Total number of terms in document } d} \quad (11)$$

Inverse Document Frequency (IDF) is a measure of the overall importance of a word. If a word is rare in general, its IDF value will be high. This means that a particular word is less common in the overall collection and therefore has more weight (Robertson, 2004).

$$IDF(t, D) = \log\left(\frac{\text{Total number of documents in the corpus}}{\text{Number of documents containing term } t + 1}\right) + 1 \quad (12)$$

TF-IDF vectorization creates a vector containing the TF-IDF scores of all words in a document. This provides a numerical representation of the importance of each word in the document, which can then be given as input to ML algorithms.

$$TF - IDF(t, d, D) = TF(t, d) \times IDF(t, D) \quad (13)$$

### **Text Preprocessing**

Text is the most unstructured form of data available, so it contains various types of noise. This means that the data cannot be directly analyzed without any preprocessing. The process of cleaning and standardizing text, removing noise, and making it ready for analysis is called "text preprocessing" (Denny and Spirling, 2018). The following steps were followed for text preprocessing in the research.

**Tokenization:** Tokenization is recognized as an important pre-processing step in text mining and NLP. In this step, textual data is broken down into smaller and more meaningful chunks. It often plays an important role in

understanding the structural properties of language, as sentences are the basic structural units that often carry meaning. Brackets such as punctuation marks, spaces, or special characters are used to separate the text into sentences and words. The words and terms identified in each sentence are treated as tokens (Vijayarani and Janani, 2016). That is, each word or term in the text is referred to as a token and analyzed using these tokens.

**Noise Reduction:** This step was performed by identifying any piece of text in the data that is incompatible with the context and the final output. Such noise elements include language stop words, i.e. words that are commonly used in a language but do not contribute to the meaning of the text (is, am, the, of, in, etc.). Furthermore, this step is concerned with removing all types of noise in the text, including URLs or links, capitalization, punctuation, and industry-specific words (Xiong et al., 2006). In this way, noise elements within the text are reduced and the text is more suitable for analysis.

**Lexical Normalization:** The lexical normalization step was carried out to clean up the multiple representations of a single word, in particular word variations such as "run", "runner", "ran", "runs" and "running". Such variations mean semantically different things but are similar in context (Han and Baldwin, 2011). This step performs the function of transforming the differences of each word into a normalizing form, also known as a "lemma". Lemmatization is one of two methods of lexical normalization, stemming or lemmatization (Badaro et al., 2014). For this case, lemmatization is preferable because lemmatization performs a stemming operation by returning the stem form of each word, which is not only limited to removing suffixes but also performs stemming.

These steps are carried out to better understand the text and make it coherent and suitable for analysis. Tokenization breaks the text into more manageable chunks; Noise Reduction removes redundant information for analysis; Lexical Normalization regularizes word variations. These steps improve accuracy and reliability in the analysis process while making the text ready for analysis.

### **Model Setups**

In this study, a total of five supervised classification algorithms (LR, NB, SVM, RF, AdaBoost) and a DL model (CNN) were used to perform sentiment analysis on customer reviews. While creating the models, the dataset was divided into two parts, 80% for training and 20% for testing. Since text data is usually high dimensional and irregular, large datasets are recommended for text mining and NLP applications. In the analyses, 10-fold cross-validation was employed. The reason for using the 10-fold cross-validation method is that the dataset used in the research is considered a relatively small dataset, especially for text mining applications. By employing 10-fold cross-validation in the analyses, it is ensured that the model is trained and evaluated on different subsets of the data, providing a more robust estimation of the model's performance. This method allows the model to learn from a variety of data splits and helps in assessing its generalization ability more effectively.

In all algorithms used, the random state was set to 42. Hyperparameter tuning was performed using Grid Search to optimize the performance of each model. In the LR algorithm, the parameter C was optimized, and the best value found was 0.1. C is known as the regularization term and controls the amount of regularization; smaller values of C mean more regularization. The max\_iter parameter was set to 1000, which means that the optimizer algorithm will perform a maximum of 1000 iterations. The class\_weight parameter was set to "balanced", so that automatic weights are used to address the imbalance between classes. For the RF algorithm, Grid Search determined that a total of 140 decision trees (n\_estimators=140) and a maximum depth of 15 (max\_depth=15) yielded the best performance. The n\_jobs parameter is set to -1 so that all processor cores are used for training the trees. The class\_weight parameter is set to "balanced" so that automatic weights are used to handle imbalance between classes. The kernel used in the SVM was optimized to be the Radial Basis Function (RBF), and the C parameter was set to 1.5. In SVM optimization, the C parameter indicates the extent to which misclassification of each training sample is avoided. For the AdaBoost algorithm, Grid Search found that using 420 weak learners and a learning rate of 0.05 provided the best results. For the Naive Bayes algorithm, the var\_smoothing parameter was optimized to 1e-9. The specific hyperparameters for each algorithm are summarized in Table 1.

**Table 1.** Optimized Hyperparameters for Each Algorithm

Algorithm	Parameter	Value
LR	C	0.1
	max_iter	1000
RF	class_weight	balanced
	n_estimators	140
	max_depth	15
	n_jobs	-1
	class_weight	balanced
SVM	kernel	RBF
	C	1.5
AdaBoost	n_estimators	420
	learning_rate	0.05
NB	alpha	0.5
	var_smoothing	1e-9

The study was developed in Python programming language and implemented using Jupyter Notebook IDE. For text mining and sentiment analysis processes, NLTK (Natural Language Toolkit) and Scikit-learn libraries were used. In addition, Matplotlib and Seaborn libraries were preferred for data visualization and analysis. Pandas and NumPy libraries were used for data manipulation and analysis.

## EXPERIMENTAL STUDY AND FINDINGS

The findings are presented in three sections. In the first section, confusion matrices, ROC curves and AUC scores of five supervised classification algorithms, LR, NB, SVM, RF, AdaBoost, are reported. In the second section, AUC and Validation AUC Score and Loss and Validation Loss Score graphs of CNN Model are shown. In the third section, the performance of the models created in the research is compared.

### *Evaluation of Supervised Classification Models*

The models were first analyzed using confusion matrices. The results obtained through the confusion matrices reflect the ability of each model to accurately classify customer sentiments. When Figure 2 and Figure 3 are examined, it is seen that the NB model stands out with high TN and TP values in both text vectorization methods, but the FP value is lower in the Count Vectorizer method. This shows that NB is successful in accurately distinguishing between negative and positive emotions, especially when the Count Vectorizer method is used. The other models obtained similar results in both vectorization methods. In addition to NB, LR and SVM models also provided high accuracy. However, the FP value of the AdaBoost model was found to be slightly high. This indicates that the model tends to classify negative comments as positive. In other words, the AdaBoost model indicates that it may tend to misinterpret sentiments in situations compared to other models. However, confusion matrices alone are not sufficient to make such an inference.

ROC curve analysis was performed to better understand the performance of the models. The AUC scores of each model were used to measure the classification abilities of the models. These measurements were performed and reported separately for Count Vectorizer and TF-IDF methods. ROC curves visualize the balance between sensitivity and specificity to assess the classification ability of the models. AUC score evaluates the overall classification performance of the model by measuring the area under the ROC curve.

When Figure 4 and Figure 5 are analyzed, LR and SVC models stand out as the highest performing models with an AUC score of 0.93 when the TF-IDF method is used. When Count Vectorizer is used, LR's AUC score decreases to 0.92, while RF's remains the same. This shows that the models have a high ability to distinguish between positive and negative classes and that there is no significant difference in terms of the vectorization method used. RF and NB models also showed strong performance with AUC scores of 0.90 and 0.91 respectively. The ROC curves of these models indicate a balanced performance between sensitivity and specificity. The AdaBoost model performed slightly lower than the other models with an AUC score of 0.89.



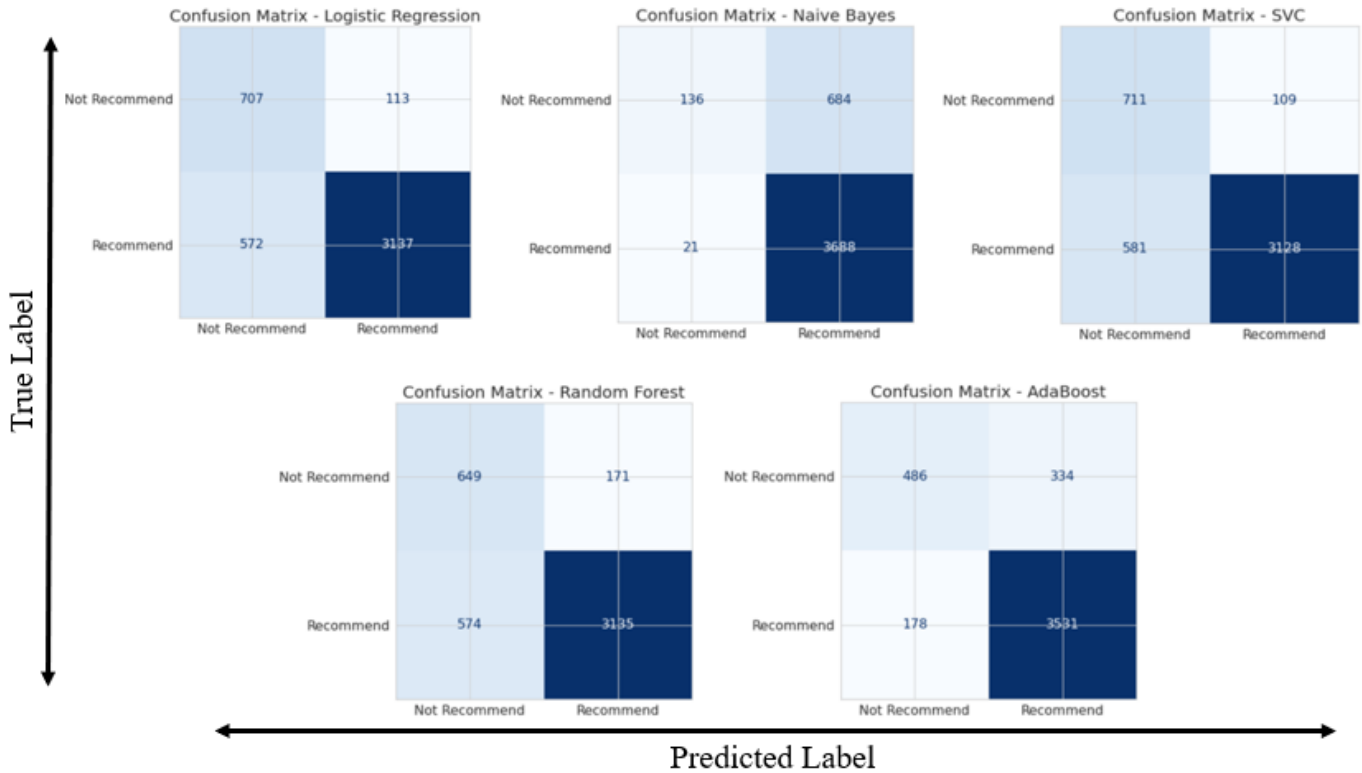


Figure 2. Confusion Matrices (Based on TF-IDF)

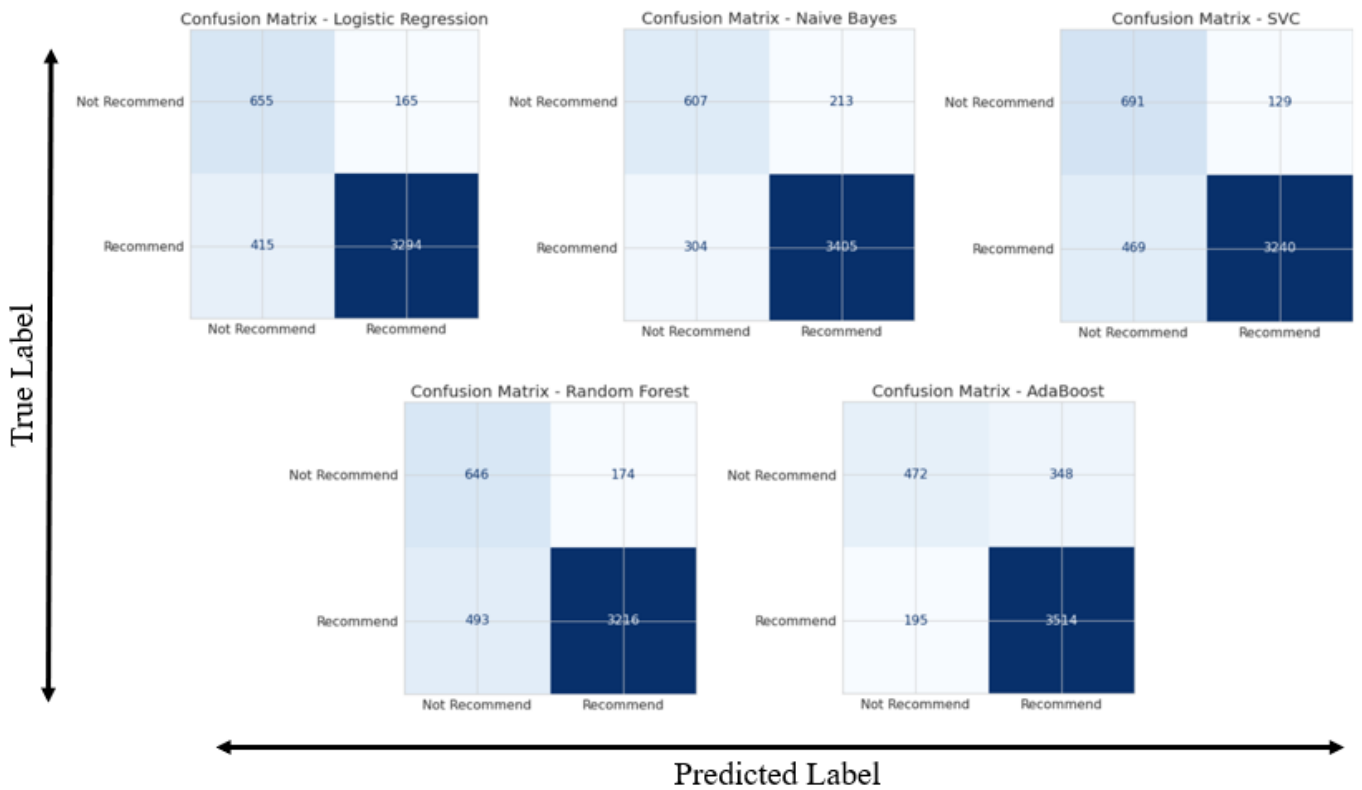


Figure 3. Confusion Matrices (Based on Count Vectorizer)

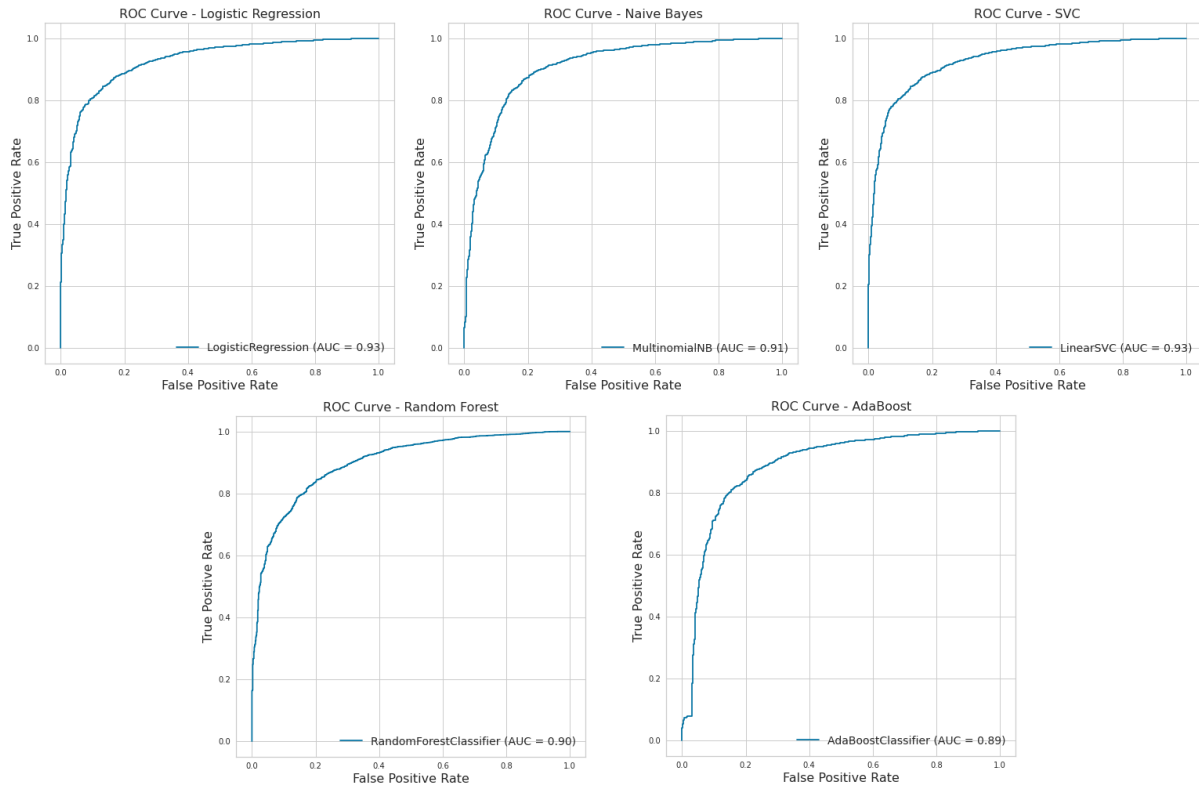


Figure 4. ROC Curves and AUC Scores (Based on TF-IDF)

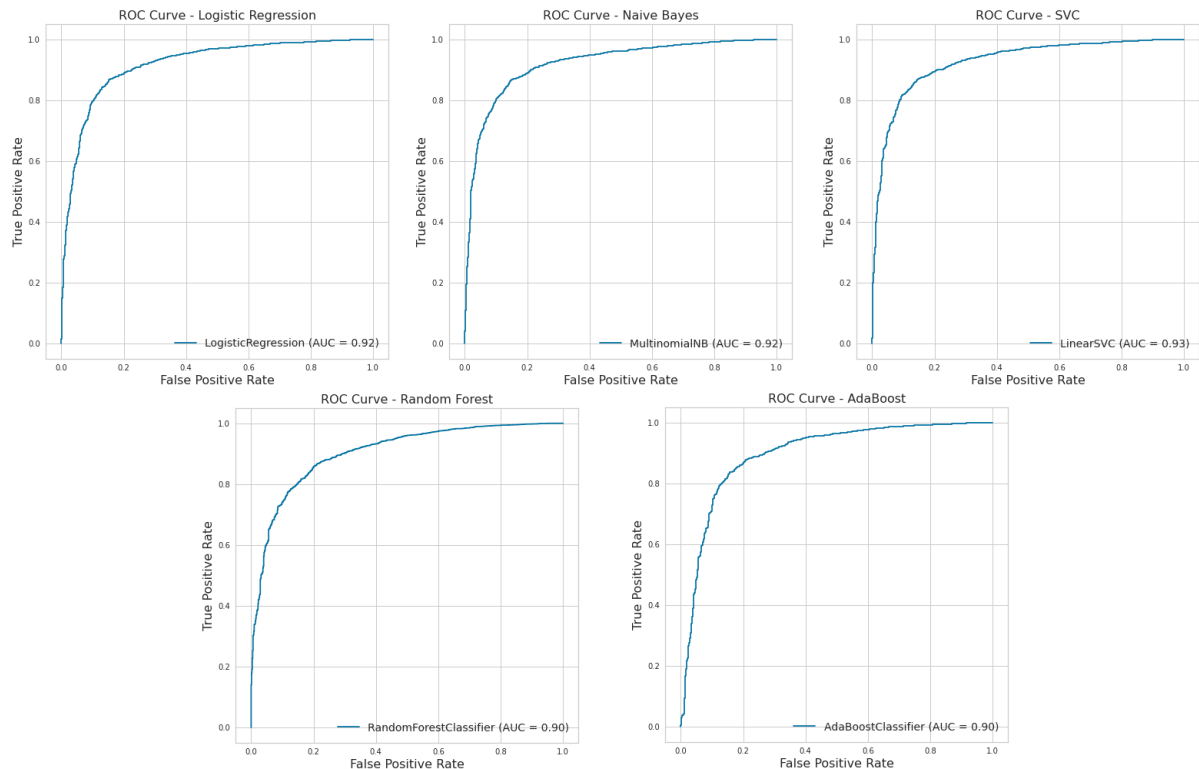


Figure 5. ROC Curves and AUC Scores (Based on Count Vectorizer)

### Evaluation of CNN Model

The first analysis of the CNN Model focuses on the AUC scores of the model during the training process and its performance on the validation set. The first graph in Figure 6 shows the model's AUC scores for the training set and validation set as the number of epochs (number of training rounds) increases. Initially, we observe that the AUC

score obtained by the model on the training set has a high initial value (0.70) and this score is consistently maintained as the epochs progress. However, the AUC score for the validation set drops below the score obtained on the training set after approximately epoch 35. This may indicate that the model exhibits an overfitting tendency during the training process. The model is highly adapted to the training set, achieving high performance on the training data, but tends to underperform against new and unseen data. The validation AUC score stabilizes at 0.90 at the end of the training process, while the overall AUC score remains at 0.95. This may indicate that the model's overall performance decreases when the patterns it initially learned during the training process are applied to the validation set. Although the overall performance of the model is high, the overlearning tendency and the poor performance on the validation set suggest that the generalization ability of the model may be limited.

The second graph in Figure 6 focuses on the model's loss values during the training process and the loss values on the validation set (val\_loss). The graph shows the loss values of the model over epochs. When the graph is analyzed, it is observed that the loss value of the model on the training set starts from 0.8 at the beginning and decreases below 0.3 as the epochs progress. This means that the model learns better and better during the training process and is able to identify patterns in the training set more effectively. On the other hand, the loss value (val\_loss) on the validation set stabilizes around 0.35 after approximately epoch 35. However, the loss value on the training set dropped below val\_loss. This suggests that the model may have overfitted the training set and underperformed on the validation set. The fact that the loss value of the model on the training set is lower than that on the validation set indicates the tendency of the model to overfit during the learning process.

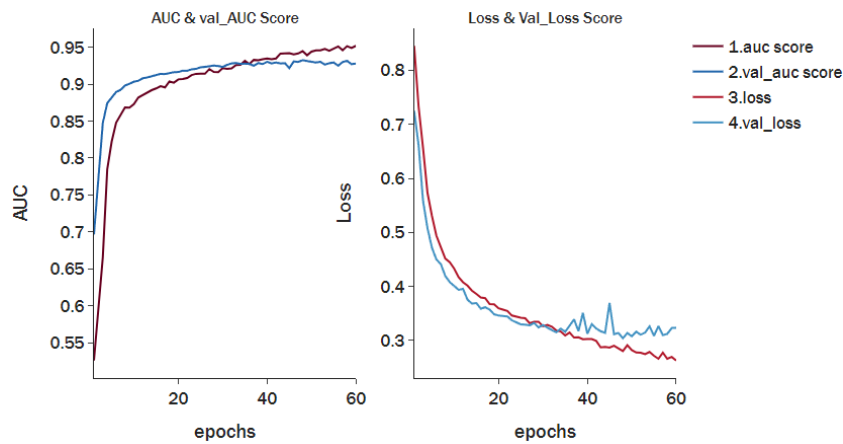


Figure 6. Training and Validation Performance

### Comparison of Model Performances

Table 2 shows the performance comparisons of the models used in the study. Sentiment analysis performed with NB, AdaBoost, LR, SVM, RF, and DL models were compared using two different text vectorization methods, Count Vectorizer and TF-IDF. While the NB model achieves 90.3% accuracy when trained with Count Vectorizer, this rate drops to 88.1% when TF-IDF is used. In the AdaBoost model, on the contrary, a lower accuracy is obtained when trained with Count Vectorizer. The LR model performs similarly with both vectorization methods. The model with the highest accuracy rate is AdaBoost model. When trained with AdaBoost TF-IDF (F1-Score: 0.955), achieved 92.4% accuracy.

NB shows consistent performance with both Count Vectorizer and TF-IDF, achieving high precision (94.3% and 93.5%) and recall (91.2%). AdaBoost performs well across both vectorization methods but notably excels with TF-IDF, achieving high precision (94.2%) and recall (97.2%). SVM also demonstrates strong performance, especially with Count Vectorizer, where it achieves high precision (95.8%) and decent recall (87.2%). RF and LR exhibit competitive results, with RF showing slightly higher precision but lower recall compared to LR across both vectorizers. DL, although not vectorized in the traditional sense, achieves competitive overall metrics. In summary, while each model exhibits strengths across various metrics and vectorization techniques, AdaBoost stands out for its robust performance. With particularly high precision and recall AdaBoost proves effective in classification tasks, especially suited for applications where balancing precision and recall is crucial, such as analyzing customer reviews. The choice of model and vectorization method should be guided by specific objectives, ensuring alignment with the desired performance metrics and the characteristics of the dataset at hand.

**Table 2.** Model Performance Comparison

Model	Text Vectorization	Accuracy	Precision	Recall	F1-Score
NB	Count Vectorizer	0.903	0.943	0.912	0.927
	TF-IDF	0.881	0.935	0.912	0.923
AdaBoost	Count Vectorizer	0.915	0.935	0.960	0.940
	TF-IDF	<b>0.924</b>	0.942	<b>0.972</b>	<b>0.955</b>
LR	Count Vectorizer	0.875	0.949	0.878	0.915
	TF-IDF	0.862	<b>0.962</b>	0.859	0.912
SVM	Count Vectorizer	0.898	0.958	0.872	0.913
	TF-IDF	0.861	<b>0.963</b>	0.839	0.897
RF	Count Vectorizer	0.891	0.948	0.871	0.904
	TF-IDF	0.876	0.948	0.846	0.894
DL	-	0.879	<b>0.962</b>	0.929	0.929

## DISCUSSION

In this section, an analysis is presented on how the characteristics of the dataset and the selection of machine learning algorithms impact the performance of sentiment analysis models, with particular attention to preprocessing steps and vectorization methods.

The dataset used in this research, features a mix of numerical, categorical, and textual data, requiring careful preprocessing to ensure compatibility with various machine learning algorithms. The review text and titles are critical features for sentiment analysis, and their quality and variability can affect NLP model performance. Preprocessing steps such as tokenization and stop-word removal are essential for standardizing the text data. Different vectorization methods, like Count Vectorizer and TF-IDF, impact model performance. For example, NB performed better with the Count Vectorizer method due to its frequency-based approach, while LR and SVM benefited from TF-IDF's nuanced feature weighting. Algorithms have varying sensitivities to dataset characteristics; NB is efficient with high-dimensional data, while SVM and LR handle overlapping classes well. Ensemble methods like AdaBoost may offer higher accuracy but can be sensitive to noisy data, as indicated by slightly higher false positive rates. The anonymization of data can affect the context and sentiment in reviews. Although necessary for privacy, such modifications may strip nuances that aid sentiment detection, emphasizing the need for thorough preprocessing.

The high performance of the AdaBoost model in the text classification task has been emphasized in several studies in the literature and is also supported by this study (Feng et al., 2017). In particular, the high precision achieved by the model when trained with both Count Vectorizer and TF-IDF reflects its ability to accurately classify customer sentiments. This is of great importance in emotion-driven applications such as customer sentiment analysis, where positive and negative reviews can be accurately identified. Other studies in the literature have often attributed AdaBoost's success to the ensemble nature of the model and its ability to evaluate the interactions between features (Wyner et al., 2017). These features of the model allow it to handle the complexity of text datasets by effectively combining different types of features and performing more robustly (Xia et al., 2011). In addition to this success, the interpretability advantages of the AdaBoost model have also been highlighted in the literature. Since AdaBoost builds a strong model by combining weak learners (usually decision trees), it is easier to understand the contribution of each learner and explain why the model makes a particular prediction (Li et al., 2005). This feature contributes to the preference for AdaBoost, especially in industrial applications, when the understandability of the model's decisions is an important factor.

The findings of the study show that the AdaBoost model has a low AUC score and a high FP value compared to the other models. On the other hand, the AdaBoost model exhibited the highest accuracy and recall values. This may suggest that the model has difficulty with a particular class or tends to misclassify it. However, the high precision and recall demonstrate the model's ability to correctly identify positive reviews. Therefore, it is important to combine these results with other contextual factors to develop further understanding of how to use the model in a specific application context and which performance metrics are prioritized.

Due to their performance advantages on large text datasets, some sources in the literature suggest that DL models are preferable (Kowsari et al., 2019; Minaee et al., 2021). These models are known for their complex learning structures and deep feature discovery capabilities. DL methods are designed to understand hidden patterns and relationships more effectively in text data (Rygielski et al., 2002). Furthermore, these advantages often require larger datasets and high computational power, which can result in cost and infrastructure challenges. Training DL models can often take

a long time and require large amounts of computational resources (Najafabadi et al., 2015). This can be a significant constraint, especially for organizations with a limited budget or infrastructure.

In this study, it was observed that the DL model achieves high accuracy due to its complex learning structures. However, despite these advantages, it can be more costly in terms of training time and computational power, which is one of the factors affecting the model selection decision. Model selection should be carefully evaluated based on various factors such as application context, dataset features, and available infrastructure. DL model with high overall performance performs poorly on the validation set due to the tendency to overfit during the training process. This suggests that the model tends to overfit the training data and may have less generalization ability to new data. To increase the generalization ability of the model, overfitting control techniques and more diverse datasets can be used to make the model form a more general representation.

Table 3 illustrates various studies in the literature that have investigated the dataset used in this study, detailing their objectives, methodologies, and findings. Due to the focus of other studies on specific tasks and metrics for evaluating their models, comparisons with this study may be limited in terms of the range of text mining and machine learning algorithms evaluated and the metrics used. This study, in comparison, comprehensively evaluates a variety of models including NB, AdaBoost, LR, SVM, RF, and DL using both Count Vectorizer and TF-IDF. When examining Table 3, it is evident that Inácio and Oliveira (2024) achieved an increase in the F1 score from 53.2% to 68.7% for the BERTimbau-large model, showing variability across different models. Agarap (2018) obtained F1 scores of 88% for recommendation classification and 93% for sentiment analysis. In contrast, this study achieved a significantly higher F1 score of 95.5% with AdaBoost using TF-IDF, demonstrating superior performance in both precision (94.2%) and recall (97.2%). This highlights a substantial improvement in F1 score compared to Inacio and Oliveira's (2024) as well as Agarap's (2018) results, underscoring the effectiveness of AdaBoost, particularly when leveraged with TF-IDF, in sentiment analysis tasks. Georgescu and Kinnunen (2020) achieved 93% accuracy using LR and NB, with a kappa statistic of 79, providing recommendations for customer profiling and business strategies. However, since metrics such as recall, precision, and F1-score were not reported, relying solely on accuracy may not sufficiently demonstrate the overall effectiveness of their models. Additionally, the absence of cross-validation in their study suggests that performance values calculated using only train-test split validation method are likely to be overestimated compared to more robust cross-validation methods, which generally yield more accurate performance estimates. The primary goal of this study is to compare various methods rather than solely aiming for high scores. Nevertheless, it has achieved consistent and generalizable results.

**Table 3.** Comparative Review of Studies Utilizing the Same Dataset

Study	Objective	Methods	Key Findings
Inácio and Oliveira (2024)	Use of multimodal transformers, proposal of a new corpus	Combining LLMs and numerical features, feature pooling method	Increased F1-score from 53.2% to 68.7% for BERTimbau-large, variability across different models
Maronikolakis and Schütze (2021)	Multiple domain adaptation, low-resource usage	Multidomain models	Performance advantages of multidomain models over single-domain models, resource efficiency
Agarap (2018)	Model improvement, hyperparameter tuning	Bidirectional RNN-LSTM model	F1-scores of 88% for recommendation classification, 93% for sentiment analysis
Georgescu and Kinnunen (2020)	Analysis of customer reviews on fashion items	LR, NB	93% accuracy, 79 kappa statistic, recommendations for customer profiling and business strategies
Cloutier and Japkowicz (2023)	Effectiveness of LLM-augmented oversampling on binary and multiclass classification	Various resampling methods including LLM-augmented techniques	LLM-augmented methods show mixed results in binary classification tasks, significant improvements in multiclass tasks, particularly achieving highest performance on small multiclass tasks with improvements ranging from 85% to 115%
This study	Evaluate effectiveness of various algorithms and text vectorization methods	Evaluation of NB, AdaBoost, LR, SVM, RF, and DL models using Count Vectorizer and TF-IDF	AdaBoost achieves 92.4% accuracy with TF-IDF (F1-Score: 0.955), excelling in precision (94.2%) and recall (97.2%).

## CONCLUSION

This research aims to compare the performance of various supervised classification and DL models for sentiment analysis on customer reviews obtained from a women's clothing e-commerce platform.

The data preparation phase of the study constitutes one of the most important parts of the research. First, missing values issues were addressed with various strategies. Significant dataset deficiencies that could cause problems in text-based analysis were cleaned. Then, Count Vectorizer and TF-IDF methods were used for text vectorization. Count Vectorizer is a tool for converting text data into a matrix of token counts, a numerical representation. Each token creates a matrix of the number of times it occurs in a given document. TF-IDF is a measure used to determine the importance of a word in a document. This method combines the frequency of the word in the document and its frequency in the overall collection. Text preprocessing steps of tokenization, noise reduction and lexical normalization are then applied. In the tokenization step, texts are broken down into more manageable chunks by segmenting them into words. The noise reduction step was used to remove redundant information, including stop words of the language. Lexical normalization was performed to regularize word variations and to obtain the root form of each word. These steps were important to prepare the text for analysis and improve model performance.

Five different supervised classification models (LR, NB, SVM, RF, AdaBoost) and CNN Model, were trained on the dataset and their performances were compared. The results show that there are some differences between the models. AdaBoost and NB models are prominent algorithms in the context of customer sentiment analysis with their high accuracy. SVM and LR models also achieved successful results but fell behind in terms of accuracy. An overfitting problem was detected in the CNN Model. Overfitting means that the model is overly adapted to the dataset used in the training process. In this case, the model may perform well on the training data, but its ability to generalize to new and unseen data may suffer. Especially in text-based models, noise, omissions in the dataset or the complexity of the relationships between features can increase the risk of overfitting. Depending on the size and complexity of the dataset, an effective approach may be to add regularization terms to control the tendency of overfitting or to prefer simpler models over more complex models. In addition, no significant performance differences were observed in terms of vectorization methods applied to the models in the study.

The overall results of the study show that the application context and performance metrics should be considered before choosing between different models. Especially in text-based analysis, data preprocessing steps and text preprocessing methods are critical factors affecting model performance. Future work could focus on testing model performance on larger and diverse datasets and more in-depth analysis to determine which model is more effective in specific application scenarios. Such research in the field of sentiment analysis can help e-commerce platforms evaluate customer reviews more effectively and improve the user experience.

## REFERENCES

- Agarap, A. F. (2018). Statistical analysis on E-commerce reviews, with sentiment classification using bidirectional recurrent neural network (RNN). *arXiv preprint arXiv:1805.03687*.
- Aizawa, A. (2003). An information-theoretic perspective of TF-IDF measures. *Information Processing & Management*, 39(1), 45-65.
- Alantari, H. J., Currim, I. S., Deng, Y., & Singh, S. (2022). An empirical comparison of machine learning methods for text-based sentiment analysis of online consumer reviews. *International Journal of Research in Marketing*, 39(1), 1-19.
- Alexopoulou, T., Michel, M., Murakami, A., & Meurers, D. (2017). Task effects on linguistic complexity and accuracy: A large-scale learner corpus analysis employing natural language processing techniques. *Language Learning*, 67(S1), 180-208.
- Angulakshmi, G., & ManickaChezian, R. (2014). An analysis on opinion mining: techniques and tools. *International Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering*, 3(7), 2319-5940.
- Badaro, G., Baly, R., Hajj, H., Habash, N., & El-Hajj, W. (2014, October). A large scale Arabic sentiment lexicon for Arabic opinion mining. In *Proceedings of the EMNLP 2014 workshop on arabic natural language processing (ANLP)* (pp. 165-173).
- Bafna, P., Pramod, D., & Vaidya, A. (2016, March). Document clustering: TF-IDF approach. In *2016 International Conference on Electrical, Electronics, and Optimization Techniques (ICEEOT)* (pp. 61-66). IEEE.

- Barik, K., Misra, S., Ray, A. K., & Bokolo, A. (2023). LSTM-DGWO-Based sentiment analysis framework for analyzing online customer reviews. *Computational Intelligence and Neuroscience*, 2023.
- Berrar, D. (2018). Bayes' theorem and naive Bayes classifier. *Encyclopedia of Bioinformatics and Computational Biology: ABC of Bioinformatics*, 403, 412.
- Biradar, S. H., Gorabal, J. V., & Gupta, G. (2022). Machine learning tool for exploring sentiment analysis on twitter data. *Materials Today: Proceedings*, 56, 1927-1934.
- Brooks, N. (2018). Women's E-Commerce Clothing Reviews. Kaggle. <https://www.kaggle.com/nicapotato/womens-ecommerce-clothing-reviews>
- Carrigan, M., Moraes, C., & Leek, S. (2011). Fostering responsible communities: A community social marketing approach to sustainable living. *Journal of Business Ethics*, 100, 515-534.
- Carter, J. V., Pan, J., Rai, S. N., & Galandiuk, S. (2016). ROC-ing along: Evaluation and interpretation of receiver operating characteristic curves. *Surgery*, 159(6), 1638-1645.
- Carvalho, D. V., Pereira, E. M., & Cardoso, J. S. (2019). Machine learning interpretability: A survey on methods and metrics. *Electronics*, 8(8), 832.
- Cervantes, J., Garcia-Lamont, F., Rodríguez-Mazahua, L., & Lopez, A. (2020). A comprehensive survey on support vector machine classification: Applications, challenges and trends. *Neurocomputing*, 408, 189-215.
- Chandrasekaran, D., & Tellis, G. J. (2017). A critical review of marketing research on diffusion of new products. *Review of Marketing Research*, 3, 39-80.
- Chawla, N., & Kumar, B. (2022). E-commerce and consumer protection in India: The emerging trend. *Journal of Business Ethics*, 180(2), 581-604.
- Cloutier, N. A., & Japkowicz, N. (2023, December). Fine-tuned generative LLM oversampling can improve performance over traditional techniques on multiclass imbalanced text classification. In *2023 IEEE International Conference on Big Data (BigData)* (pp. 5181-5186). IEEE.
- Das, A. (2021). Logistic regression. In *Encyclopedia of Quality of Life and Well-Being Research* (pp. 1-2). Cham: Springer International Publishing.
- Demirbilek, M., & Demirbilek, S. Ö. (2023). Sentiment analysis based on google comments with machine learning methods and Amazon Comprehend: The case of a university in Central Anatolia. *Journal of University Research*, 6(4), 452-461.
- Denny, M. J., & Spirling, A. (2018). Text preprocessing for unsupervised learning: Why it matters, when it misleads, and what to do about it. *Political Analysis*, 26(2), 168-189.
- Dey, S., Wasif, S., Tonmoy, D. S., Sultana, S., Sarkar, J., & Dey, M. (2020, February). A comparative study of support vector machine and Naive Bayes classifier for sentiment analysis on Amazon product reviews. In *2020 International Conference on Contemporary Computing and Applications (IC3A)* (pp. 217-220). IEEE.
- Dogru, N., & Subasi, A. (2018, February). Traffic accident detection using random forest classifier. In *2018 15th learning and technology conference (L&T)* (pp. 40-45). IEEE.
- Feng, X., Liang, Y., Shi, X., Xu, D., Wang, X., & Guan, R. (2017). Overfitting reduction of text classification based on AdaBELM. *Entropy*, 19(7), 330.
- Georgescu, I., & Kinnunen, J. (2020). Consumer recommendation dynamics in online retail business under logistic regression and naïve Bayes analyses. In *Proceedings of the International Conference on Applied Statistics* (Vol. 2, No. 1, pp. 120-128).
- Guo, J. (2022). Deep learning approach to text analysis for human emotion detection from big data. *Journal of Intelligent Systems*, 31(1), 113-126.
- Han, B., & Baldwin, T. (2011, June). Lexical normalisation of short text messages: Makn sens a# twitter. In *Proceedings of the 49th annual meeting of the association for computational linguistics: Human language technologies* (pp. 368-378).
- Han, S., & Anderson, C. K. (2020). Customer motivation and response bias in online reviews. *Cornell Hospitality Quarterly*, 61(2), 142-153.

- Hartmann, J., & Netzer, O. (2023). Natural language processing in marketing. In *Artificial Intelligence in Marketing* (Vol. 20, pp. 191-215). Emerald Publishing Limited.
- Hennig-Thurau, T., Wiertz, C., & Feldhaus, F. (2015). Does Twitter matter? The impact of microblogging word of mouth on consumers' adoption of new movies. *Journal of the Academy of Marketing Science*, 43, 375-394.
- Hossain, M. S., & Rahman, M. F. (2023). Customer sentiment analysis and prediction of insurance products' reviews using machine learning approaches. *FIIB Business Review*, 12(4), 386-402.
- Hu, W., Gong, Z., & Guo, J. (2010, November). Mining product features from online reviews. In *2010 IEEE 7th International Conference on E-Business Engineering* (pp. 24-29). IEEE.
- Inácio, M., & Oliveira, H. G. (2024, March). Exploring multimodal models for humor recognition in Portuguese. In *Proceedings of the 16th International Conference on Computational Processing of Portuguese* (pp. 568-574).
- Jararweh, Y., Al-Ayyoub, M., Fakirah, M., Alawneh, L., & Gupta, B. B. (2019). Improving the performance of the needleman-wunsch algorithm using parallelization and vectorization techniques. *Multimedia Tools and Applications*, 78, 3961-3977.
- Kamal, M., & Himel, A. S. (2023). Redefining Modern Marketing: An analysis of AI and NLP's influence on consumer engagement, strategy, and beyond. *Eigenpub Review of Science and Technology*, 7(1), 203-223.
- Kapoor, S., & Banerjee, S. (2021). On the relationship between brand scandal and consumer attitudes: A literature review and research agenda. *International Journal of Consumer Studies*, 45(5), 1047-1078.
- Kowsari, K., Jafari Meimandi, K., Heidarysafa, M., Mendu, S., Barnes, L., & Brown, D. (2019). Text classification algorithms: A survey. *Information*, 10(4), 150.
- Li, C., Zhang, Z., Lee, W. S., & Lee, G. H. (2018). Convolutional sequence to sequence model for human dynamics. In *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition* (pp. 5226-5234).
- Li, H., Bruce, X. B., Li, G., & Gao, H. (2023). Restaurant survival prediction using customer-generated content: An aspect-based sentiment analysis of online reviews. *Tourism Management*, 96, 104707.
- Li, X., Wang, L., & Sung, E. (2005, July). A study of AdaBoost with SVM based weak learners. In *Proceedings. 2005 IEEE International Joint Conference on Neural Networks, 2005.* (Vol. 1, pp. 196-201). IEEE.
- Li, X., Wang, L., & Sung, E. (2008). AdaBoost with SVM-based component classifiers. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 21(5), 785-795.
- Lian, H., Lu, C., Li, S., Zhao, Y., Tang, C., & Zong, Y. (2023). A survey of deep learning-based multimodal emotion recognition: speech, text, and face. *Entropy*, 25(10), 1440.
- Maronikolakis, A., & Schütze, H. (2021, April). Multidomain pretrained language models for green NLP. In *Proceedings of the Second Workshop on Domain Adaptation for NLP* (pp. 1-8).
- Mariani, M., & Borghi, M. (2021). Are environmental-related online reviews more helpful? A big data analytics approach. *International Journal of Contemporary Hospitality Management*, 33(6), 2065-2090.
- Minaee, S., Kalchbrenner, N., Cambria, E., Nikzad, N., Chenaghlu, M., & Gao, J. (2021). Deep learning--based text classification: a comprehensive review. *ACM Computing Surveys (CSUR)*, 54(3), 1-40.
- Mohammad, S. M. (2016). Sentiment analysis: Detecting valence, emotions, and other affectual states from text. In *Emotion measurement* (pp. 201-237). Woodhead Publishing.
- Najafabadi, M. M., Villanustre, F., Khoshgoftaar, T. M., Seliya, N., Wald, R., & Muharemagic, E. (2015). Deep learning applications and challenges in big data analytics. *Journal of Big Data*, 2(1), 1-21.
- Obiedat, R., Qaddoura, R., Ala'M, A. Z., Al-Qaisi, L., Harfoushi, O., Alrefai, M. A., & Faris, H. (2022). Sentiment analysis of customers' reviews using a hybrid evolutionary svm-based approach in an imbalanced data distribution. *IEEE Access*, 10, 22260-22273.
- Patel, A., Oza, P., & Agrawal, S. (2023). Sentiment analysis of customer feedback and reviews for airline services using language representation model. *Procedia Computer Science*, 218, 2459-2467.
- Pisner, D. A., & Schnyer, D. M. (2020). Support vector machine. In *Machine learning* (pp. 101-121). Academic Press.



- Pradhan, V. M., Vala, J., & Balani, P. (2016). A survey on sentiment analysis algorithms for opinion mining. *International Journal of Computer Applications*, 133(9), 7-11.
- Qaiser, S., & Ali, R. (2018). Text mining: use of TF-IDF to examine the relevance of words to documents. *International Journal of Computer Applications*, 181(1), 25-29.
- Racherla, P., & Friske, W. (2012). Perceived 'usefulness' of online consumer reviews: An exploratory investigation across three services categories. *Electronic Commerce Research and Applications*, 11(6), 548-559.
- Rain, C. (2013). Sentiment analysis in Amazon reviews using probabilistic machine learning. *Swarthmore College*, 42.
- Ramadhan, F. A., Ruslan, R. R. P., & Zahra, A. (2023). Sentiment analysis of e-commerce product reviews for content interaction using machine learning. *Cakrawala Repositori IMWI*, 6(1), 207-220.
- Robertson, S. (2004). Understanding inverse document frequency: on theoretical arguments for IDF. *Journal of Documentation*, 60(5), 503-520.
- Rosário, A., & Raimundo, R. (2021). Consumer marketing strategy and e-commerce in the last decade: a literature review. *Journal of Theoretical and Applied Electronic Commerce Research*, 16(7), 3003-3024.
- Rygielski, C., Wang, J. C., & Yen, D. C. (2002). Data mining techniques for customer relationship management. *Technology in Society*, 24(4), 483-502.
- Sarker, I. H. (2021). Machine learning: Algorithms, real-world applications and research directions. *SN Computer Science*, 2(3), 160.
- Shanthi, R., & Desti, K. (2015). Consumers' perception on online shopping. *Journal of Marketing and Consumer Research*, 13, 14-21.
- Singh, J. P., Irani, S., Rana, N. P., Dwivedi, Y. K., Saumya, S., & Roy, P. K. (2017). Predicting the "helpfulness" of online consumer reviews. *Journal of Business Research*, 70, 346-355.
- Sylvester, E. V., Bentzen, P., Bradbury, I. R., Clément, M., Pearce, J., Horne, J., & Beiko, R. G. (2018). Applications of random forest feature selection for fine-scale genetic population assignment. *Evolutionary Applications*, 11(2), 153-165.
- Tran, D. D., Nguyen, T. T. S., & Dao, T. H. C. (2022). Sentiment analysis of movie reviews using machine learning techniques. In *Proceedings of Sixth International Congress on Information and Communication Technology: ICICT 2021, London*, Volume 1 (pp. 361-369). Springer Singapore.
- Turki, T., & Roy, S. S. (2022). Novel hate speech detection using word cloud visualization and ensemble learning coupled with count vectorizer. *Applied Sciences*, 12(13), 6611.
- Vijayarani, S., & Janani, R. (2016). Text mining: open source tokenization tools-an analysis. *Advanced Computational Intelligence: An International Journal (ACII)*, 3(1), 37-47.
- Wani, T. A., & Ali, S. W. (2015). Innovation diffusion theory. *Journal of General Management Research*, 3(2), 101-118.
- Weiss, S. M., Indurkha, N., Zhang, T., & Damerou, F. (2010). *Text mining: predictive methods for analyzing unstructured information*. Springer Science & Business Media.
- Wyner, A. J., Olson, M., Bleich, J., & Mease, D. (2017). Explaining the success of adaboost and random forests as interpolating classifiers. *The Journal of Machine Learning Research*, 18(1), 1558-1590.
- Xia, R., Zong, C., & Li, S. (2011). Ensemble of feature sets and classification algorithms for sentiment classification. *Information Sciences*, 181(6), 1138-1152.
- Xiong, H., Pandey, G., Steinbach, M., & Kumar, V. (2006). Enhancing data analysis with noise removal. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, 18(3), 304-319.
- Zhang, F., Fleyeh, H., Wang, X., & Lu, M. (2019). Construction site accident analysis using text mining and natural language processing techniques. *Automation in Construction*, 99, 238-248.
- Zhang, J., Lu, X., & Liu, D. (2021). Deriving customer preferences for hotels based on aspect-level sentiment analysis of online reviews. *Electronic Commerce Research and Applications*, 49, 101094.

Zhao, H., Liu, Z., Yao, X., & Yang, Q. (2021). A machine learning-based sentiment analysis of online product reviews with a novel term weighting and feature selection approach. *Information Processing & Management*, 58(5), 102656.

Zhou, J., & Troyanskaya, O. G. (2015). Predicting effects of noncoding variants with deep learning-based sequence model. *Nature Methods*, 12(10), 931-934.

Zhou, L., Pan, S., Wang, J., & Vasilakos, A. V. (2017). Machine learning on big data: Opportunities and challenges. *Neurocomputing*, 237, 350-361.

Zhuang, M., Cui, G., & Peng, L. (2018). Manufactured opinions: The effect of manipulating online product reviews. *Journal of Business Research*, 87, 24-35.



# Kahramanmaraş Sutcu Imam University

## Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 19.01.2024  
Kabul Tarihi : 02.05.2024

Received Date : 19.01.2024  
Accepted Date : 02.05.2024

### 3-DIMENSIONAL AUTOMATIC SEGMENTATION OF PITUARITY TUMOR USING DEEP LEARNING

### DERİN ÖĞRENME KULLANILARAK HİPOFİZ TÜMÖRÜNÜN 3 BOYUTLU OTOMATİK BÖLÜTLENMESİ

*Sinan ALTUN*<sup>1</sup> (ORCID: 0000-0002-2356-0460)

<sup>1</sup> Kahramanmaraş İstiklal Üniversitesi, Yapı İşleri ve Teknik Daire Başkanlığı, Kahramanmaraş, Türkiye

\*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Sinan ALTUN, s.altun@yaani.com

#### ABSTRACT

The development of a benign pituitary tumor progresses very slowly. Due to this slow development, it may take time to diagnose the patient. The Tumor that will form in the Pituitary Gland, which is effective in the secretion of many hormones and located behind the optic nerves, may cover 2/3 of the Pituitary Gland. In people for whom hormonal balance is essential, due to Pituitary Tumor, Cushing's syndrome diseases can be seen as a result of irregular menstruation, visual disturbances, headache, imbalance in breast milk production, and excess ACTH production. Excess ACTH can lead to excessive weight gain, the appearance of fragile bone structure, skin scars, and emotional changes. The Pituitary Tumor is located in the deepest part of the brain, and it is tough to perform a surgical operation there. Semantic segmentation using deep learning techniques can be successful. With our study, automatic segmentation of the Tumor with an IoU score of up to 98% was possible. This success is relatively high, and promises hope for the CAD system to be created for Pulmonary tumors. The 3D-Unet technique developed recently, can perform automatic segmentation in 3 dimensions. This study aims to automatically segment a Pituitary Tumor, which requires a complex operation, with the 3D-Unet model.

**Keywords:** Pituitary tumor, hormonal diseases, semantic segmentation, 3D-UNet, deep learning

#### ÖZET

İyi huylu bir hipofiz tümörünün gelişimi çok yavaş ilerler. Bu yavaş gelişme nedeniyle hastaya tanı konulması zaman alabilir. Birçok hormonun salgılanmasında etkili olan ve görme sinirlerinin arkasında yer alan Hipofiz Bezinde oluşacak tümör, Hipofiz Bezinin 2/3'ünü kaplayabilir. Tümörün büyümesine bağlı olarak sinirler üzerindeki baskı arttıkça bazı belirtiler ortaya çıkar. Hormonal dengenin önemli olduğu kişilerde Hipofiz Tümörü nedeniyle adet düzensizliği, görme bozuklukları, baş ağrısı, anne sütü üretiminde dengesizlik, ACTH fazla üretimi sonucu Cushing sendromu hastalıkları görülebilmektedir. Aşırı ACTH aşırı kilo alınma, kırılabilir kemik yapısının ortaya çıkmasına, ciltte yara izlerine ve duygusal değişikliklere neden olabilir. Hipofiz Tümörü beynin en derin kısmında yer alır ve burada cerrahi operasyon yapılması zordur. Derin öğrenme tekniklerini kullanan anlamsal bölütleme başarılı olabilir. Çalışmamız ile Tümörün %98'e varan IoU skoruyla otomatik segmentasyonu mümkün oldu. Bu başarı nispeten yüksektir ve Akciğer tümörleri için oluşturulacak CAD sistemi için umut vaat etmektedir. Son zamanlarda geliştirilen 3D-Unet tekniği, 3 boyutlu otomatik segmentasyon yapabilmektedir. Bu çalışma, karmaşık bir operasyon gerektiren Hipofiz Tümörünün 3D-Unet modeli ile otomatik olarak segmentasyonunu amaçlamaktadır.

**Anahtar Kelimeler:** Hipofiz tümörü, hormonal hastalıklar, semantik bölütleme, 3B-Unet, derin öğrenme

## INTRODUCTION

Hormonal structure is one of the critical systems for the human body to perform its duties healthily. Thanks to hormones, the body works in a precise balance and order. The essential organ of this structure is the pituitary gland, which regulates the secretion of hormones while secreting many hormones and ensures that they work effectively (Simander et al., 2023; Geer, 2023). The pituitary gland is in the middle of the lower part of the brain, between the nasal root and the base of the brain, the optic chiasm and optic nerves, where the optic nerves meet in the upper part, the thalamus, which is called the brain of the brain, on the upper sides, the carotid arteries, which are two of the three vessels feeding the brain, and the three vessels feeding the brain in the back. Moreover, the brain stem is the respiratory and cardiac control center. Tumor development in this pituitary gland, because it is a secretory gland, and developmental anomalies are joint because it develops from brain palate cells. Depending on these diseases, due to the anatomical structure and neighborhood, vision problems by compressing the optic nerves, problems in cerebral blood supply due to pressure on the carotid vessels, and brain dysfunction due to its enlargement into the brain may develop (Sharma et al., 2023; Ciavarra, 2023). Growth retardation and sexual development problems occur as a result of the incomplete development of hormones due to developmental defects. As a result of pituitary gland secretory hormone tumors, severe life-threatening hormonal disorders that impair body functions may develop (Alkan et al., 2022).

The general and effective treatment of these problems in the pituitary gland is surgery. There are two methods to reach this area, which is difficult and risky due to its anatomical location. The first is the transcranial method, in which the pituitary gland is reached by opening the skull and traveling a long distance through the brain tissue, main cerebral vessels, and optic nerves. The second method is the transsphenoidal method, which enters through the nasal cavity, opens the sphenoid cavity, and reaches the pituitary gland. It is very preferred because of the opening of the brain with the transcranial method, the inability to control the pituitary gland fully, and the inability to perform an effective surgery. The transsphenoidal method is preferred to reach the pituitary gland more quickly than the transcranial method due to better control of the pituitary gland and less damage to the tissue during surgery (Tsuneoka et al., 2023; Trimpou et al., 2022). Complication risks are high in this method due to its anatomical location and neighborhood. Complications and rates that may be encountered after transsphenoidal surgery, taken from <https://www.turknorosirurji.org.tr> (2020), are given in Table 1. To perform an effective surgery in this area, which has many anatomical variations between people, it is necessary to determine the structure and shape of the Tumor in order to completely evacuate the Tumor, to determine the transsphenoidal anatomical path well for a successful surgery with minor damage to the tissues, and to determine its relationship with essential structures in the neighboring areas to reduce the risk of complications. While the operations are performed in a 3D environment during the surgery, preoperative planning is done through 2D imaging. It cannot reveal an adequate anatomy, thus reducing the success rate in surgical planning and during surgery. As a result of better revealing both the surgical area and the surgical path and neighborhoods with 3D imaging, the operation's success will increase, there will be less tissue damage, and the risk of reoperation and complications will be reduced by ensuring that the Tumor is evacuated more effectively.

Pituitary tumor surgeries are very risky surgeries. The more information about tumor size, location, proximity to optic nerves and thalamus, and closeness to the carotid artery to perform this surgery, the more successful it will be and the lower the incidence of postoperative complications. In the current Magnetic Resonance (MR) imaging methods, 3D tumor imaging cannot be performed, and blind spots may remain in the endoscope devices used during the surgery. It will be beneficial to have information about the 3D image of the Tumor, carotid artery, and optic nerves before the surgery.

Deep learning methods are more successful in processing medical images than classical methods. In 2D segmentation, the specialist doctor must select the appropriate slices from the MR image slices. In addition, the image obtained due to image processing will be two-dimensional. 3D U-Net is a new way of deep learning. This method can do the training by using much fewer images with many images that other deep learning methods need (Altun and Alkan; 2022c). Considering the difficulties of providing medical images, the method is a significant gain for the medical field. Since the method reduces the classification and then segmentation down to the pixel, it can achieve higher success, as seen from the literature studies (Egger et al., 2016). The most important unique aspect of the project is that it will segment the pituitary Tumor with a method that has not been studied before, such as 3D U-Net.

**Table 1.** Post-transsphenoidal complications

<b>Complication</b>	<b>Ratio</b>
Anesthesia complications	%2.8
Carotid artery rupture	%1.1
Damage to brain tissue	%1.3
Hematoma in tumor tissue that cannot be removed entirely	%2.9
Vision loss	%1.8
Paralysis in eye movements	%1.4
Cerebrospinal fluid leak	%3.9
Meningitis	%1.5
Perforation of the septum in the nose	%6.7
Nose bleeding	%3.4
Sinusitis	%8.5
Anterior pituitary hormone deficiency	%19.4
Incipient diabetes	%17.8
Death	%0.9

In this study, 3-dimensional automatic segmentation was performed using contrast-enhanced T1 sequence MR images from women diagnosed with Pituitary Tumors. Our study was limited to female patients, and the study focused on women with this disease, which disrupts the hormonal balance.

## REVIEW

Various deep learning approaches have been proposed for the segmentation of brain tumor MRIs, each aiming to accurately delineate the boundaries and achieve precise segmentation. The Edge U-Net model incorporates boundary-related MRI data with the main brain MRI data to localize tumors more accurately. To enhance the performance of the segmentation model, a novel loss function that incorporates boundary information was introduced. This loss function improves the precision of the learning process and produces more accurate results. The results demonstrated that the proposed framework achieved satisfactory Dice score values compared to state-of-the-art models, effectively differentiating brain tissues with high accuracy. The Edge U-Net model achieved Dice scores of 88.8% for meningioma, 91.76% for glioma, and 87.28% for pituitary tumors. Based on these results, the Edge U-Net model shows promise as a diagnostic tool that can assist radiologists in accurately segmenting brain tumor tissue images (Allah et al., 2023).

These researchers delve into a thorough examination of two prominent object recognition frameworks, namely YOLOv5 and YOLOv7, utilizing cutting-edge deep learning architectures to categorize and identify brain tumors within MRI scans. This preprocessed dataset is employed to assess the performance of the deep learning models in detecting and classifying brain tumors. The results from YOLOv5 indicate a recall score of 0.905 for box detection and 0.906 for mask segmentation, with precision scores of 0.94 and 0.936, respectively. Both box detection and

mask segmentation achieve a mean Average Precision (mAP) of 0.947 at an Intersection over Union (IoU) threshold of 0.5, while at an IoU threshold ranging from 0.5 to 0.95, they attain mAPs of 0.666 and 0.657, respectively. On the other hand, YOLOv7 demonstrates robust performance with a box detection accuracy of 0.936 and mask segmentation accuracy of 0.935. Across the broader IoU range of 0.5 to 0.95, the mAPs are 0.677 for box detection and 0.659 for mask segmentation (Almufareh et al., 2024).

Ali Mohammad Alqudah et al. studied segmenting meningioma, glioma, and pituitary tumors using deep learning. They obtained the data set they used in their studies from "[https://figshare.com/articles/brain\\_tumor\\_dataset/1512427/5](https://figshare.com/articles/brain_tumor_dataset/1512427/5)". A total of 3064 T1-weighted MR images are included in this database. The number of images differs for the three different tumor types. They used 70% of the data set for training and 30% for testing. The study was studied differently with the CNN deep learning method for three different sections using original images, images obtained by cropping the tumor region, and images obtained by tumor segmentation. They created the CNN architecture themselves, and it consists of 19 layers. As a result of the procedure, the average classification success was calculated as 98% (Alqudah et al., 2019).

Jan Egger et al. state that since the pituitary gland is the manager for the secretion of hormones, an indispensable part of the body, an abnormality here affects the body negatively. They cite Cushing's disease, which is caused by a pituitary tumor, as an example. In addition, the article mentions that tumors larger than 1 mm may require surgical intervention, while tumors smaller than 1 mm can be treated with various treatment methods without surgical intervention. Their study used T1 and T2 weighted MR images of 10 patients. The tumor volume obtained by manual segmentation in the open-access 3D Slicer program and the segmentation success of the GrowCut interface of this program were compared by looking at the DICE score. They calculated a DICE score between 75% and 85% (Egger et al., 2013).

Song et al. mention that since there is no 3-dimensional imaging in the endoscope devices used in pituitary tumor surgeries performed with the transsphenoidal method, vital organs such as optic nerves and carotid arteries can be damaged during this surgery. The study aims to design a new endoscope device that displays the pituitary Tumor, optic nerves, and carotid artery using computed tomography (CT) images and gives an audible alarm when the surgeon approaches these organs during the operation. Computed tomography images were segmented using the 2D U-net deep learning method. In the preprocessing part of the study, the Tumor, optic nerves, and carotid artery were manually segmented by the specialist using the 3D Slicer program in all 1218 slices of CT images of 6 patients used for training. By preprocessing 11 augmentations from each slice, the number of extracted images was 13398. The U-net operation is divided into two parts. In the first part, 1218 images and labels were trained. In the second part, after 20% of the images obtained by augmentation were reserved for the test, the training was continued using the weights obtained in the first part. It is stated that the training process takes too much time, and the aim is to reduce it, which is the reason for the two-stage system. In the Jaccard test they used to determine the segmentation success, they achieved a success rate of up to 0.76 for the optic nerve, 0.72 for the carotid artery, and 0.75 for the Tumor (Song et al., 2019).

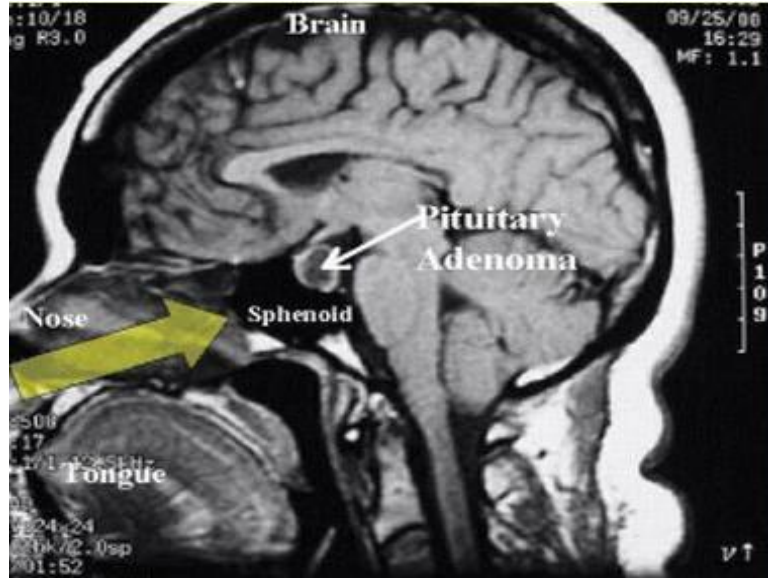
Victor E. Staartjes et al. emphasize that the transsphenoidal method is frequently used in pituitary tumor surgery, and the method aims to remove the Tumor altogether. However, it is emphasized that sometimes, the pituitary Tumor cannot be removed entirely due to its deepness or different complications. It is stated that machine learning methods have been studied frequently in recent years and have promising results in the medical field. Therefore, they propose a model that calculates whether the Tumor can be removed entirely after surgery using MR images of 140 transsphenoidal surgery patients. They used a deep learning network and the Knosp classification method for the proposed model. They used the Knosp method to grade the Tumor between 0 and 3. They achieved 91% success in deep learning and 81% in Knosp classification (Staartjes et al., 2018).

Yu Qian et al. used their study's 796 MR images of 149 patients. Since the CNN deep learning method used in the study would give better results with many images, they increased the number of images to 8756 by performing data augmentation. Of the 149 patients, 84 were patients with pituitary tumors, and 65 were in the control group. They randomly separated the dataset for training and testing at a ratio of 8:2. The study emphasizes that the pituitary Tumor is a relatively small organ, and its size may vary from person to person. For these reasons, it is emphasized that it is tough to detect a pituitary tumor manually, and it depends on the experience and personal interpretation of the doctor. In the preprocessing, the pituitary gland's region in the patients' images was manually segmented in 180x140 size. After the MR images were preprocessed separately for each of the Coronal, Horizontal, Sagittal, T2-weighted images, Coronal and Horizontal angles of the T1 images, they were processed in the CNN architecture they created, and the

success of comprehensive segmentation was examined. In this study, in which they labeled patients with pituitary tumors and patients in the control group, they achieved an average classification success of 91% in the classification of patients with and without tumors (Qian et al., 2020).

## MATERIAL

Our study is retrospective, and the dataset will be created using preoperative contrast-enhanced T1-weighted MR images of female patients who underwent pituitary tumor surgery with the transsphenoidal method in Kahramanmaraş Sütçü İmam University Faculty of Medicine, Department of Neurosurgery. Necessary ethics committee permissions were obtained to create the data set. Figure 1 shows an exemplary MR image of a pituitary tumor. In the data set, MR images of 45 women diagnosed with pituitary tumors were used. There are 33 MR images, 11 in each sequence, and 1485 MR images were used for 45 patients. The size of these images is 414x393 pixels.

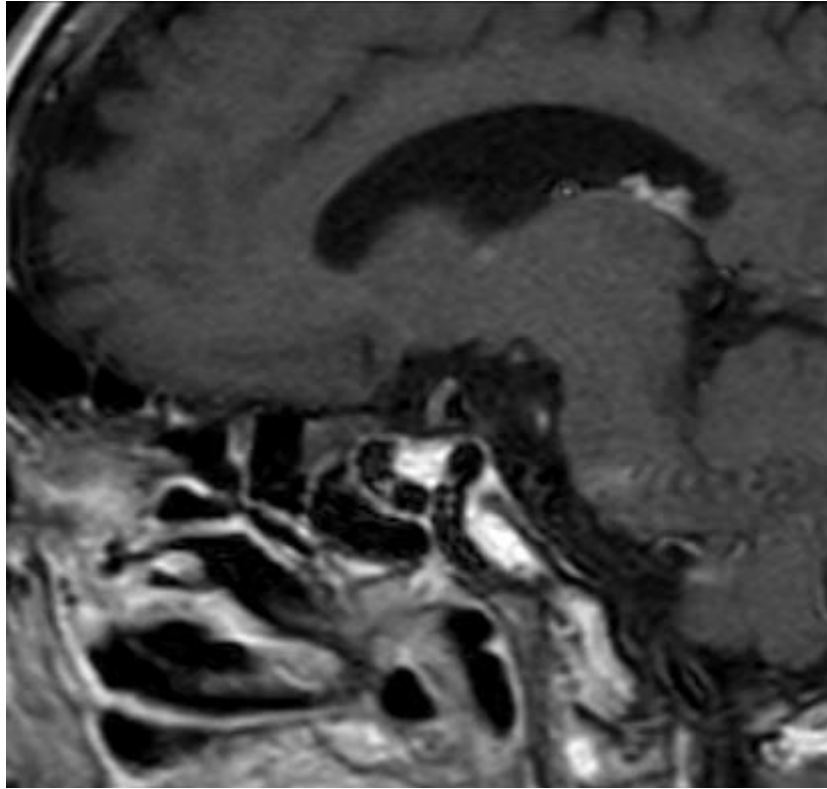


**Figure 1.** MR image of pituitary Tumor

## METHOD

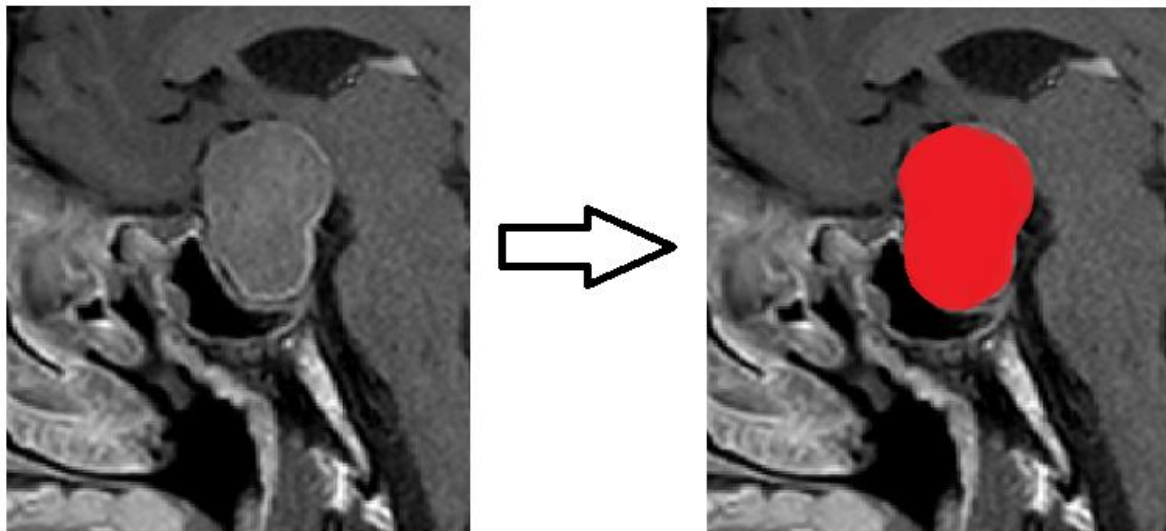
### *Preprocessing*

The MR images in the dataset are in Digital Imaging and Communications in Medicine (DICOM) image format. The images were converted to the Neuroimaging Informatics Technology Initiative (NIFTI) format, and patient information on the image was removed. In addition, the 15-year-old specialist doctor removed the completely black part of the MR image and selected only the relevant area (ROI) (Du et al., 2023). The specialist has determined that a size 414x393 is suitable for image processing. An example image is shown in Figure 2.



**Figure 2.** An exemplary MR image.

Figure 3 shows an example of manual labeling made on a 2D slice of a randomly selected patient.



**Figure 3.** Manual labeling on a 2D MR image using the 3D Slicer program.

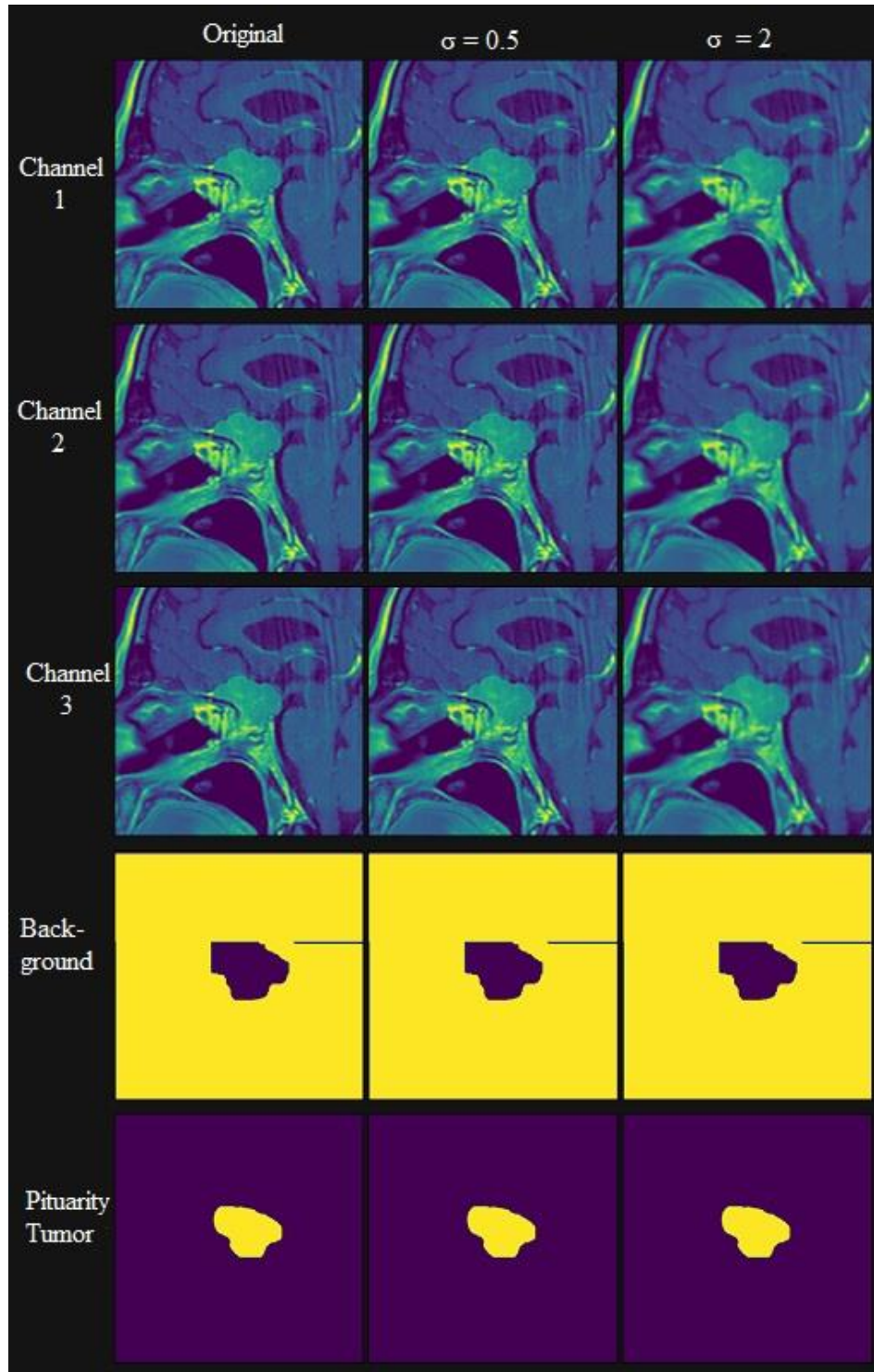
There may be noise in the MR images due to the high magnetic field used in MR imaging and the patient's movement during the shooting. One of the standard methods for removing these noises in biomedical images is the Gaussian filter (Afshari et al., 2017; Srinivasa et al., 2021).

It can be said that the Gaussian smoothing operator is a 2-dimensional convolution operator used to blur images and remove noise (Wang et al., 2022). Equation 1 contains the general formula of the Gaussian filter. Here, " $\sigma$ " denotes standard deviation, "x" and "y" denotes the values on the axes.



$$G(x, y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{x^2+y^2}{2\sigma^2}} \quad (1)$$

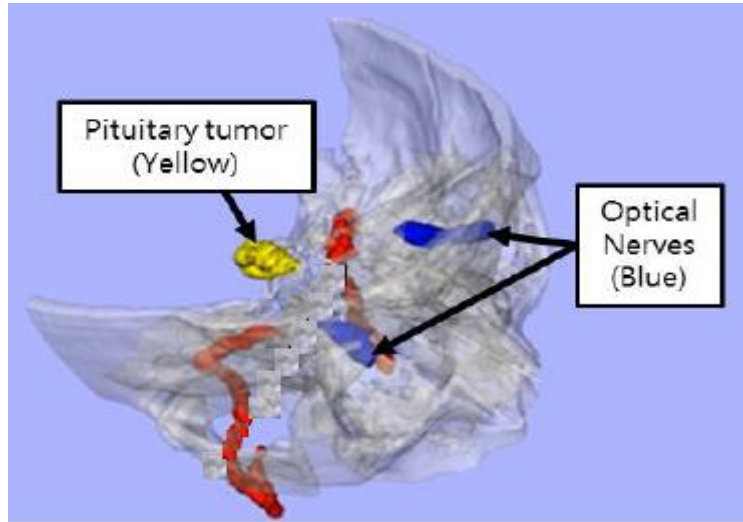
In this study, the necessary literature research for noise reduction (Afshari et al., 2017; Srinivasa et al., 2021; Wang et al., 2022) was made, and the Gaussian filter was applied to MR images. In Figure 4, the results were obtained by applying a Gaussian filter to the image of a patient in the data set for the " $\sigma$ " value of 0.5 and 2. The " $\sigma$ " value was preprocessed with the appropriate value of 2 by examining the literature (Afshari et al., 2017; Srinivasa et al., 2021; Wang et al. (2022)).



**Figure 4.** Images with Gaussian filter applied.

### 3D Slicer Program

The 3D Slicer program is a free download (<https://www.slicer.org/>) program that offers the opportunity to process medical images in every slice. The pituitary Tumor will be manually segmented in all slices in this project using program tools. It is straightforward to operate the program with a simple interface. It is possible to access training documents with a simple explanation on the <https://www.slicer.org> site. Figure 5 shows the interface image of the program (Egger, 2012).



**Figure 5.** An example image of 3D manual segmentation with the 3D Slicer program.

### 3D-Unet

U-Net architecture, Convolutional Neural Network (CNN), is a deep learning method with the same logic. U-Net deep learning architecture can achieve higher success in medical images because it performs pixel-based segmentation. While CNN needs many images for training, this is less important for U-Net architecture. For example; (Song et al., 2019) used six different medical images and three different medical images to look at the segmentation success in the U-Net architecture (Çiçek et al., 2018; Song et al., 2019).

Due to the location of the pituitary gland and the tumor tissue that may occur here, and since the transsphenoidal method, one of the pituitary tumor surgery methods, is likely to damage the surrounding tissues, 3D imaging will be helpful in tumor detection and surgery. In this study, the MR images of 45 patients who underwent pituitary tumor surgery with the transsphenoidal method will be calculated using the 3D U-Net deep learning method to calculate the success of automatic tumor segmentation. In that case, each convolutional layer uses the "ReLU" activation function, while the "Fully Connected Layer" in the CNN deep learning method is not included. The first part of the architecture works by increasing the size, and the second part works by decreasing the size (Çiçek et al., 2018; Song et al., 2019).

### Application Details

MR images were taken with the General Electric brand, Optima MR 360 advanced model, and 1.5 Tesla MR device.

Work was done in Python using Keras. A desktop computer with a 3.6GHz Intel(R) i7 CPU, GTX 1060TI graphics card, and 16GB GPU memory was used to train and validate the network.

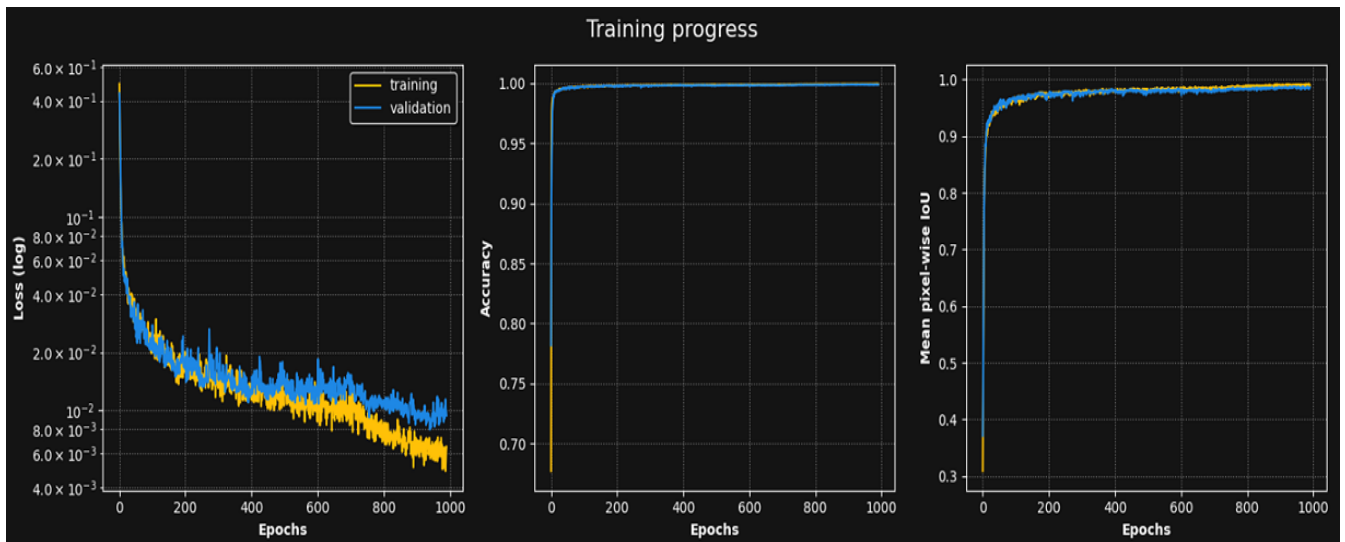
Table 2 shows the hyperparameters used for training.

**Table 2.** Hyperparameters.

Hyperparameter Name:	Value:
Epoch	1000
Learning Rate	0,01
Batch Size	2
Optimizer	Adam
Loss Function	categorical_crossentropy
Training/Test	90/10

## RESULTS

The study used 80% of the data set for training 10% for testing, and % 10 for validation. Since our data set is relatively small, cross validation was not used. Since our study will continue in the future, the data set will be increased and cross validation will be performed. Of the 45 images, 40 were used for training and 5 for testing. Five pieces of data used for training were excluded from the training. Figure 6 shows the achievements of 3D automatic segmentation. The estimated pixel values stabilized after the 800th epoch. The calculated accuracy value achieved high success in the previous epochs. The Loss function, which optimizes the model's pixel classification with high success, is the 950th epoch for the validation data set (5 pieces of data), and the minimum value has been achieved.



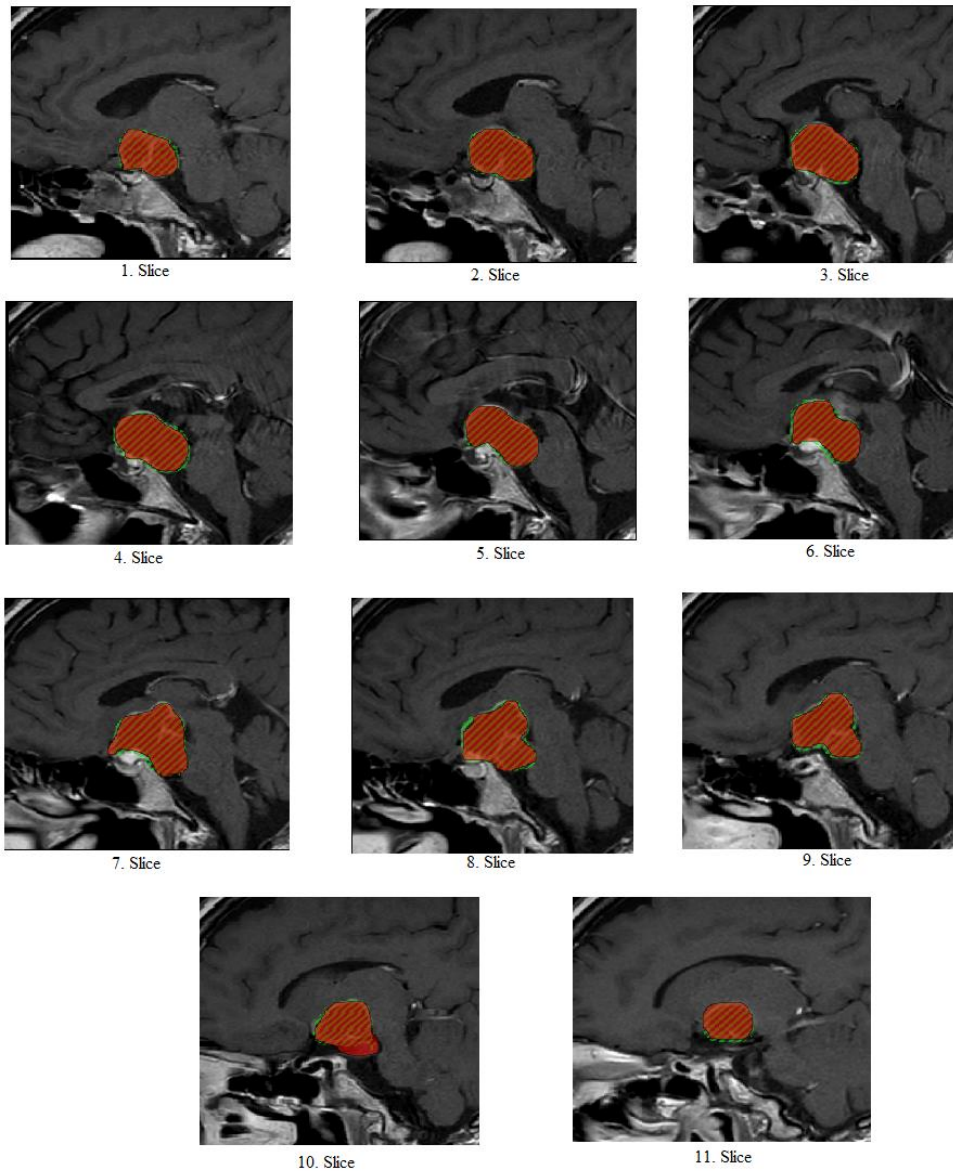
**Figure 6.** 3D Unet architecture.

Table 3 shows the accuracy results of 3D automatic segmentation. The IoU score of the automatic segmentation performed for five pieces of data not subject to training was relatively high, at 0.97. Although the number of pixels in the tumor area is less than in the background, a high IoU score was obtained here.

**Table 3.** Scores

	Background	Tumor	Mean
Train IoU score	0.99	0.97	<b>0.98</b>
Validation IoU score	0.97	0.96	<b>0.97</b>

In our study, the pituitary tumor image of patient 3, obtained as a result of manual and automatic segmentation, is shown in Figure 7. Since there are 11 slices in each of the sagittal, axial, and frontal images in each data, 11 slices will be shown separately in Figure 7. The areas shaded in orange in each slice show the pixels that manual and automatic segmentation collectively identify. It is possible to interpret from the excess of orange scans that the pixels are correctly classified in each slice. The areas scanned in red on the slices show the pituitary Tumor manually labeled by the specialist doctor. Green areas show pixels that are not manually labeled and are classified as pituitary tumors by 3D-UNet. When 11 slices are examined in detail, the number of misclassified pixels is relatively low. A few pixels that cannot be manually labeled and accurately predicted by the model are visible in the 10th slice. A small number of pixels, not in manual labeling and classified as pituitary tumors by the model, are slightly visible in each of the 11 slice images.



**Figure 7.** The result of patient No. 3 was obtained by manual and automatic segmentation.

## CONCLUSION

Hormonal balance is essential for people to lead a healthy life. Disruption of the hormonal balance can affect the relevant organs and indirectly affect all organs. The pituitary gland regulates the release of hormones, one of the most essential parts of a healthy life. One of the effects that disrupt the activities of the pituitary gland is tumor formation. Diseases such as Cushing's, acromegaly, and growth hormone deficiency may occur as a result of a pituitary tumor. In addition, the Tumor may act as a pituitary in some cases causing the release of hormones to a level that harms human health. Hormonal balance is more important in women due to conditions such as fertility. Therefore, more attention is paid to hormone balance in women, and the hormone values related to the diagnosis of any disease are becoming more critical. The Pituitary Gland, which is the manager of hormone release, becomes even more demanding for women.

The pituitary gland is located at the base of the brain, behind the bridge of the nose, in the bony cavity called the Sella Turcica (Turkish saddle). As can be seen in Figure 5, the brain has the deepest place. Again, as shown in Figure 5, it is very close to the optic nerves. The pressure of the Tumor to be formed on the optic nerves may also affect the person's visual function. The operation to clean the Tumor is quite tricky due to the gland's location. Transsphenoidal is a method that cleans the Tumor by reaching the pituitary through the nose. Since this method is complex and requires good expertise, it can be performed in a limited number of centers. It is a complicated operation due to the location of the Tumor. The proximity of the pituitary to the optic nerves makes it mandatory not to damage the nerves while the Tumor is being cleaned. In addition, removing the Tumor located in the deepest part of the brain will be tough.

Expert decision support systems are objective systems that aim to help the doctor with diagnosis and treatment by using computer software. Considerable progress has been made in processing biomedical images, especially with the deep learning methods becoming competent. Namely, 3D automatic classification and segmentation can be done on images. It is understood from here that detailed information about the location and shape of the Tumor can be obtained using 3D automatic segmentation. This information would not be available if only 2D segmentation were done on a single slice. Classifying pituitary tumors using the 3D-Unet network in the women we recommend is precious in this respect. In this way, the surgical operation can be planned in detail. In this study, research was carried out with computer software that can automatically 3D segment the pituitary tumors of female patients in whom hormonal activities are more important. The high semantic segmentation success of up to 98% objectively demonstrates the success of the proposed model.

## Funding Statement

Funding still needs to be received for the study.

## Ethics Committee Certificate

Our study is retrospective, and data were obtained from patients who applied to Kahramanmaraş Sutcu Imam University Faculty of Medicine, Department of Neurosurgery. Ethics Committee approval was obtained from the Brain and Nerve Surgery institution to obtain the data (Session Number 2021/04, Protocol Number 07).

## Thanks

## REFERENCE

- Afshari, M., Yang, A., Bega, D. (2017). Motivators and Barriers to Exercise in Parkinson's Disease. *Journal of Parkinson's Disease*, 7(4), 703–711. <https://doi.org/10.3233/jpd-171173>
- Alkan, F., Ersoy, B., Kızılay, D. Ö., Ozyurt, B. C., Coskun, S. (2022). Evaluation of cardiac structure, exercise capacity, and electrocardiography parameters in children with partial and complete growth hormone deficiency and their changes with short-term growth hormone replacement therapy. *Pituitary*, 26(1), 115–123. <https://doi.org/10.1007/s11102-022-01295-z>
- Alqudah, A. M., Alquraan, H., Abu-Qasmieh, I., Alqudah, A., Al-Sharu, W. (2019). Brain Tumor Classification Using Deep Learning Technique - A Comparison between Cropped, Uncropped, and Segmented Lesion Images with Different Sizes. *International Journal of Advanced Trends in Computer Science and Engineering*, 8(6), 3684–3691. <https://doi.org/10.30534/ijatcse/2019/155862019>

- Altun, S., Alkan, A. (2022c). LSS-net: 3-dimensional segmentation of the spinal canal to diagnose lumbar spinal stenosis. *International Journal of Imaging Systems and Technology*, 33(1), 378–388. <https://doi.org/10.1002/ima.22807>
- Ciavarra, B., McIntyre, T., Kole, M. J., Li, W., Yao, W., Guttenberg, K. B., Blackburn, S. L. (2023). Antiplatelet and anticoagulation therapy and the risk of pituitary apoplexy in pituitary adenoma patients. *Pituitary*. <https://doi.org/10.1007/s11102-023-01316-5>
- Çiçek, Ö., Abdulkadir, A., Lienkamp, S. S., Brox, T., Ronneberger, O. (2016). 3D U-Net: Learning Dense Volumetric Segmentation from Sparse Annotation. In *Lecture Notes in Computer Science* (pp. 424–432). Springer Science+Business Media. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-46723-8\\_49](https://doi.org/10.1007/978-3-319-46723-8_49)
- Egger, J., Zukić, D., Freisleben, B., Kolb, A., Nimsky, C. (2013). Segmentation of pituitary adenoma: A graph-based method vs. a balloon inflation method. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, 110(3), 268–278. <https://doi.org/10.1016/j.cmpb.2012.11.010>
- Geer, E. B. (2023). Medical therapy for refractory pituitary adenomas. *Pituitary*. <https://doi.org/10.1007/s11102-023-01320-9>
- Qian, Y., Qiu, Y., Li, C., Wang, Z., Cao, B., Huang, H., Ni, Y., Chen, L., Sun, J. (2020). A novel diagnostic method for pituitary adenoma based on magnetic resonance imaging using a convolutional neural network. *Pituitary*. <https://doi.org/10.1007/s11102-020-01032-4>
- Sharma, M., Wang, D., Scott, V., Ugiliweneza, B., Potts, K., Savage, J., Boakye, M., Andaluz, N., Williams, B. J. (2023). Intraoperative MRI use in transsphenoidal surgery for pituitary tumors: Trends and healthcare utilization. *Journal of Clinical Neuroscience*, pp. 111, 86–90. <https://doi.org/10.1016/j.jocn.2023.03.009>
- Simander, G., Dahlqvist, P., Oja, L., Eriksson, P. O., Lindvall, P., Koskinen, L. D. (2023). Intracellular pressure is related to endocrine disturbances in patients with pituitary tumors. *World Neurosurgery*. <https://doi.org/10.1016/j.wneu.2023.03.085>
- Song, H., Yoon, H., Lee, S., Hong, C., Yi, B. (2019). Surgical Navigation System for Transsphenoidal Pituitary Surgery Applying U-Net-Based Automatic Segmentation and Bendable Devices. *Applied Sciences*, 9(24), 5540. <https://doi.org/10.3390/app9245540>
- Srinivasa Reddy, K., Jaya, T. (2021). Medical Image Retrieval using Two-Dimensional PCA. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering (IJITEE)*, 9(4), 1852–1856. <https://doi.org/10.35940/ijrte.D1152.018520>
- Staatjes, V. E., Serra, C., Muscas, G., Maldaner, N., Akeret, K., Van Niftrik, C. H. B., Fierstra, J., Holzmann, D., Regli, L. (2018). Utility of deep neural networks in predicting gross-total resection after transsphenoidal surgery for pituitary adenoma: a pilot study. *Neurosurgical Focus*, 45(5), E12. <https://doi.org/10.3171/2018.8.focus18243>
- Trimpou, P., Backlund, E., Ragnarsson, O., Skoglund, T., T, H., Gudnadottir, G., Carlqvist, J., Farahmand, D. (2022). Long-Term Outcomes and Complications from Endoscopic Versus Microscopic Transsphenoidal Surgery for Cushing's Disease: A 15-Year Single-Center Study. *World Neurosurgery*, 166, e427–e434. <https://doi.org/10.1016/j.wneu.2022.07.027>
- Tsuneoka, H., Tosaka, M., Yamaguchi, R., Tanaka, Y., Mukada, N., Shimauchi-Ohtaki, H., Aihara, M., Shimizu, T., Yoshimoto, Y. (2023). The Significance of the Intercarotid Distances for Transsphenoidal Pituitary Surgery: A Magnetic Resonance Imaging Study. *World Neurosurgery*. <https://doi.org/10.1016/j.wneu.2023.04.009>
- Du, Y., Zhang, S., Fang, Y., Qiu, Q., Zhao, L., Wei, W., Tang, Y., & Li, X. (2022). Radiomic Features of the Hippocampus for Diagnosing Early-Onset and Late-Onset Alzheimer's Disease. *Frontiers in Aging Neuroscience*, (), n/a.
- Almufareh, F.M., Imran, M., Khan, A., Humayun, M., Asim, M. (2024). Automated Brain Tumor Segmentation and Classification in MRI Using YOLO-Based Deep Learning. *IEEE Access*. 12, 16189 – 16207. DOI: 10.1109/ACCESS.2024.3359418



# Kahramanmaraş Sütçü İmam University

## Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 25.01.2024  
Kabul Tarihi : 04.03.2024

Received Date : 25.01.2024  
Accepted Date : 04.03.2024

### PREDICTING LUNG CANCER USING EXPLAINABLE ARTIFICIAL INTELLIGENCE AND BORUTA-SHAP METHODS

#### AÇIKLANABİLİR YAPAY ZEKA VE BORUTA-SHAP YÖNTEMLERİYLE AKCİĞER KANSERİNİN ÖNGÖRÜLMESİ

Erkan AKKUR<sup>1\*</sup> (ORCID: 0000- 0001-5573-5096)  
Ahmet Cankat ÖZTÜRK<sup>2</sup> (ORCID: 0000- 0002-7082-6479)

<sup>1</sup> Turkish Medicine and Medical Agency, Ankara, Türkiye

<sup>2</sup> Presidency of The Republic of Turkey Secretariat of Defence Industries Agency, Ankara, Türkiye

\*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Erkan AKKUR, eakkur@gmail.com

#### ABSTRACT

Machine learning algorithms, a popular approach for disease prediction in recent years, can also be used to predict lung cancer, which has fatal effects. A prediction model based on machine learning algorithms is proposed to predict lung cancer. Five decision tree-based algorithms were preferred as classifiers. The experiment was conducted on a publicly available data set that contained risk factors. The Boruta-SHAP approach was employed to reveal the most salient features in the dataset. The use of the feature selection method improved the performance of the classifiers in the prediction process. Experiments were conducted using all features and reduced features separately. When comparing all the classifiers' performances, the XGBoost algorithm produced the best prediction rate with an accuracy of 97.22% and an AUROC of 0.972. The proposed model has a good classification rate compared to similar studies in the literature. We used the SHAP (SHapley Additive exPlanation) approach to investigate the effect of risk factors in the dataset on the model output. As a result, allergy was found to be the most significant risk factor for this disease.

**Keywords:** Lung cancer, machine learning, explainable artificial intelligence, feature selection

#### ÖZET

Son yıllarda hastalık tahmini için popüler bir yaklaşım olan makine öğrenmesi algoritmaları, ölümcül etkileri olan akciğer kanserinin tahmininde de kullanılabilir. Bu çalışmada, akciğer kanserini tahmin etmek için makine öğrenmesi algoritmalarına dayalı bir tahmin modeli önerilmiştir. Sınıflandırıcı olarak beş karar ağacı tabanlı algoritma tercih edilmiştir. Deney, risk faktörlerini içeren kamuya açık bir veri seti üzerinde gerçekleştirilmiştir. Veri setindeki en belirgin özellikleri ortaya çıkarmak için Boruta-SHAP yaklaşımı kullanılmıştır. Öznitelik seçim yönteminin kullanılması sınıflandırıcılarının tahmin işleminde göstermiş oldukları performansları artırmıştır. Deneyler tüm özellikler ve indirgenmiş özellikler ayrı ayrı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Tüm sınıflandırıcıların performansları karşılaştırıldığında, 97.22% doğruluk ve 0.972 AUROC ile en iyi tahmin oranını üreten XGBoost algoritması olmuştur. Önerilen model, literatürdeki benzer çalışmalara kıyasla iyi bir sınıflandırma oranına sahiptir. Veri setindeki risk faktörlerinin model çıktısı üzerindeki etkisini araştırmak için SHAP (SHapley Additive exPlanation) yaklaşımını kullandık. Sonuç olarak, alerji bu hastalık için en önemli risk faktörü olarak bulunmuştur.

**Anahtar Kelimeler:** Akciğer kanseri, makine öğrenmesi, açıklanabilir yapay zeka, öznitelik seçimi

## INTRODUCTION

The unbalanced proliferation of cells in the lung can lead to malignant tumoral formations known as lung cancer (LC). LC is acknowledged globally as one of the most frequent and lethal forms of cancer (Sung et al., 2021). LC is regarded as the second most common cancer in men, following prostate cancer and breast cancer in women. According to global statistics, this disease was estimated to cause 2.2 million new diagnoses and 1.8 million deaths in 2020 (Li et al., 2023). The incidence of this disease is growing globally because of increased access to tobacco and industrialization. If this disease is detected early, the survival rate can be increased. Imaging techniques and examination of symptoms can help early diagnosis. Imaging modalities such as thoracic computed tomography and chest X-rays are used to diagnose LC. Despite providing reliable results, these techniques may be expensive. Shortness of breath, chest pain, fever, wheezing, and persistent cough are symptoms that can help predict this disease at an early stage. (Latimer & Mott, 2015). The onset of this disease can be predicted using early symptoms using machine learning (ML) algorithms. These algorithms use statistical analysis and mathematical optimizations and can provide predictive results (e.g. disease, no disease) based on input data, such as text or images. ML algorithms are widely used in the healthcare industry to predict diseases such as breast cancer, liver cancer, cardiovascular disease, kidney disease, COVID-19, and diabetes. (Kaplanoglu & Nasab, 2023; Turk & Kokver, 2022; Turk et al., 2022).

The prediction performance of the ML algorithm is directly affected by the number of features in the datasets. A limited number of features may result in classes not being properly separated in certain cases. A large number of features can also lead to problems such as increased training time and degraded classification performance for high-noise features. Therefore, it is important to select the relevant features to be given as input to ML algorithms. Feature selection (FS) is defined as selecting the most important attributes in the dataset. FS is one of the processes that enhance the classification performance of ML algorithms (Cai et al., 2018; Theng, 2023). Due to the black box feature of ML algorithms and their complex structure, it is difficult to understand and interpret the behaviour of the models in the prediction process. Despite providing satisfactory results for problems such as disease prediction, these algorithms also present problems like model interpretability. Explainable artificial intelligence (EAI) is considered a process package that can assist in the comprehension and explanation of model results. With these methods, the prediction results of the models can be made more understandable by investigating the relationships between inputs and outputs for each sample. Furthermore, these methods enable a predictive model designed for disease prediction to be more comprehensively explained in a clinical setting (Confalonieri et al., 2021; Arrieta, 2020).

This study aims:

- to select the best features to achieve maximum accuracy in lung cancer prediction using the Boruta-SHAP technique, a powerful feature selection method,
- to achieve the best classification rate in predicting lung cancer using different ML algorithms.
- to investigate the effect of the attribute associated with SHAP (SHapley Additive exPlanation) values, one of the EAI methods, on the prediction of the model that achieves the best classification rate.

## RELATED WORKS

Recent related studies on predicting LC utilizing ML approaches are presented in this section. One study used different classifiers for early prediction of LC (Fasial et al., 2018). A dataset from the UCI data repository was used to implement the models designed in the study. The Gradient-boosted Tree (GBT) algorithm was able to achieve the highest classification rate with 90% accuracy based on the comparisons. Patra conducted a study to predict lung cancer by comparing different classifiers (Patra, 2020). The experiments were performed using Weka tools. The dataset was taken from UCI Respiratory. The Radial Basis Function (RBF) algorithm showed the best result with an accuracy of 81.25%. Abuya studied combining PCA with ensemble learning (EL) (Abuya, 2023). The experiments were applied to the ELVIRA Biomedical Data Set Repository (EBDSR) dataset. The proposed method achieved 98.25% accuracy. Agarwal et al. tried to predict lung cancer by comparing different classifiers with each other (Agarwal et al., 2022). The study was implemented at COLAB. The experiments were applied to a dataset from Kaggle. The Random Forest (RF) algorithm scored the best success rate with 92.3% accuracy. Dristas and Trigka carried out a study on LC risk prediction using various classifiers (Dristas & Trigka, 2022). The imbalance problem in the dataset was dealt with through the use of the SMOTE (Synthetic Minority Oversampling Technique). The Rotation Forest technique obtained the highest prediction rate with an accuracy of 97.1%. Dirik sought to predict LC with nine different classifiers (Dirik, 2023). As a result of the study, the Naive Bayes (NB) algorithm yielded a better prediction rate than the other classifiers with an accuracy of 91%. Nasser and Abu-Naser utilized an artificial neural



network (ANN) to predict LC (Nasser & Abu-Naser, 2019). In the study, the dataset was split 80:20 and the proposed method achieved a 96.67% accuracy rate. Omar and Nassif presented a comparative study using FS and ML algorithms (Omar & Nassif, 2023). The Principal Component Analysis (PCA) and Correlation-based feature selection (CFS) approach were used to identify the most discriminating features. Three classifiers were utilized to predict LC. Multiplayer Perceptron (MLP) algorithm outperformed with 90% accuracy. Ojha applied six different ML algorithms for disease prediction and compared their performance results (Ojha, 2023). The dataset used in the study was split 80:20 into training and test data. Logistic Regression (LR) gave the best result with 94.7% accuracy. Table 1 provides a summary of research on LC prediction using ML algorithms.

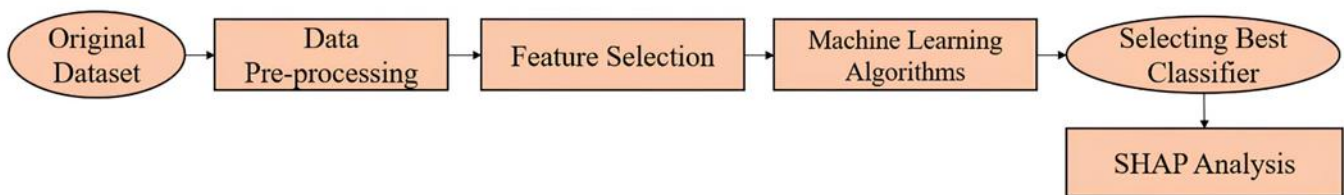
**Table 1.** Existing Studies LC Prediction

Study	Dataset	Feature Selection	The Best Classifier	Accuracy (%)
Fasial et al. (2018)	UCI repository	-	GBT	90.00%
Patra (2020)	UCI repository	-	RBF	81.25%
Abuya (2023)	EBDSR	PCA	EL	98.25%
Agarwal et al. (2022)	Kaggle	-	RF	92.30%
Dristas & Trigka (2022)	Kaggle	Gain Ratio	Rotation Forest	97.10%
Dirik (2023)	Kaggle	-	NB	91.00%
Nasser & Abu-Naser (2019)	Kaggle	-	ANN	96.67%
Omar & Nassif (2023)	Kaggle	CFS and PCA	MLP	90.00%
Ojha (2023)	Kaggle	-	LR	94.70%

The literature on LC prediction has utilized various methods of FS and classification. These studies have shown that ML algorithms can be used to successfully predict LC. The Boruta-SHAP method used in this study is the first time it has been used in the literature for LC prediction, as far as we know. Furthermore, there is no research on how to interpret lung cancer prediction models using EAI methods.

**MATERIALS AND METHODS**

This section explains the model built for the prediction of LC. Figure 1 illustrates the suggested predictive models. In the suggested approach, lung cancer data is first acquired and then the dataset is preprocessed. The features in the dataset are given as input to the ML algorithms before and after applying FS. At this stage, the effect of the FS method on the classification performance of ML algorithms was analyzed. Then, using different performance metrics, the classifier with the best prediction result was determined. Finally, SHAP analysis was used to interpret the model with the best prediction result.



**Figure 1.** The Suggested Framework of The Suggested Model

**Description of the Dataset**

The "Lung Cancer" dataset acquired from the Kaggle online web page (Lung Cancer Prediction Dataset, 2013) was employed. It consists of 309 samples and 15 different features, including basic characteristics of the individuals as well as information about their harmful habits and the presence of different abnormalities that can be observed in their health. It also contains as an output attribute a label indicating whether the person has been diagnosed with lung cancer or not.

Data preprocessing facilitates data analysis and improves the performance and speed of models, which is an important element of ML algorithms. The process starts with detecting and handling missing or duplicate values in the data set.

**Data Pre-processing**

When the dataset is analyzed, no missing data is found. However, 33 duplicate samples are observed in the dataset. Hence, the duplicate sample is removed to complete the dataset. As a result, a total of 276 samples are acquired in the dataset, 238 with lung disease and 38 without lung disease. There is an imbalance problem in the class distribution

in the dataset. The Adaptive Synthetic Sampling (ADASYN) approach was used to solve this problem. The characteristic of this synthetic data generation technique is that small samples are not repeated and more data is generated for hard-to-learn samples (He et al., 2008). Thus, the balance between the number of people diagnosed with lung cancer and those who were not diagnosed was achieved. The distribution of the output feature before and after data balancing is shown in Figure 2.

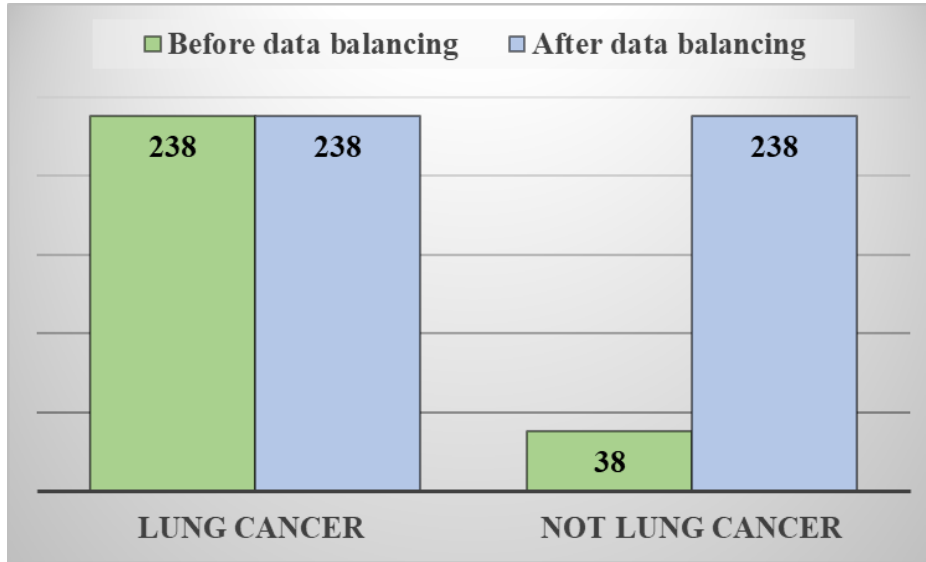


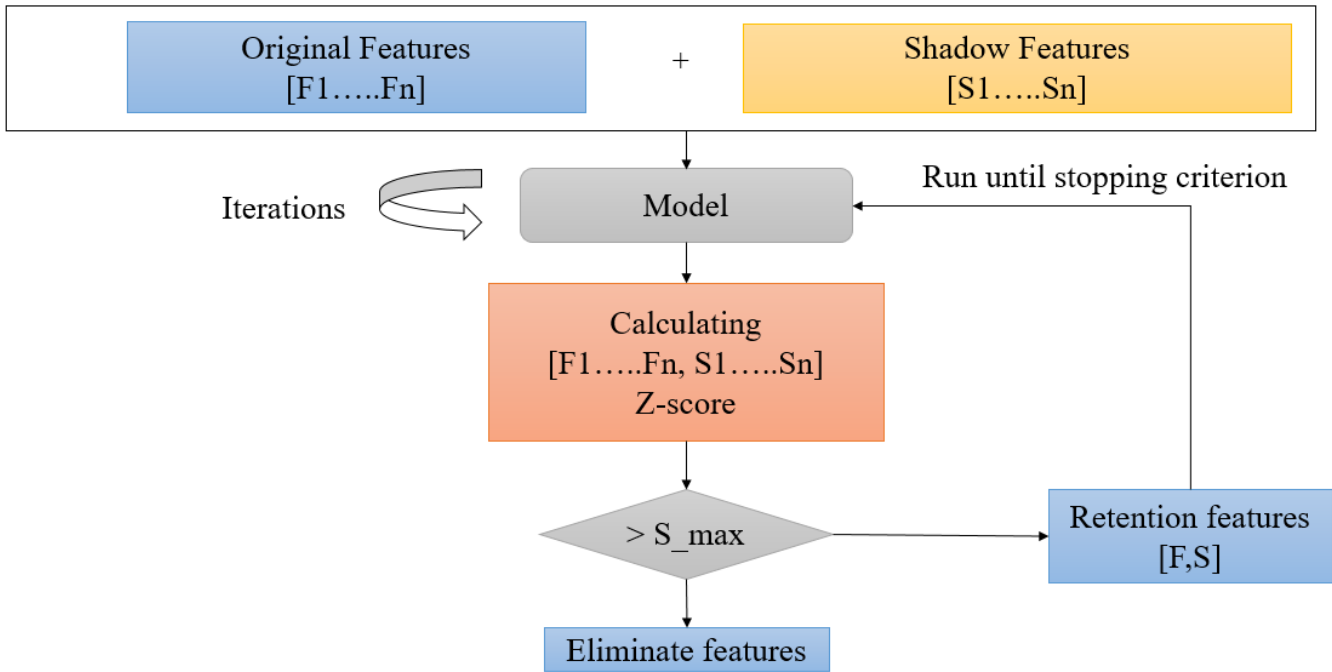
Figure 2. Data Balancing Process

### ***Boruta-SHAP Feature Selection Approach***

The Boruta-SHAP method, which combines the Boruta algorithm and SHAP values, was employed in this study to select significant features from the dataset. The Boruta method is an FS algorithm that is built around the RF technique's working principle. It attempts to select the entire set of features related to the dependent variable through a wrapper algorithm. It uses the RF algorithm as a classifier to filter out the features that are related to the target variable among all the features to form a new subset. It extracts the relative importance of all features in the dataset concerning the dependent variable, highlights the important features, and eliminates the unnecessary ones. By using a black box prediction model with the best prediction accuracy, features that are relatively closely connected to the target variable can be identified (Kursa MB, Rudnicki, 2010; Keany, 2020). The flowchart of the Boruta algorithm is shown in Figure 3.

The algorithm comprises the following steps:

- 1- Duplicates of the original dataset are created, and the variable values in these duplicate datasets are compared. The original and compared data are merged to train an RF model that measures variable importance.
- 2- A Z-score is calculated for each variable. The Z-score is derived from the Random Forest model which is the standardized version of the calculated variable significance values.
- 3- The one with the highest Z score among the shadow variables is determined.
- 4- When the resulting Z-score exceeds the highest Z-score, it is classified as significant; otherwise, it is classified as insignificant.
- 5- Repeat the above operations until all variables are labelled.



**Figure 3.** Boruta-SHAP Flowchart

The Boruta-SHAP method combines the Boruta method with SHAP values (Keany, 2020). The Boruta algorithm is an approach that seeks to capture all features of importance that can be used for prediction. The importance of a feature is measured by permutation importance, which is defined as the loss in model accuracy due to the random mixing of features in a dataset (Kursa and Rudnicki, 2010). However, this measure of importance makes the algorithm computationally expensive and is not considered a reliable measure of global feature importance, which led to the replacement of permutation importance with SHAP importance in the Boruta-SHAP algorithm (Keany, 2020). This method of variable selection Boruta-SHAP built in the Python programming language for its implementation library was used. Iteration, one of the parameters of the Boruta-SHAP method (iteration) number was set as 100.

### **Machine Learning Algorithms**

This study investigates Decision Tree (DT) and decision tree ensemble models to predict lung cancer. DT is an effective ML method that is simple but powerful. In the prediction process, the algorithm exploits the recursive partitioning of different features according to a tree structure (Charbuty & Abdulazeez, 2021). The DT-based ensemble model is an ML approach that blends multiple trees to produce more accurate predictions. A multi-tree structure is preferable in ensemble models and is beneficial for error correction. In community models, the strengths of one tree can balance the weaknesses of another tree (Tsiligaridis, 2023). As tree-based ensemble models, Random Forest (RF), Extra Tree Classifier (ETC), Extreme Gradient Boosting (XGBoost), and Adaptive Boosting (AdaBoost) algorithms are employed in this study. The RF algorithm leverages trees as the base classifier and exploits an additional level of randomization. In this method, multiple trees are trained on a random subset of features. Merging the predictions of multiple trees through majority voting produces the final prediction (Palimkar, 2022). In the ETC algorithm, a random split point of each feature is selected to enhance the variety between the trees and minimize overfitting (Geurts et al., 2006). The XGBoost algorithm inserts a new model that can reduce errors in the existing model. The algorithm computes a step function by using the second derivative of the loss function. This step ensures that the output of the new model is adjusted to minimize the error of the existing model (Chen & Guestrin, 2016). The AdaBoost algorithm aims to create a stronger classifier by combining multiple weak classifiers. At each stage, it predicts by re-running the classifier by augmenting the weight of the inaccurate predictions made as a result of the preceding phase (Wang, 2012).

### **SHAP (SHapley Additive ExPlanations) Analysis**

The SHAP is an approach that uses coalitional game theory to explain the outcome of any ML algorithm (Lundberg & Lee, 2017). The SHAP values consider each feature value of the data sample as the “player and the prediction as the “payout” and investigate the distribution of the “payout” across different features. In a sense, SHAP values can

be thought of as the average marginal contribution of a feature given all possible coalitions. The contribution of values may be either positive or negative. The positive values strengthen the prediction process, while negative ones weaken it. The absolute values of the feature correspond to its impact on the model. Larger values have a greater overall impact. The objective of the method is to present the prediction for any instance  $x_i$  by taking into account contributions from individual features (Yao et al., 2022). Using Equation 1 can provide the SHAP values in a model with a prediction function  $f(x)$  and  $m$  features.

$$\phi_i = \sum_{p \subseteq N \setminus \{i\}} \frac{|s|! (m - |s| - 1)!}{m!} [f_x(s \cup \{i\}) - f_x(s)] \quad (1)$$

The formula expressed in Equation 1 is the sum of all possible subsets ( $p$ ) of all feature values except feature value  $i$ .  $|s|!$  is the number of permutations of features that precede feature value  $i$ .  $(m - |s| - 1)!$  is the number of permutations of features that follow feature value  $i$ .  $\phi_i$  represents the SHAP value. The difference operation in the equation expresses the marginal contribution of adding the first feature value to  $s$  (Lundberg & Lee, 2017). The SHAP values can be classified into Kernel SHAP, Tree SHAP, and Deep SHAP (Yao et al., 2022). Since tree-based methods are used in this study, the Tree SHAP method was used. All of these analyses were carried out in Python through the "SHAP" package.

## EXPERIMENTAL RESULTS

### Experiment Setups

In this study, we used Jupyter Notebook 3.8.16 in Python, which provides libraries for data pre-processing, visualization, prediction, and classification to implement the prediction model for predicting lung cancer. The dataset was randomly subdivided 7:3 into training and test sets. A 5-fold cross-validation technique was used to validate the prediction of the classifiers during the training process. The performance of the classifiers in the test set was evaluated by accuracy, precision, recall, and F1-score, respectively.

### Evaluation

In this research, five ML algorithms were employed for LC prediction. Different perspectives are used to evaluate the classifications' prediction performance. The models' functionality using all features in the dataset is first examined. The impact of the FS method on the performance of the classifier is also analyzed.

### Classification Results of Using the Full Feature Set

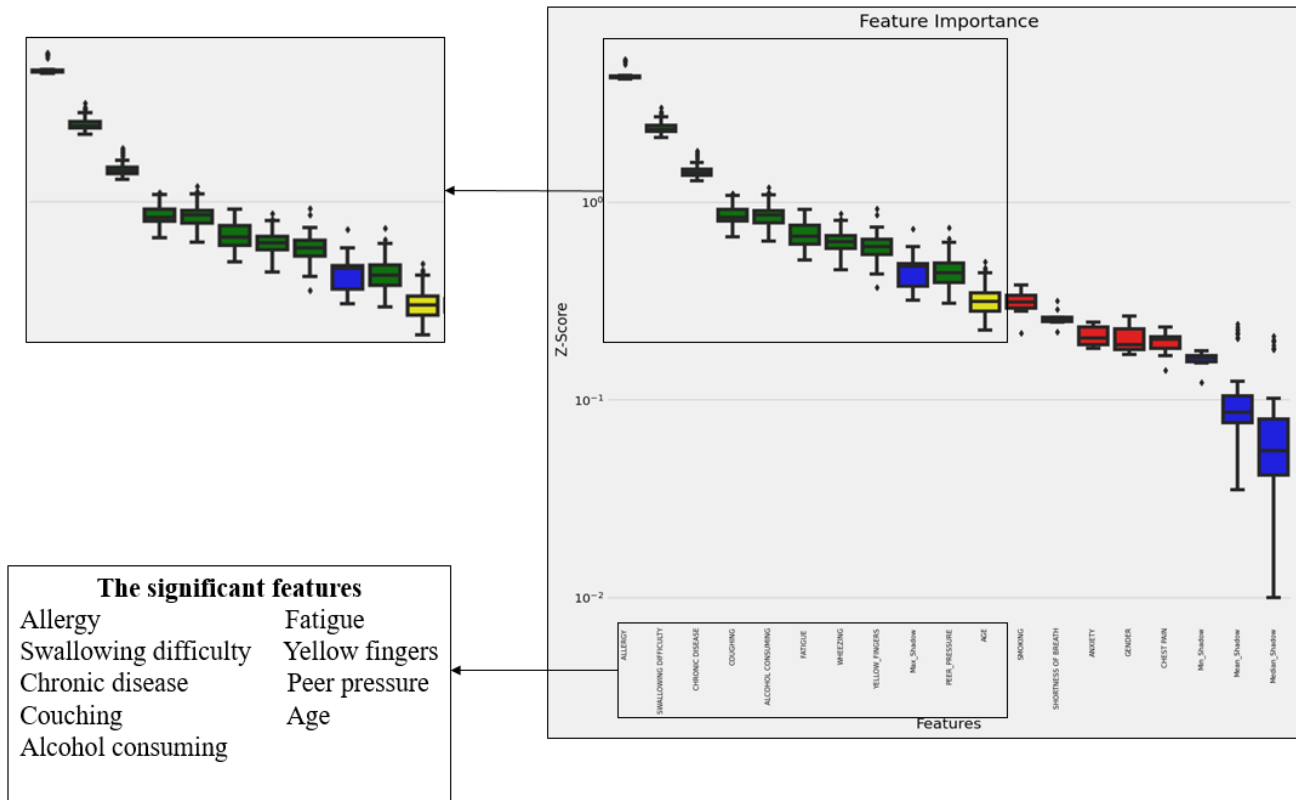
Using the entire feature set, all ML models in this section are evaluated as datasets to predict the outcome of a binary disease. Table 2 presents the results produced by the ML models for predicting LC using the full feature set. In lung cancer prediction, the DT algorithm had the lowest prediction rate (92.36% accuracy, 91.78% precision, 93.0% recall, and 92.41 % F1-score) and the XGBoost algorithm had the highest classification performance, with an accuracy of 95.83%, precision 95.83%, recall of 95.83%. and F1-score of 95.83%.

**Table 2.** Classification Results of ML Algorithms Using the Full Feature Set

Classifiers	Accuracy (%)	Precision (%)	Recall (%)	F1-Score (%)
DT	92.36	91.78	93.06	92.41
AdaBoost	93.06	93.06	93.06	93.06
ETC	93.75	92.00	95.83	93.88
RF	93.75	90.91	97.22	93.96
XGBoost	95.83	95.83	95.83	95.83

### Boruta-SHAP Feature Selection Results

The Boruta-SHAP method was utilized to identify the significance of features in the dataset, resulting in model selection flexibility. It allows for a visual representation of the selected features (Kim et al., 2022). Figure 4 depicts the impact of each feature on prediction via Boruta-SHAP. Green bars mark accepted features, yellow bars mark tentative features, and red bars mark rejected features. The blue box represents the minimum, maximum, median, and mean features. The FS process led to the selection of nine significant risk factors. The selected features were allergy, swallowing difficulty, age, gender, smoking, alcohol consumption, peer pressure, fatigue, and yellow fingers, respectively.



**Figure 4.** Selection of Features by Boruta-SHAP

**Classification Results Using Reduced Feature Set**

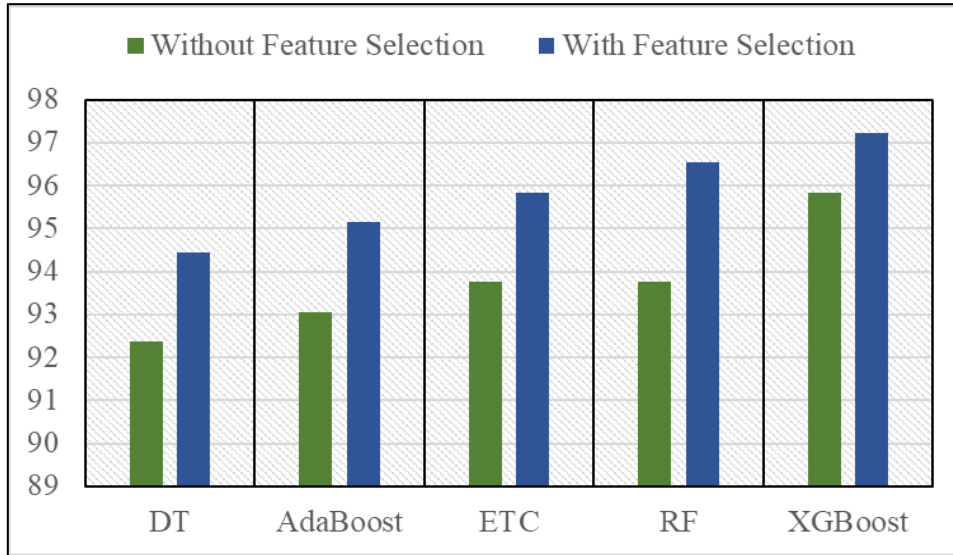
After feature selection, the selected features were given as input to the classifiers. The performance of the classifiers with the reduced feature set is presented in Table 3. In lung cancer prediction, in line with the results obtained before using the feature selection method, the DT algorithm had the lowest prediction rate (94.44% accuracy, 95.71% precision, 93.06% recall, and 94.37% F1-score), while the XGBoost algorithm had the highest classification performance with 97.22% accuracy, 95.95% precision, 98.61% recall, and 97.26% F1-score.

**Table 3.** Classification Results of ML Algorithms Using the Reduced Feature Set

Classifiers	Accuracy (%)	Precision (%)	Recall (%)	F1-Score (%)
DT	94.44	95.71	93.06	94.37
AdaBoost	95.14	92.21	98.61	95.30
ETC	95.83	94.59	97.22	95.89
RF	96.53	94.67	98.61	96.60
XGBoost	97.22	95.95	98.61	97.26

**The Effect of The Boruta-SHAP Method on the Performance of ML Algorithms**

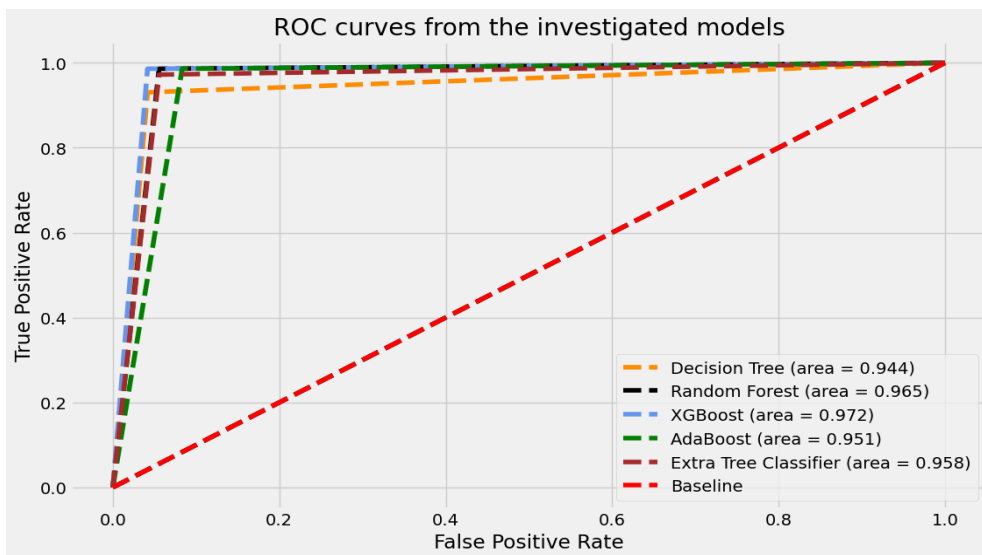
The performance of the classifiers in terms of accuracy using all features and selected features is shown in Figure 5. The use of the feature selection algorithm improved the accuracy of the DT, AdaBoost, and ETC algorithms by 2.08%, the RF algorithm by 2.78%, and the XGBoost algorithm by 1.39%. It indicates that by reducing the number of features using a feature selection technique, classifiers can achieve a higher prediction rate.



**Figure 5.** The Effect of the Boruta-SHAP Method on the Performance of ML Algorithms

### *Determining the ML Algorithm with the Best High Classification Performance for Predicting Lung Cancer*

In this study, we utilized ROC (Receiver Operating Characteristic Curve) to identify the ML algorithm with the best prediction rate in the process of predicting LC. This metric can visually show the performance of classification models at all classification thresholds. At different classification thresholds, it plots the false positive rate against the true positive rate. The area under the curve (AUC) is expressed as the area under the ROC curve. It indicates if the data is sufficient to enable precise differentiation between predicted values (Bradley, 1997). The AUROC values are illustrated in Figure 6. With an AUROC of 0.972, the XGBoost algorithm is the most accurate predictor, while the DT algorithm has the worst performance among the classifiers with an AUROC of 0.944.



**Figure 6.** AUROC Curves of Classifiers

### *Comparison of the Suggested Predictive Model with Similar Studies in the Literature*

There have been considerable studies in the literature on LC prediction using the ML algorithm. Table 4 presents a benchmark of the suggested model against models from other earlier studies using the same dataset. During analysis of the comparison table, it is observed that the suggested model has a good classification rate compared to other existing models. The FS method was used in certain studies on this subject in the literature, but it was not favoured in others. Our study utilized the Boruta-SHAP method, which offers flexibility in model selection and a visual

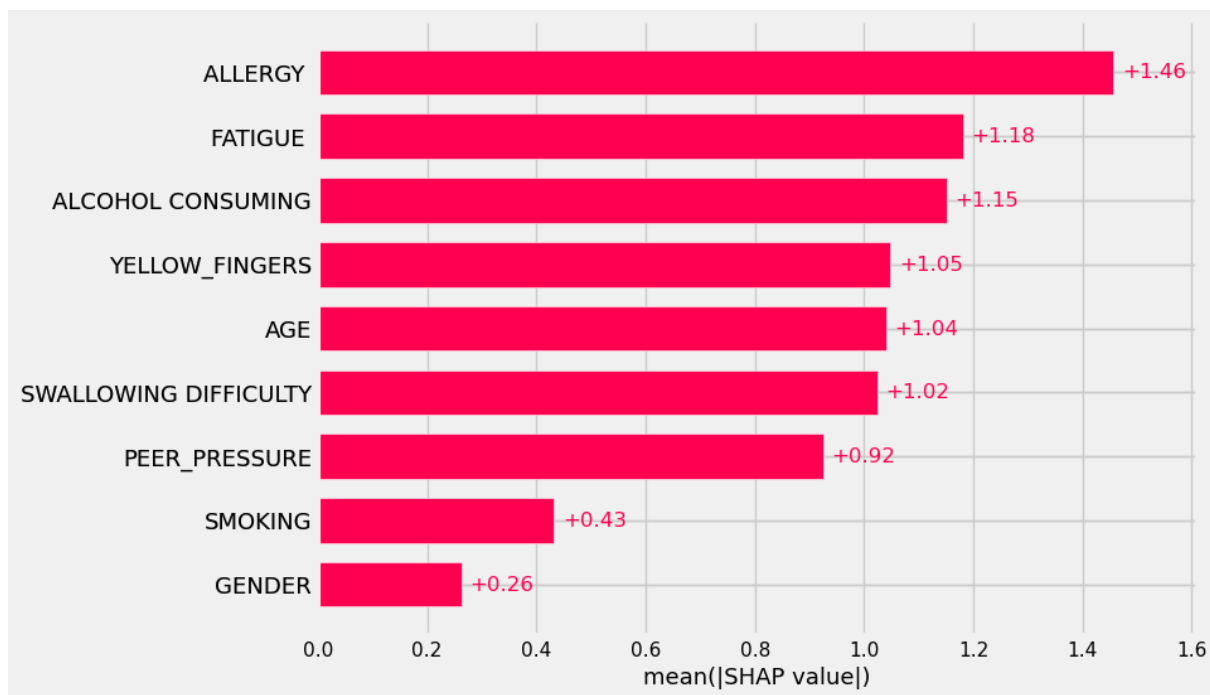
representation of selected key variables. At the same time, to our knowledge, the Boruta-SHAP method has not been used before in the diagnosis of lung cancer.

**Table 4.** Comparison of Suggested Model with Similar Studies

Studies	The Best Classifier	Accuracy (%)
Agarwal et al. (2022)	RF	92.30%
Dristas & Trigka (2022)	Rotation Forest	97.10%
Dirik (2023)	NB	91.00%
Nasser & Abu-Naser (2019)	ANN	96.67%
Omar & Nassif (2023)	MLP	90.00%
Ojha (2023)	LR	94.70%
Suggested model	XGBoost	97.22%

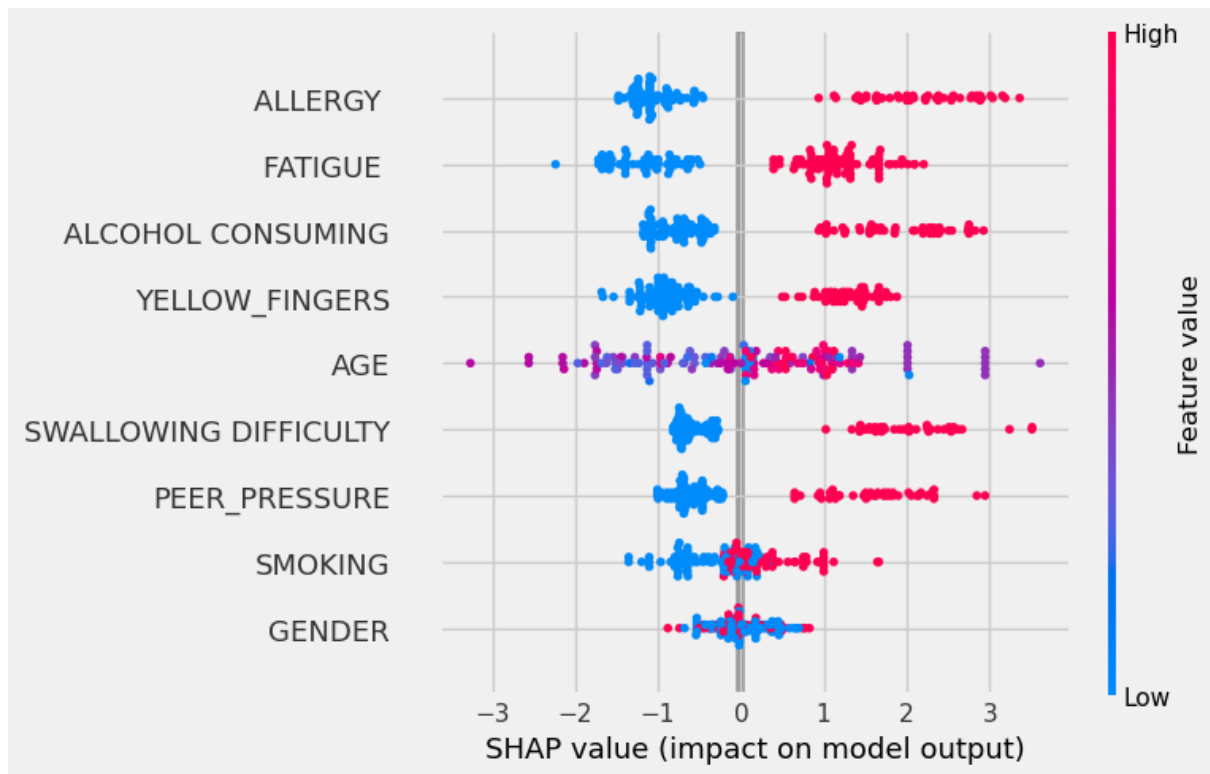
### Model Interpretability

This study presents the SHAP approach for modelling interpretability. The significance of the features in the XGBoost model with the highest prediction rate was analyzed. Figure 7 demonstrates the feature prominence of the XGBoost model using the SHAP method. In analyzing SHAP values, it appears that allergy, fatigue, alcohol consumption, and yellow fingers are significant variables in predicting LC. As can be seen in Figure 7, the variable that contributes the most to the prediction model is allergy (+1.46), followed by fatigue (+1.18) and alcohol consumption (+1.15).



**Figure 7.** Feature Importance Based on SHAP Values

Another visual representation of SHAP analysis is the Beeswarm, which is displayed in Figure 8. It aims to display the distribution of multiple variables in a way that minimizes the friction between points. In the graph, the x-axis represents the data points and the y-axis represents the density of the points. The higher the SHAP value of a feature, the higher the log-likelihood of lung disease in the lung disease prediction model. Each sample in the dataset is run through the model, and each patient in the dataset is run through the model. A dot is produced for each feature association value so that a patient gets a dot in the row of each attribute. The dots are coloured according to the value of the feature for that patient and stacked vertically to show density. In Figure 8, the allergy is the most significant risk factor for lung cancer patients.



**Figure 8.** SHAP Summary Plot for The XGBoost Algorithm

## CONCLUSION

LC causes many deaths worldwide. The earlier it can be diagnosed, the lower the mortality rate. For the diagnosis of this disease, it is important to identify and monitor the risk factors affecting the disease. In recent years, ML algorithms have become an important approach for the prognosis or prediction of various diseases. In this study, we attempt to predict LC using DT-based ML techniques. For this purpose, DT, AdaBoost, RF, ECT, and XGBoost algorithms were used for prediction. The suggested approach was applied to a publicly available dataset containing the risk factors of people with LC. The Boruta-SHAP approach was used to identify the most meaningful features in the dataset. To examine the effect of the FS algorithm, the performance of the classifiers was evaluated before and after the use of the FS algorithm. According to the analysis, the Boruta-SHAP approach had a positive impact on the performance of all classifiers. Experimental results reveal that with a lower number of features, LC disease can be correctly predicted at a higher rate. Comparing the performance of the classifiers, the XGBoost algorithm produced the best prediction rate with an accuracy of 97.22% and an AUROC of 0.972. In addition, this study seeks to bridge the gap in the interpretability of ML algorithms. Understanding the inner workings of a predicting model is crucial. For this purpose, we utilized the SHAP technique, that is one of the explainable artificial intelligence methods. It can help measure the contribution of features to the model. The XGBoost model with the best prediction rate was selected for SHAP analysis. As a result, the allergy feature was found to be the most prominent risk factor in predicting LC. Even though the model presented in this study delivers a reasonable prediction rate, it also has constraints. The dataset used in this study is publicly accessible. However, we consider it to be a reliable dataset as it includes risk factors for LC. A dataset from a hospital or an institute would have provided data with richer and more diverse features. However, access to medical data is restricted due to privacy reasons. In future studies, it is planned to construct deep learning-based prediction models on a dataset to be taken from the hospital environment.

## REFERENCES

- Sung, H., Ferlay, J., Siegel, R. L., Laversanne, M., Soerjomataram, I., Jemal, A., & Bray, F. (2021). Global cancer statistics 2020: GLOBOCAN estimates of incidence and mortality worldwide for 36 cancers in 185 countries. *CA: a cancer journal for clinicians*, 71(3), 209-249.
- Li, C., Lei, S., Ding, L., Xu, Y., Wu, X., Wang, H., Zhang, Z., Gao, T., Zhang, Y., Li, L. (2023). Global burden and trends of lung cancer incidence and mortality. *Chin Med J (Engl)*, 136(13):1583-1590



- Latimer, K. M., & Mott, T. F. (2015). Lung cancer: diagnosis, treatment principles, and screening. *American family physician*, 91(4), 250-256.
- Kaplanoglu, E., & Nasab, A. (2023). Evaluation of artificial intelligence techniques in disease diagnosis and prediction. *Discover Artificial Intelligence*, 3(1).
- Turk, F. & Kokver, Y. (2022). Application with deep learning models for COVID-19 diagnosis, *SAUCIS*, vol. 5, no. 2, pp. 169–180.
- Turk, F., Luy, M., Barıscı, N. & Yalcinkaya, F., (2022), Kidney tumour segmentation using two-stage bottleneck block architecture, *Intelligent Automation and Soft Computing*, 33(1).
- Cai, J., Luo, J., Wang, S., & Yang, S. (2018). Feature selection in machine learning: A new perspective. *Neurocomputing*, 300, 70-79.
- Theng, D., & Bhojar, K. K. (2023). Feature selection techniques for machine learning: a survey of more than two decades of research. *Knowledge and Information Systems*, 1-63.
- Confalonieri, R., Coba, L., Wagner, B., & Besold, T. R. (2021). A historical perspective of explainable Artificial Intelligence. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Data Mining and Knowledge Discovery*, 11(1), e1391.
- Arrieta, A. B., Díaz-Rodríguez, N., Del Ser, J., Bennetot, A., Tabik, S., Barbado, A., ... & Herrera, F. (2020). Explainable Artificial Intelligence (XAI): Concepts, taxonomies, opportunities and challenges toward responsible AI. *Information fusion*, 58, 82-115.
- Faisal, M. I., Bashir, S., Khan, Z. S., & Khan, F. H. (2018, December). An evaluation of machine learning classifiers and ensembles for early-stage prediction of lung cancer. In 2018 3rd international conference on emerging trends in engineering, sciences and technology (ICEEST) (pp. 1-4). IEEE.
- Patra, R. (2020). Prediction of lung cancer using machine learning classifier. In: Chaubey, N., Parikh, S., Amin, K. (eds) *Computing Science, Communication and Security. COMS2 2020. Communications in Computer and Information Science*, vol 1235. Springer, Singapore. DOI: 10.1007/978-981-15-6648-6\_11.
- Abuya, T.K. (2023). Lung Cancer Prediction from Elvira Biomedical Dataset Using Ensemble Classifier with Principal Component Analysis. *Journal of Data Analysis and Information Processing*, 11, 175-199.
- Agarwal S., Thakur S. and Chaudhary A. (2022, October). Prediction of lung cancer using machine learning techniques and their comparative analysis. 2022 10th International Conference on Reliability, Infocom Technologies and Optimization (Trends and Future Directions) (ICRITO), Noida, India. DOI: 10.1109/ICRITO56286.2022.9965052.
- Dritsas, E., & Trigka, M. (2022). Lung cancer risk prediction with machine learning models. *Big Data and Cognitive Computing*, 6(4), 139.
- Dirik, M. (2023). Machine learning-based lung cancer diagnosis. *Turkish Journal of Engineering*, 7(4), 322-330.
- Nasser, I. M., & Abu-Naser, S. S. (2019). Lung cancer detection using artificial neural network. *International Journal of Engineering and Information Systems (IJEAIS)*, 3(3), 17-23.
- Omar A. C. and Nassif A. B. (2023). Lung cancer prediction using machine learning based feature selection: A comparative Study, 2023 Advances in Science and Engineering Technology International Conferences (ASET), Dubai, United Arab Emirates, pp. 1-6. DOI: 10.1109/ASET56582.2023.10180436.
- Ojha T. (2023), Machine learning based classification and detection of lung cancer, *Journal of Artificial Intelligence and Capsule Networks* 5(2):110-128.
- Lung Cancer Prediction Dataset (2013). Available online: <https://www.kaggle.com/datasets/mysarahmadbhat/lungcancer?fbclid=IwAR0uQ5K3mEbQZJcwQGYqILJ5RydvsK2oU1Sa5vYvit0ECqkx6vPR43JAM>. / Accessed 02.01.2024.
- He, H., Bai, Y., Garcia, E.A., Li, S. (2008). ADASYN: Adaptive synthetic sampling approach for imbalanced learning. In: International Joint Conference on Neural Networks (IEEE World Congress on Computational Intelligence), pp. 1322–1328. DOI: 10.1109/IJCNN.2008.4633969.
- Kursa MB, Rudnicki WR. (2010). Feature selection with the Boruta package. *J. Stat. Softw.* 36(11): 1-13.

- Keany E. (2020). Boruta-Shap: A wrapper feature selection method which combines the Boruta feature selection algorithm with Shapley values. Zenodo: Geneva, Switzerland.
- Charbuty, B., & Abdulazeez, A. (2021). Classification based on decision tree algorithm for machine learning. *Journal of Applied Science and Technology Trends*, 2(01), 20-28.
- Tsiligaridis J., (2023). Tree-Based ensemble models and algorithms for classification, 2023 International Conference on Artificial Intelligence in Information and Communication (ICAIIIC), Bali, Indonesia, pp. 103-106.
- Palimkar, P., Shaw, R.N., Ghosh, (2022). A Machine learning technique to prognosis diabetes disease: Random forest classifier approach. In *Advanced Computing and Intelligent Technologies*; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, pp. 219–244.
- Geurts P., Ernst D. & Wehenkel L. (2006). Extremely randomized trees, *Machine Learning*, vol.63, pp.3-42.
- Chen T. & Guestrin C. (2016). XGBoost: A scalable tree boosting system. In Proc. of the 22Nd ACM SIGKDD Int. Conf. on Knowledge Discovery and Data Mining pp. 785–94.
- Wang, R. (2012). AdaBoost for feature selection, classification and its relation with SVM, a review. *Physics Procedia*, 25, 800-807.
- Lundberg S.M. & Lee S.I. (2017). A unified approach to interpreting model predictions.” *Advances in neural information processing systems*, 30.
- Yao L., Leng Z., Jiang J. & Ni F. (2022). Modelling of pavement performance evolution considering uncertainty and interpretability: a machine learning based framework, *International Journal of Pavement Engineering*, 23(14):5211-5226.
- Kim, J. Lee, J. & Park, M. (2022). Identification of smartwatch-collected lifelog variables affecting body mass index in middle-aged people using regression machine learning algorithms and SHapley Additive Explanations. *Appl. Sci.* 12, 3819.
- Bradley, A. P. (1997). The use of the area under the ROC curve in the evaluation of machine learning algorithms. *Pattern recognition*, 30(7), 1145-1159.



# Kahramanmaraş Sutcu Imam University Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 26.01.2024  
Kabul Tarihi : 17.04.2024

Received Date : 26.01.2024  
Accepted Date : 17.04.2024

## REMOVAL OF VETERINARY ANTIBIOTICS BY USING LAYERED DOUBLE HYDROXIDE PHOTOCATALYSTS: EFFECTS OF REACTION PARAMETERS AND KINETIC MODELLING

### TABAKALI ÇİFT HİDROKSİT FOTOKATALİZÖRLER KULLANILARAK VETERİNER ANTİBİYOTİKLERİN GİDERİMİ: REAKSİYON PARAMETRELERİNİN ETKİLERİ VE KİNETİK MODELLEME

Merve BARAÇ<sup>1</sup> (ORCID: 0000-0002-1094-6348)  
Burcu PALAS<sup>1</sup> (ORCID: 0000-0002-2815-0057)  
Gülin ERSÖZ<sup>1\*</sup> (ORCID: 0000-0002-5875-5946)

<sup>1</sup>Ege Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Kimya Mühendisliği Bölümü, İzmir, Türkiye

\*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Gülin ERSÖZ, gulin.ersoz@ege.edu.tr

#### ABSTRACT

The photocatalytic performances of Ni-Fe-LDH, Co-Fe-LDH, and Cu-Fe-LDH, (LDH: Layered Double Hydroxide) were investigated for the removal of oxytetracycline hydrochloride (OTC-HCl) from water. Layered double hydroxide materials were synthesized by using the co-precipitation method. The photocatalysts were characterized by SEM, XRD, XPS, and BET surface area analyses. The highest pharmaceutical removal efficiency was obtained by using Ni-Fe-LDH photocatalyst. Box-Behnken design was used to examine the influences of reaction parameters on OTC-HCl removal and to determine the optimal reaction conditions. In the parametric study, the interactive influences of photocatalyst loading, solution pH, and the initial oxidant concentration on oxytetracycline hydrochloride removal were investigated. Under visible light irradiation, the optimal conditions were determined to be 1.5 g/L catalyst loading, pH 5, and 1.48 mM H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> concentration by using Ni-Fe-LDH photocatalyst. OTC-HCl degradation was calculated as 67.1% under the optimal conditions. Hydroxyl radical was determined to be the main effective reactive. Phytotoxicity tests were performed using *Lepidium sativum* seeds. Veterinary antibiotic degradation fit to first order reaction. The Arrhenius constant and activation energy were evaluated as 2.6 min<sup>-1</sup> and 14.21 kJ/mol, respectively.

**Keywords:** Layered double hydroxide, tetracycline antibiotics, photocatalytic oxidation, kinetic modelling

#### ÖZET

Oksitetrasiklin hidroklorik asidin (OTC-HCl) sudan uzaklaştırılması için Ni-Fe-TÇH, Co-Fe-TÇH ve Cu-Fe-TÇH'nin (TÇH: Tabakalı Çift Hidroksit) fotokatalitik performansları araştırılmıştır. Tabakalı çift hidroksit malzemeler kopresipitasyon yöntemi kullanılarak sentezlenmiştir. Fotokatalizörler SEM, XRD, XPS ve BET yüzey alanı analizleri ile karakterize edilmiştir. En yüksek farmasötik giderim değeri, Ni-Fe-TÇH fotokatalizörünün varlığında elde edilmiştir. Reaksiyon parametrelerinin OTC-HCl giderimi üzerindeki etkilerini araştırmak ve optimum reaksiyon koşullarını belirlemek için Box Behnken tasarımı kullanılmıştır. Parametrik çalışmada fotokatalizör dozu, çözelti pH değeri ve başlangıç oksidan derişiminin oksitetrasiklin hidroklorik asit giderimi üzerine interaktif etkileri incelenmiştir. Ni-Fe-TÇH fotokatalizör kullanılarak görünür ışık altında optimum reaksiyon koşulları 1,5 g/L fotokatalizör dozu, 1,48 mM H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> konsantrasyonu ve pH 5 olarak belirlenmiştir. Optimum koşullar altında OTC-HCl giderimi %67,1 olarak hesaplanmıştır. Radikal tuzaklama deneylerinde hidroksil radikalinin başlıca etkili reaktif tür olduğu tespit edilmiştir. *Lepidium sativum* tohumları kullanılarak fitotoksisite testleri gerçekleştirilmiştir. Kinetik çalışmalarda veteriner antibiyotik bozunmasının birinci dereceden reaksiyon hız

ToCite: BARAÇ, M., PALAS, B., & ERSÖZ, G., (2024). REMOVAL OF VETERINARY ANTIBIOTICS BY USING LAYERED DOUBLE HYDROXIDE PHOTOCATALYSTS: EFFECTS OF REACTION PARAMETERS AND KINETIC MODELLING. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 27(3), 804-820

modeline uyduğu sonucuna varılmıştır. Aktivasyon enerjisi 14,21 kJ/mol ve ön üstel faktör 2,6 min<sup>-1</sup> olarak hesaplanmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Tabakalı çift hidroksit, tetrasiklin antibiyotikler, fotokatalitik oksidasyon, kinetik modelleme

## INTRODUCTION

The wastewater contaminated with pharmaceutical drugs constitutes a major international concern for surface waters and drinking waters. Veterinary antibiotics have been used worldwide in large amounts to treat disease and protect animal health. They have been used at large scales in animal farming and pollute water sources through the disposal of metabolized and unmetabolized (expired or unused) antibiotics (Leavey-Roback, Krasner, and Suffet, 2016; Sarmah, Meyer, and Boxall, 2006). In addition, the antibiotics are released into the environment hospital effluents, pharmaceutical industry wastewaters, and runoff from agricultural lands into sewers (Michael et al., 2013; Ngigi, Magu, and Muendo, 2020). In agriculture (poultry, farming of swine, cattle breeding, etc.) use of antibiotics comprises treatment, disease prevention, growth promotion, and control (Done, Venkatesan, and Halden, 2015). Tetracyclines are the most commonly used antibacterial pharmaceuticals followed by sulfonamides. The main tetracycline drugs are chlortetracycline, doxycycline, tetracycline, and oxytetracycline. Tetracyclines are known to be effective against a large number of bacteria from various groups, as well as rickettsia, chlamydia, spirochetes, mycoplasmas, leptospores, and some protozoa (Samanidou, Nikolaidou, and Papadoyannis, 2007). The presence of tetracyclines in the environment may result in serious influences on human health including contribution to antibiotic resistance (Yildirim-Tirgil et al., 2019).

The emerging contaminants in present wastewater discharged from various industries including pharmaceutical, textile, food, etc. have gained attention due to their toxicity and persistence in the environment. The persistence of the organic compounds is assessed by the rates at which they are removed by physical, chemical, and biological processes. Persistent organic pollutants are chemicals whose long-term persistence results in accumulation in the environment and biota due to chronic exposure (Chauhan et al., 2021; Papa and Gramatica, 2008). Antibiotics are regarded as persistent since the rate of entering into the environment is more than the rate of decomposition. Most of the pharmaceuticals including the antibiotics are non-biodegradable and have very stable chemical structures. Antibiotic residues may result in adverse effects such as generation of stable organic by-products, which are difficult to eliminate by the traditional wastewater treatment methods. (Gothwal and Shashidhar, 2015; Rokesh, Sakar, and Do, 2021).

In addition, incomplete mineralization of antibiotics may result in formation of degradation products that are more toxic than the parent compound. Therefore, advanced oxidation methods are good alternatives to treat antibiotic containing wastewater since they are capable of complete mineralization (Adeyemi, Ajiboye, and Onwudiwe, 2021).

Among the many methods applied for pollutant removal, such as adsorption, coagulation-flotation, filtration, and biological treatment, advanced oxidation processes stand out due to the complete degradation of pollutants instead of their transfer from one phase to another. Reactive radicals released in advanced oxidation processes, which have an important role among the environmentally friendly methods applied in wastewater treatment, non-selectively transform a wide range of organic pollutants into H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, and simple inorganic salts.

Most of the active ingredients in drugs are persistent in the aquatic environment due to their non-biodegradable characteristics. The pharmaceutical residues in water produce hazardous effects in both human bodies and aquatic ecosystems. Endocrine system disruption is one of the important issues arising from the effect of chemicals. Therefore, it is crucial to degrade the drug residues in water before discharging the drug containing wastewater (Gupta et al., 2022).

Most of the traditional wastewater treatment methods are insufficient to decompose the persistent compounds. Advanced oxidation processes are promising technologies to eliminate the persistent pharmaceuticals in wastewater through the formation of hydroxyl radicals (Lin et al., 2017). Among the advanced oxidation processes, photocatalysis and photo Fenton-like oxidation have received attention since these methods are cost-effective and environmentally friendly in comparison to many other wastewater treatment processes. Organic contaminants can be mineralized completely by using photocatalytic oxidation in contrast to nondestructive treatment methods such as coagulation and adsorption. In these processes, various reactive species including <sup>•</sup>OH, <sup>•</sup>O<sub>2</sub><sup>-</sup>, and h<sup>+</sup> are formed in the presence of photocatalysts (Bagherzadeh, Kazemeini, and Mahmoodi, 2021). Therefore, the development of

inexpensive and effective photocatalysts for the decomposition of persistent organic pollutants has become a significant research area.

Layered double hydroxide (LDH) materials which are known to be anionic clays and hydrotalcite-like materials have gained attention for the effective elimination of organic pollutants in wastewater. Layered double hydroxides consist of exchangeable interlayer anions, divalent and trivalent metals, and interlayer anions. Due to their large surface area, crystal structure, and molecular stability, layered double hydroxides are among the promising multifunctional materials for applications in wastewater treatment. By using layered double hydroxides containing copper and iron ions, peroxide activation can be achieved with negligible metal leaching. Due to their anion exchange capacity, and the ability to capture inorganic and organic anions, layered double hydroxides have a great potential to be used in catalytic processes, ion exchange, adsorption, photochemical and electrochemical applications (F. Li and Duan, 2005; Yan et al., 2017).

According to the study reported in the literature, the layered double hydroxides showed a promising performance for the removal of antibiotics from water. For instance, Ao et al. (2019) studied middle pressure UV/peroxymonosulfate (MPUV/PMS) oxidation in the presence of sulfate radical to remove tetracycline in water. Optimal removal was achieved at an initial tetracycline dosage of 11.25  $\mu\text{M}$  at pH=3.7, a PMS dose of 0.2  $\mu\text{M}$ , and a 250  $\text{mJcm}^{-2}$  UV light irradiation. As a result, 82% of tetracycline was degraded by the MPUV/PMS system (Ao et al., 2019). Chen et al. (2019) investigated the photocatalytic performance of  $\text{Ag}_2\text{O}/\text{Ag}$  decorated layered double hydroxide catalyst. LDH- $\text{Ag}_2\text{O}/\text{Ag}$  was prepared by depositing  $\text{Ag}_2\text{O}$  on LDH surface and converted into silver nanoparticles after heat treatment. The optimal catalytic efficiency of LDH- $\text{Ag}_{10}$  catalysts ( $0.0184 \text{ min}^{-1}$ ) was nearly 46 times higher than that of bare layered double hydroxide ( $0.0004 \text{ min}^{-1}$ ). Radical quenching experiments showed that  $\bullet\text{OH}$  is the dominant reactive oxygen species whereas  $\text{h}^+$  and  $\bullet\text{O}_2^-$  have also affected the tetracycline oxidation (C. R. Chen et al., 2019). Fan et al. (2012) studied anion exchange precipitation process to prepare bifunctional  $\text{Ag}/\text{AgBr}/\text{Co-Ni-NO}_3$  LDH nanocomposites. It was observed that  $\text{Ag}/\text{AgBr}$  nanoparticles were widely spread on  $\text{Co-Ni-NO}_3$  LDH layers. Nanocomposites have been used to absorb and photocatalytically decompose organic pollutants from water. For the removal of dyes and phenol, the catalytic activities of nanocomposites were found to be higher than  $\text{Co-Ni-Br}$  LDH and  $\text{Ag}/\text{AgBr}$ . This method may be preferred for the preparation of other LDH/silver salt compositions. It was concluded that these kinds of nanostructures have extensive applications in treatment due to their high absorption capacity and high photocatalytic activity (Fan et al., 2013).

Panplado et al. (2019) studied on degradation of tetracycline antibiotics from wastewater. In situ-adsorption method includes formation of mixed metal hydroxide materials which act as an adsorbent for tetracycline removal from aqueous solutions, by using the components of layered double hydroxide materials under alkaline conditions. 100% removal of tetracycline was achieved under optimized conditions. Recovery of tetracycline was tested in the presence of various anions. Due to the high charge density, 98% recovery was obtained by using phosphate (Panplado et al., 2019). Zhu et al. (2021) analyzed the photocatalytic removal performance of  $\text{Cu-Fe}/\text{LDH}@/\text{BiOI}_{1.5}$  photocatalyst designed with a simple hydrothermal synthesis method. The tests of photocatalytic oxidation of tetracycline indicated that the highest removal reached 73% in 75 minutes in the presence of 1:10  $\text{Cu-Fe}/\text{LDH}@/\text{BiOI}_{1.5}$  catalyst. The dominant reactive oxygen species were determined to be  $\text{O}_2^{\bullet-}$  and  $\text{h}^+$  in radical trapping experiments (Zhu et al., 2021).

When the studies in the literature on the oxidation of industrial pollutants in the presence of layered double hydroxide catalysts are evaluated, it is concluded that layered double hydroxide catalysts are effective in antibiotic removal. Though the catalytic activities of several types of layered double hydroxides were tested in literature studies, the comparison of the photocatalytic performances of copper, cobalt, and nickel containing layered double hydroxides, optimization of the reaction conditions by response surface methods and investigation of the reaction kinetics and toxicity assessment under optimized conditions constitute the innovative approaches of this study.

## MATERIAL AND METHOD

### Chemicals

$\text{Fe}(\text{NO}_3)_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$  (Merck, 99–102%),  $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$  (Tekkim Kimya),  $\text{Co}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  (Carlo Erba),  $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$  (Merck, 99–102), and sodium hydroxide (Merck,  $\geq 99\%$ ) were used to prepare layered double hydroxide catalysts. Hydrogen peroxide ( $\text{H}_2\text{O}_2$ , Merck, 35%) and oxytetracycline hydrochloride ( $\text{C}_{22}\text{H}_{24}\text{N}_2\text{O}_9 \cdot \text{HCl}$ ,

Doğa İlaç) were used as the oxidant and the target veterinary antibiotic, respectively, in the photocatalytic experiments.

### **Catalyst Preparation**

Layered double hydroxides were prepared according to the co-precipitation method adopted from the literature (Khataee et al., 2019; Mandal, Mayadevi, and Kulkarni, 2009; Mikami et al., 2016; Z. Shi, et al., 2020). The trivalent metal nitrate (iron nitrate nonahydrate) and the divalent metal nitrate (nitrate salt of copper, cobalt, or nickel) were dissolved in pure water by setting the molar ratio of  $M^{3+}/M^{2+}$  to 1/3. 2 N NaOH solution was added into the solution dropwise until the pH of the solution reaches to 10. The resulting mixture was stirred vigorously. The resulting precipitates were filtered, aged at ambient conditions, and dried in an oven at 80 °C for 8 h to obtain the layered double hydroxide photocatalysts.

### **Catalyst Characterization**

The surface texture of the layered double hydroxides was analyzed by a Thermo Scientific Apreo S Scanning Electron Microscopy and the chemical states of elements present on a sample surface were examined via a Thermo Scientific K-Alpha X-Ray Photoelectron Spectrometer in Ege University Application and Research Center for Testing and Analysis. The phases of the layered double hydroxides were analyzed via a Philips X'Pert Pro X-Ray Diffractometer and the surface area measurements were performed by using Mikromeritics Gemini V analyzer in Izmir Institute of Technology Materials Research Center.

### **Experimental System and Procedure**

The photocatalytic oxidation of oxytetracycline hydrochloride (OTC-HCl) was performed in a beaker by using a temperature-controlled hot plate. An 80-Watt halogen lamp was used as a visible light source. In a typical run, 200 mL of 50 ppm OTC-HCl solutions are prepared and the pH of the pharmaceutical solutions is adjusted to the desired values by the addition of HCl or NaOH solutions. After the addition of catalyst, the experiments are carried out in darkness for 30 minutes to reach equilibrium. Subsequently, the required amount of hydrogen peroxide is added and the visible lamp is turned on. The photocatalysis lasted for 60 minutes. Samples are taken periodically to analyze the OTC-HCl degradation.

### **Experimental Plan**

The photocatalytic performances of Ni-Fe-LDH, Co-Fe-LDH, and Cu-Fe-LDH were tested at pH 4 and 1 g/L catalyst loading in the presence and the absence of hydrogen peroxide comparatively. After the most effective layered double hydroxide was selected, the interactive influences of catalyst dose, pH, and  $H_2O_2$  dosage on OTC-HCl degradation were studied in the presence of the chosen catalyst. The experimental plan was determined based on Box–Behnken design. The factors and their levels used in the parametric study are listed in Table 1.

**Table 1.** Boundaries of the Experimental Design and Coded and Actual Values of the Reaction Parameters

Variable	Symbol	Ranges of levels		
		-1	0	1
Initial pH	$X_1$	4	7	10
Catalyst Loading, g/L	$X_2$	0.5	1.5	2
$[H_2O_2]_0$ , mM	$X_3$	0	1	2

The generation of hydroxyl radicals in the photo Fenton-like oxidation process by using layered double hydroxides was analyzed by radical trapping experiments. Isopropanol and methanol were used as hydroxyl radical scavengers (C. Li et al., 2018; S. Li and Hu, 2016). Under the optimal conditions, kinetic studies were conducted at 25°C, 35°C, and 45°C to evaluate the activation energy and to obtain the reaction rate equation expressing the photocatalysis of OTC-HCl by using the most effective layered double hydroxide.

### **Analysis**

Adsorption and photocatalytic degradation of OTC-HCl was determined by spectrophotometric analysis according to the literature studies (F. Chen et al., 2016; Kang, Xu, and Shi, 2019; B. Liu et al., 2019; Luo et al., 2015; W. Shi et al., 2020). The decrease in OTC-HCl concentration during the photocatalytic oxidation was determined by measuring the absorbance values in a UV-VIS Spectrophotometer. The absorbance was measured at 275 nm since the rings containing N-groups which are associated with the absorbance at 275 nm are harder to open when compared

to the other rings in the OTC-HCl molecule (Soltani, Tayyebi, & Lee, 2019). OTC-HCl degradation was evaluated according to Equation 1:

$$\text{OTC-HCl Degradation, \%} = \frac{[C]_0 - [C]_t}{[C]_t} \times 100 \quad (1)$$

$C_0$ : The initial OTC-HCl concentration, ppm

$C_t$ : OTC-HCl concentration at time t, ppm

### Toxicity Tests

Toxicity tests were performed to determine whether toxic oxidation products are formed during the photocatalytic oxidation (Hoekstra, Bosker, and Lantinga, 2002; Palas, Ersöz, and Atalay, 2019). The toxicity based on growth inhibition was evaluated by measuring the root length of the seeds grown in treated and untreated OTC-HCl solutions and in water. 5 mL treated and untreated OTC-HCl solutions and water were added into separate petri dishes containing *Lepidium sativum* seeds. The seeds were incubated for 3 days in darkness. After 3 days, lengths of the roots growing in different mediums were measured and the inhibition of root growth was calculated based on Eq. 2:

$$\text{Root Growth Inhibition, \%} = \left[ \frac{L_C - L_P}{L_C} \right] \times 100 \quad (2)$$

$L_C$ : Mean length of roots of *L. sativum* growing in water (control medium), cm

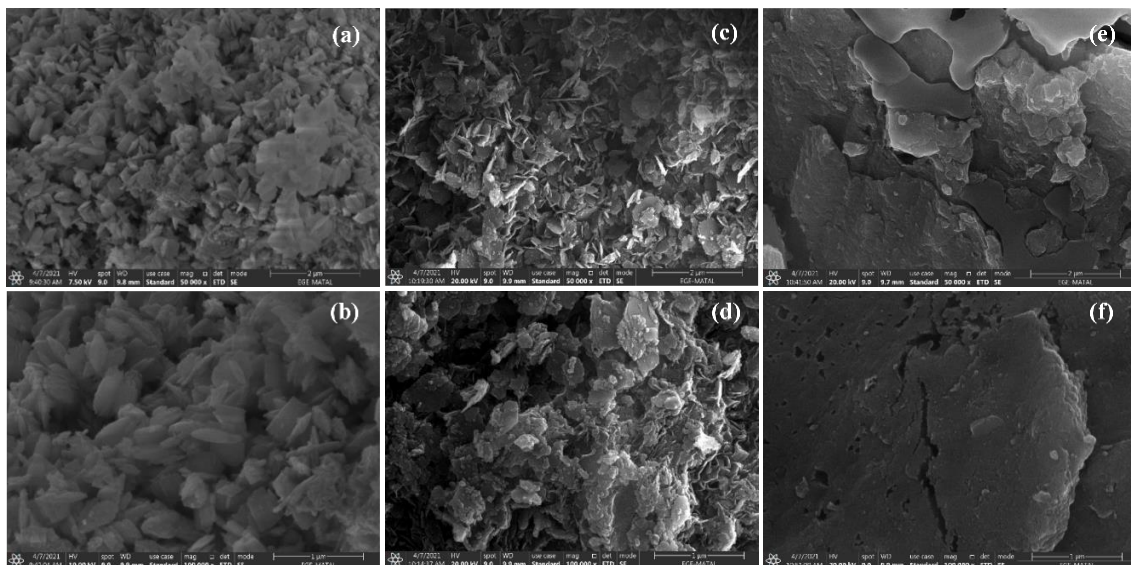
$L_P$ : Mean length of roots of *L. sativum* roots growing in treated or untreated OTC-HCl solutions, cm

## EXPERIMENTAL RESULTS AND DISCUSSIONS

### Characterization of Catalysts

#### Investigation of Surface Morphology

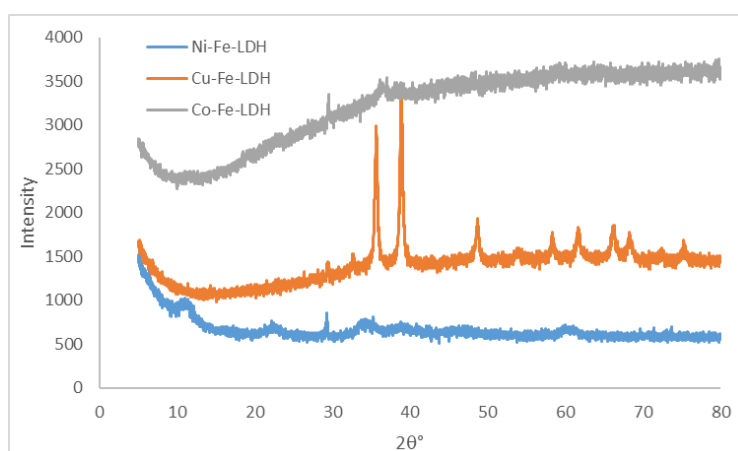
The SEM images of layered double hydroxides are shown in Figure 1. Scanning electron microscope images are recorded at 50000x and 100000x magnifications. As seen in Figure 1, Cu-Fe-LDH catalyst structure is almost homogeneous, and leaf like structures are observed on the surface. Co-Fe-LDH micrographs show that plate-like particles are aggregated and piled indicating the formation of layered double structures. Ni-Fe LDH catalyst samples present aggregates of poorly defined shapes. Ni-Fe-LDH consists of thin layers and coacervates which is the typical product of the co-precipitation method.



**Figure 1.** Scanning Electron Micrographs of Cu-Fe-LDH (a,b), Co-Fe-LDH (c,d), and Ni-Fe-LDH (e,f) Recorded at 50000 and 100000 Times Magnifications

### XRD Analysis

X-ray diffraction analyses were carried out to determine the composition and structural parameters of layered double hydroxide photocatalysts. XRD pattern of Ni-Fe-LDH, Cu-Fe-LDH, and Co-Fe-LDH are presented in Figure 2.



**Figure 2.** XRD Pattern of LDH Photocatalysts

The XRD pattern of Ni-Fe LDH catalyst shows the characteristic peaks of hydrotalcite-like compounds. The sharp and high-intensity peaks indicate the formation of crystalline structures instead of amorphous structures. Well-defined peaks at 11.6°, 35.5°, and 62.9° are assigned to the (003), (009), and (113) planes of the Ni-Fe LDH, respectively, which confirms that the layered double hydroxide crystals are formed (J. Chen et al., 2018; Ren et al., 2019; Sirisomboonchai et al., 2019). The peaks at 29.3° and 50.8° are associated with the impurities of Ni<sub>0.6</sub>Fe<sub>2.4</sub>O<sub>4</sub> phase (Anantharaj et al., 2017) and Ni-Fe alloys (Rosmini et al., 2022).

The diffraction peaks at 27.1°, 29.5°, 36.1°, and 55.2° are indexed into (006), (105), (015), and (110) planes of Co-Fe-LDH (Arif et al., 2019). Cu-Fe LDH displayed several sharp diffraction peaks at 35.9°, 38.9°, 48.5°, 58.0°, 61.8°, 63.2°, 66°, 68.2°, and 75.2°. The XRD pattern showed that Cu-Fe-LDH was well crystallized with a typical layered structure. In the literature, similar XRD patterns are reported for Cu-Fe LDH (L. Liu et al., 2019).

### Surface Analysis

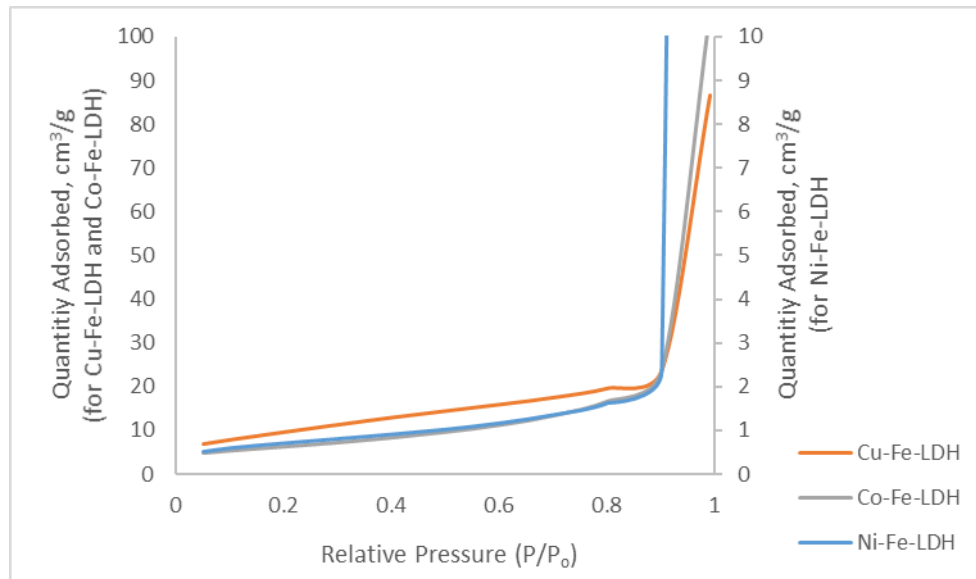
The results of BET surface area measurements performed for Cu-Fe LDH, Ni-Fe LDH, and Co-Fe photocatalysts are presented in Table 2, and the N<sub>2</sub> adsorption isotherms are shown in Figure 3.

	Cu-Fe LDH	Ni-Fe LDH	Co-Fe LDH
BET Surface Area, m <sup>2</sup> /g	35.65	2.55	22.63
Pore Volume, cm <sup>3</sup> /g	0.134	0.125	0.164
Pore Size, Å	150.62	336.19	289.1

The surface areas of the layered double hydroxides prepared in this study and the literature studies are similar. For instance, Utami et al. (2022) reported that the surface area of NiAl LDH is 3.288 m<sup>2</sup>/g (Utami, Ahmad, Zahara, Lesbani, and Mohadi, 2022). Wei et al. (2022) revealed that the surface areas of Mg-Al-Cl LDHs and Ca-Al-CO<sub>3</sub>-LDHs were 8.4 and 7.6 m<sup>2</sup>/g, respectively (Wei, Li, Ye, Rietveld, and van Halem, 2022). N<sub>2</sub> adsorption and desorption isotherms of Ni-Fe-LDH are presented in Figure 3.

The adsorption and desorption isotherms of LDH photocatalysts corresponded to Type III isotherms indicating a multilayer structure according to the IUPAC classification. Type III indicates weak interactions of adsorbent and adsorbate on macroporous adsorbents (Rouquerol et al., 2014). Type-III isotherm is convex with respect to the relative pressure axis throughout the entire range. For each catalyst, the P/P<sub>0</sub> value difference between adsorption and desorption was found to be <0, which tells microporous volume is relatively less. Based on the IUPAC classification, the resemblance of H<sub>3</sub> type hysteresis loop reveals the existence of flat particles or slit-shaped pores (L. Liu et al., 2019; Tagliazucca, et al., 2013).

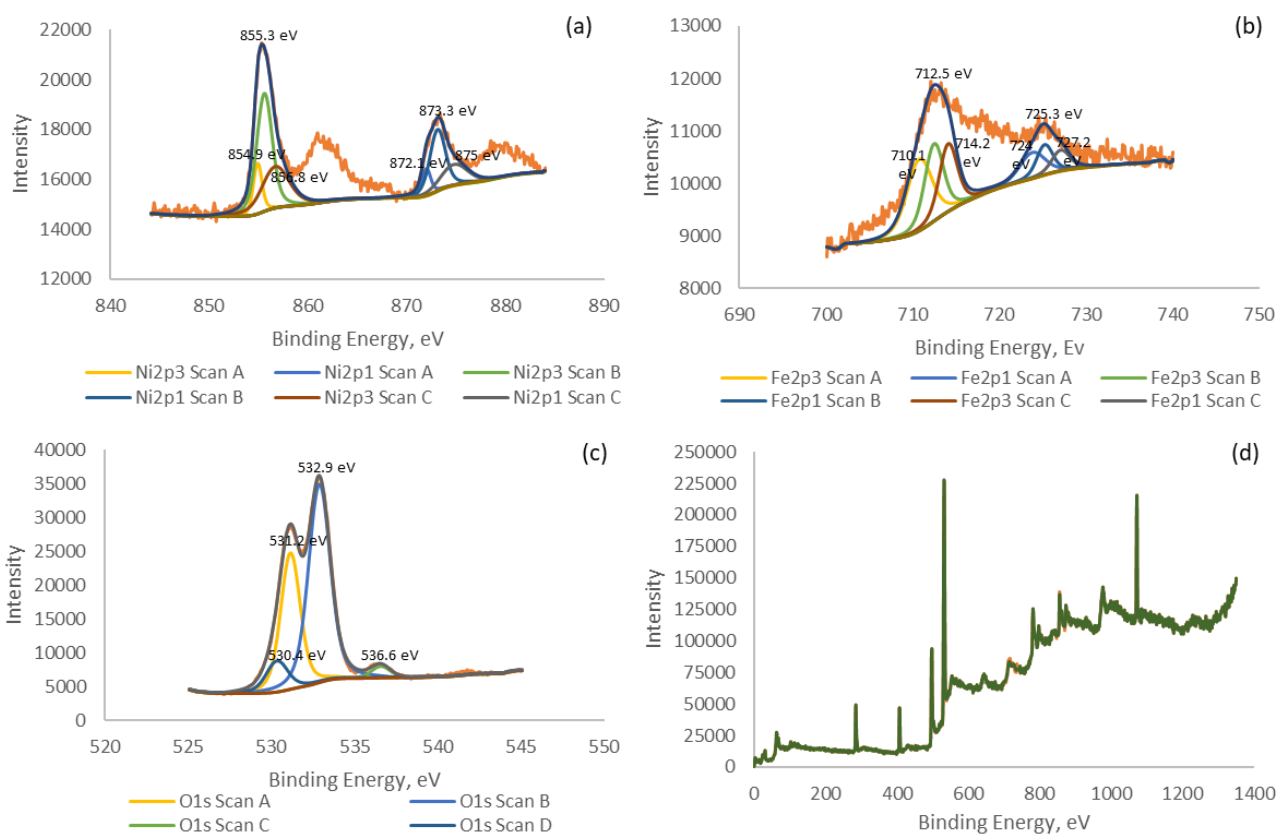




**Figure 3.** N<sub>2</sub> Adsorption and Desorption Isotherms of Layered Double Hydroxides

### XPS Analysis

Valence states of the most effective layered double hydroxide catalyst were determined by XPS analysis and X-ray photoelectron spectra of Ni-Fe-LDH were presented in Figure 4.



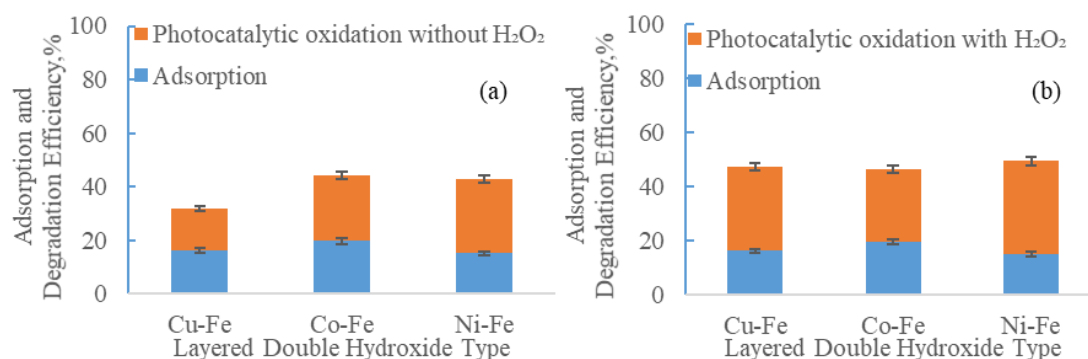
**Figure 4.** XPS Spectrum of Ni-Fe-LDH Catalyst (a) Ni<sub>2p</sub> Scan, (b) Fe<sub>2p</sub> Scan, (c) O<sub>1s</sub> Scan, and (d) XPS Survey

Figure 4 shows the chemical states of nickel, iron, oxygen, and carbon. In Ni 2p spectrum, the peaks are located at 872.08, 856.78, 855.58, 855.28, and 854.88 eV. The peaks observed at 854.88 eV and 855.28 eV are associated with the presence of Ni-O bond and Ni(OH)<sub>2</sub> group, respectively (Mauraya et al., 2022). In Fe 2p spectrum, the peaks are centered at 727.18, 725.28, 723.98, 714.18, 712.48, and 710.88 eV. The peak appeared at 710.88 eV indicating the presence of Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. The peak located at 723.98 eV confirms +3 oxidation state of iron. The peaks are centered at

541.98, 537.18, 536.58, 532.88, 531.18, 530.38 eV. In O1s spectra of Ni-Fe-LDH catalyst, the peaks around 530.38 and 531.18 corresponded to metal-oxygen bond and oxygen defects in the layered double hydroxide, respectively. The peak around 532.88 is attributed to the adsorbed oxygen resulting from hydroxyl groups including adsorbed water (X. Feng et al., 2021; C. Song et al., 2021).

### Catalyst Screening

Antibiotic removal performances of Cu-Fe-LDH, Co-Fe-LDH, and Ni-Fe-LDH layered double hydroxides were studied at pH 4 and 1 g/L of catalyst dose under visible light irradiation. The experimental study was carried out in darkness and without oxidant during the first 30 minutes to reach the adsorption equilibrium. After 30 min, photocatalytic oxidation was maintained for 1 hour under visible light with or without using H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> as an oxidant. In case of using oxidant, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> dosage was fixed at 1 mM. The experimental results obtained from the catalyst screening study are presented in Figure 5.



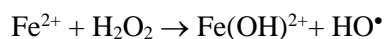
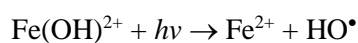
**Figure 5.** Photocatalytic Activities of Various Layered Double Hydroxides in the Absence (a) and in the Presence of Oxidant (b) (Reaction conditions: pH 4, 1 g/L of catalyst loading)

According to the literature survey, a negligible degradation was observed for the photolysis of tetracycline indicating that was stable in the absence of photocatalyst (B. Liu et al., 2019; Reyes et al., 2006; Wu et al., 2020). The experimental results show that the adsorption performances of the layered double hydroxides varied between 15.1% and 19.7%. The highest photocatalytic degradation efficiency was obtained by using a Ni-containing catalyst. The photocatalytic degradation efficiencies of OTC-HCl were evaluated as 15.4%, 24%, and 27.7% by using Cu-Fe-LDH, Co-Fe-LDH, and Ni-Fe-LDH, respectively, whereas these efficiencies increased to 31.1%, 26.9%, and 34.4% in the presence of H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>. The highest cumulative antibiotic removal including the adsorption and photocatalytic oxidation was calculated as 49.5% in the presence of Ni-Fe-LDH catalyst.

### Interactive Influences of Reaction Parameters

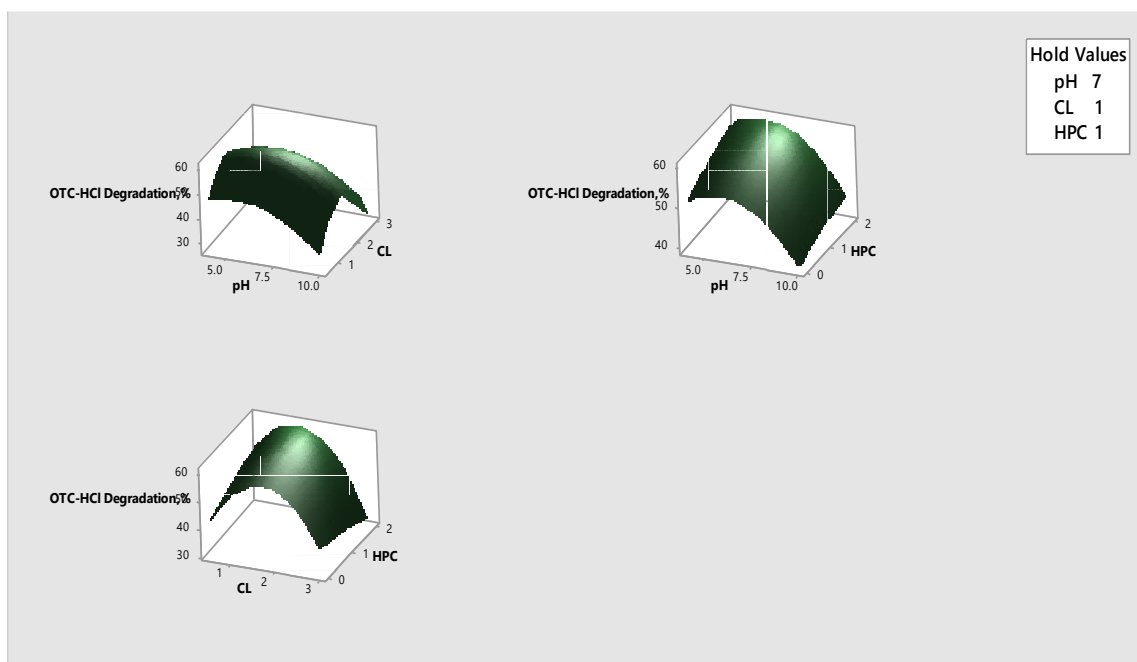
Ni-Fe LDH, which provides the most effective removal, was used in the parametric study. As in the catalyst screening, the experiments were carried out in two sections including the adsorption performed in darkness and the subsequent photocatalysis under visible light irradiation. The parametric study plan was formed based on the Box-Behnken design using the Minitab17 program. The response surface methodology was applied to determine the interactive influences of process variables on antibiotic removal with a confidence level of 95%. The upper and lower limits of the oxidation parameters were 4-10 for pH, 0.5-1.5 g/L for catalyst loading, and 0-2 mM for H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> dosage. The response surface plots showing the interactive influences of catalyst loading (CL), initial pH, and the initial H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> dosage (HPC) are presented in Figure 6.

In photo Fenton oxidation processes, the organic pollutants were decomposed and reacted with the hydroxyl radicals mainly generated in the following reactions:



The reactions of hydroxyl radicals with organic compounds containing C-H or C=C bonds generally proceed with rate constants approaching the diffusion-controlled limit. For this reason, oxidation rates are generally limited by the

rates of hydroxyl radical formation and competition by other hydroxyl radical scavengers in reaction medium rather than by reactivity with the oxidant (Haag and David Yao, 1992).



**Figure 6.** Surface Plots Showing the Interactive Influences of pH and CL (a), pH and HPC (b), and CL and HPC (c) on OTC-HCl Degradation

Catalyst loading is one of the important parameters affecting the hydroxyl radical formation and performance of Fenton oxidation-based processes. In the presence of Ni-Fe-LDH reactive oxygen species are formed in the reactions between the oxidant and both of the ferric and nickel ions. From Figures 6a and 6c, it is concluded that OTC-HCl removal was improved by increasing the catalyst loading up to the optimal value. The enhancement of antibiotic degradation efficiency can be explained by the increase in the number of active sites on the surface of the catalyst at a higher catalyst loading (Q. Feng et al., 2020). However, above the optimal catalyst dose, the removal efficiencies can be explained by  $\cdot\text{OH}$  scavenging resulting from the excess iron and nickel species. Additionally, light penetration through the reaction medium is reduced at high catalyst loadings and the total number of photons that could reach hydrogen peroxide molecules decreases (Kasiri, Aleboye, and Aleboye, 2008). Kerchich et al. (2021) reported that the dye removal efficiencies increased up to 0.5 g/L  $\delta\text{-Fe}_2\text{O}_3/\text{MgAl-LDH}$  photocatalyst dose due to the increase in absorption sites on the catalyst surface leading to the formation of hydroxyl radicals. However, above the optimum photocatalyst dosage, the removal efficiencies decreased due to the reduction of the light penetration and the agglomeration of the photocatalyst particles (Kerchich, et al., 2021).

Figures 6a and 6b depicted that increasing the initial pH resulted in decrease in OTC-HCl degradation. Fenton-based processes at acidic conditions. The lower degradation efficiency at high pH values can be attributed to the decomposition of hydrogen peroxide into water and oxygen which reduces the formation of  $\cdot\text{OH}$  (Arshadi et al., 2016). Moreover, the performance of Fenton-based processes decreases at basic conditions due to the tendency to formation of  $\text{HO}_2\cdot$  that is less reactive than  $\cdot\text{OH}$ .

Similarly, the improvement of antibiotic degradation in acidic medium by using layered double hydroxide catalysts is reported in literature studies. Sahoo et al. (2019) reported that tetracycline degradation efficiency is maximum at pH 4.5 since in a weak acidic environment, hydrogen ions can easily react with  $\cdot\text{O}_2^-$  to generate  $\cdot\text{OH}$  (Sahoo, Patnaik, and Parida, 2019). Song et al. (2022) stated that the photocatalytic performance of  $\text{Ce}/\text{TiO}_2@\text{LDH}$  decreases with the increase of pH value due to the hydroxide anions coming from high pH conditions reacted with hydroxyl radicals, resulting in the deactivation of hydroxyl radicals (Z. Song, Gao, Liao, Zhang, and Wang, 2022).

The increase in oxidant dosage favored antibiotic degradation. Studies in the literature are also consistent with the fact that the use of hydrogen peroxide increases antibiotic removal up to the optimal dosage. For instance, Gholami et al. (2020) revealed that the addition of hydrogen peroxide favored the photocatalytic degradation of gemifloxacin

antibiotic using Zn-Co-LDH@biochar photocatalyst (Gholami, Khataee, Soltani, Dinpazhoh, and Bhatnagar, 2020). However, the excessive use of oxidant also reduces the degradation efficiencies. Yang et al. (2022) revealed that in the presence of FeNi-LDH/Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>, the tetracycline degradation efficiency was remarkably decreased at high H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> concentration since excessive H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> quench the hydroxyl radicals to produce hydroperoxyl radicals which further consume the hydroxyl radicals (Yang et al., 2022).

The variation in H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> dosage was less effective than pH. It is recommended to operate near the upper boundary of oxidant dosage in an acidic medium to reach the highest OTC-HCl degradation.

By the synergetic effect of H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> and metal ions (M), hydroxyl radicals are formed in the following reaction:



To examine the interactive influences of catalyst and H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> loadings, the catalyst loading was changed in the range of 0.5 and 1.5 g/L whereas the pH varied between 4 and 10. Figure 5c depicts that catalyst loading was more effective in comparison to hydrogen peroxide dosage since the variation in antibiotic degradation efficiency with respect to catalyst loading was higher than the variation with respect to oxidant dosage.

### Response Optimization

The optimal photo Fenton-like oxidation conditions were decided by maximizing the OTC-HCl degradation. Catalyst dose, pH, and the initial H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> dosage were optimized at 1.5 g/L, 5, and 1.48 mM, respectively, and the degradation efficiency is predicted as 68.7%. A set of experiments were conducted at the optimal conditions to test the accuracy of the model by the comparison of the predicted and the experimental degradation efficiencies. Under the optimal conditions, 67.1% OTC-HCl degradation was achieved. The error was calculated as approximately 2.3%. Since the calculated error is below 10%, the model equation can be accepted as accurate and used to predict the degradation at any reaction condition in the range of the defined upper and lower boundaries of reaction parameters. The decrease in OTC-HCl concentration under the optimal conditions is shown in Figure 7.

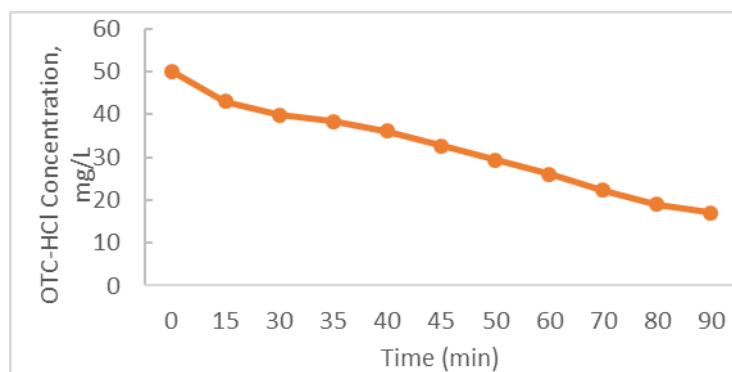


Figure 7. The Decrease in OTC-HCl Concentration under the Optimum Photocatalytic Conditions

### Radical Quenching Experiments

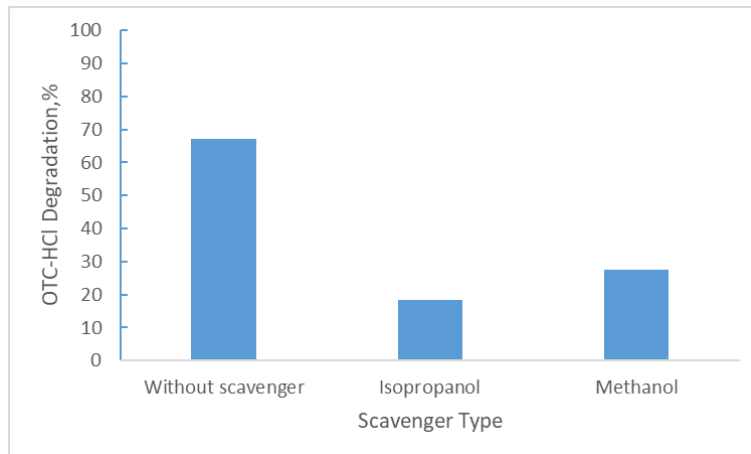
To determine whether  $^{\bullet}OH$  radicals are generated during the photo Fenton-like reactions, OTC-HCl degradation was calculated both in the presence and absence of hydroxyl radical scavengers. Radical trapping studies were performed at the optimal operating conditions by adding isopropanol or methanol separately. The degradation efficiencies obtained by the addition of radical quenchers are given in Figure 8.

Antibiotic degradation efficiencies decreased by the addition of methanol and isopropanol significantly. OTC-HCl degradation efficiencies were evaluated as 27.4% and 18.5% by using methanol and isopropanol, respectively. The results demonstrated that mainly  $^{\bullet}OH$  was involved and played an effective role in OTC-HCl degradation.

### Toxicity Tests

In the context of this study, the photocatalytic conditions including the photocatalyst and oxidant dosages and pH were optimized by using response surface methodology and Box-Behnken Design. The toxicity of the photocatalytic oxidation products was analyzed for the optimized reaction conditions which are recommended for practical

applications in further studies. Toxicity tests were performed to assess the toxicity of the intermediates and end products generated during the photocatalytic oxidation of OTC-HCl by using layered double hydroxides.



**Figure 8.** Radical Trapping Experimental Results

The mean root lengths of *L. sativum* roots growing in treated and untreated OTC-HCl solutions were 19.46 and 14.66 mm, respectively, whereas the mean length of the roots growing in water was 37.13 mm. The toxicity of the untreated and treated pharmaceutical solutions in terms of growth inhibition was calculated as 60.51% and 47.59%, respectively. Since the growth inhibition was reduced by 12.92% after the photo Fenton-like oxidation treatment in the presence of Ni-Fe-LDH catalyst, it is determined that this treatment method and Ni-Fe-LDH photocatalyst were effective in decreasing the toxicity of OTC-HCl solutions.

### Kinetic Study

Kinetic studies were conducted to derive reaction rate equation expressing photocatalytic degradation of the parent compound, OTC-HCl using layered double hydroxides. The kinetic study on oxytetracycline hydrochloride degradation in the presence of Ni-Fe-LDH was carried out in a temperature range of 25-45°C under the optimal reaction conditions which were determined as pH 5, 1.5 g/L catalyst loading, and 1.48 mM H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> dosage. The initial OTC-HCl dosage was fixed at 50 mg/L in the kinetic study. For the determination of the most suitable kinetic model for the kinetic data, power rate models, which are the most commonly used reaction kinetic models, were proposed and the most appropriate reaction rate expression was determined by comparing the regression coefficients. The suitability of the 1<sup>st</sup> and 2<sup>nd</sup> order reaction rate models given in Equations 3 and 4 were tested by the application of regression analysis.

$$\frac{dC_{\text{OTC-HCl}}}{dt} = -k_1 C_{\text{OTC-HCl}} \quad \text{by integrating: } \ln \frac{[C_{\text{OTC-HCl}}]_0}{[C_{\text{OTC-HCl}}]} = k_1 t \quad (3)$$

$$\frac{dC_{\text{OTC-HCl}}}{dt} = -k_2 C_{\text{OTC-HCl}}^2 \quad \text{by integrating: } \frac{1}{[C_{\text{OTC-HCl}}]} = \frac{1}{[C_{\text{OTC-HCl}}]_0} + k_2 t \quad (4)$$

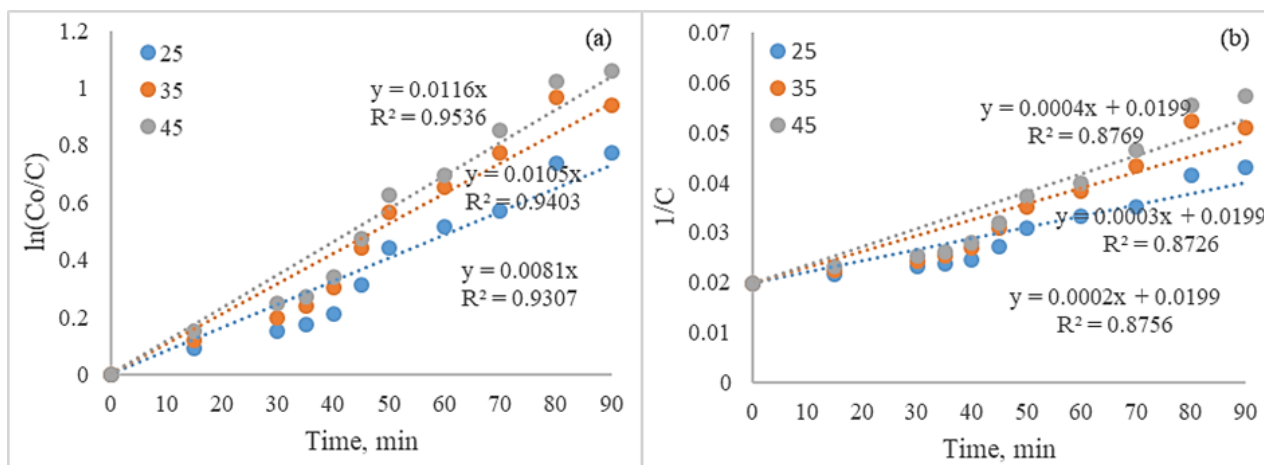
where  $C_{\text{OTC-HCl}}$  [mg/L] is the concentration of OTC-HCl,  $k_1$  [min<sup>-1</sup>] and  $k_2$  [L.mg<sup>-1</sup>.min<sup>-1</sup>] are the first and second-order reaction rate constants, respectively, and  $t$  [min] is the reaction time.

The graphics showing the 1<sup>st</sup> and the 2<sup>nd</sup> order reaction rates and corresponding regression coefficients are presented in Figure 9, and the calculated values of the kinetic parameters are tabulated in Table 3.

**Table 3.** Regression Coefficients and Rate Constants Calculated based on the 1<sup>st</sup> and 2<sup>nd</sup> Order Reaction Rate Models

	1 <sup>st</sup> Order Reaction Rate Model		2 <sup>nd</sup> Order Reaction Rate Model	
	$k_1$ [min <sup>-1</sup> ]	R <sup>2</sup>	$k_2$ [L.mg <sup>-1</sup> .min <sup>-1</sup> ]	R <sup>2</sup>
25°C	0.0081	0.93	0.0002	0.88
35°C	0.0105	0.94	0.0003	0.878
45°C	0.0116	0.95	0.0004	0.88

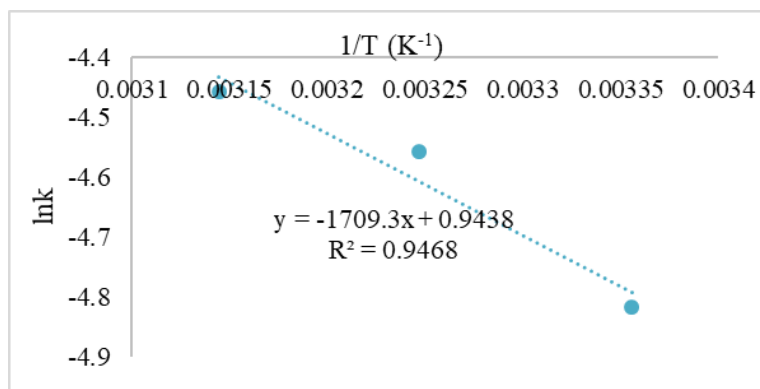
k: Reaction rate constant, R<sup>2</sup>: Regression coefficient



**Figure 9.** Regression Coefficients and Reaction Rate Constants Derived based on the 1<sup>st</sup> (a) and 2<sup>nd</sup> (b) Order Reaction Rate Models

As the reaction temperature rose from 25°C to 45°C, the reaction rate constants increased due to the faster antibiotic degradation. The high  $R^2$  values varying between 0.93 and 0.96 indicated that the 1<sup>st</sup> order reaction rate model fit well with the antibiotic degradation data. It has been reported in many literature studies that the tetracycline degradation in photo Fenton oxidation processes follows first-order reaction kinetics (Lu et al., 2023; Palanivel et al., 2021; Thi et al., 2022; Yuan et al., 2023).

The Arrhenius plot of photo Fenton-like oxidation of OTC-HCl by using Ni-Fe-LDH (Figure 10) was drawn by using first-order rate constant. The activation energy and Arrhenius constant were determined as 14.21 kJ/mol and 2.58 L.mg<sup>-1</sup>min<sup>-1</sup>, respectively. This value is slightly higher than the activation of the diffusion controlling reactions, which is usually in the range of 10–13 kJ/mol indicating that the intrinsic chemical reactions on the catalyst surface are more effective than the rate of mass transfer (Zhou et al., 2022).



**Figure 10.** Arrhenius Plot Drawn based on the 1<sup>st</sup> Order Reaction Rate Model

In literature, the reported values of activation energies calculated for photo-Fenton like oxidation of tetracycline antibiotics are usually similar to or higher than activation energy value determined in this study. For instance, Yuan et al. (2023) reported 39.8 kJ/mol of activation energy for tetracycline hydrochloride removal in the presence of Fe<sub>3</sub>S<sub>4</sub>/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> catalyst (Yuan et al., 2023). Thi et al. (2022) evaluated the activation energy as 17.91 kJ/mol for tetracycline removal in the presence of Prussian blue decorated g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> as photo-Fenton catalyst (Thi et al., 2022). Zhou et al. (2022) evaluated the activation energy as 27.88 kJ/mol for tetracycline hydrochloride removal by using Fe<sub>3</sub>S<sub>4</sub>/MoS<sub>2</sub> catalyst (Zhou et al., 2022). Activation energy calculated in the present study is lower than that in the literature, indicating that the tetracycline degradation by photocatalytic reaction requires a relatively low energy and can be easily achieved.

## CONCLUSIONS

The photocatalytic performances of various layered double hydroxides including Ni-Fe-LDH, Co-Fe-LDH, and Cu-Fe-LDH were synthesized, and their visible light-driven catalytic activities were compared for the degradation of the

target veterinary antibiotic. Ni-Fe-LDH exhibited the highest photocatalytic performance in photo Fenton-like oxidation. The interactive influences of catalyst dosage, pH, and H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> dose on OTC-HCl degradation were analyzed, and the reaction conditions were maximized according to Box-Behnken design. Oxytetracycline hydrochloride degradation was optimized at pH 5, 1.5 g/L of catalyst loading, and 1.48 mM H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> concentration. At the optimal reaction conditions, 67.1% antibiotic degradation was achieved. Hydroxyl radicals were the main reactive active species responsible for the antibiotic degradation. The photo Fenton oxidation of the antibiotic fits the first-order reaction rate model well. The low activation energy showed that rapid reactions occur by using Ni-Fe-LDH catalyst. The toxicity was reduced by 12.92% during the photocatalytic oxidation.

Investigation of the photocatalytic performances of copper, cobalt, and nickel containing layered double hydroxides for the degradation of veterinary antibiotics, optimization of the reaction conditions by response surface methods, and derivation of kinetic models expressing the OTC-HCl degradation in the presence of layered double hydroxides, and toxicity assessment under optimized conditions constitute the innovative approaches of this experimental study.

The results indicated that the Ni-Fe-LDH is a promising and efficient candidate to be used as a photocatalyst in environmentally friendly applications of veterinary pharmaceutical wastewater treatment. The application of efficient wastewater technologies would contribute to the protection of aquatic life and improvement of environmental health by keeping the water sources clean. The kinetic models expressing the pollutant degradation can provide background for scale-up studies and can encourage practical applications of environmentally friendly advanced oxidation methods in wastewater treatment facilities.

## ACKNOWLEDGEMENT

This study was supported by Ege University Scientific Research Project Fund [FYL-2020-22394].

## REFERENCES

- Adeyemi, J. O., Ajiboye, T., & Onwudiwe, D. C. (2021). Mineralization of Antibiotics in Wastewater Via Photocatalysis. *Water, Air, & Soil Pollution*, 232(5), 219. <https://doi.org/10.1007/s11270-021-05167-3>
- Anantharaj, S., Karthick, K., Venkatesh, M., Simha, T. V. S. V., Salunke, A. S., Ma, L., ... Kundu, S. (2017). Enhancing electrocatalytic total water splitting at few layer Pt-NiFe layered double hydroxide interfaces. *Nano Energy*, 39(June), 30–43. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2017.06.027>
- Ao, X., Sun, W., Li, S., Yang, C., Li, C., & Lu, Z. (2019). Degradation of tetracycline by medium pressure UV-activated peroxymonosulfate process: Influencing factors, degradation pathways, and toxicity evaluation. *Chemical Engineering Journal*, 361, 1053–1062. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.12.133>
- Arif, M., Yasin, G., Shakeel, M., Mushtaq, M. A., Ye, W., Fang, X., ... Yan, D. (2019). Hierarchical CoFe-layered double hydroxide and g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> heterostructures with enhanced bifunctional photo/electrocatalytic activity towards overall water splitting. *Materials Chemistry Frontiers*, 3(3), 520–531. <https://doi.org/10.1039/C8QM00677F>
- Arshadi, M., Abdolmaleki, M. K., Mousavinia, F., Khalafi-Nezhad, A., Firouzabadi, H., & Gil, A. (2016). Degradation of methyl orange by heterogeneous Fenton-like oxidation on a nano-organometallic compound in the presence of multi-walled carbon nanotubes. *Chemical Engineering Research and Design*, 112, 113–121. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2016.05.028>
- Bagherzadeh, S. B., Kazemeini, M., & Mahmoodi, N. M. (2021). Preparation of novel and highly active magnetic ternary structures (metal-organic framework/cobalt ferrite/graphene oxide) for effective visible-light-driven photocatalytic and photo-Fenton-like degradation of organic contaminants. *Journal of Colloid and Interface Science*, 602, 73–94. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2021.05.181>
- Chauhan, R., Dinesh, G. K., Alawa, B., & Chakma, S. (2021). A critical analysis of sono-hybrid advanced oxidation process of ferrioxalate system for degradation of recalcitrant pollutants. *Chemosphere*, 277, 130324. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.130324>
- Chen, C. R., Zeng, H. Y., Yi, M. Y., Xiao, G. F., Zhu, R. L., Cao, X. J., ... Peng, J. W. (2019). Fabrication of Ag<sub>2</sub>O/Ag decorated ZnAl-layered double hydroxide with enhanced visible light photocatalytic activity for tetracycline degradation. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 172(February), 423–431. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.01.080>

- Chen, F., Yang, Q., Sun, J., Yao, F., Wang, S., Wang, Y., ... Zeng, G. (2016). Enhanced Photocatalytic Degradation of Tetracycline by AgI/BiVO<sub>4</sub> Heterojunction under Visible-Light Irradiation: Mineralization Efficiency and Mechanism. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 8(48), 32887–32900. <https://doi.org/10.1021/acsami.6b12278>
- Chen, J., Zheng, F., Zhang, S. J., Fisher, A., Zhou, Y., Wang, Z., ... Sun, S. G. (2018). Interfacial Interaction between FeOOH and Ni-Fe LDH to Modulate the Local Electronic Structure for Enhanced OER Electrocatalysis. *ACS Catalysis*, 8(12), 11342–11351. <https://doi.org/10.1021/acscatal.8b03489>
- Done, H. Y., Venkatesan, A. K., & Halden, R. U. (2015). Does the Recent Growth of Aquaculture Create Antibiotic Resistance Threats Different from those Associated with Land Animal Production in Agriculture? *AAPS Journal*, 17(3), 513–524. <https://doi.org/10.1208/s12248-015-9722-z>
- Fan, H., Zhu, J., Sun, J., Zhang, S., & Ai, S. (2013). Ag/AgBr/Co-Ni-NO<sub>3</sub> Layered Double Hydroxide Nanocomposites with Highly Adsorptive and Photocatalytic Properties. *Chemistry - A European Journal*, 19(7), 2523–2530. <https://doi.org/10.1002/chem.201203408>
- Feng, Q., Zhou, J., Luo, W., Ding, L., & Cai, W. (2020). Photo-Fenton removal of tetracycline hydrochloride using LaFeO<sub>3</sub> as a persulfate activator under visible light. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 198(April), 110661. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.110661>
- Feng, X., Shi, Y., Shi, J., Hao, L., & Hu, Z. (2021). Superhydrophilic 3D peony flower-like Mo-doped Ni<sub>2</sub>S<sub>3</sub>@NiFe LDH heterostructure electrocatalyst for accelerating water splitting. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(7), 5169–5180. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.11.018>
- Gholami, P., Khataee, A., Soltani, R. D. C., Dinpazhoh, L., & Bhatnagar, A. (2020). Photocatalytic degradation of gemifloxacin antibiotic using Zn-Co-LDH@biochar nanocomposite. *Journal of Hazardous Materials*, 382, 121070. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.121070>
- Gothwal, R., & Shashidhar, T. (2015). Antibiotic Pollution in the Environment: A Review. *CLEAN – Soil, Air, Water*, 43(4), 479–489. <https://doi.org/10.1002/clen.201300989>
- Gupta, A. D., Singh, H., Varjani, S., Awasthi, M. K., Giri, B. S., & Pandey, A. (2022). A critical review on biochar-based catalysts for the abatement of toxic pollutants from water via advanced oxidation processes (AOPs). *Science of the Total Environment*, 849(June), 157831. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157831>
- Haag, W. R., & David Yao, C. C. (1992). Rate Constants for Reaction of Hydroxyl Radicals with Several Drinking Water Contaminants. *Environmental Science and Technology*, 26(5), 1005–1013. <https://doi.org/10.1021/es00029a021>
- Hoekstra, N. J., Bosker, T., & Lantinga, E. A. (2002). Effects of cattle dung from farms with different feeding strategies on germination and initial root growth of cress (*Lepidium sativum* L.). *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 93(1–3), 189–196. [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(01\)00348-6](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(01)00348-6)
- Kang, N., Xu, D., & Shi, W. (2019). Synthesis plasmonic Bi/BiVO<sub>4</sub> photocatalysts with enhanced photocatalytic activity for degradation of tetracycline (TC). *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 27(12), 3053–3059. <https://doi.org/10.1016/j.cjche.2019.05.008>
- Kasiri, M. B., Aleboye, H., & Aleboye, A. (2008). Degradation of Acid Blue 74 using Fe-ZSM5 zeolite as a heterogeneous photo-Fenton catalyst. *Applied Catalysis B: Environmental*, 84(1–2), 9–15. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2008.02.024>
- Kerchich, S., Boudjemaa, A., Chebout, R., Bachari, K., & Mameri, N. (2021). High performance of δ-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> novel photo-catalyst supported on LDH structure. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 406, 113001. <https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2020.113001>
- Khataee, A., Sadeghi Rad, T., Nikzat, S., Hassani, A., Aslan, M. H., Kobya, M., & Demirbaş, E. (2019). Fabrication of NiFe layered double hydroxide/reduced graphene oxide (NiFe-LDH/rGO) nanocomposite with enhanced sonophotocatalytic activity for the degradation of moxifloxacin. *Chemical Engineering Journal*, 375(June), 122102. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.122102>
- Leavey-Roback, S. L., Krasner, S. W., & Suffet, I. M. H. (2016). Veterinary antibiotics used in animal agriculture as NDMA precursors. *Chemosphere*, 164, 330–338. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.08.070>
- Li, C., Sun, Z., Zhang, W., Yu, C., & Zheng, S. (2018). Highly efficient g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/TiO<sub>2</sub>/kaolinite composite with novel



- three-dimensional structure and enhanced visible light responding ability towards ciprofloxacin and *S. aureus*. *Applied Catalysis B: Environmental*, 220, 272–282. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2017.08.044>
- Li, F., & Duan, X. (2005). Applications of Layered Double Hydroxides. In *Layered Double Hydroxides* (pp. 193–223). Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag. [https://doi.org/10.1007/430\\_007](https://doi.org/10.1007/430_007)
- Li, S., & Hu, J. (2016). Photolytic and photocatalytic degradation of tetracycline: Effect of humic acid on degradation kinetics and mechanisms. *Journal of Hazardous Materials*, 318(June), 134–144. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2016.05.100>
- Lin, L., Wang, H., Jiang, W., Mkaouar, A. R., & Xu, P. (2017). Comparison study on photocatalytic oxidation of pharmaceuticals by TiO<sub>2</sub>-Fe and TiO<sub>2</sub>-reduced graphene oxide nanocomposites immobilized on optical fibers. *Journal of Hazardous Materials*, 333, 162–168. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2017.02.044>
- Liu, B., Wu, Y., Zhang, J., Han, X., & Shi, H. (2019). Visible-light-driven g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/Cu<sub>2</sub>O heterostructures with efficient photocatalytic activities for tetracycline degradation and microbial inactivation. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 378(April), 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2019.04.007>
- Liu, L., Li, S., An, Y., Sun, X., Wu, H., Li, J., ... Li, H. (2019). Hybridization of Nanodiamond and CuFe-LDH as Heterogeneous Photoactivator for Visible-Light Driven Photo-Fenton Reaction: Photocatalytic Activity and Mechanism. *Catalysts*, 9(2), 118. <https://doi.org/10.3390/catal9020118>
- Lu, C., Wang, J., Cao, D., Guo, F., Hao, X., Li, D., & Shi, W. (2023). Synthesis of magnetically recyclable g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub>/NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> S-scheme heterojunction photocatalyst with promoted visible-light-response photo-Fenton degradation of tetracycline. *Materials Research Bulletin*, 158, 112064. <https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2022.112064>
- Luo, B., Xu, D., Li, D., Wu, G., Wu, M., Shi, W., & Chen, M. (2015). Fabrication of a Ag/Bi<sub>3</sub>TaO<sub>7</sub> Plasmonic Photocatalyst with Enhanced Photocatalytic Activity for Degradation of Tetracycline. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 7(31), 17061–17069. <https://doi.org/10.1021/acsami.5b03535>
- Mandal, S., Mayadevi, S., & Kulkarni, B. D. (2009). Adsorption of aqueous selenite [Se(IV)] species on synthetic layered double Hydroxide Materials. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 48(17), 7893–7898. <https://doi.org/10.1021/ie900136s>
- Mauraya, A. K., Mahana, D., Jhaa, G., Pradhan, B. K., Roopa, Tomer, S., ... Muthusamy, S. K. (2022). Heterostructure nanoarchitectonics with ZnO/SnO<sub>2</sub> for ultrafast and selective detection of CO gas at low ppm levels. *Ceramics International*, 48(24), 36556–36569. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2022.08.215>
- Michael, I., Rizzo, L., Mc Ardell, C. S., Manaia, C. M., Merlin, C., Schwartz, T., ... Fatta-Kassinos, D. (2013). Urban wastewater treatment plants as hotspots for the release of antibiotics in the environment: A review. *Water Research*, 47(3), 957–995. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2012.11.027>
- Mikami, G., Grosu, F., Kawamura, S., Yoshida, Y., Carja, G., & Izumi, Y. (2016). Harnessing self-supported Au nanoparticles on layered double hydroxides comprising Zn and Al for enhanced phenol decomposition under solar light. *Applied Catalysis B: Environmental*, 199, 260–271. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2016.06.031>
- Ngigi, A. N., Magu, M. M., & Muendo, B. M. (2020). Occurrence of antibiotics residues in hospital wastewater, wastewater treatment plant, and in surface water in Nairobi County, Kenya. *Environmental Monitoring and Assessment*, 192(1), 18. <https://doi.org/10.1007/s10661-019-7952-8>
- Palanivel, B., Shkir, M., Alshahrani, T., & Mani, A. (2021). Novel NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> deposited S-doped g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> nanorod: Visible-light-driven heterojunction for photo-Fenton like tetracycline degradation. *Diamond and Related Materials*, 112, 108148. <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2020.108148>
- Palas, B., Ersöz, G., & Atalay, S. (2019). Bioinspired metal oxide particles as efficient wet air oxidation and photocatalytic oxidation catalysts for the degradation of acetaminophen in aqueous phase. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 182, 109367. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2019.109367>
- Panplado, K., Subsadsana, M., Srijaranai, S., & Sansuk, S. (2019). Rapid Removal and Efficient Recovery of Tetracycline Antibiotics in Aqueous Solution Using Layered Double Hydroxide Components in an In Situ-Adsorption Process. *Crystals*, 9(7), 342. <https://doi.org/10.3390/cryst9070342>
- Papa, E., & Gramatica, P. (2008). Screening of persistent organic pollutants by QSPR classification models: A

- comparative study. *Journal of Molecular Graphics and Modelling*, 27(1), 59–65. <https://doi.org/10.1016/j.jm gm.2008.02.004>
- Ren, L., Wang, C., Li, W., Dong, R., Sun, H., Liu, N., & Geng, B. (2019). Heterostructural NiFe-LDH@Ni<sub>3</sub>S<sub>2</sub> nanosheet arrays as an efficient electrocatalyst for overall water splitting. *Electrochimica Acta*, 318, 42–50. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2019.06.060>
- Reyes, C., Fernández, J., Freer, J., Mondaca, M. A., Zaror, C., Malato, S., & Mansilla, H. D. (2006). Degradation and inactivation of tetracycline by TiO<sub>2</sub> photocatalysis. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 184(1–2), 141–146. <https://doi.org/10.1016/j.jphotochem.2006.04.007>
- Rokesh, K., Sakar, M., & Do, T.-O. (2021). Emerging Hybrid Nanocomposite Photocatalysts for the Degradation of Antibiotics: Insights into Their Designs and Mechanisms. *Nanomaterials*, 11(3), 572. <https://doi.org/10.3390/nano11030572>
- Rosmini, C., Tsoncheva, T., Kovatcheva, D., Velinov, N., Kolev, H., Karashanova, D., ... Lázaro, M. J. (2022). Mesoporous Ce–Fe–Ni nanocomposites encapsulated in carbon-nanofibers: Synthesis, characterization and catalytic behavior in oxygen evolution reaction. *Carbon*, 196(April), 186–202. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2022.04.036>
- Rouquerol, F., Rouquerol, J., Sing, K. S. W., Maurin, G., & Llewellyn, P. (2014). Introduction. In *Adsorption by Powders and Porous Solids: Principles, Methodology and Applications: Second Edition* (pp. 1–24). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-097035-6.00001-2>
- Sahoo, D. P., Patnaik, S., & Parida, K. (2019). Construction of a Z-Scheme Dictated WO<sub>3-x</sub>/Ag/ZnCr LDH Synergistically Visible Light-Induced Photocatalyst towards Tetracycline Degradation and H<sub>2</sub> Evolution. *ACS Omega*, 4(12), 14721–14741. <https://doi.org/10.1021/acsomega.9b01146>
- Samanidou, V. F., Nikolaidou, K. I., & Papadoyannis, I. N. (2007). Advances in chromatographic analysis of tetracyclines in foodstuffs of animal origin - A review. *Separation and Purification Reviews*, 36(1), 1–69. <https://doi.org/10.1080/15422110600822758>
- Sarmah, A. K., Meyer, M. T., & Boxall, A. B. A. (2006). A global perspective on the use, sales, exposure pathways, occurrence, fate and effects of veterinary antibiotics (VAs) in the environment. *Chemosphere*, 65(5), 725–759. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2006.03.026>
- Shi, W., Ren, H., Li, M., Shu, K., Xu, Y., Yan, C., & Tang, Y. (2020). Tetracycline removal from aqueous solution by visible-light-driven photocatalytic degradation with low cost red mud wastes. *Chemical Engineering Journal*, 382, 122876. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.122876>
- Shi, Z., Wang, Y., Sun, S., Zhang, C., & Wang, H. (2020). Removal of methylene blue from aqueous solution using Mg-Fe, Zn-Fe, Mn-Fe layered double hydroxide. *Water Science and Technology*, 81(12), 2522–2532. <https://doi.org/10.2166/wst.2020.313>
- Sirisomboonchai, S., Li, S., Yoshida, A., Li, X., Samart, C., Abudula, A., & Guan, G. (2019). Fabrication of NiO Microflake@NiFe-LDH Nanosheet Heterostructure Electrocatalysts for Oxygen Evolution Reaction. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, 7(2), 2327–2334. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.8b05088>
- Soltani, T., Tayyebi, A., & Lee, B. K. (2019). Photolysis and photocatalysis of tetracycline by sonochemically heterojunctioned BiVO<sub>4</sub>/reduced graphene oxide under visible-light irradiation. *Journal of Environmental Management*, 232(September 2017), 713–721. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.11.133>
- Song, C., Liu, Y., Wang, Y., Tang, S., Li, W., Li, Q., ... Lei, Y. (2021). Highly efficient oxygen evolution and stable water splitting by coupling NiFe LDH with metal phosphides. *Science China Materials*, 64(7), 1662–1670. <https://doi.org/10.1007/s40843-020-1566-6>
- Song, Z., Gao, H., Liao, G., Zhang, W., & Wang, D. (2022). A novel slag-based Ce/TiO<sub>2</sub>@LDH catalyst for visible light driven degradation of tetracycline: performance and mechanism. *Journal of Alloys and Compounds*, 901, 163525. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.163525>
- Tagliazucca, V., Schlichte, K., Schüth, F., & Weidenthaler, C. (2013). Molybdenum-based catalysts for the decomposition of ammonia: In situ X-ray diffraction studies, microstructure, and catalytic properties. *Journal of Catalysis*, 305, 277–289. <https://doi.org/10.1016/j.jcat.2013.05.011>
- Thi, L. N., Phan, T. T. T., Ngoc, T. N., Viswanath, N. S. M., Le, H. T. T., Tran Thi, L., ... Vo, V. (2022). Prussian

- Blue decorated g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> – From novel synthesis to insight study on charge transfer strategy for improving visible-light driven photo-Fenton catalytic activity. *Journal of Alloys and Compounds*, 916, 165331. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2022.165331>
- Utami, H. P., Ahmad, N., Zahara, Z. A., Lesbani, A., & Mohadi, R. (2022). Green Synthesis of Nickel Aluminum Layered Double Hydroxide using Chitosan as Template for Adsorption of Phenol. *Science and Technology Indonesia*, 7(4), 530–535. <https://doi.org/10.26554/sti.2022.7.4.530-535>
- Wei, L., Li, Z., Ye, G., Rietveld, L. C., & van Halem, D. (2022). Comparative study of low-cost fluoride removal by layered double hydroxides, geopolymers, softening pellets and struvite. *Environmental Technology (United Kingdom)*, 43(27), 4306–4314. <https://doi.org/10.1080/09593330.2021.1946600>
- Wu, S., Hu, H., Lin, Y., Zhang, J., & Hu, Y. H. (2020). Visible light photocatalytic degradation of tetracycline over TiO<sub>2</sub>. *Chemical Engineering Journal*, 382, 122842. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.122842>
- Yan, J., Chen, Y., Qian, L., Gao, W., Ouyang, D., & Chen, M. (2017). Heterogeneously catalyzed persulfate with a CuMgFe layered double hydroxide for the degradation of ethylbenzene. *Journal of Hazardous Materials*, 338, 372–380. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2017.05.007>
- Yang, L., Li, L., Liu, Z., Lai, C., Yang, X., Shi, X., ... Tang, C. (2022). Degradation of tetracycline by FeNi-LDH/Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub> photo-Fenton system in water: From performance to mechanism. *Chemosphere*, 294(November 2021), 133736. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.133736>
- Yildirim-Tirgil, N., Lee, J., Cho, H., Lee, H., Somu, S., Busnaina, A., & Gu, A. Z. (2019). A SWCNT based aptasensor system for antibiotic oxytetracycline detection in water samples. *Analytical Methods*, 11(20), 2692–2699. <https://doi.org/10.1039/c9ay00455f>
- Yuan, J., Zhou, H., Li, D., & Xu, F. (2023). Construction of Fe<sub>3</sub>S<sub>4</sub>/g-C<sub>3</sub>N<sub>4</sub> composites as photo-Fenton-like catalysts to realize high-efficiency degradation of pollutants. *Ceramics International*. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2023.01.205>
- Zhou, H., Wang, S., Jiang, J., Shao, L., Li, D., Yuan, J., & Xu, F. (2022). Magnetic Fe<sub>3</sub>S<sub>4</sub>/MoS<sub>2</sub> with visible-light response as an efficient photo-Fenton-like catalyst: Validation in degrading tetracycline hydrochloride under mild pH conditions. *Journal of Alloys and Compounds*, 921, 166023. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2022.166023>
- Zhu, Z., Yang, R., Zhu, C., Hu, C., & Liu, B. (2021). Novel Cu-Fe/LDH@BiOI<sub>1.5</sub> photocatalyst effectively degrades tetracycline under visible light irradiation. *Advanced Powder Technology*, 32(7), 2311–2321. <https://doi.org/10.1016/j.apt.2021.05.008>



# Kahramanmaraş Sütçü İmam University Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 01.02.2024  
Kabul Tarihi : 28.04.2024

Received Date : 01.02.2024  
Accepted Date : 28.04.2024

## 6 ŞUBAT 2023 DEPREMLERİ İÇİN KIRSALDAKİ YIĞMA YAPILARIN PERFORMANSLARI ÜZERİNE BİR SAHA ARAŞTIRMASI: NURDAĞI/GAZİANTEP ÖRNEĞİ

### A FIELD STUDY ON THE PERFORMANCE OF MASONRY STRUCTURES IN RURAL AREAS FOR THE 6 FEBRUARY 2023 EARTHQUAKES: NURDAĞI/GAZİANTEP EXAMPLE

Musa YETKİN<sup>1</sup> (ORCID: 0000-0002-6259-4137)

<sup>1</sup> Firat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Elazığ, Türkiye

\*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Musa YETKİN, musayetkin@firat.edu.tr

#### ÖZET

6 Şubat 2023 tarihinde Türkiye'nin güneydoğusunda iki yıkıcı deprem meydana gelmiştir.  $M_w=7.7$  ve  $M_w=7.6$  büyüklüğündeki bu iki depremin merkez üssü sırasıyla Kahramanmaraş'ın Pazarcık ve Elbistan ilçeleridir. Bu depremlerde çok sayıda kişi hayatını kaybetmiş ve birçok yapı yıkılmış/ağır hasar görmüştür. Bu yıkıcı depremlerden en fazla etkilenen yerleşim yerlerinden birisi de Gaziantep ilinin Nurdağı ilçesi olmuştur. Bu makale çalışması, 6 Şubat 2023 depremleri sonrası Nurdağı ilçesinde kırsalda inşa edilen yığma yapıların performanslarını belirlemeye yönelik yapılan bir saha araştırmasını ve elde edilen bulguların değerlendirilerek birtakım çözüm önerileri geliştirilmesi konularını kapsamaktadır. Bu çalışmada, öncelikle Nurdağı ilçesinin yer aldığı bölgenin depremselliği ve 6 Şubat 2023 depremlerinin karakteristik özelliklerinden bahsedilmiştir. Daha sonra Nurdağı ilçesi için yapılan saha araştırmasında gözlenen yığma yapı hasarları sunulmuş ve bu hasar tipleri için değerlendirmeler yapılmıştır. Çalışmanın sonunda ise hasarlı yapılar ve yeni inşa edilecek yığma yapılar için birtakım çözüm önerileri sunulmuştur.

**Anahtar Kelimeler:** 6 Şubat 2023 depremleri, saha araştırması, yığma yapılar, deprem performansı, hasar tipleri

#### ABSTRACT

On February 6, 2023, two devastating earthquakes occurred in southeastern Turkey. The epicentres of these two earthquakes with magnitudes of  $M_w=7.7$  and  $M_w=7.6$  are the Pazarcık and Elbistan districts of Kahramanmaraş, respectively. Many people lost their lives, and many buildings were destroyed or severely damaged in these earthquakes. One of the settlements most affected by these devastating earthquakes was the Nurdağı district of Gaziantep province. This paper covers a field study conducted to determine the performance of masonry structures built in rural areas of Nurdağı district after the February 6, 2023, earthquakes and the development of some solution suggestions by evaluating the findings obtained. This study mentioned the seismicity of the region where Nurdağı district is located and the characteristics of the February 6, 2023 earthquakes. Then, the damages to the masonry structure observed in the field study for the Nurdağı district were presented, and evaluations were made for these damage types. Finally, some solutions for damaged and newly constructed masonry structures were presented.

**Keywords:** February 6, 2023 earthquakes, field study, masonry structures, earthquake performance, damage types

#### GİRİŞ

ToCite: YETKİN, M., (2024). 6 ŞUBAT 2023 DEPREMLERİ İÇİN KIRSALDAKİ YIĞMA YAPILARIN PERFORMANSLARI ÜZERİNE BİR SAHA ARAŞTIRMASI: NURDAĞI/GAZİANTEP ÖRNEĞİ. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 27(3), 821-837.

Yeryüzündeki tektonik levha hareketleri sonucunda oluşan ve genellikle ani ve şiddetli olarak meydana gelen sarsıntılar olarak tanımlanan depremler, dünya genelinde sıkça yaşanan ve insanların hayatlarını derinden etkileyen doğal afetler arasında yer almaktadır. Bu doğal afetler ciddi maddi ve manevi kayıplara neden olabilir. Bu kayıplardan bazıları, yapıların yıkılması/hasar görmesi, altyapının zarar görmesi, can kayıpları ve toplumdaki travma/korku duygularının oluşmasıdır. Ayrıca depremlerin tetikleme sonucu ortaya çıkan tsunamiler, yangınlar ve toprak kaymaları gibi afetler, yaşanan kayıpların artmasına sebep olmaktadır.

Depremlerin meydana getirdiği kayıpları ortaya çıkaran en önemli etmen, yapıların yıkılması veya ağır hasar görmesidir. Nitekim depremler esnasında yıkılan/ağır hasar gören yapı sayısı ne denli az olursa, maddi ve manevi kayıplar da o denli az olmaktadır. Ancak yapılardaki düşük rijitlik, kötü malzeme, tasarım eksiklikleri, mühendislik hizmeti alınmaması, yetersiz kontrol ve kötü zemin koşulları gibi etkenler yapıların depremlerde yıkılmasına/ağır hasar görmesine sebep olmaktadır.

Depremlerde, köprüler, barajlar, camiler, hanlar, hamamlar, kervansaraylar, kiliseler gibi pek çok yapı türü hasar görebilmektedir. Bu yapı türleri için depremin meydana getirdiği hasarlar da birbirine göre farklılık göstermektedir. Yapıların deprem davranışını anlamak için, depremlerin yapılarda meydana getirdiği hasarları araştırmak inşaat mühendisliği açısından oldukça önemli bir konudur. Bu araştırmalar yapıların deprem etkisi altındaki davranışlarını anlamak, hasar tiplerini, yaygınlığını ve nedenlerini belirlemek, yapısal zayıflıkları ortaya koyabilmek ve güçlendirme yöntemleri geliştirmek, mühendislik pratiği geliştirerek daha güvenilir tasarımlar yapabilmek ve bu sayede afet dirençli şehirler oluşturabilmek adına ciddi katkılar sunmaktadır.

Yapıların depremler karşısında gösterdiği davranışı anlamaya yönelik saha araştırmaları araştırmacıların oldukça ilgisini çeken bir konudur. 21. yüzyılda meydana gelen yıkıcı depremler için 1 Mayıs 2003 Bingöl (Türkiye) depremi için Doğangün (2004) ve Kaplan vd. (2003), 14 Ağustos 2003 Lefkada (Yunanistan) depremi için Karakostas vd. (2005), 26 Aralık 2003 Bam (İran) depremi için Ahmadizadeh ve Shakib (2004), 2 Temmuz 2004 Ağrı (Türkiye) depremi için Bayraktar vd. (2007), 8 Ekim 2005 Keşmir depremi için Naseer vd. (2010), 15 Ağustos 2007 Pisco (Peru) depremi için Taucer vd. (2009), 20 ve 27 Aralık 2007 Bala-Ankara (Türkiye) depremleri için Adanur (2010) ve Ural vd. (2012), 12 Mayıs 2008 Sichuan (Çin) depremi için Zhao vd. (2009), 6 Nisan 2009 L'Aquila (İtalya) depremi için Brandonisio vd. (2013) ve Indirli vd. (2013), 4 Eylül 2010 Darfield (Yeni Zelanda) depremi için Ingham ve Griffith (2010), 8 Mart 2010 Kovancılar-Elazığ (Türkiye) depremi için Akkar vd. (2011) ve Celep vd. (2011), 11 Mayıs 2011 Lorca (İspanya) depremi için Ruiz-Pinilla vd. (2016), 23 Haziran 2011 Maden-Elazığ (Türkiye) depremi için Sayın vd. (2011), 23 Ekim 2011 ve 9 Kasım 2011 Van (Türkiye) depremleri için Ateş vd. (2013), Bayraktar vd. (2013), Çelebi vd. (2013), Oyguc and Oyguc (2017), Oyguc (2016), Tapan vd. (2013), Taşkın vd. (2013), Yazgan vd. (2016), Yön vd. (2019), Mayıs 2012 Emilia (İtalya) depremleri için Bovo vd. (2020) ve Sorrentino vd. (2014), 24 Mayıs 2014 Ege Denizi depremi için Göçer (2020), 25 Nisan 2015 Nepal depremi için Gautam and Chaulagain (2016), Dutta vd. (2016), 26 Ekim 2015 Hindu Kush (Afganistan) depremi için Ismail ve Khatkhatk (2019), 24 Ocak 2020 Sivrice-Elazığ (Türkiye) depremi için Atmaca vd. (2020), Çağlar vd. (2023), Dedeoğlu vd. (2022), Dedeoğlu vd. (2023), Doğan vd. (2021), Işık vd. (2020), Yetkin vd. (2021), Yurdakul vd. (2021), 30 Ekim 2020 Samos adası depremi için Onat vd. (2022) ve Yakut vd. (2022), 21 Kasım 2021 Erzurum-Köprüköy depremi için Kocaman (2023a) ve 6 Şubat 2023 depremleri için Büyüksaraç vd. (2024), Erkek ve Yetkin (2023), İnce (2023), Kahya vd. (2024), Kocaman (2023b), Mercimek (2023), Vuran vd. (2024) ve Yetkin vd. (2024) tarafından yapılan çalışmalar bunlardan bazılarıdır.

6 Şubat 2023'te meydana gelen ardışık yıkıcı depremler başta Kahramanmaraş ve Gaziantep olmak üzere Hatay, Adıyaman, Malatya, Adana, Osmaniye, Kilis, Şanlıurfa, Diyarbakır ve Elazığ illerinde yaklaşık 15 milyon insanın yaşadığı bir bölgede ve çevre ülkelerden Suriye, Kuzey Kıbrıs Türk Cumhuriyeti (KKTC), Irak, Lübnan ve Ürdün'de kuvvetlice hissedilmiştir.

Bu makale çalışması da yaklaşık 15 milyon insanın yaşadığı bir bölgeyi etkileyen (Türkiye nüfusunun yaklaşık %18'i), yaklaşık 50000 kişinin hayatını kaybetmesine ve yaklaşık 110000 kişinin yaralanmasına yol açan 6 Şubat 2023 depremleri sonrası yapılan bir saha araştırmasını ve elde edilen bulguların değerlendirilerek birtakım çözüm önerileri geliştirilmesi konularını kapsamaktadır. Saha çalışması, 6 Şubat 2023 depremlerinden en fazla etkilenen yerlerden Gaziantep ili Nurdağı ilçesi için gerçekleştirilmiştir. Nitekim makalede öncelikle Nurdağı ilçesinin yer aldığı bölgenin depremselliği ve 6 Şubat 2023 depremlerinin karakteristik özelliklerinden bahsedilmiştir. Daha sonra Nurdağı ilçesi için yapılan saha araştırmasından elde edilen bulgular paylaşılmıştır. Nurdağı ilçesi için yapı stoğunun önemli bir kısmını yığma yapılar oluşturduğu için yığma yapılarda oluşan hasarlar sunulmuş ve bu hasar tipleri için

değerlendirmeler yapılmıştır. Çalışmanın sonunda ise hasarlı yığma yapılar ve yeni inşa edilecek yığma yapılar için birtakım çözüm önerileri sunulmuştur.

### **Bölgenin Tektoniği ve Depremselliği**

Nurdağı ilçesi Akdeniz Bölgesi ile Güneydoğu Anadolu Bölgesi'nin birleşme noktasında yer alan Gaziantep ili sınırları içerisinde yer almaktadır. İlçenin doğusu Gaziantep ili Şahinbey ve Şehitkamil ilçeleri, batısı Osmaniye ili Bahçe ilçesi, kuzeyi Kahramanmaraş ili Türkoğlu ve Pazarcık ilçeleri, güneyi Gaziantep ili İslahiye ilçesi ile çevrilidir. Kuzeyde Amanos dağlarının uzantısı ve güneyde Kartal Yücesi Tepesinin arasında kalan Amik Ovası'nın birleşiminde bulunan ilçede, ovalık bölgeler genellikle tarım alanı olarak kullanılmakta ve dağlık kesimlerin yamaçlarında su kaynakları bulunmaktadır (URL-1; URL-2). İlçenin TÜİK verilerine göre 2022 yılı nüfusu 41322 olarak belirlenmiştir (URL-3). Nurdağı ilçesinin konumu Şekil 1'de verilmiştir.



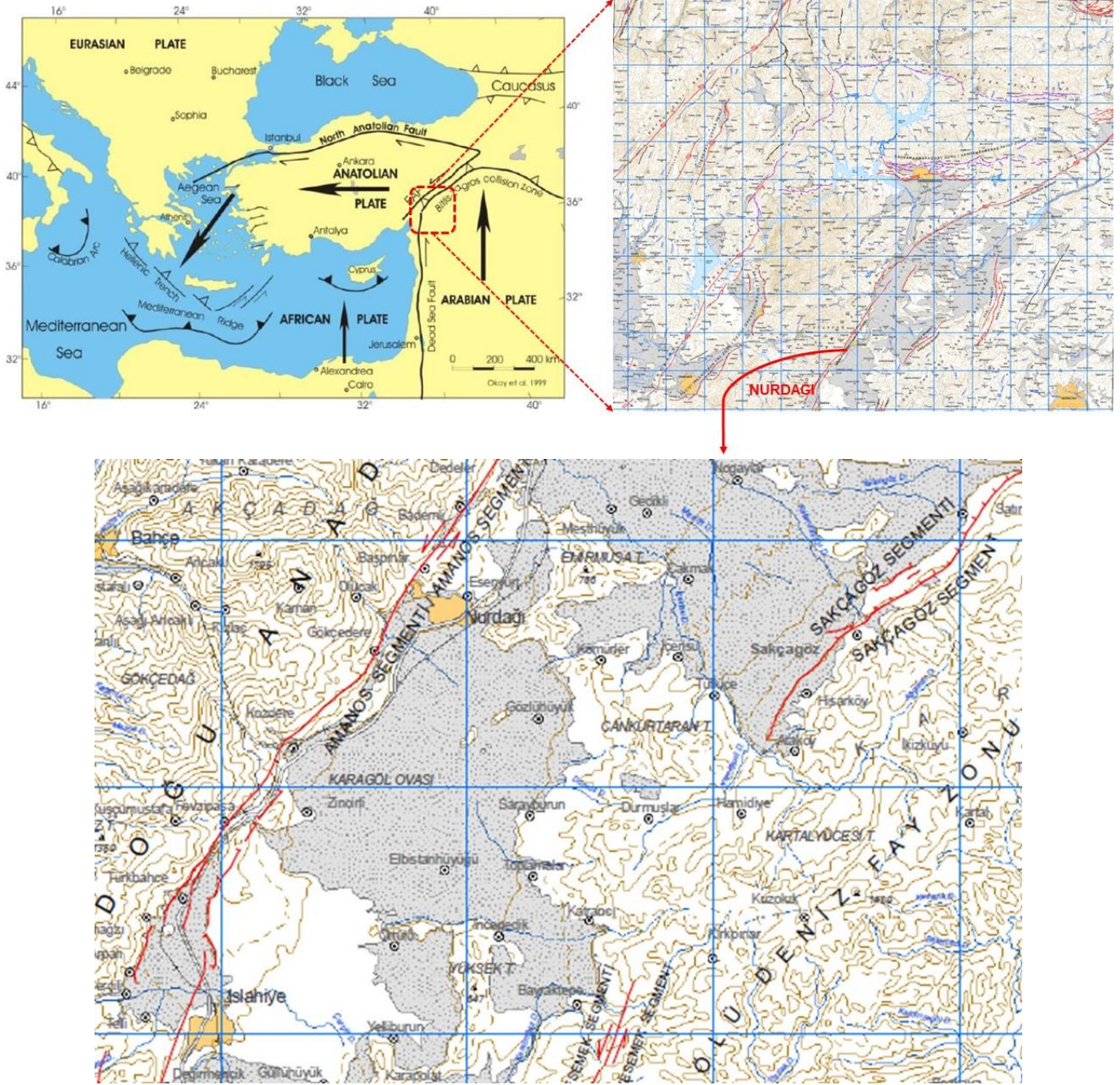
**Şekil 1. Nurdağı İlçesinin Konumu**

Gaziantep ve yakın çevresinin mevcut morfolojik şeklini almasında iki tektonik yapı etkili olmuştur. Bu yapılar Doğu Anadolu Fay (DAF) ve Ölü Deniz Fay (ÖDF) zonlarına ait aktif faylardır. DAF zonu, Kuzey Anadolu Fay zonu ile birlikte Türkiye'nin en etkin iki ana fay kuşağından birini oluşturmaktadır. Bingöl-Karlıova ile Antakya arasında bulunan DAF zonu, kuzeye doğru hareket eden Arap Plakası ile batıya doğru hareket eden Anadolu Bloğu arasında, ortalama 30 km genişlikte ve 600 km uzunluğunda sol yanal doğrultu atımlı bir transform fay olup birçok segmentten oluşmaktadır (Arpat ve Şaroğlu, 1975; Herece, 2003; Demirtaş, 2003). ÖDF zonu ise Kızıl Denizden başlayarak DAF zonuna kadar devam etmekte ve yaklaşık 1000 km uzunluğuna sahiptir. DAF zonu ile Narlı civarında birleşen ÖDF zonu, aktif bir fay olup bölgede yıkıcı depremlerin meydana gelmesinde etkili olmaktadır (İmamoğlu ve Çetin, 2007). Bu fayların her ikisi de deprem üretme potansiyeli taşımakta ve Gaziantep il sınırlarından geçmektedir. Ayrıca saha çalışmasının yapıldığı Nurdağı ilçe sınırlarından ise Türkoğlu – Antakya ve Sakçagöz segmentleri geçmektedir. Bölgenin tektonik yapısı Şekil 2'de verilmiştir.

Gaziantep ve yakın çevresinde meydana gelmiş tarihsel depremler araştırıldığında, büyüklüğü 7.6 seviyelerine ulaşan depremlerin olduğu görülecektir. Bu depremlerin Gaziantep için en fazla yıkıma neden olanlarından biri, 1822 yılında meydana gelen ve büyüklüğü  $M_s=7.5$  olan depremdir (Ambraseys ve Jackson, 1998). Tarihsel dönemin yanı sıra aletsel dönemde de Gaziantep ve yakın çevresini etkileyen depremler meydana gelmiştir. 1971 yılında Gaziantep'te meydana gelen ve büyüklüğü 4.6-5.8 aralığında değişen depremlerde Nurdağı ilçesinde çok sayıda yapı ağır hasar görmüştür. 1978 ve 1986 yıllarında Gaziantep'te meydana gelen depremlerde de sırasıyla İslahiye ve Şehitkamil ilçelerindeki bazı yapılarda ağır hasar meydana gelmiştir. 2020 yılında Sivrice-Elazığ'da meydana gelen  $M_w=6.8$  büyüklüğündeki depremde, Gaziantep'te bulunan bazı yapılarda ağır hasar oluşmuştur. Gaziantep ve yakın çevresinde aletsel dönemde meydana gelen ve  $M_w=4.0$ 'ın üzerindeki depremler Şekil 3'te verilmiştir.

### **6 Şubat 2023 Depremleri**

6 Şubat 2023 tarihinde DAF ile ÖDF zonlarının birleştiği üçlü eklem noktasına yakın bir bölgede yaklaşık dokuz saat arayla iki büyük deprem meydana gelmiştir. Bu depremlerin birincisi Kahramanmaraş'ın Pazarcık ilçesinde yerel saat ile 04:17'de ve birinci depremin artçıları devam ederken Kahramanmaraş'ın Elbistan ilçesinde yerel saat ile 13:24'te ikinci bir deprem oluşmuştur. Bu depremlere ait büyüklükler AFAD tarafından sırasıyla  $M_w=7.7$  ve  $M_w=7.6$  olarak açıklanmıştır.

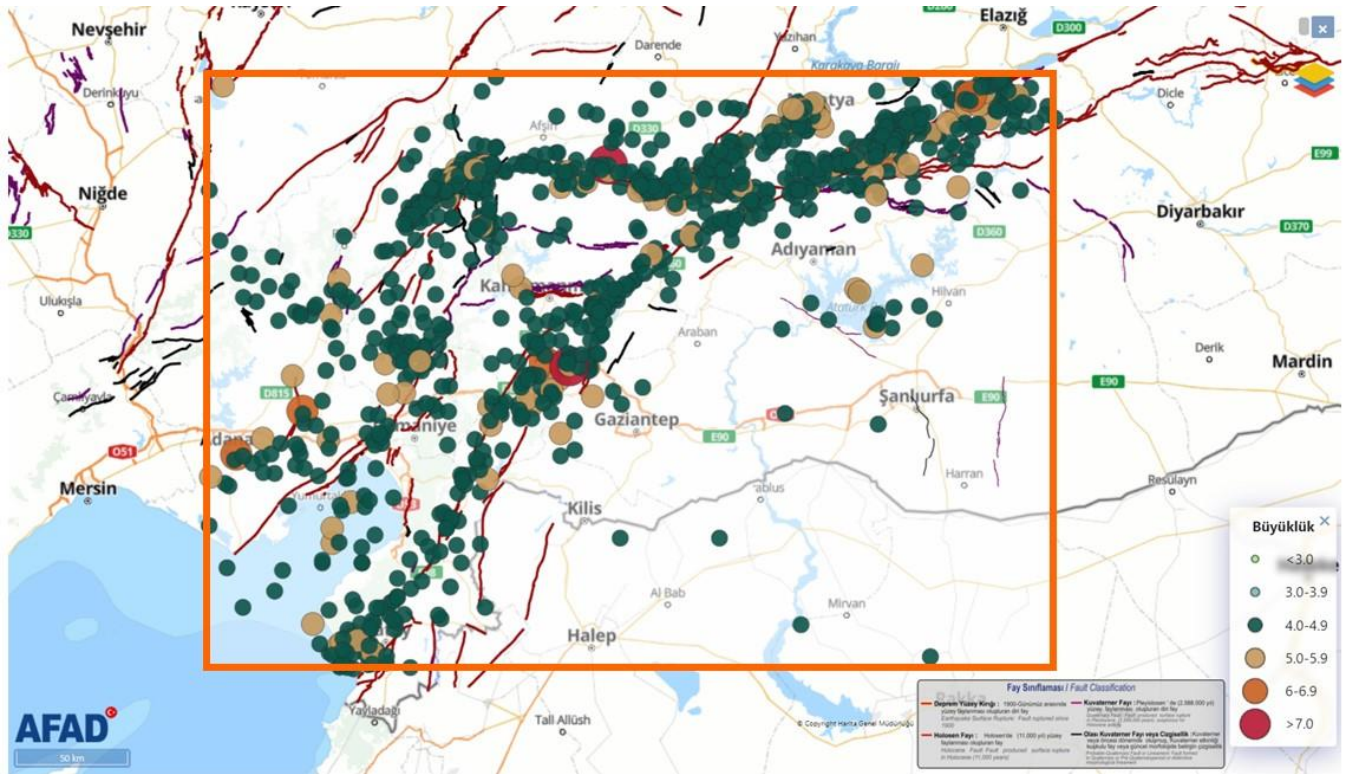


Şekil 2. Bölgenin Tektonik Yapısı (Okay vd., 2010; Emre vd., 2012)

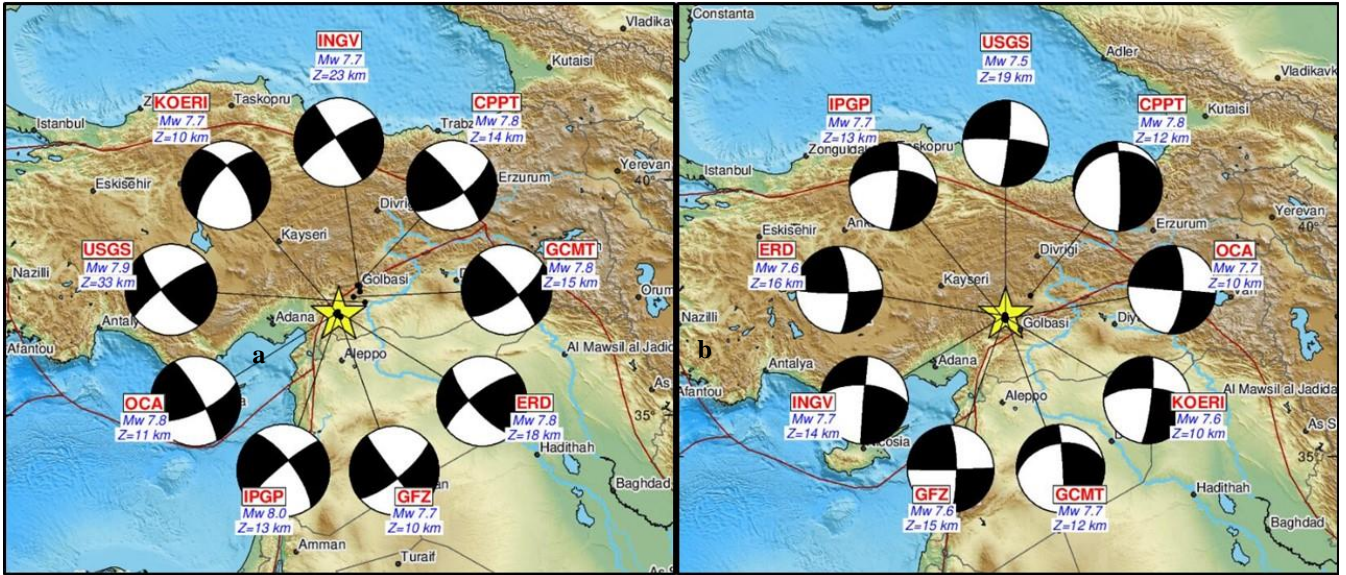
Birinci depremin merkez üssü Gaziantep'in yaklaşık 40 km kuzeybatısında ve Kahramanmaraş'ın 33 km güneydoğusunda meydana gelmiş olup bu depremin odak derinliği 8.6 km'dir. İkinci depremin merkez üssü ise Kahramanmaraş'ın 62 km kuzeydoğusunda ve Adıyaman'ın yaklaşık 98 km kuzeybatısında meydana gelmiş olup, bu depremin odak derinliği 7.0 km'dir. Odak derinlikleri itibariyle her iki deprem de sığ depremler sınıfındadır. Bu yıkıcı depremlerin çeşitli araştırma merkezlerine göre merkez üsleri ve moment tensör çözümleri Şekil 4'te verilmiştir.

6 Şubat 2023 Pazarcık (Kahramanmaraş) depremi, AFAD tarafından işletilen ve depremin merkez üssüne 635.21 km uzaklık içerisinde bulunan 361 kuvvetli yer hareketi istasyonu tarafından kaydedilmiştir. Depremin kuzey-güney, doğu-batı ve düşey bileşenleri için maksimum yer ivmesi değerleri merkez üssüne 31.42 km mesafede yer alan 4614-Kahramanmaraş istasyonunda sırasıyla 2.21 g, 2.22 g ve 1.99 g olarak belirlenmiştir. Elbistan (Kahramanmaraş) depremi ise depremin merkez üssüne 627.70 km uzaklık içerisinde bulunan 370 kuvvetli yer hareketi istasyonu tarafından kaydedilmiştir. Depremin kuzey-güney ve doğu-batı bileşenleri için maksimum yer ivmesi değerleri merkez üssüne 66.68 km mesafede yer alan 4612-Kahramanmaraş istasyonunda sırasıyla 0.65 g ve 0.53 g olarak,

düşey bileşenleri için maksimum yer ivmesi değerleri merkez üssüne 21.43 km mesafede yer alan 4631-Kahramanmaraş istasyonunda 0.62 g olarak belirlenmiştir.



Şekil 3. Gaziantep ve Çevresinde Aletsel Dönemde Meydana Gelen  $M_w=4.0$  ve Üzerindeki Depremler (URL-4)



Şekil 4. Çeşitli Araştırma Merkezlerine Göre a. Birinci Şok ve b. İkinci Şok İçin Merkez Üsleri ve Moment Tensör Çözümleri (URL-5)

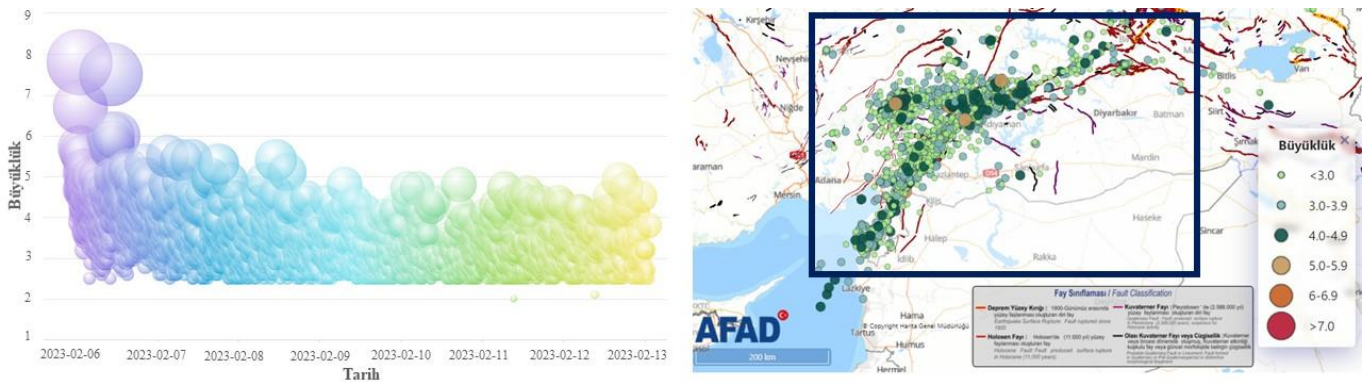
6 Şubat 2023  $M_w=7.7$  ve  $M_w=7.6$  depremleri için en büyük ivme değerlerinin kaydedildiği bazı istasyonlar için yer hareketinin özellikleri Tablo 1’de sunulmuştur. Burada  $R_{epi}$  istasyonun depremin merkez üssüne olan uzaklığı,  $V_{s30}$  (m/s) istasyonun bulunduğu zeminin üst 30 metrede ortalama kayma dalga hızları, N-S kuzey-güney, E-W doğu-batı ve U-D düşey ivme değerleridir.



**Tablo 1.** En Büyük İvme Değerlerinin Kaydedildiği Bazı İstasyonlar İçin Yer Hareketinin Özellikleri (URL-6)

	$M_w=7.7$			$M_w=7.6$		
	4614	3129	2708	4612	4631	4406
İstasyonu	İstasyonu	İstasyonu	İstasyonu	İstasyonu	İstasyonu	İstasyonu
Boylam (°)	37,2978	36,1343	36,6484	36,4819	37,4277	37,9738
Enlem (°)	37,4851	36,1912	37,0993	38,0240	37,9663	38,3439
$R_{epi}$ (km)	31,42	146,39	40,77	66,68	21,43	70,17
$V_{s30}$ (m/s)	541	447	523	246	543	815
N-S (g)	<b>2,21</b>	1,38	1,82	<b>0,65</b>	0,34	0,48
E-W (g)	<b>2,22</b>	1,22	1,13	<b>0,53</b>	0,40	0,42
U-D (g)	<b>1,99</b>	0,73	1,02	0,50	<b>0,62</b>	0,33

$M_w=7.7$  ve  $M_w=7.6$  ardışık depremleri sonrasında çok sayıda artçı deprem meydana gelmiştir. Bu artçı depremlerin 432 tanesinin büyüklüğü  $M_w=4.0$ 'ın üzerinde olmuştur (URL-4). Bu depremlerin bir kısmı bölgede yıkılan binaların veya binalardaki hasar oranının artışına sebebiyet vermiştir. Bölgede meydana gelen artçı depremlerin büyüklüklerini ve lokasyonlarını gösteren görseller Şekil 5'te verilmiştir.

**Şekil 5.** Bölgede Meydana Gelen Artçı Depremlerin Büyüklükleri ve Lokasyonları (URL-4; URL-5)

### Yığma Yapılarda Gözlenen Hasarlar

Gaziantep ilinin Nurdağı ilçesinde kırsal bölgelerde bulunan yapı stoğu genellikle tek veya iki katlı olarak inşa edilen yığma yapı biçimindedir. Yığma yapı tipi olarak ise kerpiç, taş ve harman tuğlası yığma birimleri ve çimento veya çamur harcı kullanılarak inşa edilen yapıların çoğunlukta olduğu dikkat çekmektedir. Genel kullanım amacı olarak barınma ve ahır ihtiyaçları için yerel halk tarafından yerel malzemeler kullanılarak tasarlanan bu yapıların büyük bir çoğunluğu herhangi bir mühendislik hizmeti olmadan inşa edilmiştir.

Bölgede inşa edilen yığma yapılar için 6 Şubat 2023 depremleri sonrası saha araştırması yapılmıştır. Depremlerin yığma yapılar üzerindeki etkilerini duvar tipleri ve hasar tipleri açısından değerlendirmek mümkündür. Duvar tipleri açısından çoğunlukla kerpiç, taş ve harman tuğlası duvar hasarları ile karşılaşmıştır. Bu duvar tipleri ile oluşturulan yığma yapıların bir kısmı toptan göçmeye uğramıştır (Şekil 6).

Toptan göçmeye uğrayan yığma yapıların bir kısmının farklı malzemeler kullanılarak inşa edildiği belirlenmiştir (Şekil 7). Bu durum, yapının mevcut tasarımının sonradan değiştirildiğini veya yapıya ilave kat eklendiğini düşündürmüştür. Bu nedenle yapının mevcut taşıma gücünün üzerinde bir yük ile yüklenmesi, ilgili yapıların deprem davranışını da olumsuz yönde etkilemiştir.

Toptan göçmeye uğramayıp çeşitli hasarların meydana geldiği yığma yapılarda ise köşe hasarları, düzlem içi duvar hasarları, dış duvarlarda düzlem dışı devrilme hasarları, aynı duvar üzerinde düzlem içi kesme çatlakları ve kopma hasarları, uygun olmayan malzeme veya kötü işçilik kaynaklı hasarlar gözlenmiştir.



Şekil 6. Toptan Göçme İçin Örnekler



Şekil 7. Farklı Malzemeler Kullanılarak İnşa Edilen Yapılarda Toptan Göçme İçin Örnekler

### ***Köşe Hasarları***

Yığma yapılarda depremler esnasında en fazla gözlenen hasar tiplerinden birisi köşe hasarlarıdır. Bu hasarlar, birbirine dik taşıyıcı duvarların düzlem dışı deformasyonlara maruz kalması durumunda meydana gelmektedir. Bu hasarların en büyük nedenleri, taşıyıcı duvarlar arasında bağlantının iyi olmaması, düşük malzeme kalitesi, kötü işçilik ve hatıl kullanılmamasından kaynaklanmaktadır. Bu hasarlara ait çeşitli görseller Şekil 8'de verilmiştir.

### ***Düzlem İçi Duvar Hasarları***

Yığma binaların performansı, duvarların sahip oldukları düzlem içi rijitlikleri ile ilgilidir. Duvarların düzlem içi rijitliklerinin düşük olması, yapıda düzlem içi hasarların oluşmasına neden olabilmektedir. Yapılarda bu gibi hasarlara neden olan kuvvetler ise düşey yükler ve deprem yükleridir. Bu yüklerin bir arada etkimesi durumu olmadan, yalnızca düşey yüklerin etkimesi durumunda da bu tip hasarlar meydana gelebilmektedir. Yapıya düşey yüklerin yanı sıra deprem yüklerinin de etkimesi durumunda ise, deprem yükleri duvarlardaki kesme kuvvetini artırarak bu kuvvetlerin neden olduğu diyagonal kesme çatlaklarının oluşmasına sebep olmaktadır. Bu hasarlar uzunluğu fazla olan duvarlarda sık görülmekte ve genellikle duvarların ilk olarak kapı ve pencere boşlukları olan

bölgelerinden başlayarak yayılmaya başlamaktadır. Bu boşlukların olmadığı duvarlarda ise yaklaşık olarak  $\times$  şeklindeki çatlak biçimi görülmektedir (Şekil 9).



Şekil 8. Köşe Hasarları İçin Örnekler



Şekil 9.  $\times$  Şeklindeki Çatlak Biçimi İçin Örnekler

Duvarların düzlem içi yükler etkisindeki davranışını kesme ve eğilme davranışı olarak sınıflandırmak mümkündür. Bu davranışa bağlı olarak duvarlarda meydana gelen hasarlar genellikle bir kaç şekilde gözlenmektedir. Bunlardan birincisi, duvarların çoğunlukla alt kısımlarında meydana gelen çatlakların duvarın boyuna doğrultusu boyunca ilerleyerek düşey düzlemde ayrılma hasarı şeklindeki hasarlardır. İkincisi, duvar köşegeni boyunca meydana gelen çekme çatlaklarıdır. Bu çatlaklar da ileri boyutlara ulaştığında duvarda köşegen boyunca ayrılma hasarı meydana gelmekte ve duvar kararsız hale gelerek taşıma kapasitesini kaybetmektedir. Üçüncüsü, düşey yük ve deprem yükünün duvarda meydana getirdiği ve genellikle duvarların alt kısımlarında oluşan ezilme hasarlarıdır. Diğer bir

hasar türü ise düşey yüklerin meydana getirdiği ayrılmaya bağlı çekme hasarlarıdır. Bu hasar tipleri bazı durumlarda birlikte ortaya çıkabilmektedir. 6 Şubat 2023 depremleri esnasında yığma yapılarda çeşitli düzlem içi hasarlar gözlenmiştir. Bu hasarlar çoğunlukla, duvar köşelerinden başlayarak diyagonal şekilde bir yol izleyen ve lento eksikliğinden kaynaklı olarak kapı ve pencere boşlukları etrafından yayılacak şekilde olmuştur (Şekil 10).



Şekil 10. Düzlem İçi Duvar Hasarları İçin Örnekler

#### ***Dış Duvarlarda Düzlem Dışı Devrilme Hasarları***

Yığma duvarların düzlem içi performansı, düzlem içi rijitliklerinin yüksek olması nedeniyle yüksektir. Ancak bu duvarların düzlem dışı yöndeki hareketlerden kaynaklanan (eğilme gerilmeleri etkisi) performansları, düzlem içi performanslarına göre daha düşüktür. Bu nedenle yığma duvarlara düzlem dışı doğrultuda deprem kuvvetlerinin etkimesi durumunda, ilgili duvarlar esnek bir davranış sergileyerek eğilme mekanizması ortaya çıkabilmektedir. 6 Şubat 2023 depremleri için duvarlarda dış duvarda bir doğrultuda düzlem dışı devrilme (Şekil 11a,g), köşelerde iki doğrultuda düzlem dışı devrilme (Şekil 11b-c), kısmi kopma (Şekil 11c-f) şeklinde çeşitli düzlem dışı hasarlar gözlenmiştir.

#### ***Aynı Duvar Üzerinde Düzlem İçi Kesme Çatlakları ve Kopma Hasarı Durumu***

Depremin yatayda her iki yöndeki bileşeninin (doğu-batı ve kuzey-güney) yapıya aynı anda etkimesi, yapılarda düzlem içi ve düzlem dışı hasarların birlikte oluşmasına da neden olabilmektedir. Bu tip hasarlar için çeşitli örnekler Şekil 12’de verilmiştir.

## TARTIŞMA VE ÖNERİLER

Yapılan saha araştırmasında toptan göçmeye uğrayan çok sayıda yapı gözlenmiştir. Yapılardaki hasar tipleri ise köşe hasarları, düzlem içi duvar hasarları, dış duvarlarda düzlem dışı devrilme hasarları, aynı duvar üzerinde düzlem içi kesme çatlakları ve kopma hasarı, uygun olmayan malzeme veya kötü işçilik kaynaklı hasarlar olarak belirlenmiştir. Bu hasar tiplerinin engellenebilmesi veya ilgili kısımların güçlendirilmesi için çeşitli yöntemler mevcuttur.

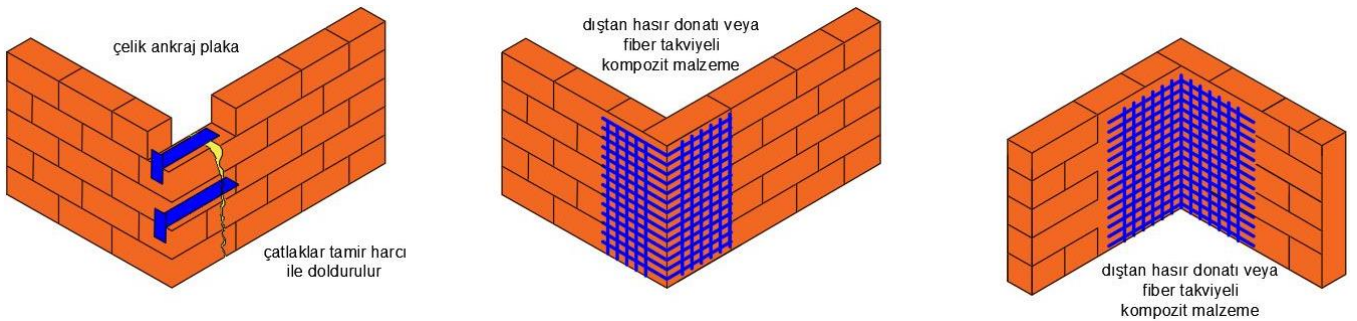


Şekil 11. Dış Duvarlarda Düzlem Dışı Devrilme Hasarları İçin Örnekler



Şekil 12. Aynı Duvar Üzerinde Düzlem İçi Kesme Çatlakları ve Kopma Hasarı Durumu İçin Örnekler

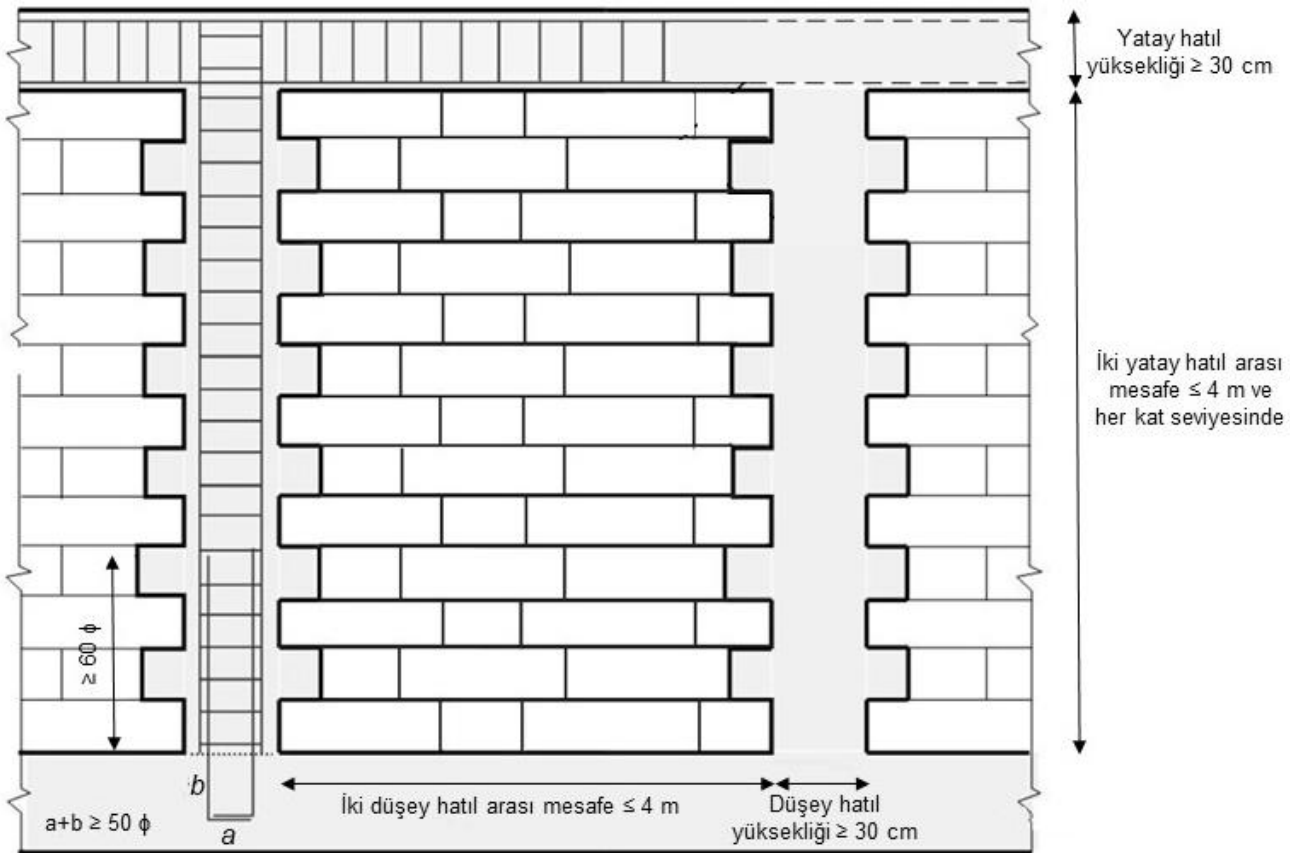
Köşe hasarlarının oluşmasını engelleyebilmek için öncelikle malzeme kalitesinin iyi olmasına ve kalifiye işçilik yapılmasına dikkat edilmeli ve köşe noktalarındaki bağlantıyı güçlendirecek birtakım çözümler uygulanmalıdır. Bu çözümlerden bazıları ilgili köşe noktalarında çelik ankraj plaka, içten veya dıştan donatı veya lifli polimer kompozit malzeme uygulaması ile güçlendirme olarak söylenebilir (Şekil 13).



Şekil 13. Köşe Hasarlarını Engelleme veya İlgili Bölgeleri Güçlendirmek İçin Birtakım Çözümler

Yeni inşa edilecek yığma yapılarda köşe hasarlarının oluşmasını engelleyebilmek için taşıyıcı duvarlarda kerpiç, boşluklu beton briket, ponza taşı, moloz taş ve dolgu duvarlar için üretilmiş tuğlalar kullanılmamalıdır. Kesme taş ve tuğla duvar kullanılarak inşa edilen yapılarda ise betonarme yatay ve düşey hatıllar yapılmalıdır. Bu hatıllar duvarların yanal rijitliğini artırmakta ve yanal kuvvetleri dağıtarak yapının kutu şeklinde hareket etmesini sağlamaktadır. Bu sayede yapılardaki köşe hasarlarının yanı sıra düzlem içi ve düzlem dışı hasarlar da önemli ölçüde azaltılmış olacaktır. Ancak hatıl eksikliği veya yönetmeliklerin getirdiği sınırlamalara uygun olmayan hatıllar, yapılarda köşe hasarlarının yanı sıra düzlem içi ve düzlem dışı hasarların da en büyük nedenlerindedir.

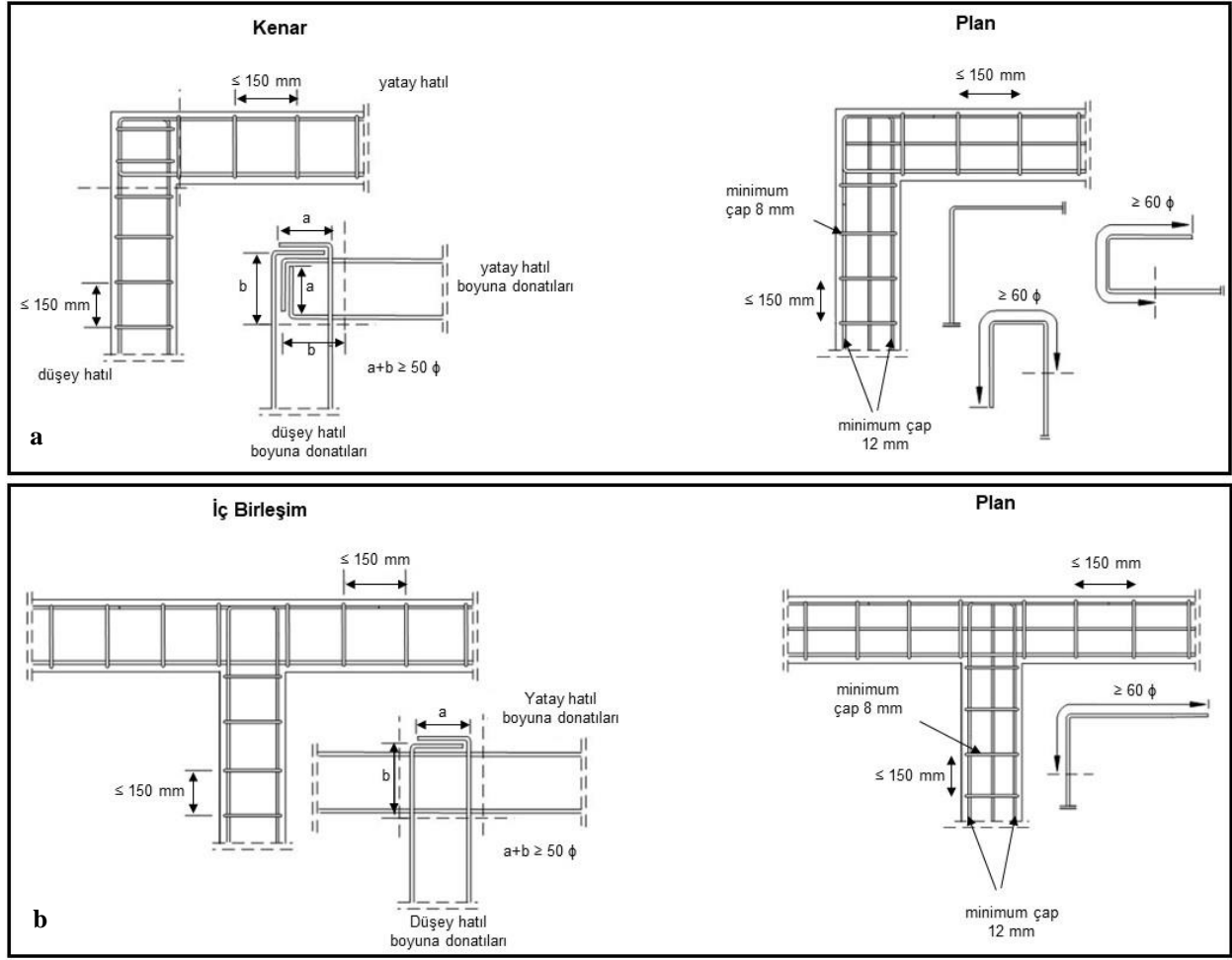
TBDY-2018 yığma yapılarda betonarme hatıl kullanılmasını zorunlu kılmaktadır. Düşey ve yatay hatıllar için betonun basınç dayanımı minimum 25 MPa, en kesit yükseklikleri minimum 300 mm olmalı, boyuna donatı sayısı ve enine donatı aralığı ise sırasıyla  $6\phi 12$  ve  $\phi 8/150$  mm değerinden az olmamalıdır. Bu hatılların en kesit genişliği, en az duvar kalınlığı kadar olmalıdır. Yatay hatılların düşeydeki aralığı 4 m'yi aşmamalıdır. Düşey hatıl donatılarında bindirmeli ekler  $60\phi$ 'den daha kısa olmamalıdır. TBDY-2018 için bu hatılların uygulama sınırları Şekil 14-15'te verilmiştir.



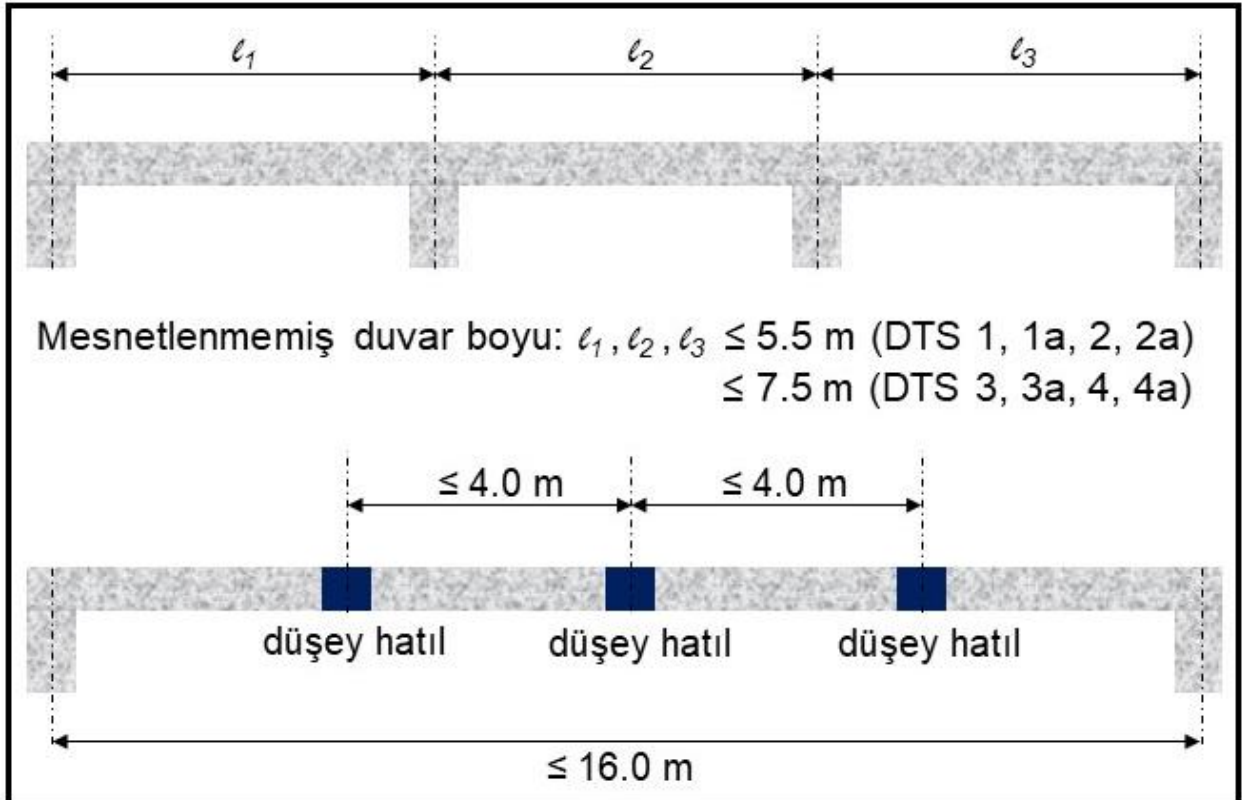
Şekil 14. TBDY-2018'e Göre Taşıyıcı Duvarlarda Yatay ve Düşey Hatıl Detayları

Yığma yapılardaki diğer bir hasar türü olarak düzlem içi hasarlar karşımıza çıkmaktadır. Bu hasarların en büyük nedeni ise, yatay ve düşey hatılların eksikliğinin yanı sıra duvarların geniş uzunluklara sahip olmasına bağlı olarak duvarların rijitliklerinin azalmasından kaynaklanmaktadır. Bu geniş uzunluklar duvarlardaki kesme etkisini artırmakta olup, TBDY-2018 tarafından bu hususta getirilen sınırlamalar Şekil 16'da verilmiştir. Şekil 16 için DTS (Deprem Tasarım Sınıfı), BKS (Bina Kullanım Sınıfı) ve SDS (Kısa periyot tasarım spektral ivme katsayısı)'ye bağlı olarak belirlenmektedir.

Yığma yapıların düzlem dışı rijitliklerini artırmanın diğer bir yolu ise rijit döşemelerin yapılması ile mümkündür. Bu döşemeler rijit bir diyafram oluşturarak duvarların deprem kuvvetleri karşısında bir bütün olarak hareket edebilmesini sağlamaktadır. TBDY-2018, binalarda betonarme döşeme yapılmasını, bu döşemelerin kalınlığının en az 100 mm olmasını ve yatay hatıllarla desteklenmesini zorunlu tutmaktadır.

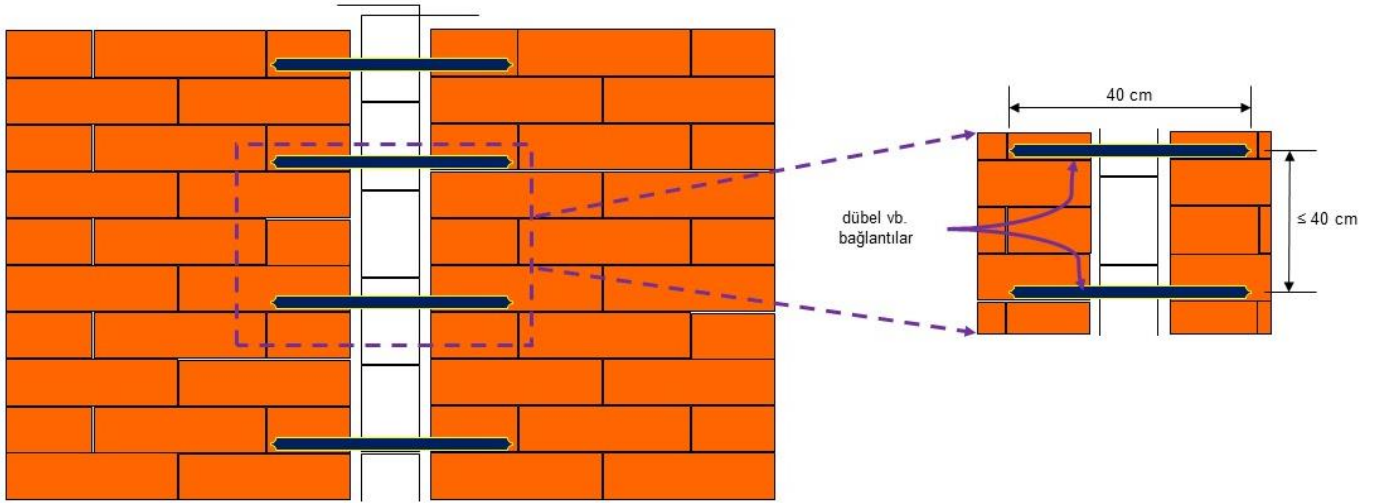


Şekil 15. TBDY-2018'e Göre a. Kenar ve b. İç Birleşimlerde Yatay Hatıllar



Şekil 16. Taşıyıcı Duvarların Desteklenmemiş En Büyük Uzunlukları ve Düşey Hatıllar Arası Mesafeler

Ancak duvar-döşeme ve duvar-duvar bağlantılarının düzgün yapılmaması durumunda düzlem dışı mekanizma durumu yine kaçınılmaz olacaktır. Bu nedenle bu bağlantıların da düzgün yapılması rijit diyafram durumunu sağlamak için önem arz etmektedir. Duvarlar arasındaki bağlantıları güçlendirebilmek amacıyla, özel olarak tasarlanmış yatay dübellerle duvarların kenetlenmesini artırmak tercih edilebilecek bir seçenektir (Şekil 17).



Şekil 17. Duvarlar Arasındaki Bağlantıları Güçlendirmek Amacıyla Dübel vb. Bağlantılar Kullanılması (Meli vd. 2011'den uyarlandı)

Yapı stoğunun eski olması, yapıların hiçbir mühendislik hizmeti almadan inşa edilmesi ve uygun olmayan malzeme kullanımı, yapılarda yukarıda verilen hasar tiplerinin oluşmasını kaçınılmaz kılmaktadır. Bu nedenle yapıların inşa sürecinde, mühendislik hizmeti alınması, profesyonel yapı denetim firmaları tarafından kontrol edilmesi ve deprem yönetmeliklerinde belirtilen malzemeler kullanılması sağlanmalıdır. TBDY-2018'de hangi malzemelerin yığma birim olarak kullanılabilceği hususunda "Boşluklu beton briketler, dolgu duvarları için üretilmiş diğer tuğlalar, kerpiç, moloz taş, ponza taşı ve benzeri biçim verilmiş bloklar, hiçbir zaman taşıyıcı duvar malzemesi olarak kullanılmayacaktır." ifadesi yer almaktadır. TBDY-2018, harç birimlerin küp basınç dayanımlarının ise donatısız ve kuşatılmış yığma yapılar için 5.0 MPa ve donatılı yığma yapılar 10.0 MPa değerinden düşük olmaması gerektiğini belirtmiştir.

Nurdağı ilçesindeki zemin yapısı da yukarıda bahsedilen hasarların ortaya çıkmasında etkili olmuştur. Nitekim Nurdağı ilçesinin büyük bir kısmı çakıl, kum ve killerden oluşan yaşlı alüvyonlardan müteşekkildir. Ayrıca yeraltı su seviyesi genel olarak 0.5-10 m civarındadır (URL-2). Yer altı su seviyesinin yüzeye bu denli yakın oluşunun da depremin şiddetini artırdığı düşünülmektedir.

Nurdağı ilçesi konum itibarıyla sismik olarak hareketli bir bölgededir. Bölgede DAF ve ÖDF zonları etkilidir. Bu durum meydana gelebilecek olası depremlerde ilçedeki kötü zemin özelliklerine sahip olan yerleşim yerlerinde yapılarındaki hasar riskini kaçınılmaz kılmaktadır. Bu nedenle ilçede kötü zemin özelliklerine sahip olan yerleşim yerlerini belirlemek üzere zemin etütleri yapılmasının yararlı olacağı düşünülmektedir. Ayrıca yerleşim yerlerinin faya olan yakınlığı uzmanlarca belirlenmeli ve aktif faylara yakın olan bölgelerde yapılaşmanın önüne geçilmelidir.

## SONUÇLAR

6 Şubat 2023 tarihinde Kahramanmaraş'ın Pazarcık ve Elbistan ilçelerinde sırasıyla  $M_w=7.7$  ve  $M_w=7.6$  büyüklüğünde iki deprem meydana gelmiştir. Bu depremler ve sonrasında meydana gelen artçı depremler toplam 11 ilde yıkıma yol açmıştır. Depremlerden en fazla etkilenen yerleşim yerlerinden birisi de Gaziantep ilinin Nurdağı ilçesidir. Nurdağı ilçesi için yapı stoğunun büyük bir bölümünü yığma yapılar oluşturmaktadır. Bu çalışmada Nurdağı ilçesi için yığma yapılarda meydana gelen hasarları belirlemeye yönelik saha araştırması gerçekleştirilmiştir.

Saha araştırmasında çok sayıda yapının toptan göçmeye uğradığı belirlenmiştir. Bunun yanı sıra hasara gören yapılardaki hasar tipleri çeşitlilik göstermiştir. Bu hasar tipleri ise köşe hasarları, düzlem içi duvar hasarları, dış duvarlarda düzlem dışı devrilme hasarları, aynı duvar üzerinde düzlem içi kesme çatlakları ve kopma hasarları, uygun olmayan malzeme veya kalifiye olmayan işçilik kaynaklı hasarlar olarak belirlenmiştir. Bu hasar tiplerinin



engellenebilmesi, hasarlı kısımların güçlendirilmesi ve yeni inşa edilecek yapılarda dikkat edilmesi gereken bazı hususlar için şu önerilerde bulunulmuştur:

- Eski yapı stoğu, alanında uzman kişiler tarafından değerlendirilmeli ve performansı yetersiz olan yapılar için yıkım işlemleri gerçekleştirilmeli veya güçlendirme çözümleri geliştirilmelidir.
- Yeni inşa edilecek yapıların malzeme kalitesinin iyi olması, kalifiye işçilik yapılması, deprem yönetmeliği esasları dikkate alınarak tasarlanması, mühendislik hizmeti alınarak inşa edilmesi ve profesyonel yapı denetim firmaları tarafından kontrol edilmesi sağlanmalıdır.
- Köşe noktalarındaki bağlantıyı güçlendirecek çelik ankraj plaka, içten veya dıştan donatı veya lifli polimer kompozit malzeme uygulaması gibi birtakım çözümler uygulanmalıdır.
- Taşıyıcı duvarlarda boşluklu beton briket, dolgu duvarlar için üretilmiş tuğlalar, kerpiç, moloz taş ve ponza taşı kullanılmamalıdır.
- Harç birimlerin küp basınç dayanımlarının, TBDY-2018’de belirtilen minimum küp basınç dayanımından düşük olmamasına dikkat edilmelidir.
- Kesme taş ve tuğla duvar kullanılarak inşa edilecek yapılarda, deprem yönetmeliklerinin getirdiği sınırlar gözetilerek betonarme yatay ve düşey hatlar yapılmalıdır.
- Yapılardaki rijit diyafram davranışı sağlayabilmek için rijit döşeme yapılmalıdır. Rijit döşeme için deprem yönetmelikleri tarafından getirilen sınırlar dikkate alınmalıdır.
- Duvar-döşeme ve duvar-duvar arasındaki bağlantıları güçlendirebilmek için, ilgili kısımlarda özel olarak tasarlanmış dübel kullanımı vb. uygulamalara başvurulmalıdır.
- Kötü zemin özelliklerine sahip olan yerleşim yerlerini belirlemek için zemin etütleri yapılmalıdır.
- Aktif faylara yakın olan bölgelerde yapılaşmanın önüne geçilmelidir.

Sonuç olarak 6 Şubat 2023 depremlerinin ortaya çıkardığı yıkım, geçmiş depremlerden yeterince ders alınmadığını ve akademik bilgi ve tecrübenin uygulamaya yeterince yansımadığını göstermiştir. Bu çalışma, deprem kaynaklı hasarların ve can kayıplarının azaltılmasında profesyonel mühendislik hizmeti alınmasının, mühendislerden işçilere kadar inşaat sektöründe çalışanların deprem bilincinin artırılması için daha fazla eğitim verilmesinin, deprem yönetmeliklerine uygun olarak tasarım yapılmasının, binaların yapımında mutlak kontrol sağlanmasının ve üretimin her aşamasında titizlikle takip edilmesinin hayati önemini vurgulamaktadır.

## KAYNAKLAR

- Adanur, S. (2010). Performance of masonry buildings during the 20 and 27 December 2007 Bala (Ankara) earthquakes in Turkey. *Natural Hazards and Earth System Science*, 10, 2547–2556.
- Ahmadizadeh, M., & Shakib, H. (2004). On the December 26, 2003, southeastern Iran earthquake in Bam region. *Engineering Structures*, 26, 1055–1070.
- Akkar, S., Aldemir, A., Askan, A., Bakır, S., Canbay, E., Demirel, I. O., & Yenier, E. (2011). 8 March 2010 Elazığ-Kovancılar (Turkey) Earthquake: Observations on ground motions and building damage. *Seismological Research Letters*, 82, 42–58.
- Arpat, E., & Şaroğlu, F. (1975). Türkiye’deki bazı önemli genç tektonik olaylar. *Türkiye Jeoloji Kurumu Bülteni*, 18(1), 91-101.
- Ates, S., Kahya, V., Yurdakul, M., & Adanur, S. (2013). Damages on reinforced concrete buildings due to consecutive earthquakes in Van. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 53, 109-118.
- Atmaca, B., Demir, S., Günaydin, M., Altunişik, A. C., Hüsem, M., Ateş, Ş., ... & Angin, Z. (2020). Field investigation on the performance of mosques and minarets during the Elazığ-Sivrice Earthquake. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 34(6), 04020120.

- Bayraktar, A., Altunişik, A.C., & Pehlivan, M. (2013). Performance and damages of reinforced concrete buildings during the October 23 and November 9, 2011 Van, Turkey, earthquakes. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 53, 49–72.
- Bayraktar, A., Coşkun, N., & Yalçın, A. (2007). Damages of masonry buildings during the July 2, 2004 Doğubayazıt (Ağrı) earthquake in Turkey. *Engineering Failure Analysis*, 14, 147–157.
- Bovo, M., Barbaresi, A., Torreggiani, D., & Tassinari, P. (2020). Collapse and damage to vernacular buildings induced by 2012 Emilia earthquakes. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 18, 1049-1080.
- Brandonisio, G., Lucibello, G., Mele, E., & De Luca, A. (2013). Damage and performance evaluation of masonry churches in the 2009 L'Aquila earthquake. *Engineering Failure Analysis*, 34, 693–714.
- Büyüksaraç, A., Gündoğdu, E., Bektaş, Ö., & Işık, E. (2024). Failure mechanism by wrench faulting in Central Anatolia. *Engineering Failure Analysis*, 156, 107786.
- Çaglar, N., Vural, I., Kirtel, O., Saribiyik, A., & Sumer, Y. (2023). Structural damages observed in buildings after the January 24, 2020 Elazığ-Sivrice earthquake in Türkiye. *Case Studies in Construction Materials*, 18, e01886.
- Celep, Z., Erken, A., Taskin, B., & Ilki, A. (2011). Failures of masonry and concrete buildings during the March 8, 2010 Kovancılar and Palu (Elazığ) Earthquakes in Turkey. *Engineering Failure Analysis*, 18, 868–889.
- Çelebi, E., Aktas, M., Çağlar, N., Özocak, A., Kutanis, M., Mert, N., & Özcan, Z. (2013). October 23, 2011 Turkey/Van-Erciş earthquake: Structural damages in the residential buildings. *Natural Hazards*, 65, 2287–2310.
- Dedeoğlu, İ.Ö., Yetkin, M., & Calayır, Y. (2022). 24 January 2020 Sivrice-Elazığ Earthquake: Assessment of Seismic Characteristics of Earthquake, Earthquake Territory and Structural Performance of Reinforced Concrete Structures. *Sakarya University Journal of Science*, 26, 1892–1907.
- Dedeoğlu, İ.Ö., Yetkin, M., Calayır, Y., & Erkek, H. (2023) January 24, 2020 Sivrice-Elazığ (Türkiye) Earthquake: The Seismic Assessment of the Earthquake Territory, Geotechnical Findings and Performance of Masonry Buildings. *Iran J Sci Technol Trans Civ Eng*, <https://doi.org/10.1007/s40996-023-01318-0>
- Demirtaş, R. (2003). DAFZ'nda Deprem Üreten Diri Faylar; 1900-2003 Yılları Arasında Doğu Anadolu Fay Zonunda Olmuş Hasar Yapıcı Depremler. *TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası Yayınları*, 78 (3).
- Dogan, G., Ecemis, A. S., Korkmaz, S. Z., Arslan, M. H., & Korkmaz, H. H. (2021). Buildings damages after Elazığ, Turkey earthquake on January 24, 2020. *Natural Hazards*, 109(1), 161-200.
- Doğangün, A. (2004). Performance of reinforced concrete buildings during the May 1, 2003 Bingöl Earthquake in Turkey. *Engineering Structures*, 26(6), 841-856.
- Dutta, S. C., Nayak, S., Acharjee, G., Panda, S. K., & Das, P. K. (2016). Gorkha (Nepal) earthquake of April 25, 2015: Actual damage, retrofitting measures and prediction by RVS for a few typical structures. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 89, 171-184.
- Emre, Ö., Duman, T.Y., Olgun, Ş., Elmacı, H. & Özalp, S. (2012). 1:250.000 Ölçekli Diri Fay Haritası Serisi, Gaziantep (NJ 37-9) Paftası, Seri No:38, Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Ankara-Türkiye.
- Erkek, H., & Yetkin, M. (2023). Assessment of the performance of a historic minaret during the Kahramanmaraş, earthquakes (Mw 7.7 and Mw 7.6). *Structures*, 58, 105620.
- Gautam, D., & Chaulagain, H. (2016). Structural performance and associated lessons to be learned from world earthquakes in Nepal after 25 April 2015 (MW 7.8) Gorkha earthquake. *Engineering Failure Analysis*, 68, 222–243.
- Göçer, C. (2020). Structural evaluation of masonry building damages during the April 24, 2014 Gökçeada earthquake in the Aegean Sea. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 18, 3459–3483.
- Herece, E. (2003). Doğu anadolu fayı deprem ve kentleşme. *TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası Yayınları*, 78 (3).
- Indirli, M., S. Kouris, L.A., Formisano, A., Borg, R.P., & Mazzolani, F.M. (2013). Seismic damage assessment of unreinforced masonry structures after the Abruzzo 2009 earthquake: The case study of the historical centers of L'Aquila and Castelvechio Subequo. *International Journal of Architectural Heritage*, 7, 536–578.
- Ingham, J., & Griffith, M. (2010). Performance of unreinforced masonry buildings during the 2010 Darfield (Christchurch, NZ) earthquake. *Australian Journal of Structural Engineering*, 11, 207–224.

- Isik, E., Aydın, M. C., & Buyuksarac, A. (2020). 24 January 2020 Sivrice (Elazığ) earthquake damages and determination of earthquake parameters in the region. *Earthquakes and Structures*, 19(2), 145.
- Ismail, N., & Khattak, N. (2019). Observed failure modes of unreinforced masonry buildings during the 2015 Hindu Kush earthquake. *Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 18, 301–314.
- İmamoğlu, M.Ş., & Çetin, E. (2007). Güneydoğu Anadolu Bölgesi ve Yakın Yöresinin Depremselliği. *Dicle Üniversitesi Ziya Gökalp Eğitim Fakültesi Dergisi*, (9), 93-103.
- İnce, O. (2024). Structural damage assessment of reinforced concrete buildings in Adıyaman after Kahramanmaraş, (Türkiye) Earthquakes on 6 February 2023. *Engineering Failure Analysis*, 156, 107799.
- Kahya, V., Genç, A.F., Sunca, F., Roudane, B., Altunişik, A.C., Yılmaz, S., Günaydin, M., Dok, G., Kirtel, O., Demir, A., Aykanat, B., Arslan, M.E., Sarıbiyik, A., Aydın, F., Aslan, B., Sezdirmez, T., Tatar, T., Emiroğlu, M., Atmaca, B., Adanur, S., Ertürk Atmaca, E., Güleş, O., Demirkaya, E., Öztürk, H., & Akgül, T. (2024). Evaluation of earthquake-related damages on masonry structures due to the 6 February 2023 Kahramanmaraş,-Türkiye earthquakes: A case study for Hatay Governorship Building. *Engineering Failure Analysis*, 156, 107855.
- Kaplan, H., Yılmaz, S., Binici, H., Yazar, E., & Çetinkaya, N. (2004). May 1, 2003 Turkey-Bingöl earthquake: damage in reinforced concrete structures. *Engineering Failure Analysis*, 11(3), 279-291.
- Karakostas, C., Lekidis, V., Makarios, T., Salonikios, T., Sous, I., & Demosthenous, M. (2005). Seismic response of structures and infrastructure facilities during the Lefkada, Greece earthquake of 14/8/2003. *Engineering Structures*, 27(2), 213-227.
- Kocaman, İ. (2023a). Damage mechanisms of masonry structures: an observation after 19 November Erzurum-Köprüköy Earthquake. *Journal of Structural Engineering & Applied Mechanics*, 6(5), 455-467.
- Kocaman, İ. (2023b). The effect of the Kahramanmaraş, earthquakes (Mw 7.7 and Mw 7.6) on historical masonry mosques and minarets. *Engineering Failure Analysis*, 149, 107225.
- Meli, R., Brzev, S., Astroza, M., Boen, T., Crisafulli, F., & Dai, J. (2011). Seismic Design Guide for Low-Rise Confined Masonry Buildings Earthquake Engineering Research Institute (EERI), Oakland, California.
- Mercimek, Ö. (2023). Seismic failure modes of masonry structures exposed to Kahramanmaraş, earthquakes (Mw 7.7 and 7.6) on February 6, 2023. *Engineering Failure Analysis*, 151, 107422.
- Naseer, A., Khan, A. N., Hussain, Z., & Ali, Q. (2010). Observed seismic behavior of buildings in northern Pakistan during the 2005 Kashmir earthquake. *Earthquake Spectra*, 26(2), 425-449.
- Okay, A.I., Zattin, M., & Cavazza, W. (2010). Apatite fission track data for the Miocene Arabia-Eurasia collision. *Geology*, 38, 35-38.
- Onat, O., Yön, B., Öncü, M. E., Varolgüneş, S., Karaşin, A., & Cemalgil, S. (2022). Field reconnaissance and structural assessment of the October 30, 2020, Samos, Aegean Sea earthquake: an example of severe damage due to the basin effect. *Natural Hazards*, 112(1), 75-117.
- Oyguc, R. (2016). Seismic performance of RC school buildings after 2011 Van earthquakes. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 14, 821–847.
- Oyguc, R., & Oyguc, E. (2017). 2011 Van Earthquakes: Lessons from Damaged Masonry Structures. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 31, 1–20.
- Ruiz-Pinilla, J. G., Adam, J. M., Pérez-Cárcel, R., Yuste, J., & Moragues, J. J. (2016). Learning from RC building structures damaged by the earthquake in Lorca, Spain, in 2011. *Engineering Failure Analysis*, 68, 76-86.
- Sayın, E., Yön, B., Calayır, Y., & Karaton, M. (2013). Failures of masonry and adobe buildings during the June 23, 2011 Maden-(Elazığ) earthquake in Turkey. *Engineering Failure Analysis*, 34, 779-791.
- Sorrentino, L., Liberatore, L., Liberatore, D., & Masiani, R. (2014). The behaviour of vernacular buildings in the 2012 Emilia earthquakes. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 12, 2367–2382.
- Tapan, M., Comert, M., Demir, C., Sayan, Y., Orakcal, K., & Ilki, A. (2013). Failures of structures during the October 23, 2011 Tabanlı (Van) and November 9, 2011 Edremit (Van) earthquakes in Turkey. *Engineering Failure Analysis*, 34, 606–628.

- Taskin, B., Sezen, A., Tugsal, U. M., & Erken, A. (2013). The aftermath of 2011 Van earthquakes: Evaluation of strong motion, geotechnical and structural issues. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 11, 285–312.
- Taucer, F., Alarcon, J.E., & So, E. (2009). 2007 August 15 magnitude 7.9 earthquake near the coast of Central Peru: Analysis and field mission report. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 7, 1–70.
- TBDY. (2018). Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği. Ankara: Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı.
- Ural, A., Doğangün, A., Sezen, H., & Angın, Z. (2012). Seismic performance of masonry buildings during the 2007 Bala, Turkey earthquakes. *Natural Hazards*, 60, 1013–1026.
- URL-1. Nurdağı Tarihçe. <http://www.nurdagi.gov.tr/> Erişim tarihi: 24.01.2024
- URL-2. Gaziantep İl Afet Risk Azaltma Planı - İRAP. (2021)  
<https://gaziantep.afad.gov.tr/kurumlar/gaziantep.afad/E-Kutuphane/II-Planlari/Gaziantep-IRAP.pdf> Erişim tarihi: 24.01.2024
- URL-3. Nurdağı Nüfus Verileri. <https://www.tuik.gov.tr/> Erişim tarihi: 24.01.2024
- URL-4. Deprem Verileri. <https://deprem.afad.gov.tr/event-instrumental> Erişim tarihi: 27.01.2024
- URL-5. 6 Şubat 2023 Depreminin Karakteristikleri. <https://www.emsc-csem.org/> Erişim tarihi: 29.01.2024
- URL-6. 6 Şubat 2023 Depreminin İvme Verileri. <https://tadas.afad.gov.tr/list-event> Erişim tarihi: 29.01.2024
- Vuran, E., Serhatoğlu, C., Timurağaoğlu, M.Ö., Smyrou, E., Bal, İ.E., & Livaoğlu, R. (2024). Damage observations of RC buildings from 2023 Kahramanmaraş earthquake sequence and discussion on the seismic code regulations. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 1-30. <https://doi.org/10.1007/s10518-023-01843-3>.
- Yakut, A., Sucuoğlu, H., Binici, B., Canbay, E., Donmez, C., İlki, A., & Ay, B. Ö. (2022). Performance of structures in İzmir after the Samos island earthquake. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 20, 7793–7818.
- Yazgan, U., Oyuç, R., Ertaç Ergüven, M., & Celep, Z. (2016). Seismic performance of buildings during 2011 Van earthquakes and rebuilding efforts. *Journal of Earthquake Engineering and Engineering Vibration*, 15, 591–606.
- Yetkin, M., Dedeoğlu, İ.Ö., & Calayır, Y. (2021). 24 Ocak 2020 Sivrice depremi sonrasında Elazığ ilinde bulunan minarelerde meydana gelen hasarların araştırılması ve değerlendirilmesi. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 33, 379–389.
- Yetkin, M., Dedeoğlu, İ.Ö., & Tunç, G. (2024). February 6, 2023, Kahramanmaraş twin earthquakes: Evaluation of ground motions and seismic performance of buildings for Elazığ, southeast of Türkiye. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 181, 108678.
- Yön, B., Onat, O., & Öncü, M. E. (2019). Earthquake damage to nonstructural elements of reinforced concrete buildings during 2011 Van seismic sequence. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 33(6), 04019075.
- Yurdakul, Ö., Duran, B., Tunaboyu, O., & Avşar, Ö. (2021). Field reconnaissance on seismic performance of RC buildings after the January 24, 2020 Elazığ-Sivrice earthquake. *Natural Hazards*, 105, 859–887.
- Zhao, B., Taucer, F., & Rossetto, T. (2009). Field investigation on the performance of building structures during the 12 May 2008 Wenchuan earthquake in China. *Engineering Structures*, 31(8), 1707-1723.



# Kahramanmaraş Sütçü İmam University Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 02.02.2024  
Kabul Tarihi : 31.05.2024

Received Date : 02.02.2024  
Accepted Date : 31.05.2024

## GÖL ORTAMINDA OLUŞMUŞ BİTÜMLÜ KİLTAŞI ÇÖKELLERİNDE HAVZANIN PALEO-TUZLULUK İNCELEMELERİ: DİYATOME TÜRÜ ALGLERLE TUZLULUK ARASINDAKİ İLİŞKİ

### PALEO-SALINITY INVESTIGATIONS OF THE BASIN IN BITUMINOUS CLAYSTONE SEDIMENTS FORMED IN LACUSTRINE ENVIRONMENT: THE RELATIONSHIP BETWEEN DIATOM TYPE ALGAE AND SALINITY

Ali SARI<sup>1</sup> (ORCID: 0000-0001-6289-3332)

Kamal ISMAYILZADA<sup>2</sup> (ORCID: 0000-0002-0960-0286)

Elif AKISKA<sup>3\*</sup> (ORCID: 0000-0002-6180-4710)

Fuat EROL<sup>4</sup> (ORCID: 0009-0008-5830-3860)

<sup>1,3</sup> Ankara Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Gölbaşı/Ankara

<sup>2</sup> Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 06100, Tandoğan/Ankara

<sup>4</sup> Türkiye Kömür İşletmeleri Kurumu Genel Müdürlüğü, Yenimahalle/Ankara

\*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Elif AKISKA, egunen@eng.ankara.edu.tr

#### ÖZET

Bitümlü şeyller ülkemizdeki pek çok kömür sahasında genel olarak kömürlü serilerin üst litolojilerinde gözlenmektedir. Bu litolojilerden bitümlü çamurtaşları genel olarak bitümlü şeyl ya da bitümlü marn şeklindedir ve bunların neredeyse tamamı tatlı göl suyu koşullarında çökelmiş olup organik madde türleri ise Tip-I kerojenidir. Halbuki, inceleme konusu olan Ilgın Havzası'ndaki bitümlü kayaçlar bitümlü kiltası özelliğinde olup organik madde türü ise tuzlu göl suyu koşullarında yaşamış olan silis kavkılı diyatome türü algelere bağlı olarak, Tip-II kerojenidir. Bu çalışmada, organik maddece çok zengin (%TOC-ort:33.36) olan bu kayaçların çökelim koşullarının daha iyi anlaşılabilmesi için gölün tuzluluk koşulları ile organik maddeyi oluşturan diyatome türü algler arasındaki ilişki araştırılmıştır. Ilgın (Konya) bitümlü kiltasının çökeldiği havzada yapılan paleo-tuzluluk incelemelerinde; Sr/Ba (1.32-5.24) ort: 2.870, Rb/K (0.0036-0.0089) ort:0.0062 ve %TOC/%S (0.38-3.36) ort:1.0033 olup, yapılan paleo-tuzluluk yeniden yapılandırılmalarının birbirleriyle uyumlu oldukları ve gölün tuzlu su koşullarında olduğu belirlenmiştir. Detritik sedimanter kayaçlardaki silisyumun kaynağı ya detritik kaynaklı kuvars ya da biyojenik kavki kaynaklı silisyumdur. Ilgın göl havzasında bitümlü kiltası örneklerindeki silisyumun tuzlu sığ göl suyu koşullarında yaşamış silis kavkılı diyatomelerden kaynaklandığı belirlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Bitümlü kiltası, paleo-tuzluluk, organik madde, biyolojik üretkenlik, diyatome

#### ABSTRACT

Bituminous shales are generally observed in the upper lithologies of coal series in many coal fields in Turkey. Among these lithologies, bituminous mudstones are generally bituminous shale or bituminous marl and almost all of them were deposited under fresh lake water conditions and their organic matter types are Type-I kerogen. The organic matter types are predominantly Type-I kerogen. However, the bituminous rocks in the Ilgın basin exhibit characteristics of bituminous claystone, with the organic matter type identified as Type-II kerogen. This is attributed to the presence of silica-shelled diatom algae that thrived in salty lake water conditions. This study aims to investigate the relationship between the lake's salinity conditions and the diatom algae responsible for the organic matter, providing insights into the deposition conditions of these organic-rich rocks (average TOC:33.36%). In paleo-salinity

ToCite: SARI, A., ISMAYILZADA, K., AKISKA, E.& EROL, F., (2024). GÖL ORTAMINDA OLUŞMUŞ BİTÜMLÜ KİLTAŞI ÇÖKELLERİNDE HAVZANIN PALEO-TUZLULUK İNCELEMELERİ: DİYATOME TÜRÜ ALGLERLE TUZLULUK ARASINDAKİ İLİŞKİ. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 27(3), 838-853.

studies conducted in the Ilgın (Konya) bituminous claystone deposition basin, key ratios such as Sr/Ba(average:2.870, range:1.32-5.24), Rb/K (average:0.0062,range:0.0036-0.0089), and %TOC/%S (average:1.0033,range:0.38-3.36) were examined. The results indicated consistent paleo-salinity reconstructions, affirming the presence of saltwater conditions in the lake. To identify the source of silicon in detrital sedimentary rocks, the study explored whether it originated from detrital quartz or from biogenic shells. It was determined that the silicon in the bituminous claystone samples in the Ilgın lake basin originated from siliceous diatoms that lived in salty shallow lake water conditions.

**Keywords:** Bituminous claystone, paleo-salinity, organic matter, biological productivity, diatome

## GİRİŞ

Gösel bitümlü çamurtaşları denizel petrol kaynak kayalarına nazaran organik madde içerikleri son derece yüksek olan kayaçlardır. Bu kayaçların organik maddece zengin olmalarının en önemli sebebi ise göllerin redoks koşullarıdır. Bitümlü çamurtaşlarının çok büyük bir bölümü tatlı su koşullarında çökelmiş olup, organik madde türleri ise Tip-I kerojen olan bitümlü şeyl ya da bitümlü marn türü kayaçlardır. Ülkemizde bitümlü çamurtaşlarının çökelim ortamlarının jeokimyasal koşulları hakkında bugüne kadar yapılan çalışmaların sayısı son derece sınırlıdır.

Diyatomeler ve bitümlü kayaçların çökeldiği göl koşullarının paleo-tuzluluk incelemelerine örnek olarak Akbulut ve Udoh (2015), Vosoughi Moradi vd. (2016) ve Pehlivanlı (2019)'un çalışmaları örnek olarak verilebilir. Öte yandan, Nielsen vd. (2015) Miyosen yaşlı Güneyce formasyonunun (Güneybatı Türkiye) iz fosillerini, çökeltme ortamı ve oksijen durumunu, Yıldız vd., (2015) İznik gölü sondaj karotlarında tanımlanan Kuvaterner diatom topluluğunu ve paleoortamını, Tokatlı (2012) Sucul sistemlerin izlenmesinde bazı diyatome indekslerinin kullanılmasını (Gürleyik Çayı örneği, Eskişehir), Solak (2011) Yukarı Porsuk Çayında (Kütahya) diyatome indekslerinin uygulanması konusunda, Ocakoğlu vd. (2011) Çubuk Gölünün (Bolu, KB Anadolu) sedimantolojik, jeokimyasal ve paleoekolojik araçlarla paleoklimsel incelemesini yapmışlardır. Akkoca ve Işık (2018) organik maddece zengin Dadaş şeyllerinde detaylı jeokimyasal incelemeler yapmışlardır. Akkoca vd. (2019) Hazar Gölü'nden aldığı Holosen sedimanlarında paleoklimsel çalışmalar yapmışlardır. Uluslararası literatürde ise çökel havzalarının paleo-tuzluk incelemeleri ve diyatomelerle ilgili pek çok çalışma bulunmaktadır. Bunlardan bazıları şunlardır: Campbell ve Williams (1965), Couch (1971), Round (1981), Wang ve Wu (1983), Gasse (1987), Fritz, vd., (1993), Whitton ve Kelly (1995), Cox (1996), Edlund ve Stoermer, (2000), Taylor vd., (2007), Wei, ve Algeo (2020). Ilgın linyitli kömür sahası Konya İlinin kuzeybatısında yer alır (Şekil 1). Genel olarak Ülkemizde kömür oluşumunun görüldüğü havzalarda, altta kömür ve onun üzerinde de bitümlü çamurtaşı istifleri yer alır. Ülkemizde pek çok sahadaki bitümlü çamurtaşı istifleri genellikle bitümlü şeyl ve bitümlü marn özelliğinde olup, 30-450 m aralığında değişen kalınlıklara sahiptir. Ancak, Ilgın sahası bir istisna olup, bitümlü kilaşı özelliğindedir. Bitümlü kilaşları, bitümlü şeyl ve bitümlü marnlara nazaran en yüksek organik madde (OM) içeriğine sahiptir. Bunun nedeni göl tabanına taşınan organik maddelerin süratli bir şekilde kil tarafından örtülüp/sarılıp gerek oksijenle temasının kesilmesi ve gerekse de dipte gezinen/yaşayan diğer organizmaların saldırısından süratli bir şekilde kurtulması nedeniyledir. Yine, Ülkemizdeki pek çok bitümlü çamurtaşı sahasındaki kayaçlar genel olarak tatlı su özelliğinde olan göl ortamında depolanırken Ilgın sahasındaki bitümlü kilaşlarının ise paleo-tuzluluk konfigürasyonlarına göre tuzlu göl suyu şartlarında depolanmış oldukları belirlenmiştir. Bu çalışmada yine Ilgın sahası (Konya) bitümlü kilaşı kayaçlarının organik madde türünün tuzlu su koşullarında yaşamaya uygun silis kavkılı diyatomelerden oluştuğu belirlenmiştir.

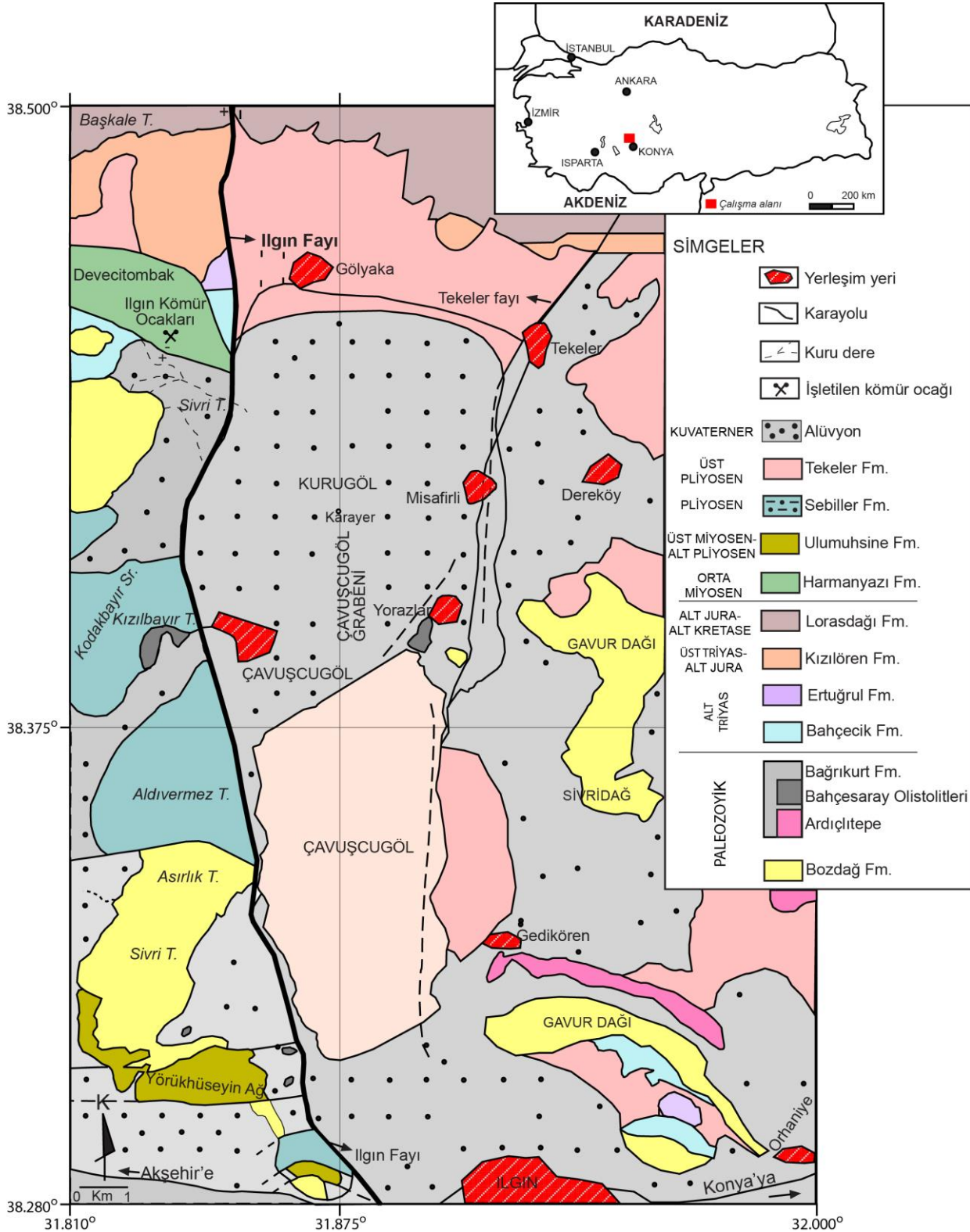


Şekil 1. Yer Bulduru Haritası (Harita Verisi: Google, ©2013 / Landsat / Copernicus)

## JEOLJİ

Bu makalede kullanılan stratigrafik istif “General Topics in Geology and Earth Sciences 1 (Chapter II)” (Sarı vd., 2023) kitap bölümünden alınmıştır. Paleozoyik ve Mesozoyik yaşlı birimler bölgede etkin olan Alpin orojenezinin etkisiyle yoğun deformasyon geçirmişlerdir. Mesozoyik yaşlı birimler, Paleozoyik temel üzerinde açılı uyumsuz olarak yer almaktadırlar. Mesozoyik yaşlı birimler stratigrafik olarak açılı uyumsuz şekilde alttan üste doğru; Alt Triyas yaşlı Bahçecik Formasyonu (metakırıntılılar ve fillit) ile yine Alt Triyas yaşlı Ertuğrul Formasyonu (metakarbonat-metakırıntılı ardalı) ve üzerlerinde de Üst Triyas-Alt Jura yaşlı Kızılören Formasyonu (bitüm kokulu dolomitler) yer alırken, onun da üzerinde ise Alt Jura-Alt Kretase yaşlı Lorasdağı Formasyonu (dolomit ve kalsitik dolomitler) bulunur. Mesozoyik yaşlı bu formasyonların üzerinde de yine açılı uyumsuz olarak Neojen yaşlı formasyonlar yer alır. Bu birimler ise yine alttan üste doğru; Orta Miyosen (Orta Serravaliyen) yaşlı (Karayiğit vd., 1999) Harmanyazı Formasyonu (bitümlü kiltası, marn ve kömürden oluşur), Üst Miyosen-Alt Pliyosen yaşlı Ulumuhsine Formasyonu (tabanında konglomera ile başlar ve üst seviyelerde kireçtaşlarından oluşur), Pliyosen yaşlı Sebiller Formasyonu (kiltası, konglomera ve değişik boyutlu malzemelerden oluşur), Üst Pliyosen-Kuvaterner yaşlı Tekeler Formasyonu (kireçtaşı ve dolomit taneleri içeren konglomera) yer alır (Hüseyinca ve Eren, 2007). Neojen yaşlı formasyonlar üzerinde ise en genç birimler olan güncel alüvyonlar bulunur (Şekil 2, 3).

Bu makalede çalışma konusu olan Harmanyazı Formasyonu'nun kalınlığının yaklaşık 100-120 metre civarında olduğu düşünülmektedir. Birimin litolojisi; kireçtaşı, marn, linyit ve kiltası aralanmasından oluşmakta olup, hakim litolojiyi ise bitümlü kiltaları oluşturur. Bitümlü kiltaları genel olarak gri ve kahverenkli olup, çok zengin organik madde içeriğine sahiptir. Harmanyazı Formasyonu'nun tabanında kalınlıkları 5.0-21,6 metre arasında değişmekte olan iki adet ana kömür damarı bulunmaktadır. Ocakta halen işletilmekte olan kömür kalınlığı ise 0,60-21,55m arasındadır.



Şekil 2. İnceleme Alanına Ait Jeolojik Harita (Hüseyinca ve Eren, 2007).



ÜST SİSTEM		SİSTEM		SERİ		FORMASYON		KALINLIK (m)		SİMGELER		LİTOLOJİ	AÇIKLAMALAR		
SENZOYİK		NEOJEN		MIYOSEN		ALT JURA-ALT KRETASE		ORTA TRIYAS-ALT JURA		ALT TRIYAS				DEVONİYEN - ALT PERMIYEN	
				ÜST PLYOSEN	SEBİL-TEKELER	110	Ts						Kahve-gri renkli çok çeşitli boyutlu tutturulmamış malzeme		
				MIYOSEN	HARMAN-YAZI	120	Th						Karbonat ve kil çimento, iri blok, blok, kum boyutlu malzeme içeren tabakalı konglomera	<b>Açısal uyumsuzluk</b>	
				ÜST MIYOSEN ALT PLYOSEN	ULUMUHSINE	100	Tu						Sarı, kırmızı, beyaz renkli kil, kıltaşı ve tutturulmuş konglomera		
													Tabanda çakıl, blok ve fillit parçalı konglomera içeren sarı, krem renkli kireçtaşı		
													Beyaz, gri, sarı, turuncu, kahve renkli kıltaşı, marn, kireçtaşı ve kömür		
													<b>Açısal uyumsuzluk</b>		
				ALT JURA-ALT KRETASE	LORASDAĞI	400	Tr-Ki						Açık mavi-gri renkli, orta-kalın tabakalı dolomit mermer		
				ORTA TRIYAS-ALT JURA	KIZILÖREN	250	Tr-Jk						Koyu mavi-lacivert renkli orta-kalın tabakalı, bitüm kokulu, dolomit mermer		
				ALT TRIYAS	ERTUĞRUL	100	Tr e						Sarı, pembe renkli, orta-kalın tabakalı mermer ve fillit		
				ALT TRIYAS	BAHÇECİK	350	Tr b						Mor renkli konglomera, metakumtaşı ve fillit		
													<b>Açısal uyumsuzluk</b>		
				DEVONİYEN - ALT PERMIYEN	BAĞRIKURT BAHÇESEHİR OLİSTOLİTLERİ	800	D-Pbbj						Merceksi geometrili, beyaz renkli, masif, dış kökenli rekristalize kireçtaşı		
													Gri, yeşil, kahve renkli orta-kalın tabakalı metakonglomera, metakumtaşı ve fillit		
													Kalın tabakalı, siyah renkli, dolomitik mermer üyesi		
				ÜST SİLÜRİYEN-ALT KARBONİFER	BOZDAĞ	1000	S-Cb						Beyaz, mavimsi gri ve siyah renkli, orta-kalın tabakalı, masif görümlü bitüm kokulu mermer		

Şekil 3. İnceleme Alanının Genelleştirilmiş Stratigrafik Dikme Kesiti (Hüseyinca ve Eren, 2007).

## MATERYAL VE METOT

İnceleme materyallerini Ilgın (Konya) sahasındaki linyit kömürlerinin hemen üzerinde yer alan, organik madde içerikleri çok yüksek olan bitümlü kıltaşı seviyelerinden tabandan tavana kadar sistematik şekilde alınan 14 adet kayaç örnekleri oluşturur. Bitümlü kıltaşı örneklerinde Majör ve Minör element analizleri Ankara Üniversitesi YEBİM laboratuvarında ICP-OES (Inductively Coupled Plasma - Optical Emission Spectrometry) model cihaz

kullanılarak yapılırken, yine 14 adet bitümlü killi kayaların organik madde miktarlarının belirlenmesi için Piroliz analizleri de (%TOC analizi) ise TPAO Ar-Ge Merkezi Müdürlüğü laboratuvarlarında Rock Eval VI cihazı ile IFP 160000 standardı kullanılarak yaptırılmıştır.

## JEOKİMYASAL SONUÇLAR

Bu çalışmada sahada Harmanyazı Formasyonu'nun en iyi görüldüğü yerden tabandaki kömürlü seviyeden başlayarak tavana kadar sistematik olarak bitümlü kilitaşlarından 14 adet örnekleme yapılmıştır (Şekil 4). Sahadan derlenen bitümlü kilitaş örneklerine ait majör ve minör element analiz sonuçları da (Tablo 1)'de verilmiştir.

ÖRNEK ADI	KALINLIK (m)	LİTOLOJİK BİRİM
KI-14	40 cm	Bitümlü Kilitaş
KI-13	30 cm	Bitümlü Kilitaş
KI-12	40 cm	Bitümlü Kilitaş
KI-11	20 cm	Bitümlü Kilitaş
KI-10	25 cm	Bitümlü Kilitaş
-	4 cm	Kilitaş
KI-9	10 cm	Bitümlü Kilitaş
KI-8	40 cm	Bitümlü Kilitaş
KI-7	100 cm	Bitümlü Kilitaş
KI-6	20 cm	Bitümlü Kilitaş
KI-5	20 cm	Bitümlü Kilitaş
KI-4	200 cm	Bitümlü Kilitaş
KI-3	100 cm	Bitümlü Kilitaş
KI-2	40 cm	Bitümlü Kilitaş
KI-1 Ara Linyit	50 cm	Linyit
KI-1	50 cm	Bitümlü Kilitaş
KI-1 Alt Linyit	1000 cm	Linyit

- ölçeksiz -

Şekil 4. Harmanyazı Formasyonu'na Ait Ölçülmüş Stratigrafik Kesit.

**Tablo 1.** Harmanyazı Formasyonu Bitümlü Kiltası Örneklerine Ait TOC, Ana ve İz Element Sonuçları

	TOC (%)	S (%)	Cu (ppm)	Ni (ppm)	Ba (ppm)	Zn (ppm)	Rb (ppm)	Sr (ppm)	Ti (%)	Al (%)	Si (%)	Mo (ppm)	K (%)
KI-14	14,52	1,77	1,50	2,60	140,00	28,90	11,60	499,00	0,09	0,49	5,59	3,10	0,20
KI-13	34,32	9,18	16,20	24,00	70,30	42,20	24,60	99,40	0,08	1,64	14,19	14,60	0,36
KI-12	21,00	3,68	9,80	35,50	94,60	30,00	18,30	496,00	0,03	1,38	15,24	9,10	0,24
KI-11	41,52	8,29	7,50	14,40	29,10	25,80	9,50	94,70	0,05	0,45	11,36	10,60	0,15
KI-10	26,50	4,36	11,00	14,80	59,60	40,70	13,30	177,00	0,11	0,92	19,78	10,00	0,20
KI-9	23,33	5,98	6,90	20,20	89,60	39,60	17,00	228,00	0,06	1,41	8,80	8,10	0,35
KI-8	37,69	3,71	14,00	31,10	115,00	48,50	37,20	301,00	0,09	3,36	13,29	3,40	0,67
KI-7	44,44	5,23	14,00	22,70	77,90	44,20	28,20	277,00	0,16	2,45	11,41	2,70	0,52
KI-6	16,29	3,52	5,90	9,80	75,60	32,70	13,50	293,00	0,26	0,88	22,74	5,70	0,28
KI-5	40,99	9,32	14,90	17,40	45,50	50,90	10,50	151,00	0,14	0,91	4,58	10,80	0,16
KI-4	28,93	2,86	28,00	37,60	112,00	80,70	45,00	148,00	0,05	3,11	29,42	7,90	0,63
KI-3	37,12	11,67	21,00	20,00	52,50	29,50	10,60	72,10	0,06	0,49	6,59	14,50	0,16
KI-3/2	34,51	5,93	16,10	24,20	39,80	58,00	6,00	168,00	0,06	0,14	17,74	8,50	0,12
KI-2	31,07	7,79	8,00	14,50	67,80	28,40	11,70	203,00	0,10	1,24	4,90	8,40	0,20
KI-1	36,41	10,02	16,10	15,90	83,00	14,00	21,10	67,00	0,04	1,85	5,01	15,10	0,27

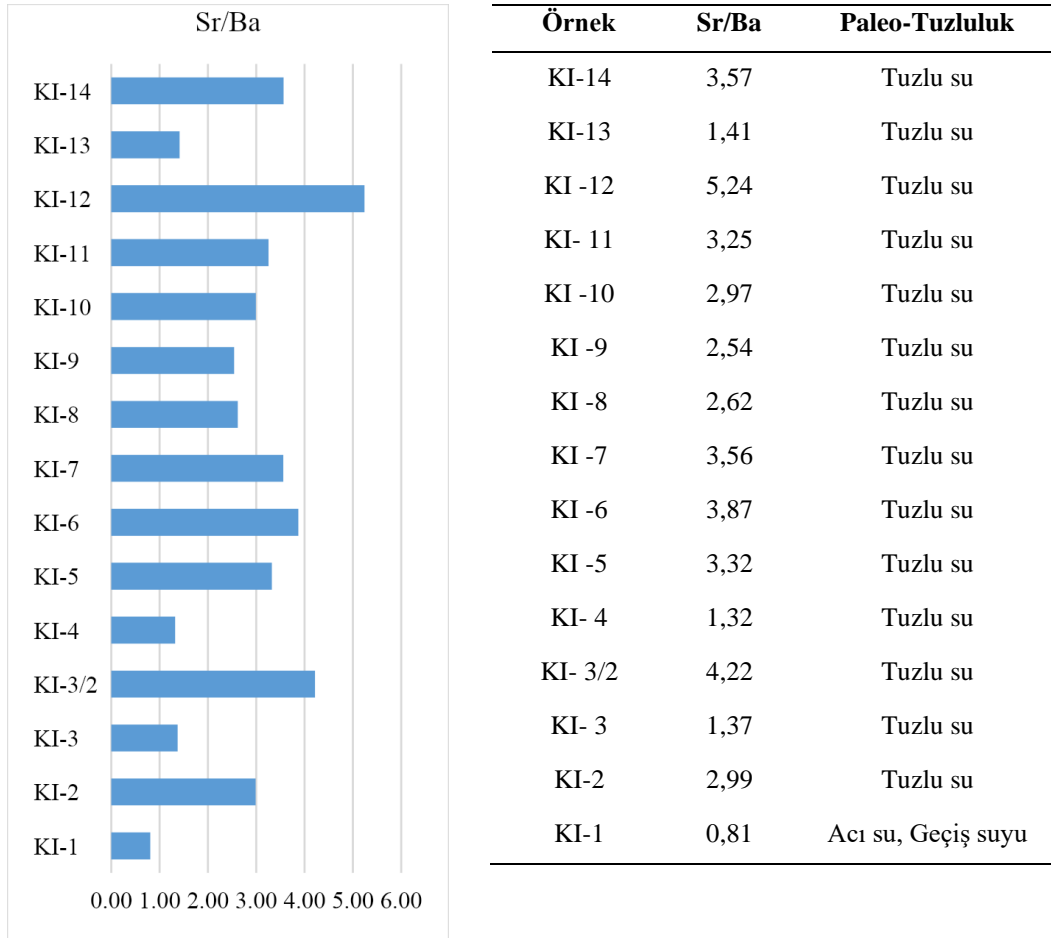
### Sr/Ba Oranına Göre Paleo-Tuzluluk

Stronsiyum/Baryum (Sr/Ba) oranı ile Galyum'un (Ga) element konsantrasyonu paleo-göl havzalarındaki tuzluluğu anlamak için kullanılabilir (Pais ve Jones, 1997; Wei ve Algeo, 2019). Sr ve Ba elementleri kimyasal özellikleri ile benzerdir ancak artan tuzluluğa farklı tepki vermektedirler (Lan vd., 1987; Zheng ve Liu, 1999). Karasal çökeltelerde stronsiyum, hava koşulları sırasında baryumdan daha hızlı serbest kalır ve tatlı sularda düşük Sr/Ba oranlarına (~1.4) neden olur (Yang vd., 2004a; Yang vd., 2004b). Buna karşılık deniz suyunda farklı konsantrasyonlardan dolayı (Sr 8,1 mg/l ve Ba 0,021 mg/l) çok daha yüksek Sr/Ba oranları (~39) bulunmaktadır (Krauskopf, 1956). Bu temel farklılıklar, Sr/Ba oranını eski bir su kütlesinin tuzluluğunun bir göstergesi haline getirir (Deng ve Qian, 1993; Zheng ve Liu, 1999; Wei vd., 2018; Wei ve Algeo, 2019). Genel olarak <0,2, 0,2-0,5 ve >0,5 Sr/Ba oranları tatlı su, acı su ve deniz suyu koşullarında çökelmiş çökelti için eşik değerlerdir (Wei ve Algeo, 2019). Stronsiyum (Sr) ve baryum (Ba), çeşitli sedimanter ortamlarda farklı jeokimyasal davranışa sahip iki elementtir (Liu vd., 1984; Wang, 1996). Sr ve Ba'nın her ikisi de toprak alkali eser elementlerdir ve benzer kimyasal özelliklere sahiptir, fakat baryum tuzları nispeten daha düşük bir çözünürlüğe sahiptir ve baryum iyonunun yarıçapı daha büyüktür. Sonuç olarak Baryum, kil minerali, kolloid veya organik madde tarafından adsorbe eğilimindedir. Suda tuzluluk arttıkça ilk olarak Ba çökelirken, Sr ise sudaki tuzluluk artışı yeterli ve belirli bir miktarda ise çökelir. Bu nedenle pek çok araştırmacı tarafından göl ve denizel havzaların ayrımı ve paleo-su tuzlulukları Sr/Ba oranından yararlanılarak yorumlanmıştır. Örneğin; Sr/Ba oranı <1.0 ise tatlı su, göl ortamını; > 1.0 ise tuzlu su, deniz ortamına işaret eder (Couch, 1971; Chen vd., 2009; Liu vd., 2009). Wang ve Wu (1983) 'de paleo-tuzluluğu yeniden yapılandırmış ve; < 0.6 Sr/Ba oranını gölsel depolanma ortamı, tatlı su; 0.8 - 1.0 Sr/Ba oranını ise denizel depolanma ortamı, tuzlu su için kullanmışlardır. Deng ve Qian (1993) ile Liu (1980) tarafından da Sr/Ba oranı sudaki tuzluluk değişimini yapılandırmak için kullanılmıştır. Araştırmacılara göre, genel olarak > 1.0'den yüksek Sr/Ba oranı yüksek tuzluluğu ve denizel ortamı yansıtırken < 0.6'den düşük Sr/Ba oranı da tatlı su, göl ortamına işaret eder (Tablo 2).

**Tablo 2.** Sr/Ba Oranına Göre Sudaki Paleo-tuzluluk Değişimi (Deng ve Qian, 1993; Liu, 1980)

Sr/Ba oranı	Paleo-Tuzluluk
< 0.6	Tatlı su, göl
0.6 - 1.0	Acı su, Geçiş suyu
> 1.0	Tuzlu su, deniz

İlgın sahasından alınan bitümlü kilitaşı örneklerinin çeşitli araştırmacıların kullandıkları Sr/Ba oranlarına göre göl suyunun paleo-tuzluluk değeri değerlendirildiğinde kesitin tabanındaki KI-1 numaralı örneğin çökmesi esnasında göl suyunun acı su özelliğinde olduğunu ve devamında da gölün tamamen tuzlu suya geçmiş olduğunu söyleyebiliriz (Şekil 5).



Şekil 5. İlgın Sahası Bitümlü Kilitaşı Örneklerinde Sr/Ba Oranlarına Göre Paleo-Tuzluluk Tespiti

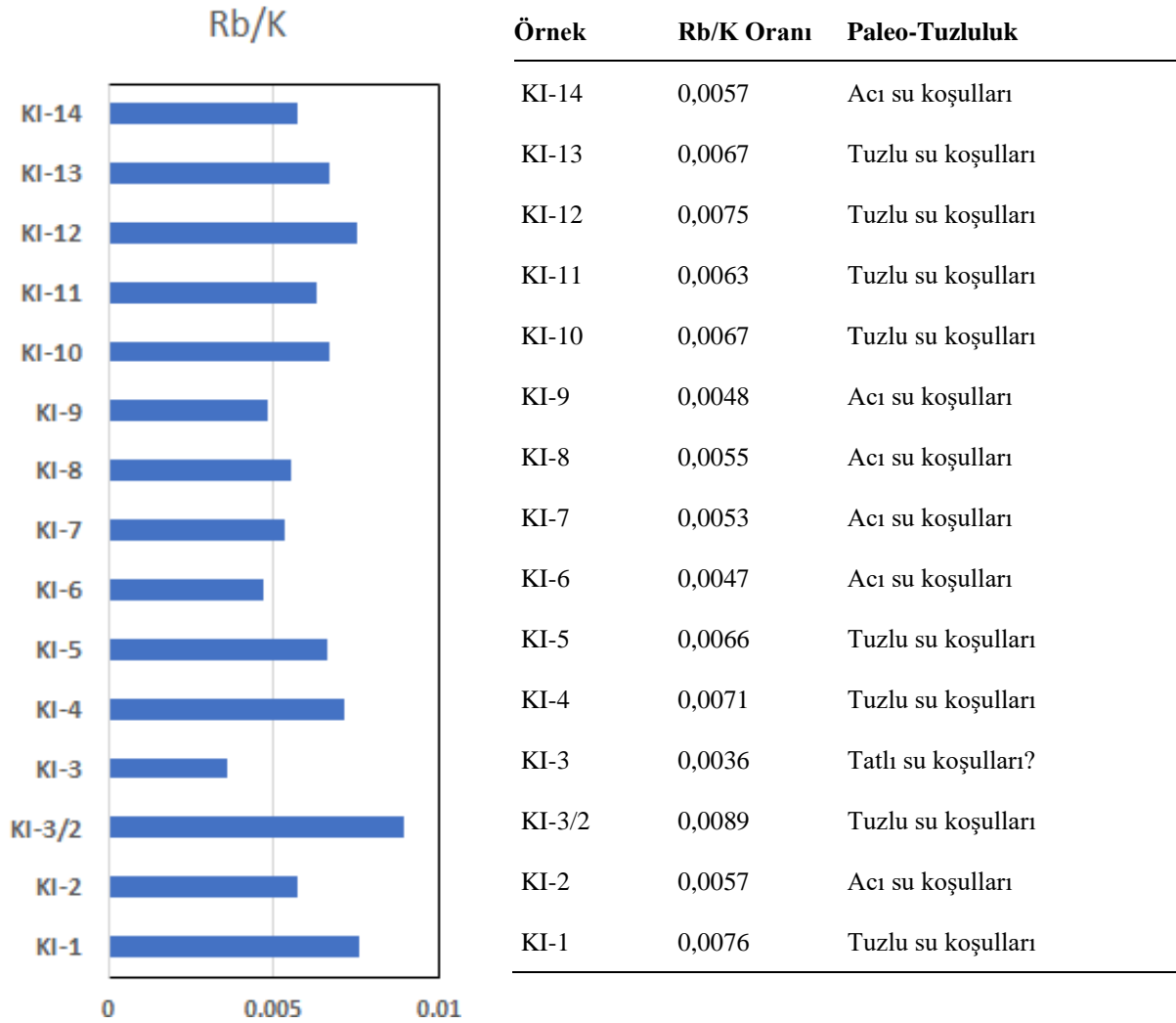
### Rb/K Oranına Göre Paleo-Tuzluluk

Rb/K elementel oranının kullanımı, tatlı su ortamlarına (0,0013 ppm) göre deniz suyundaki artan Rb konsantrasyonları (0,12 ppm) nedeniyle denizel şeylerin daha yüksek Rb konsantrasyonları içerdiği varsayımına dayanmaktadır (Campbell and Williams, 1965; Taylor and McClennan, 1985). Burada K konsantrasyonları ise kil fraksiyonunu temsil etmek için kullanılmaktadır. Paleo-tuzluluk yeniden yapılandırılmaları Rb/K oranına göre Campbell ve Williams'ın (1965) yöntemi izlenerek de yapılabilir (Tablo 3). Bu amaçla, Rb ve K elementlerinin oranı, değişen tuzluluk seviyelerini yorumlamak için kullanılmaktadır.

Tablo 3. Rb/K Oranına Göre Paleo-Tuzluluk Değişimi (Campbell ve Williams, 1965)

Rb/K Oranı	Paleo-Tuzluluk
$\leq 0,004$	Tatlı su koşulları
$>0,004 - \leq 0,006$	Acı su koşulları
$>0,006$	Tamamen tuzlu su/denizel koşullar

İlgın sahasından alınan bitümlü kıltaşı örneklerinin Rb/K oranlarına göre paleo-tuzluluk yapılandırmasında istifin tabanının tuzlu su ve acı su koşullarında olduğu görülürken KI-3 numaralı örneğin tatlı su koşullarının üst sınırında çıktığı görülmektedir (Şekil 5-6). KI-3 numaralı örnekle ilgili husus “Tartışma ve Sonuçlar” bölümünde değerlendirilmiştir.



Şekil 6. İlgın Sahası Bitümlü Kıltaşı Örneklerinde Rb/K Oranlarına Göre Paleo-Tuzluluk Tespiti

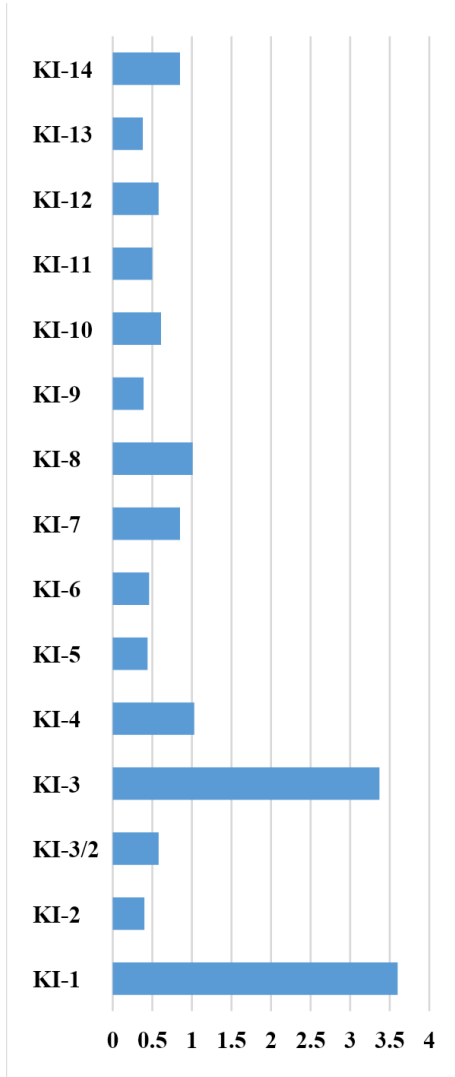
### Organik Jeokimyasal Verilere Göre Paleo-Tuzluluk

Ampirik incelemeler, OM miktarının (%TOC) toplam kükürt içeriğine oranının (%TOC/%S) göllere karşı deniz ortamlarının bir göstergesi olarak kullanılabilir olduğuna ve paleo-tuzluluk yeniden yapılandırması içinde kullanılabileceğine işaret edilmektedir (Berner ve Raiswell,1983; Berner,1984) (Tablo 4).

Tablo 4. %TOC/%S Oranlarına Göre Paleo-Tuzluluk Değişimi (Berner ve Raiswell, 1983; Berner, 1984)

%TOC/%S değerleri	Paleo-Tuzluluk
<2.8	Yüksek tuzlu su ortamı
>2.8	Tatlı su koşulları

İlgın sahasından alınan bitümlü kıltaşı örneklerinin %TOC/%S oranlarına göre paleo-tuzluluk değerlendirmesinde tabandaki KI-1 ve daha üstte yer alan KI-3 numaralı örneklerin çökmesi esnasında göl suyunun tatlı su koşullarında olduğu, üste doğru ise gölün tamamen tuzlu su özelliğinde olduğu görülmektedir (Şekil 7). KI-1 ve KI-3 numaralı örneklerle ilgili husus “Tartışma ve Sonuçlar” bölümünde değerlendirilmiştir.



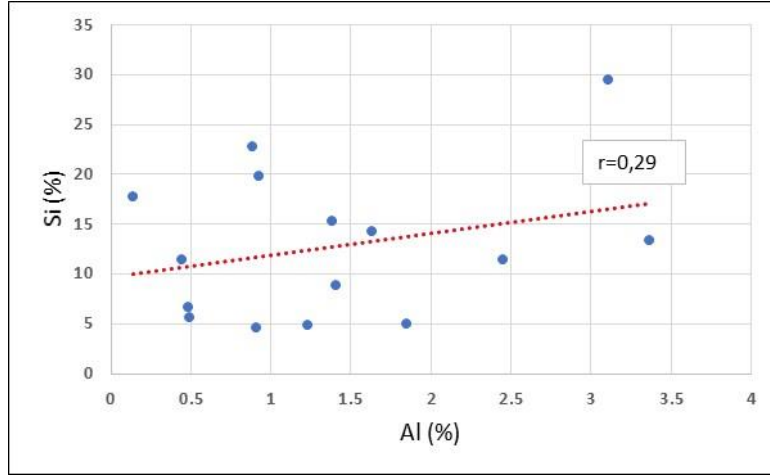
Örnekler	%TOC/%S	Paleo-Tuzluluk
KI-14	0,85	Yüksek tuzlu su ortamı
KI-13	0,38	Yüksek tuzlu su ortamı
KI-12	0,58	Yüksek tuzlu su ortamı
KI-11	0,50	Yüksek tuzlu su ortamı
KI-10	0,61	Yüksek tuzlu su ortamı
KI-9	0,39	Yüksek tuzlu su ortamı
KI-8	1,01	Yüksek tuzlu su ortamı
KI-7	0,85	Yüksek tuzlu su ortamı
KI-6	0,46	Yüksek tuzlu su ortamı
KI-5	0,44	Yüksek tuzlu su ortamı
KI-4	1,03	Yüksek tuzlu su ortamı
KI-3	3,37	Tatlı su koşulları?
KI-3/2	0,58	Yüksek tuzlu su ortamı
KI-2	0,4	Yüksek tuzlu su ortamı
KI-1	3,60	Tatlı su koşulları?

Şekil 7. Ilgın Sahası Bitümlü Kiltası Örneklerinde %TOC/%S Oranlarına Göre Paleo-Tuzluluk Tespiti

### Silisyum'un Kaynak İncelemesi

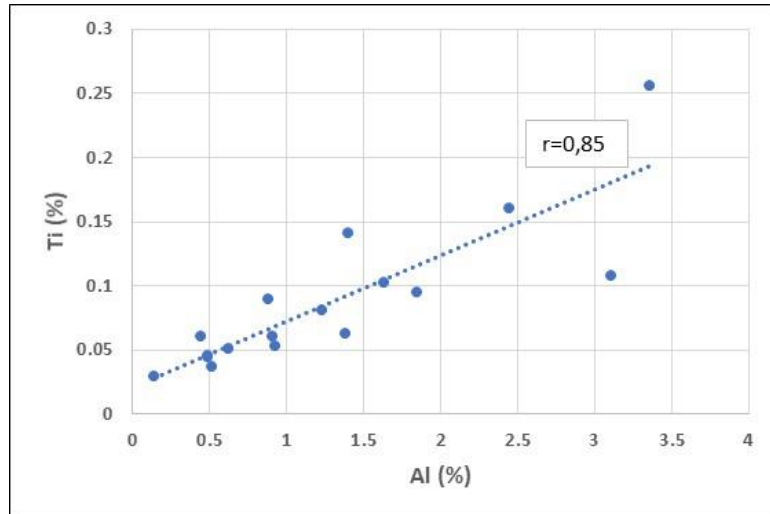
Silisyum (Si); elementinin iki farklı kaynağı vardır. Bunlar; ya detritik yani karasal kaynak (kuvars) ya da biyojenik (kavkı) kaynağıdır. Si'a karşı Al'u çapraz çizmek silisyumun kökeninin biyojenik ya da detritik olduğunu ortaya çıkarır. Eğer Si elementi Al ile güçlü korelasyon ilişkisine sahipse, silika (Si) muhtemelen detritik kaynaklıdır ve kayada kil fraksiyonu ile birlikte bulunmaktadır (Sageman ve Lyons, 2009). Aksine, Si ve Al çok zayıf bir korelasyon ilişkisine sahipse, Si muhtemelen köken olarak biyojenik kaynaklıdır ve otijeniktir.

Ilgın sahası örneklerinde, Si'deki göreceli artış ve Al (doğrusal olmayan ilişki) oranındaki azalma ve Si ile Al arasındaki zayıf korelasyon ( $r=0.29$ ) ilişkisi bitümlü kiltası örneklerinde Si'in büyük bir kısmının biyojenik kaynaklı olduğunu göstermektedir (Şekil 8).



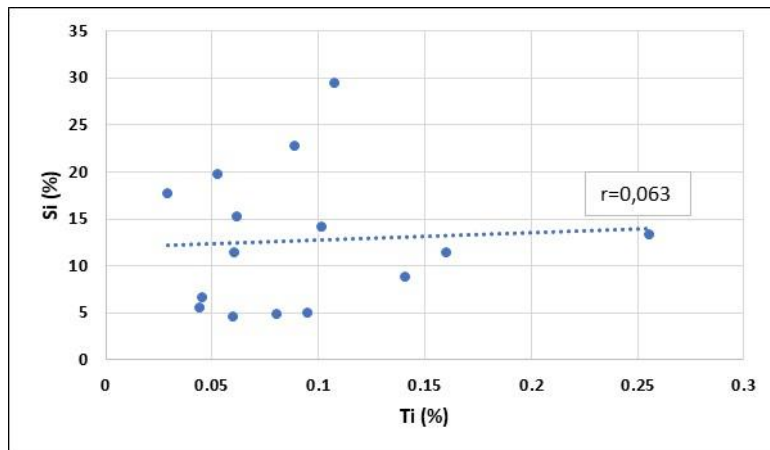
Şekil 8. Alüminyum (Al)'un Silisyum'a (Si) Karşı İkili Diyagramı

Ti'da Al gibi detritik kaynaklı bir element olup, Al'a karşı çapraz çizildiğinde aralarında çok kuvvetli bir korelasyon ( $r=0,85$ ) ilişkisi olduğu görülmektedir (Şekil 9).



Şekil 9. Alüminyum (Al)'un Titanyum'a (Ti) Karşı İkili Diyagramı

Oysaki, Ilgın sahasına ait örneklerde Si'a karşılık Ti çapraz çizildiğinde yine aralarında çok zayıf bir korelasyon ( $r=0,063$ ) ilişkisinin olduğu görülmektedir (Şekil 10). Bu durum Si'un kaynağının biyojenik olduğunu ispatlamaktadır.



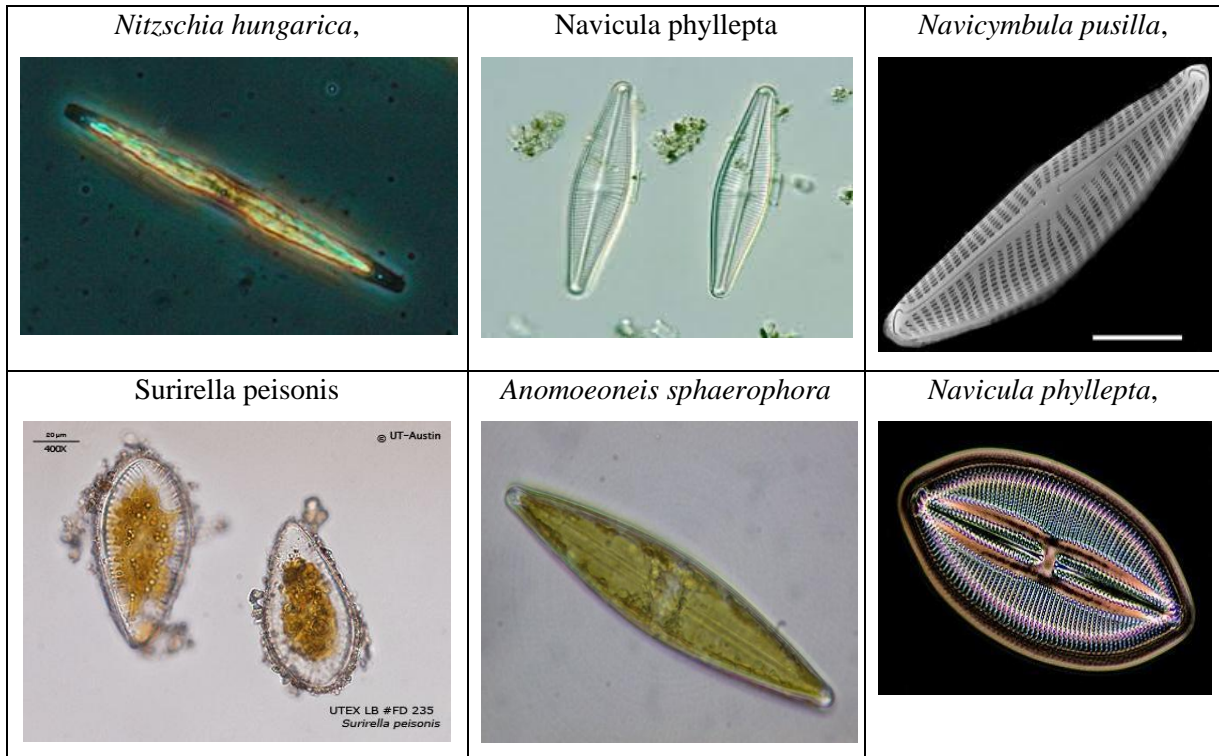
Şekil 10. Titanyum (Ti)'un Silisyum'a (Si) Karşı İkili Diyagramı

## TARTIŞMA VE SONUÇLAR

### *Diyatome Türü Algler ile Paleo-tuzluluk Arasındaki İlişki*

İlgın sahası bitümlü kilitaşı örneklerinde yapılan organik jeokimyasal çalışmalarda örneklerin kerojen tipinin Tip-II olduğu ve çok yüksek organik madde içeriğine, %TOC ortalaması (ort:31,24), sahip olduğu belirlenmiştir. Bu nedenle, İlgın sahası gibi çok tuzlu bir göl ortamında yaşamış olan fitoplankton alglerin türünün belirlenmesinde kayaç bileşiminde bulunan silikanın bir organik üretkenlik göstergesi olarak kullanılabileceğini söyleyebiliriz. Çünkü; silisyum (Si); elementinin iki farklı kaynağı vardır. Bunlar; ya detritik yani karasal kaynak (kuvars) ya da biyojenik (kavkı) kaynağıdır. Silisyumun kaynağı detritik/karasal kaynaklı ise genellikle sedimanter kayaçların bileşimine kuvars minerali olarak girer. Detritik kaynaklı kuvarsın bileşimindeki Si bolluğu organik madde korunumu açısından olumsuzluk teşkil eder. Çünkü, yüksek kuvars bolluğu genellikle bol oksijenli, çalkantılı ve enerjili ortamlarda çökelen kumtaşı ya da silttaşı gibi kayaçlarda görülür. Oysaki, bu tür kayaçların çökeltme ortamlarında bitümlü çamurtaşları çökelemez ve organik madde de bu tür kayaçların çökeltim ortamlarında var olsa da korunamaz.

Tuzlu göl ortamlarında yaşayan canlı türlerinden olan diyatome, tortul kayaçlarda en bol bulunan silis kavkılı fitoplankton alglerden bir tanesidir. Bu alglerin en önemli özelliği, asimetrik ve silisten oluşan iki kapağa sahip olmalarıdır. Diyatome mikroskopik alglerin bir grubudur ve altın-kahverengi pigmentasyonları ve biyolojik olarak üretilen biyojenik opalin silikadan yapılmış bir hücre duvarına sahip olmaları ile karakterize edilir. Opalin silikadan yapıldıkları için diyatome hücre duvarları kırılmaya ve çözünmeye karşı oldukça dirençlidir (Edlund vd., 2000). Diyatome tuzlu göllerde farklı taksonomik bileşimlerde ortaya çıkarlar (Fritz vd., 1993; Gasse vd., 1995). Tuzlu göllerde yaşayan diyatome taksonları kesinlikle geniş tolerans aralıklarına sahip olup, dolayısıyla tuzluluktaki büyük dalgalanmalara bile dayanabilmektedirler (Gasse, 1987). Tuzlu göllerde yaşayan en tipik diyatome taksonlarından bazıları: *Navicula salinicola*, *Navicula phyllepta*, *Campylodiscus clypeus*, *Anomoeoneis sphaerophora*, *Navicula phyllepta*, *Navicymbula pusilla*, *Synedra pulchella*, *Nitzschia hungarica* ve *Surirella peisonis*'dir (Şekil 11). İlgın sahasından derlenen 14 adet bitümlü kilitaşı içerisinde yukarıda bahsedilen diyatome türü örneklerine ait kavkılara rastlanmamıştır. Bunun başlıca sebeplerinden bir tanesi tuzlu göllerde yaşayan silis yapıları plaklarla örtülü olan diyatome türü algal canlılar öldükleri zaman bünyelerindeki silis plaklar dibe çökerek bitümlü kayaçların bileşimindeki silisyuma katılırlarken organik kısımları ise kayacın organik madde miktarını oluşturmasıdır.



Şekil 11. Tuzlu Göllerde Bulunan En Tipik Diyatome Taksonlarından Bazıları (Fritz vd., 1993; Cox, 1996)



### **Paleo-tuzluluk Değerlendirmeleri**

İlgın sahası bitümlü kilitaşı örneklerinde yapılan paleo-tuzluluk incelemelerinde Sr/Ba (1,32 – 5,24) oranı ort: 2,87 olup, kesitin tabanındaki KI-1 (0,81) numaralı örneğin çökmesi esnasında göl acı su özelliğinde olup, üste doğru kesitin geriye kalan tüm örneklerinde İlgın sahasında bitümlü kilitaşı örneklerinin çökeli mi esnasında göl suyunun tamamının tuzlu olduğu görölmektedir (Şekil 5).

İlgın sahasından alınan bitümlü kilitaşı örneklerinin Rb/K oranlarına göre paleo-tuzluluk yapılandırmasında ise istifin tabanının tuzlu su ve acı su koşullarında olduğu görölrken KI-3/2 numaralı örneğin Rb/K değeri nin (0,0036) acı su koşullarına yakın çıktığı görölmektedir (Şekil 5 6). Ancak, bu örnekte Rb/K değeri nin acı su koşullarına geçme sınırında olması ve hem altındaki KI-2 ve hem de üzerindeki KI-3 numaralı örneklerin tuzlu su koşullarında olması nedeniyle KI-3/2 numaralı örneğin çökmesi esnasında göl suyunun acı su koşullarına geçmekte olduğunu ve devamında da gölün tamamen tuzlu suya geçmiş olduğunu söyleyebiliriz. Bu nedenle, Rb/K oranlarına göre yapılan paleo-tuzluluk yapılandırmasının Sr/Ba oranına göre belirlenen paleo-tuzluluk yapılandırması ile uyumlu olduğu görölmektedir.

Ayrıca, bitümlü kilitaşı örneklerinin %TOC/%S oranlarına göre yapılan paleo-tuzluluk yapılandırmasında ise istifin tabanındaki KI-1 ve daha üstte yer alan KI-3 numaralı örneklerin çökmesi esnasında göl suyunun tatlı su koşullarında olduğunu ve devamında da gölün tamamen tuzlu su özelliğinde olduğu görölmektedir (Şekil 7). Ancak, Berner ve Raiswell (1983) ile Berner (1984)'in paleo-tuzluluk yapılandırma çalışmasında sadece tatlı su koşulları ile yüksek tuzlu su ortamı koşulları belirlenmiş olup, her iki ortam arasında var olması gereken bir geçiş ortamı niteliğindeki acı su ortamı ise tanımlanmamıştır. Bu nedenle, her ne kadar KI-1 ve KI-3 numaralı örnekler tatlı su özelliği koşullarında görölse de KI-1'in çökme ortamının hemen üzerinde yer alan, yüksek tuzlu su ortamında çökelmiş olan KI-2 ve KI-3/2 numaralı örneklerle uyumlu olması gerektiğinden KI-1 numaralı örneğin tatlı sudan doğrudan tuzlu suya geçmeden önce "acı su" koşullarında olması gerekir. Yine, KI-3 numaralı örnekten itibaren yukarıya doğru göl suyunun tamamen tuzlu su koşullarında bulunmasından dolayı da KI-3 numaralı örneğin de tatlı su koşulunda değil önce tatlı sudan tuzlu suya geçiş koşulu olan acı su koşullarında olması gerekmektedir.

İlgın sahasından alınan bitümlü kilitaşı örneklerinin gerek Sr/Ba oranları gerek Rb/K oranları ve gerekse de %TOC/%S oranlarına göre yapılan paleo-tuzluluk yapılandırmalarında tuzluluğun temel olarak iklim tarafından kontrol edildiğini göstermektedir. İlgın (Konya) bitümlü kilitaşı çökeli mi havzasında paleo-tuzluluk konfigürasyonlarının birbirleriyle uyumlu olduklarını ve gölün tuzlu su koşullarında olduğunu söyleyebiliriz. Böylece, nemli bir iklim altında göl, tatlı su koşullarını sürdürmek için yeterli su kaynağına sahipken, bitümlü şeylin birikmesi sırasında kurak koşulların hızla gelişmesi tuzlanmaya neden olmuştur. Sonuç olarak bu çalışmada aşağıdaki bulgular elde edilmiştir.

- İlgın sahasından alınan bitümlü kilitaşı örneklerinin Sr/Ba oranlarına göre kesitin tabanında göl suyunun önce acı su özelliğinde olduğu devamında da gölün tamamen tuzlu suya geçmiş olduğu belirlenmiştir.
- Bitümlü kilitaşı örneklerinin Rb/K oranlarına göre gölün paleo-tuzluluk yapılandırmasına göre göl suyunun tamamen acı su ve tuzlu su koşullarında olduğu belirlenmiştir.
- Bitümlü kilitaşı örneklerine ait %TOC/%S oranlarının paleo-tuzluluk değerlendirmesine göre başlangıçta göl suyunun tabanda tatlı su koşullarında olduğu ve üste doğru ise gölün acı su koşullarına geçerek tamamen çok tuzlu su özelliğine geçmiş olduğu belirlenmiştir.
- İlgın sahasına ait bitümlü kilitaşı örneklerindeki Si'in büyük bir kısmının diyatome türü fitoplankton alglerden kaynaklanan biyojenik kavrı kaynaklı olduğu belirlenmiştir.

### **TEŞEKKÜR**

Yazarlar, bu makaleyi eğitim-öğretimindeki 90. yıl münasebetiyle (1934-2024) Ankara Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü'ne (Ankara Jeoloji) ithaf ederler. Bitümlü kilitaşı örneklerinde majör ve minör, iz element analizleri Ankara Üniversitesi YEBİM laboratuvarında ICP-OES (Inductively Coupled Plasma - Optical Emission Spectrometry) model cihaz kullanılarak yapılmış olup, kendilerine teşekkür ederiz.

## KAYNAKLAR

- Akbulut, A., Udoh, A.U., Akbulut. (2015). Diatomlar ve paleolimnoloji çalışmalarındaki önemi. 16.Paleontoloji-Stratiğrafi çalıştayı.25-28 Ekim, Rize, 11 s.
- Akkoca, D.B., Işık, Ü. (2018). Geochemistry of Paleozoic Dadaş Shales from the Foreland of Southeastern Turkey, Bismil, Diyarbakır. *Periodico Di Mineralogia* 87(3), 207-225. <https://doi.org/10.2451/2018PM683>
- Akkoca, D.B., Eriş, K.K., Çağatay, M.N., Biltekin, D. 2019. The mineralogical and geochemical composition of Holocene sediments from Lake Hazar, Elazığ, Eastern Turkey: implications for weathering, paleoclimate, redox conditions, provenance, and tectonic setting. *Turkish Journal of Earth Sciences*. 28(5), 760-785. <https://doi.org/10.3906/yer-1812-8>
- Berner, R. A. (1984). Sedimentary pyrite formation: An update. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 48, 605–615. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(84\)90089-9](https://doi.org/10.1016/0016-7037(84)90089-9)
- Berner, R. A., Raiswell, R. (1983). Burial of organic carbon and pyrite sulfur in sediments over Phanerozoic time: A new theory. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 47, 855–862. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(83\)90151-5](https://doi.org/10.1016/0016-7037(83)90151-5)
- Berner, R. A., Raiswell, R. (1984). C/S method for distinguishing freshwater from marine sedimentary rocks. *Geology*, 12, 365–368. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1984\)12<365:CMFDFD>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1984)12<365:CMFDFD>2.0.CO;2)
- Campbell, F. A., Williams, G. D. (1965). Chemical composition of shales of the Mannville Group (Lower Cretaceous) of central Alberta, Canada. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 49, 81–87.
- Chen, B., Jahn, B. M., Tian, W. (2009). Evolution of the Solonker suture zone: constraints from zircon U-Pb ages, Hf isotopic ratios and whole-rock Nd–Sr isotope compositions of subduction and collision-related magmas and forearc sediments. *Journal of Asian Earth Sciences*, 34(3), 245–257. <https://doi.org/10.1016/j.jseas.2008.05.007>
- Couch, E. L. (1971). Calculation of paleosalinities from boron and clay mineral data. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 55, 1829–1837. <https://doi.org/10.1306/819A3DAC-16C5-11D7-8645000102C1865D>
- Cox, E.J. (1996). Identification of Freshwater Diatoms from Live Material. Chapman&Hall. First Edition, 158 pp.
- Deng, H. W., Qian, K. (1993). Sedimentary geochemistry and environmental analysis. Gansu Science And Technology Press, Gansu (in Chinese).
- Edlund, M. B., & Stoermer, E. F. (2000). A 200,000-year, high-resolution record of diatom productivity and community makeup from Lake Baikal shows high correspondence to the marine oxygen-isotope record of climate change. *Limnology and Oceanography*, 45, 948–962. <https://doi.org/10.4319/lo.2000.45.4.0948>
- Fritz, S. C., Juggins, S., Battarbee, R. W. (1993). Diatom assemblages and ionic characterization of lakes of the Northern Great Plains, North America: A tool for reconstructing past salinity and climate fluctuations. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 50(9), 1844–1856. <https://doi.org/10.1139/f93-207>
- Gasse, F. (1987). Diatoms for reconstructing palaeoenvironments and palaeohydrology in tropical semi-arid zones. Examples of some lakes from Niger since 12,000 B.P. *Hydrobiologia*, 154, 127–163. <https://doi.org/10.1007/BF00026837>
- Gasse, F., Juggins, S., Khelifa, L. B. (1995). Diatom-Based transfer-functions for inferring past hydrochemical characteristics of African lakes. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 117, 31–54. [https://doi.org/10.1016/0031-0182\(94\)00122-O](https://doi.org/10.1016/0031-0182(94)00122-O)

Hüseyinca, M. Y., Eren, Y. (2007). Ilgın (Konya) kuzeyinin stratigrafisi ve tektonik evrimi. Selçuk Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi, 23, 1–2.

Kelly, M.G., Whitton, B.A. (1995). The Trophic Diatom Index: a new index for monitoring eutrophication in rivers. J. Appl. Phycol., 7: 433-444. <https://doi.org/10.1007/BF00003802>

Karayığit, A. I., Akgün, F., Gayer, R. A., Temel, A. (1999). Quality, Palynology, And Paleoenvironmental Interpretation of The Ilgın Lignite, Turkey. International Journal of Coal Geology, 38, 219–236. [https://doi.org/10.1016/S0166-5162\(98\)00015-9](https://doi.org/10.1016/S0166-5162(98)00015-9)

Krauskopf, K. B. (1956). Factors controlling the concentrations of thirteen rare metals in sea-water. Geochimica et Cosmochimica Acta, 9(1–2), 1-32, B1–B32. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(56\)90055-2](https://doi.org/10.1016/0016-7037(56)90055-2)

Lan, X. H., Ma, D. X., Xu, M. G., Zhou, Q. W., Zhang, G. W. (1987). Some geochemical indicators of the Pearl River Delta and their facies significance. Marine Geology & Quaternary Geology, 7(1), 39–49.

Liu, Y. G., Schmitt, R. A. (1984). Chemical profiles in sediment and basalt samples from Deep Sea Drilling Project Leg 74, Hole 525A, Walvis Ridge. In T. C. Jr. Moore, & P. D. Rabinowitz (Eds.), Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project, 74, (pp. 713-730). U.S. Govt. Printing Office.

Liu, Z.J., Yang, L. H., Dong, Q. S., Zhu, J. W., Guo, W., Ye, S.Q., Liu, R., Meng, Q.T., Zhang, H. L., Gan, S.C. (2009). Oil shale in China. Petroleum Industry Press, Beijing (in Chinese with English abstract).

Liu, B. J. (1980). Sedimentary Petrology, Geological Press: Beijing, China, 13–89, (in Chinese).

Nielsen, J.K., Görmüş, M., Uysal, K., Kanbur, S. (2015). Miyosen yaşlı Güneyce formasyonu (Güneybatı Türkiye) iz fosilleri, çökme ortamı ve oksijen durumu. 16. Paleontoloji-Stratigrafi çalıştayı. 25-28 Ekim, Rize, sayfa 48.

Ocakoğlu, F., Tunoğlu, C., Dönmez, E.O., Açıkalın, S. (2011). Çubuk Gölünün (Bolu, KB Anadolu) Sedimentolojik, Jeokimyasal ve Paleokolojik Araçlarla Paleoklimsel İncelemesi. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Proje No: 109Y353, Eskişehir.

Pais, I., Jones, Jr., J. B. (1997). The Handbook of Trace Elements. St. Luice Press, Boca Raton.

Pehlivanlı, B.Y. (2019). Petrollü şeyllerin element karakteristikleri ve organik maddenin paleo-sedimanter şartlarını kontrol eden faktörler; Çeltik formasyonu petrollü şeylleri, Sorgun-Yozgat/Türkiye. MTA Dergisi, 158: 255-268. <https://doi.org/10.19111/bulletinofmre.494703>

Round, F. E. (1981). The Ecology of Algae. Cambridge University Press, Cambridge. 653 p.

Sarı, A., İsmayılzada, K., Pehlivanlı, B. Y., Erol, F. (2023). The Relationship between Depositional Processes and Biological Productivity of Bituminous Claystones: Ilgın (Konya) Field. General Topics in Geology and Earth Sciences 1, 23–40 (Chapter II).

Sageman, B. B., Lyons, T. W. (2009). Geochemistry of Fine-grained Sediments and Sedimentary Rocks in Holland. In H.D. Holland, & K. K. Turekian (Eds.), Readings from the Treatise on Geochemistry, 424–456. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B0-08-043751-6/07157-7>

Solak, C. N. (2011). The Application of Diatom Indices in the Upper Porsuk Creek Kütahya – Turkey. Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences 11, 31-36.

Tokatlı, C. (2012). Sucul sitemlerin izlenmesinde bazı diyatome indekslerinin kullanılması: Gürleyik Çayı örneği (Eskişehir). DPÜ Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi 29, 21-28.

Taylor, J.C., Harding, W.R., Archibald, C.G.M. 2007. An Illustrated Guide to Some Common Diatom Species From South Africa. Report to the water search commission.

Taylor, S.R., McClennan, S.M. (1985). The continental crust; its composition and evolution; 1402 an examination of the geochemical record preserved in sedimentary rocks. Blackwell 1403 Scientific Publication, Oxford (312 pp).

Vosoughi Moradi, A., Sari, A., Akkaya, A. (2016). Geochemistry of the Miocene oil shale (Hançili Formation) in the Çankırı-Çorum Basin, Central Turkey: Implications for Paleoclimate conditions, source–area weathering, provenance and tectonic setting. *Sedimentary Geology* 341, 289–303. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2016.05.002>

Wang, A. (1996). Discriminant Effect of Sedimentary Environment by the Sr/Ba Ratio of Different Existing Forms. *Acta Sedimentologica Sinica* 3(2), 297–304.

Wang, Y., Wu, P. (1983). Geochemical criteria of sediments in the coastal area of Jiangsu and Zhejiang provinces. *J Tongji University*, 4, 79– 87 (in Chinese).

Wei, W., Algeo, T.J. (2020). Elemental proxies for paleosalinity analysis of ancient shales and mudrocks. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 287, 341–366. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2019.06.034>

Wei, W., Algeo, T. J., Lu, Y., Lu, Y. C., Liu, H., Zhang, S., Peng, L., Zhang, J., Chen, L. (2018). Identifying marine incursions into the Paleogene Bohai Bay Basin lake system in northeastern China. *International Journal of Coal Geology* 200, 1–17. <https://doi.org/10.1016/j.coal.2018.10.001>

Whitton, B.A., Kelly, M.G. 1995. Use of algae and other plants for monitoring rivers. *Aust. J. Ecol.* 20, 45-56. <https://doi.org/10.1111/j.1442-9993.1995.tb00521.x>

Yang, S. Y., Li, C. X., Yang, D. Y., Li, X. S. (2004a). Chemical weathering of the loess deposits in the lower Changjiang Valley, China and paleoclimatic implications. *Quaternary International* 117(1), 27–34. [https://doi.org/10.1016/S1040-6182\(03\)00113-7](https://doi.org/10.1016/S1040-6182(03)00113-7)

Yang, S. Y., Jung, H. S., Li, C. (2004b). Two unique weathering regimes in the Changjiang and Huanghe drainage Basins: geochemical evidence from river sediments. *Sedimentary Geology* 164(1), 19–34. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2003.08.001>

Yıldız, A., Yümün, Z.Ü., Meriç, E. (2015). İznik gölü sondaj karotlarında tanımlanan Kuvaterner diatom topluluğu ve paleoortam yorumu. 16. Paleontoloji-Stratigrafi çalıştayı. 25-28 Ekim, Rize, 64 s.

Zheng, R. C., Liu, M.Q. (1999). Study on palaeosalinity of Chang 26 oil reservoir set in Ordos Basin. *Oil & Gas Geology*, 20(1), 20–25. <https://10.11743/ogg19990105>



# Kahramanmaraş Sütçü İmam University Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 03.02.2024  
Kabul Tarihi : 05.07.2024

Received Date : 03.02.2024  
Accepted Date : 05.07.2024

## ÜÇ İPLİK ÖRME KUMAŞLARDA FİZİKSEL ÖZELLİKLER VE PATLAMA MUKAVEMETİ ÜZERİNE FARKLI ASTAR İPLİĞİ ORANLARININ ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

### INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF DIFFERENT BACKED YARN RATIOS ON PHYSICAL PROPERTIES AND BURSTING STRENGTH OF THREE- FLEECE KNITTED FABRICS

Seval UYANIK<sup>1</sup>\*ORCID 0000-0002-9513-5746  
Sabih OVALI<sup>1</sup> ORCID 0000-0002-6370-1977

<sup>1</sup>Adıyaman University, Faculty of Engineering, Department of Textile Engineering, Adıyaman, Turkey

\*Sorumlu Yazar/ Corresponding Author: Seval UYANIK,suyanik@adiyaman.edu.tr

#### ÖZET

Üç iplik örme kumaş, tek plakalı yuvarlak örme makinelerinde atlama, askı ve ilmek elemanlarının birlikte kullanılmasıyla elde edilen örgü çeşididir. İplik besleme miktarı kasnak derecelerinin değiştirilmesiyle ayarlanabilmekte olup üç iplik kumaşta zemin, bağlantı ve astar olarak üç farklı besleme oranları ile çalışan iplikler kullanıldığı için üç besleme bandı ve kasnağı gereklidir. Bu çalışma ile üç iplik yuvarlak örme kumaşlarda zemin ve bağlantı ipliklerinin beslemesi sabit tutulup astar iplik besleme kasnak dereceleri değiştirilmiş ve böylece kumaşta meydana gelen astar iplik oranı değişimlerinin kumaş fiziksel özellikleri ile patlama mukavemeti üzerine etkilerinin ortaya koyulması amaçlanmıştır. Zemin iplik beslemesi sabit iken astar iplik oranındaki değişimlerden kumaş sıklığının etkilenmediği, ancak astar iplik oranı arttıkça kumaş gramaj ve kalınlık değerlerinde paralel düşük oranlarda artış olduğu, diğer yandan patlama mukavemetinde ise astar iplik sıklığının azalmasına bağlı olarak önemsiz oranlarda düşme meydana geldiği tespit edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Üç iplik örme kumaş, astar ipliği, zemin/astar iplik oranı, kumaş fiziksel özellikleri, patlama mukavemeti.

#### ABSTRACT

Three-fleece knitted fabric is a type of knitting obtained by using loop, tuck and float stitches together on single-plate circular knitting machines. The yarn feeding amount can be adjusted by changing the pulley degrees, and three feeding belts and pulleys are required for the ground, binding and backed yarns used in three-fleece fabric. With this study, the feeding of the ground and binding yarns in three-fleece circular knitted fabrics was kept constant and the backed yarn feeding pulley degrees were changed, and thus, it was aimed to reveal the effects of the backed yarn ratio changes in the fabric on the physical properties and bursting strength of the fabric. It has been determined that the fabric density is not affected by the changes in the backed yarn ratio when the ground yarn feed is constant, but as the backed yarn ratio increases, there is a parallel low increase in fabric weight and thickness values, and on the other hand, there is an insignificant decrease in bursting strength due to the decrease in the backed yarn density.

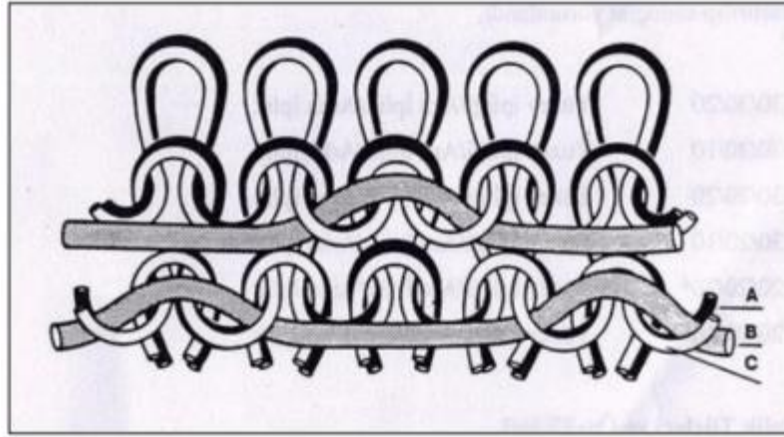
**Keywords:** Three-fleece fabric, backed yarn, ground/backed yarn ratio, fabric physical properties, bursting strength.

## GİRİŞ

Üç iplik örme kumaş, tek plakalı yuvarlak örme makinelerinde atlama, askı ve ilmek kullanılarak elde edilen örgü cinsidir (Şekil 1-2). Üç iplik kumaşta adından da anlaşılacağı üzere kumaşı oluşturmak için zemin, bağlantı ve astar olarak üç farklı iplik kullanılır. Zemin ipliği ile kumaş ön yüzündeki ilmekler, astar ipliği ile arka yüzdeki atlama ve askı yapan ilmekler ve bağlantı ipliği ile de kumaş ön yüzünden gözükmeyip zemin ilmeklerinin arkasında gizlenmiş olan bağlantı ilmekleri yapılır ve astar ipliğinin kumaş ön yüzünde gözükmesi önlenip arka yüzde kalması sağlanır. Böylece bağlantı ipliği sayesinde süprem ve iki iplik kumaşlara göre daha yüksek gramajlı, daha dolgun ve daha sağlam yapılı kumaşlar elde edilmiş olur (Yakartepe & Yakartepe, 1995; Megep, 2024)



Şekil 1. Üç İplik Kumaş (Tekstilbilgi.net, 2024)

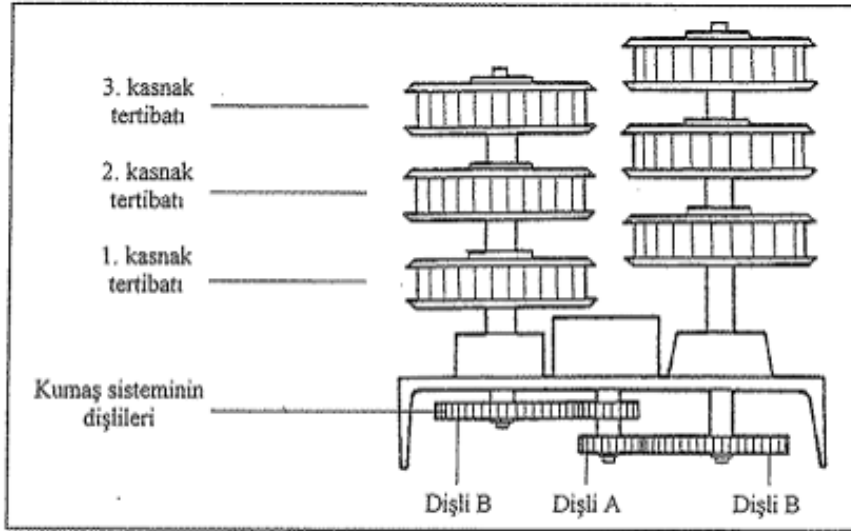


Şekil 2. Üç İplik Şematik Görünüm (Yakartepe & Yakartepe, 1995)

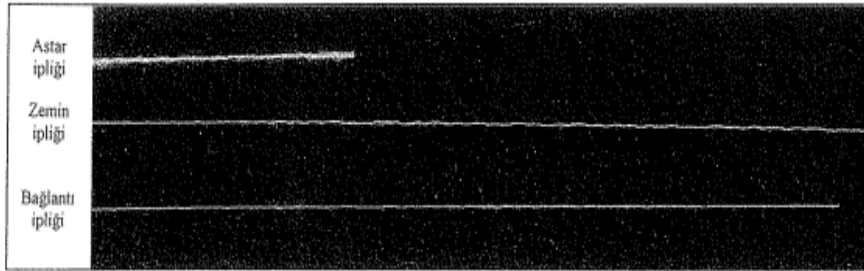
A. Zemin (ön) İplik, B. Astar (arka) İplik, C. Bağlantı (ara) İplik

Üç iplik kumaşta zemin, bağlantı ve astar olarak üç farklı besleme oranları ile çalışan iplikler kullanıldığı için üç bant (üç kasnak) gereklidir (Şekil 3).

Harcanan iplik miktarları farklıdır ve ilmek yapan zemin ve bağlantı iplikleri için daha fazla iplik beslemesi yapılırken kumaş arkasında atlama ve askı yapan astar ipliği çok daha düşük oranda beslenir (Şekil 4)



Şekil 3. Üç İplik Makinelerinde Besleme Kasnakları (Yakartepe & Yakartepe, 1995)



Şekil 4. Üç İplik Kumaşta Harcanan İplik Miktarları (Yakartepe & Yakartepe, 1995)

Süprem örme kumaşa göre yüksek boyutsal stabilite ve termal konfor özellikleri, düşük hava geçirgenliği ile dış hava şartlarına özellikle de soğuğa karşı yüksek koruma özellikleri ile iki iplik ve üç iplik kumaşlar rahatlığın ön plana çıkmasıyla günümüzde çoğunlukla casual giyim, spor ve outdoor giysilerde tercih edilmektedir (Uyanık, 2023).

Üç iplik kumaşlarla ilgili yapılan çalışmalarda çoğunlukla fiziksel ve boyutsal özellikler, şardon etkisi, geçirgenlik ve termal özellikler, mukavemet özellikleri incelenmiştir (Özcan vd., 2005; Foudaa., 2018; Gunesoglu vd., 2005; Gunesoglu&Meriç, 2006; Asker vd., 2019; Kaikobad vd., 2023). Bu çalışmalarda astar ipliğin kalınlaşmasıyla kumaş gramajı ve kalınlığının arttığı (Özcan vd., 2005; Foudaa, 2018), may dönmesi ile kumaş çekme değerlerinin iyileştiği ve şardon işlemi ile ısı konfor özelliklerinin geliştiği (Gunesoglu vd., 2005; Gunesoglu & Meriç, 2006), astar iplik cinsi ve terbiye işlemlerinin şardon haslığı üzerinde etkili olduğu (Asker vd., 2019), astar iplik yoğunluğunun kumaş gramajı ve patlama mukavemetine etki ettiği ve kumaş gramajı ile patlama mukavemeti arasında ise ters yönlü ilişki olduğu (Kaikobad vd., 2023) ortaya konulmuştur.

Mevcut çalışma kapsamında zemin ve bağlantı ipliği kasnak dereceleri sabit tutulup besleme oranları değiştirilmeden astar ipliğini besleyen kasnak dereceleri değiştirilmiş ve farklı astar ipliği oranları elde edilmiştir. Böylece astar ipliği besleme miktarında meydana gelen değişimlerin başka bir deyişle astar ipliğinin standart beslemeye göre az veya çok miktarda beslenmesinin kumaş fiziksel özellikleri ve patlama mukavemeti üzerine etkisi araştırılmış ve böylece daha iyi kumaş özelliklerinin elde edilmesi için optimum astar ipliği kullanım oranının belirlenmesi amaçlanmıştır.

## MATERYAL METOT

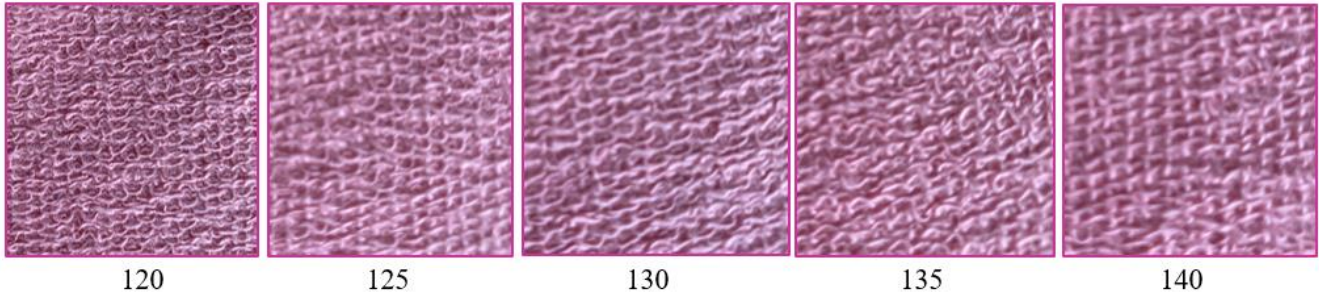
Çalışma amacıyla %100 pamuk O.E rotor Ne 30/1 iplikler zemin (ön yüz) ve bağlantı (ara yüz) iplikleri olarak, Ne 10/1 iplik ise astar ipliği (arka yüz) olarak kullanılmak suretiyle üretim hızı 20 dv/dk, makine inceliği E 20 (20 iğne/inç) olan 32 pus (inç) çapında yuvarlak örgü makinesinde üç iplik kumaş numuneleri üretilmiştir.

Astar ipliği oranının kumaş özellikleri üzerine etkilerini incelemek amacıyla zemin ve bağlantı ipliklerini besleyen

kasnakların dereceleri sabit tutulmuş ve astar iplikleri için farklı ksnak derecelerinde iplik beslemesi yapılarak 5 farklı kumaş elde edilmiştir. Üç iplik örgü kumaş numunelerinin sıklıklarını belirten ilmek sıra-çubuk sayıları TS EN 14971 standardına göre, gramaj değerleri ise TS EN 12127 standardına göre her bir numuneden 5'er adet test yapılarak belirlenmiştir. Kumaş numunelerinin kalınlıkları TS 7128 EN ISO standardına göre Schmit marka dijital kalınlık ölçüm cihazı kullanılarak saptanmıştır. Her bir kumaş türü için farklı yerlerden 5 adet ölçüm alınmıştır. Kumaş numunelerinin patlama mukavemeti testleri ise TS EN ISO 13938-2 standardına göre SDL Atlas M229P model patlama mukavemet cihazı kullanılarak yapılmıştır. Cihazda 7,3 cm<sup>2</sup>'lik test kiti kullanılmış ve her bir numune için 5'er adet ölçüm gerçekleştirilmiştir. Numunelerin özelliklerini gösteren ve yapılan testlerin ortalamaları alınarak oluşturulan test sonuçları Tablo 1'de verilmiştir. Her bir üç iplik kumaş numunesi için astar iplik yoğunluğunu gösteren kumaş arka yüz görünümü Şekil 5'te gösterilmiştir. Çalışma sonuçlarını istatistiksel olarak değerlendirmek amacıyla SPSS 25 paket programı kullanılmış ve %95 güven aralığında astar iplik ksnak derecesi faktör olarak alınıp MANOVA ve Pearson korelasyon testleri uygulanmıştır. MANOVA ve korelasyon sonuçları Tablo 2-3'te gösterilmiştir.

**Tablo 1.** Üç İplik Kumaş Özellikleri

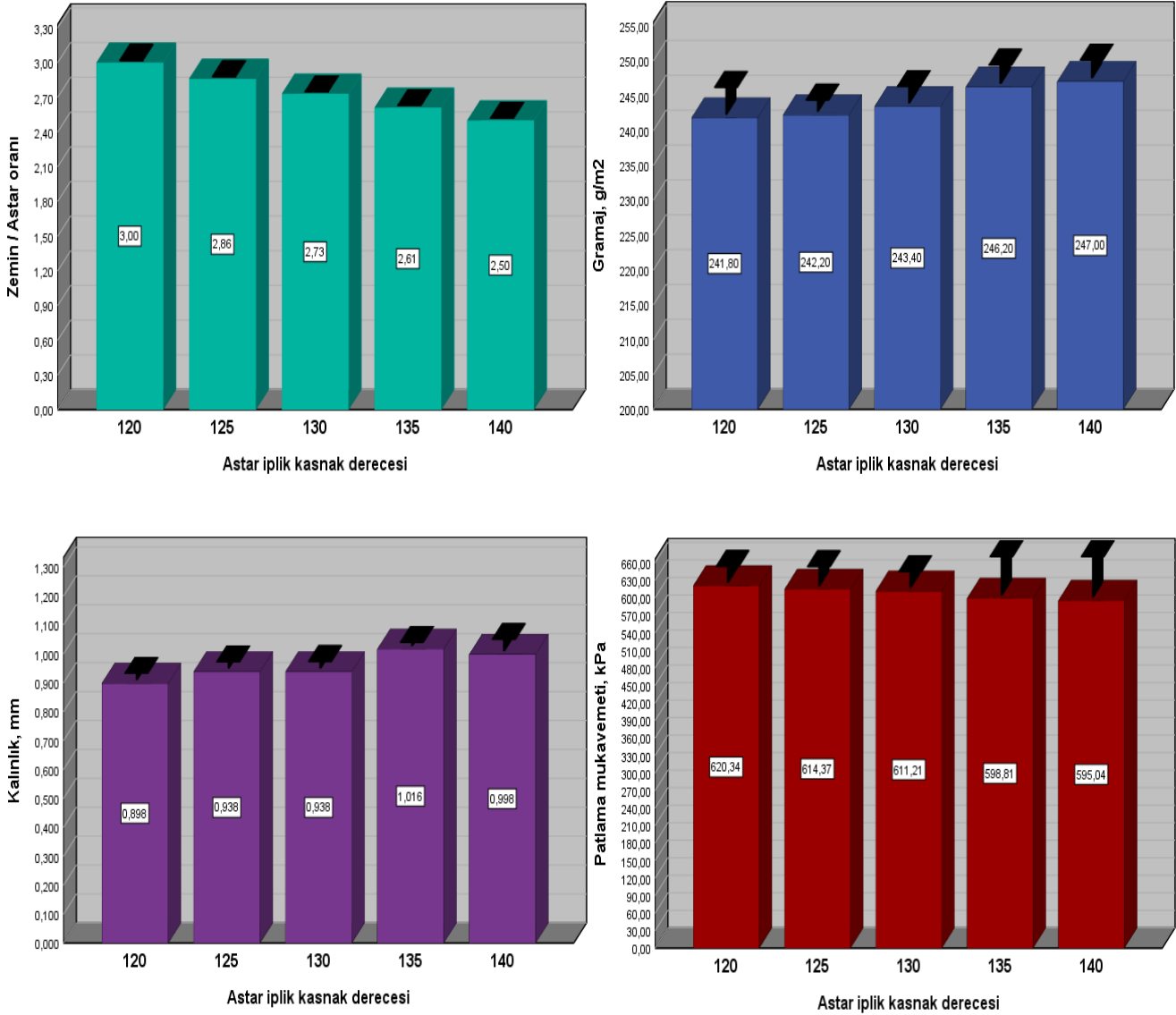
No	Astar İplik Ksnak Derecesi	İlmeK Sıra Sayısı/cm (cpc)	İlmeK Çubuk Sayısı/cm (wpc)	İlmeK Yoğunluğu (ilmeK/cm <sup>2</sup> )	Zemin/Astar oranı	Gramaj g/m <sup>2</sup>	Kalınlık mm	Patlama Mukavemeti (kPa)
1	120	12,5	10,5	131,25	3,00	241,80	0,898	620,34
2	125	12,5	10,5	131,25	2,86	242,00	0,938	614,37
3	130	12,5	10,5	131,25	2,73	243,40	0,940	611,21
4	135	12,5	10,5	131,25	2,61	246,00	1,016	598,81
5	140	12,5	10,5	131,25	2,50	247,00	0,998	595,04

**Şekil 5.** Üç İplik Kumaşların Arka Yüz (Astar) Görünümleri

## BULGULAR VE TARTIŞMA

Test edilen kumaş özellikleriyle elde edilen sonuçlar izleyen grafikler üzerinde gösterilmiştir. Şekil 6'da verilen grafiklerden astar ipliği ksnak derecesi arttıkça beslenen astar iplik miktarının arttığı ve zemin iplik beslemesi sabit tutulduğu için zemin/astar oranının düştüğü, ancak astar ipliği oranının artmasıyla beklendiği gibi gramaj ve kalınlığın arttığı görülmektedir.





Şekil 6. Üç İplik Kumaşların Fiziksel Özellikleri ve Patlama Mukavemeti

Söz konusu gramaj artışları düşük oranda olup kumaşlar arasında belirgin fark yaratmazken kalınlık açısından biraz daha belirgin olup özellikle 135 ve 140 kasnak dereceli üç iplik kumaşlar ile 120, 125 ve 130 kasnak dereceli kumaşlar arasında bir miktar fark olduğu gözükmemektedir.

Patlama mukavemeti açısından grafik incelendiğinde astar iplik kasnak derecesinin artması ve paralelinde zemin/astar oranının düşmesiyle patlama mukavemetinde düşüşler meydana geldiği ancak söz konusu mukavemet düşmelerinin kumaşlar arasında önemli bir fark meydana getirmediği ve tüm kumaşların aynı sınırlar içinde mukavemete sahip olduğu gözlenmektedir Diğer yandan daha önce de belirttiği üzere (Uyanık, 2023) üç iplik kumaşlarda astar ipliği oranının artmasıyla patlama mukavemetinin kısmen düşmesinin, kumaş arkasında yer alan astar iplik uzunluğunun artarak kumaşın daha gevşek hale gelmesi veya başka bir deyişle birim alanda yerleşen astar iplik sıklığının azalması kaynaklı olduğu düşünülmektedir.

Tablo 2’de verilen ANOVA sonuçları, elde edilen bulguları istatistiksel olarak desteklemektedir. Buna göre  $p = 0,000$  değerleri, astar iplik kasnak derecesinin sadece zemin/astar iplik oranı ve kalınlık üzerinde istatistiksel olarak anlamlı etki gösterdiğini;  $p = 0,064$  ve  $p = 0,648$  değerleri ise gramaj ve patlama mukavemeti üzerinde ise anlamlı etkisinin olmadığını göstermiştir. Tablo 3’te verilen Pearson korelasyon sonuçları incelendiğinde ise  $r = -,999^{**}$  katsayı değeri ile, astar iplik kasnak derecesi ile zemin/astar iplik oranı arasında ters yönlü ve oldukça kuvvetli bir ilişki olduğu ve kasnak derecesinin artmasıyla zemin/astar iplik oranının düştüğü anlaşılmaktadır.

Diğer taraftan  $r = ,685^{**}$  değeri astar iplik kasnak derecesi ile gramaj arasındaki ilişkinin vasatın biraz üstünde kuvvetle pozitif yönlü olduğunu,  $r = ,813^{**}$  değeri ise kalınlık ile arasındaki ilişkinin pozitif yönlü ve kuvvetli olduğunu ve  $r = -,384$  değeri ise patlama mukavemeti ile arasındaki ilişkinin ters yönlü ancak zayıf bir ilişki olduğunu ortaya koymuştur.

**Tablo 2.** MANOVA Test Sonuçları

Faktör	Bağımsız Değişken	Tip III Kareler Toplamı	df	Kareler Ortalaması	F	Sig.
Astar iplik kasnak derecesi	Zemin/ astar oranı	,603 <sup>a</sup>	4	,151	.	,000
	Gramaj	73,137 <sup>b</sup>	4	18,284	2,857	,064
	Kalınlık	,033 <sup>c</sup>	4	,008	12,023	,000
	Patlama mukavemeti	1680,683 <sup>d</sup>	4	420,171	,631	,648
a. $R^2 = 1,000$ (Ayarlı $R^2 = 1,000$ )						
b. $R^2 = ,449$ (Ayarlı $R^2 = ,292$ )						
c. $R^2 = ,775$ (Ayarlı $R^2 = ,710$ )						
d. $R^2 = ,153$ (Ayarlı $R^2 = -,089$ )						

**Tablo 3.** Pearson Korelasyon Test Sonuçları

		Zemin / astar oranı	Gramaj	Kalınlık	Patlama mukavemeti
Astar iplik kasnak derecesi	Pearson Korelasyon	-,999 <sup>**</sup>	,685 <sup>**</sup>	,813 <sup>**</sup>	-,384
	Sig. (2-tailed)	,000	,000	,000	,104
**. Korelasyon 0.01 düzeyinde anlamlıdır (2-yönlü).					

## SONUÇLAR

Çalışma ile zemin (ön yüz), bağlantı (ara yüz) ve astar (arka yüz) iplikleriyle elde edilen üç iplik kumaşlarda zemin ve bağlantı ipliklerinin besleme kasnak dereceleri yani iplik besleme miktarları sabit tutulup astar iplik besleme kasnak dereceleri dolayısıyla iplik besleme miktarları değiştirilmiş ve böylece kumaşa meydana gelen astar iplik uzunluğundaki ve dolayısıyla birim alandaki astar iplik oranındaki değişimlerin kumaş fiziksel özellikleri ile patlama mukavemeti üzerine etkilerinin irdelenmesi amaçlanmıştır.

Zemin ve bağlantı ipliklerinin kasnak dereceleri değiştirilmeden sabit miktarda beslenmelerinin sonucu olarak kumaş sıklığının (may sayısı x çubuk sayısı) astar iplik oranındaki değişimlerden etkilenmediği, ancak astar iplik oranı arttıkça kumaş gramaj ve kalınlık değerlerinde paralel düşük oranlarda artış olduğu, diğer yandan patlama mukavemetinde ise astar iplik sıklığının azalmasına bağlı olarak önemsiz oranlarda düşme meydana geldiği tespit edilmiştir.

Sonuç olarak patlama mukavemetinde gözlenen kısmi düşüşler nedeniyle de astar iplik oranı düşük besleme kasnak derecelerinde çalışılmasının fayda sağlayacağı sonucuna varılmıştır. Ancak çalışma şardonlu üç iplik kumaşlar üzerinde yapıldığı için şardonlu kumaşlar ile çalışmanın tekrar edilmesi ileriki çalışmalar için önemli bir katkı sağlayacaktır.

## KAYNAKLAR

Asker, G., Akkus, E., Arslan, I., Sevilmiş, M., Pektaş, K., & Balci, O. (2019). Investigation of the fibre loss effect of raised 3-thread fleecy fabric, *Tekstil ve Mühendis*, 26 (116), 346-352.

Foudaa, A.E. (2018). Effect of backed yarn characteristics on two thread fleecy knitted fabric properties, *Indian*

*Journal of Fibre & Textile Research*,43, 247-251.

Gunesoglu, S., Meric, B., & Gunesoglu, C. (2005). Thermal contact properties of 2-yarn fleece knitted fabrics, *Fibres & Textiles in Eastern Europe*,13 (2), 46-50.

Gunesoglu, S., & Meric, B. (2006). Heat and mass transfer properties of 2-yarn fleece knitted fabrics, *Indian Journal of Fibre and Textile Research*, 31 (3), 415-421.

Kaikobad, M.F., Sayam, A., Paul, S.C., Reza, M.A., Faruque, O., & Apel, N.A. (2023). Sarker, E. Evaluation of physical and mechanical characteristics of three-thread fleece knit fabric for their structural changes; Available at SSRN: <https://ssrn.com/abstract=4441339>.

Megep.(2024).[https://megep.meb.gov.tr/mte\\_program\\_modul/moduller\\_pdf/Tek%20Plaka%20Yuvarlak%20C3%96rme%20Makinelerinde%20C3%9Cretim%202.pdf](https://megep.meb.gov.tr/mte_program_modul/moduller_pdf/Tek%20Plaka%20Yuvarlak%20C3%96rme%20Makinelerinde%20C3%9Cretim%202.pdf), Son erişim: 10 Haziran 2024.

Özcan, G., & Candan, C. (2005). Properties of three-thread fleece fabrics, *Textile Research Journal* 75 (2), 129-133.

Tekstilbilgi.net. (2024). <https://tektstilbilgi.net/etiket/3-iplik-kumas-nedir>, Son erişim: 17 Haziran 2024.

TS EN 14971, Tekstil-Örölmüş Kumaşlar-Birim Uzunluk ve Birim Alan Başına Örgü İlmeği Sayısının Tayini

TS EN 12127, Tekstil-Kumaşlar-Küçük Numuneler Kullanarak Birim Alan Başına Kütlenin Tayini

TS 7128 EN ISO 5084, Tekstil-Tekstil ve Tekstil Mamullerinin Kalınlık Tayini

TS EN ISO 13938-2- Tekstil-Kumaşların patlama özellikleri- Bölüm 2: Patlama Mukavemetinin ve Patlama Gerilmesinin Tayini için Pnömatik Metot

Uyanık, S. (2023). İki iplik örme kumaşlarda farklı astar ipliği oranlarının kumaş özelliklerine etkilerinin incelenmesi, *Çukurova Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 38 (3), 819-826.

Yakartepe, M., & Yakartepe, Z. (1995). Yuvarlak örme kumaş tanıtımı ve analizi, *T.K.A.M. Tekstil ve Konfeksiyon Araştırma Merkezi*, Cilt 12, 652-739, İstanbul.



# Kahramanmaraş Sütçü İmam University Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 04.02.2024  
Kabul Tarihi : 04.03.2024

Received Date : 04.02.2024  
Accepted Date : 04.03.2024

## DUVAR YALITIM TİPLERİ VE CO<sub>2</sub> EMİSYONLARI: SINIRDA KARBON DÜZENLEME MEKANİZMASINI TAMAMLAYICI BİREYSEL İYİLEŞTİRMELER ÇERÇEVESİNDE BİR İNCELEME

### WALL INSULATION TYPES AND CO<sub>2</sub> EMISSIONS: A STUDY WITHIN THE FRAMEWORK OF INDIVIDUAL IMPROVEMENTS COMPLEMENTARY TO THE CARBON BORDER ADJUSTMENT MECHANISM

Ahmet Serhan CANBOLAT<sup>1\*</sup> (ORCID: 0000-0002-0423-6411)

<sup>1</sup> Bursa Uludağ Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Bursa, Türkiye

\*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Ahmet Serhan CANBOLAT, ascanbolat@uludag.edu.tr

#### ÖZET

Sınırdaki Karbon Düzenleme Mekanizması (SKDM) son zamanlarda sıklıkla duyulan bir konu haline gelmiştir. Genel olarak atmosfere salınan CO<sub>2</sub> miktarını azaltmaya yönelik tedbirler içeren SKDM'ye bireysel olarak herkesin katkı sunması, farklı anlaşmalarla taahhüt ettiğimiz sıfır emisyonla ulaşma politikası kapsamında ülkemiz için faydalı olacaktır. Karbon emisyonunun azalma potansiyeli en yüksek sektör olan inşaat sektöründe yapılan yalıtım uygulamaları bu çalışmanın ana konusudur. Bu kapsamda soğutma kaynaklı enerji ihtiyacından dolayı ortaya çıkan CO<sub>2</sub> miktarları (operasyonel emisyon) ve duvar bileşenlerinin üretim sürecinden dolayı atmosfere salınan CO<sub>2</sub> miktarları (gömülü emisyon) farklı duvar yapıları için hesaplanmıştır. Bu çalışma, olumsuz çevresel etkileri en aza indirmek amacıyla iki farklı senaryo üzerinde yapılan analizleri içermektedir. İlk senaryoda, altı farklı duvar yapısı oluşturulmuş ve her bir yapının, soğutma sezonunda atmosfere yaydığı emisyon miktarları detaylı bir şekilde incelenmiştir. Ayrıca, çeşitli duvar tiplerinde atmosfere yayılan CO<sub>2</sub> emisyon miktarları ve bu emisyonların kaynakları (enerji, yalıtım, sıva, beton), grafiksel olarak sunulmuştur. İkinci senaryoda ise duvarlara sonradan uygulanan farklı kalınlıklardaki yalıtımın, atmosfere salınan toplam emisyon miktarları üzerindeki etkisi incelenmiş olup, çevresel açıdan optimum yalıtım kalınlığı 10 cm olarak tespit edilmiş ve bu yalıtım kalınlığında atmosfere salınan CO<sub>2</sub> miktarı 5,05 kg/m<sup>2</sup> olarak hesaplanmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** CO<sub>2</sub> emisyonu, yalıtım, güneş radyasyonu, optimizasyon, SKDM

#### ABSTRACT

The Carbon Border Adjustment Mechanism (CBAM) has become a frequently discussed topic in recent times. The individual contribution to the CBAM, which includes measures to reduce the amount of CO<sub>2</sub> released into the atmosphere, will be beneficial for our country in the context of the zero-emission policy we have committed to with various agreements. The focus of this study is insulation applications in the construction sector, which is the sector with the highest potential for reducing carbon emissions. In this context, the CO<sub>2</sub> emissions arising from cooling energy demand (operational emissions) and the CO<sub>2</sub> emissions released into the atmosphere due to the production process of wall components (embodied emissions) were calculated for different wall structures. The analyses were conducted for two different scenarios. In the first scenario, six different wall structures were created, and the emissions released into the atmosphere for each structure were examined in detail. Furthermore, the amounts of CO<sub>2</sub> emissions released into the atmosphere from various wall types and the sources of these emissions (energy, insulation, plaster, concrete) were presented. In the second scenario, different insulation thicknesses applied to the walls were studied for their impact on total emissions to the atmosphere. The optimal insulation thickness was found to be 10 cm, resulting in a calculated CO<sub>2</sub> emission of 5.05 kg/m<sup>2</sup>.

**Keywords:** CO<sub>2</sub> emission, insulation, solar radiation, optimization, CBAM

ToCite: CANBOLAT, A. S., (2024). DUVAR YALITIM TİPLERİ VE CO<sub>2</sub> EMİSYONLARI: SINIRDA KARBON DÜZENLEME MEKANİZMASINI TAMAMLAYICI BİREYSEL İYİLEŞTİRMELER ÇERÇEVESİNDE BİR İNCELEME. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 27(3), 861-872.

## GİRİŞ

Son yıllarda teknolojinin çok hızlı ilerlemesi, artan nüfus ve yaşam standartlarının yükselmesi nedeniyle enerji tüketiminde ve buna bağlı olarak sera gazı emisyonlarında büyük bir artış yaşanmaktadır. Sera gazlarının artışı, küresel ısınma ve iklim değişikliğine yol açarak çevre ve insan sağlığı üzerinde birçok olumsuz etkiye neden olmaktadır. Bu etkiler arasında artan orman yangınları, mevsimsel dengesizlikler, eriyen buzullar, deniz seviyesinin yükselmesi, salgın hastalıkların yayılması ve solunum sistemi problemleri sayılabilir. Bu bulgular, sera gazlarının kontrol altına alınmasının önemini arttırmaktadır. Buna bağlı olarak başta uluslararası düzeyde olmak üzere birtakım önlemler alınmaktadır. Bunlardan en önemlisi Avrupa Birliği'nin (AB), daha temiz, sürdürülebilir ve sağlıklı bir çevre için ortaya koyduğu ve Avrupa Yeşil Mutabakatı adını verdiği kapsamlı bir yol haritasıdır. Avrupa Yeşil Mutabakatının sera gazı emisyonlarının azaltılması yönünde kullanacağı temel araçlardan birisi de Sınırdaki Karbon Düzenleme Mekanizmasıdır (SKDM) (European Union, 2023). SKDM, Türkiye'deki ihracat odaklı çalışan firmaların ürünlerini üretirken karbon ayak izini azaltmalarını, dolayısıyla uluslararası ticaretin iklim dostu bir perspektifle işlenmesini amaçlamaktadır. Aksi halde AB ithal ettiği bazı ürünler için karbon içeriklerine göre "karbon salınımı vergisi" alınmasını öngörmektedir (İmer Ertunga ve Seyhun, 2022). AB özellikle sera gazı emisyonu yüksek, enerji-yoğun sektörlerde emisyonların 2005 yılına kıyasla 2030 yılında %62 oranında azaltılmasını hedeflemektedir (Türkiye Cumhuriyeti Ticaret Bakanlığı, 2023). SKDM tüzüğü 1 Ocak 2026 tarihinde resmi olarak devreye girecek olup, bu tarihe kadar olan süre geçiş dönemi olarak adlandırılmıştır ve tüzüğe uygun hareket etmeyen firmalara herhangi bir mali yükümlülük doğmayacaktır. Fakat bu uzun vadeli bir süreç olduğu için tüm sektörler karbon emisyonunu azaltmaya yönelik çalışmalara şimdiden başlamıştır. Ayrıca Türkiye'nin imzalamış olduğu Paris Anlaşması'na göre 2053 yılına kadar net sıfır emisyon durumuna ulaşma taahhüdü bulunmaktadır. Bununla beraber Türkiye, 2022 yılında Mısır'ın Şarm El-Şeyh şehrinde gerçekleştirilen Birleşmiş Milletler İklim Değişikliği Çerçeve Sözleşmesi'nin 27. Taraflar Konferansı'nda 2010 yılındaki karbon emisyon seviyelerinin 2030 yılına kadar %21'e azaltım hedefini, %41'e yükseltmiştir (Türkiye Cumhuriyeti Dışişleri Bakanlığı, 2022).

Türkiye Cumhuriyeti Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı ve Avrupa İmar ve Kalkınma Bankası iş birliği ile hazırlanan rapora göre SKDM'den en çok etkilenecek ikinci sektörün çimento sektörü olacağı tahmin edilmektedir (Türkiye Cumhuriyeti Çevre Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı, 2023). Raporda en çok etkilenecek sektör olarak da demir-çelik sektörü ön plana çıkmaktadır. Bu bağlamda bakıldığında aslında genel olarak inşaat sektörünün en fazla etkilenecek dolayısıyla karbon emisyon azaltma potansiyeli en fazla olan sektör olduğu görülmektedir. Tüm bu bilgiler ışığında, şirketlerin kendi bünyelerinde yapacakları iyileştirmeler dışında karbonsuzlaşmayı bir devlet politikası haline getirmek ve yeşil dönüşümü tamamlayıcı strateji ve teşviklerle genişletmek Türkiye'ye daha fazla sosyal ve ekonomik faydalar sunacaktır.

İnşaat sektörünün SKDM'den en fazla etkilenecek sektör olduğu ve buna paralel olarak toplam enerji tüketiminin yaklaşık %40'ının ve sera gazı emisyonunun %35'inin konut ve hizmet binalarında gerçekleştiği bilinmektedir (Canbolat, 2023). Binalardaki ısı transferinin büyük bir kısmı dış cepheden gerçekleştiği için enerji tasarrufunun en pratik ve zahmetsiz yöntemi termal yalıtım uygulamasıdır. Yalıtım uygulaması ile binayı ısıtmak veya soğutmak için ihtiyaç duyulan enerji miktarları ve buna bağlı olarak CO<sub>2</sub> emisyonları azalacaktır. Son yıllarda bina dış cephesine uygulanan yalıtımın enerji tüketimine, maliyete ve karbon emisyonlarına etkisini inceleyen çalışmaların sayısı artmaktadır. (Yüce vd., 2021) soğuk iklim bölgesinde bulunan ve ısıtma ihtiyacı yüksek olan bir bölge için farklı yalıtım malzemeleri, yakıt tipleri ve duvar yapıları için kapsamlı analizler yapmıştır. Yakıt olarak kömür ve doğalgaz, yalıtım malzemesi olarak taş yünü, cam yünü, EPS ve XPS, duvar yapısı olarak ise yatay delikli tuğla ve bims kullanmışlardır. Yatay delikli tuğla yerine bims kullanımının maksimum enerji tasarrufu sağladığı sonucuna varmışlardır. (Bademlioğlu vd., 2018) yoğunlaşma riskini göz önünde bulundurarak, aylara göre gerekli minimum yalıtım kalınlıklarını Türkiye'nin 4. derece gün bölgesinde bulunan bir il hesaplamışlardır. Şubat ayını yoğunlaşma riski en fazla olan, dolayısıyla yoğunlaşmayı önlemek için maksimum kalınlıkta yalıtıma ihtiyaç duyulan ay olarak tespit etmişlerdir. Çalışma sonucunda şubat ayı için gerekli minimum yalıtım kalınlığını 10,4 cm olarak elde etmişlerdir. (Arslan vd., 2023) yaptıkları deneysel çalışmada güçlendirilmiş polimer katkılı betonarme yapı elemanlarında farklı yangın yalıtım malzemelerinin ve beton dayanımının sıcaklık geçişlerine etkilerini incelemişlerdir. Araştırma sonucunda taş yünü ile yalıtım yapılan betonarme elemanların koruyuculuğu cam yünü ve kırmızı alçıpana göre daha yüksek olduğu görülmüştür. Ayrıca yalıtım malzemesinin sıcaklık geçişindeki rolünün çok önemli olduğu sonucuna varmışlardır. (Dombaycı vd., 2020) ekserji denklemlerini kullanarak farklı yalıtım malzemeleri için CO<sub>2</sub> emisyonunu azaltan en uygun yalıtım kalınlığını belirlemişlerdir. Yakıt olarak doğal gaz, yalıtım malzemesi olarak da taş yünü ve cam yünü kullanmışlardır. Çalışma koşullarına göre ideal yalıtım kalınlığı taş yünü için 18 cm, cam yünü için ise 40 cm olarak tespit edilmiştir. (Huang vd., 2020), farklı yakıt türleri ve yalıtım malzemeleri için minimum toplam

maliyeti veren optimum yalıtım kalınlığını belirlemişlerdir. Yeni bir aerojel süper yalıtım malzemesini köpüklü poliüretan, ekstrüde polistiren, genişletilmiş polistiren ve cam elyaf gibi diğer geleneksel yalıtım malzemeleriyle karşılaştırmışlardır. Ayrıca her bir malzemeyi ekolojik açıdan da değerlendirmişler ve atmosfere salınan CO<sub>2</sub> miktarlarını hesaplamışlardır. (Axaopoulos vd., 2019) CO<sub>2</sub> emisyon faktörlerini kullanarak Yunanistan'da bulunan Atina şehrinin çevresel açıdan ideal yalıtım kalınlıklarını farklı koşullar için tespit etmişlerdir. Çalışma sonuçlarına göre duvar türlerine, yalıtım malzemelerine ve duvar yönlerine göre ideal yalıtım kalınlıkları 11,2 cm ile 23,4 cm arasında değişmektedir. (Canbolat, 2023) farklı yalıtım malzemeleri ve yakıt tipleri kullanarak üç farklı bina kullanım durumu için (yazlık, kışık ve dört mevsim ev) hem maliyeti hem de karbon emisyonunu azaltmaya yönelik kapsamlı bir optimizasyon çalışması yapmıştır. Analizler Türkiye'deki dört farklı iklim bölgesi için ayrı ayrı yapılmıştır. Çalışma sonuçlarına göre amaç sadece karbon emisyonunu azaltmak olduğunda elde edilen optimum yalıtım kalınlığı, amaç sadece maliyeti azaltmak olduğunda elde edilen optimum yalıtım kalınlığından her zaman daha yüksek çıkmıştır. (Akan vd., 2022) binalardaki yalıtım kaynaklı CO<sub>2</sub> emisyonunu hesaplamak üzere bir modelleme yapmışlardır. Matlab programında oluşturdukları model ile dört farklı yakıt, beş farklı yalıtım malzemesi, üç farklı durum (ısıtma, soğutma ve ısıtma-soğutma beraber) ve beş farklı il için CO<sub>2</sub> emisyonlarını hesaplamışlardır. Isı yalıtımı yapılan binalarda CO<sub>2</sub> emisyonunun ısıtma sezonunda yaklaşık %66-76, soğutma sezonunda ise %46-69 oranında azaldığını tespit etmişlerdir.

Görüldüğü gibi son yıllarda, binalardaki yalıtım uygulamalarının maliyete etkilerinin yanında karbon emisyonuna etkileri konusunda yapılan çalışmalara da literatürde sıklıkla rastlanmaktadır. Genelde yapılan çalışmalarda ısıtma veya soğutma kaynaklı enerji ihtiyacından dolayı ortaya çıkan CO<sub>2</sub> miktarı ve yalıtım malzemesinin üretim sürecinden dolayı atmosfere salınan CO<sub>2</sub> miktarı hesaplanmıştır. Bu çalışmada ise yalıtım malzemesi dışında duvarı oluşturan diğer bileşenler (iç sıva, dış sıva, beton) de hesaplamalara katılmış ve daha detaylı sonuçlar elde edilmiştir. Çalışmada iki farklı senaryoya göre analizler yapılmıştır. İlk senaryoda İzmir ilinde sıfırdan yapılan bir bina olduğu ve toplam 20 cm'lik bir duvar olacağı varsayılmıştır. Buna bağlı olarak 6 farklı duvar yapısı oluşturulmuş ve her bir duvar yapısının soğutma sezonunda atmosfere salacağı emisyon miktarları hesap edilmiştir. İkinci senaryoda ise hali hazırda inşa edilmiş bir bina olduğu ve duvarlarının yalıtımsız olduğu varsayılmıştır. Bu duvarlara sonradan farklı kalınlıklarda yalıtım uygulaması yapılmış ve yine soğutma sezonunda atmosfere salınan toplam emisyon miktarları, çevresel açıdan optimum yalıtım kalınlığı ve CO<sub>2</sub> tasarruf oranları hesap edilmiştir.

## MATERYAL VE YÖNTEM

### Güneş Radyasyonu Hesaplamaları

Derece gün yöntemi, binalardaki enerji tüketiminin tahmininde kullanılan kullanışlı ve güvenilir bir yöntemdir. Bu çalışmada da soğutma kaynaklı yıllık enerji ihtiyacının tespitinde derece gün yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntemde göre, ortalama dış ortam sıcaklığı ( $T_0$ ) ile referans sıcaklığı ( $T_r$ ) arasındaki fark arttıkça binanın enerji ihtiyacı da artmaktadır. Referans sıcaklığı, binadaki ısı kaynakları ve kayıpları arasındaki denge noktasını temsil eden bir sıcaklıktır. Güneş radyasyonunun hesaba katılması, derece gün yönteminin daha doğru sonuçlar vermesini sağlar. Bu nedenle, özellikle sıcak iklimlerde veya güneş radyasyonunun yüksek olduğu durumlarda, güneş radyasyonunun hesaba katılması önemlidir. Güneş radyasyonunun hesaba katılması için, günlük ortalama dış hava sıcaklığına güneş radyasyonunun etkisi eklenir. Bu şekilde elde edilen sıcaklık değeri,  $T_{güneş}$  olarak ifade edilmiştir. Çalışma soğutma sezonu için yapıldığından soğutma derece gün sayısı ( $CDD$ ) aşağıdaki formül yardımıyla hesaplanmıştır.

$$CDD = \sum_{g=1}^{365} (T_{güneş} - T_r) \quad T_{güneş} > T_r \text{ olduğu durumda} \quad (1)$$

Bu denklemde geçen  $T_{güneş}$  ifadesi aşağıdaki formül ile hesaplanmaktadır (Cengel, 2002).

$$T_{güneş} = T_0 + \frac{\alpha_s \dot{q}_s}{h_0} - \frac{\varepsilon \sigma (T_0^4 - T_{çevre}^4)}{h_0} \quad (2)$$

Yukarıdaki eşitlikteki  $T_0$  ortalama dış ortam sıcaklığı,  $\alpha_s$  yüzeyin güneş soğurma katsayısı,  $h_0$  birleşik ısı taşınım katsayısı,  $\dot{q}_s$  yüzeye gelen güneş ışınımı değeri,  $\varepsilon$  yüzeyin yayma katsayısı,  $\sigma$  Stefan Boltzman sabiti,  $T_{çevre}$  çevreleyen yüzeylerin ortalama sıcaklığını ifade etmektedir (Canbolat vd., 2019). Atmosfer dışında yatay düzleme düşen günlük güneş ışınımı aşağıdaki eşitlik yardımıyla hesaplanır.

$$\dot{q}_{0,h} = \frac{G_{s,c}}{\pi} \left[ 1 + 0,033 \cos \left( \frac{360n}{365} \right) \right] \left[ \cos \varnothing \cos \delta \sin \omega_s + \frac{2\pi \omega_s}{360} \sin \varnothing \sin \delta \right] \quad (3)$$

$$\frac{\dot{q}_h}{\dot{q}_{0,h}} = \left( a + b \frac{n}{N} \right) \quad (4)$$

$$a = 0,103 + 0,000017Z + 0,198 \cos(\varnothing - \delta) \quad (5)$$

$$b = 0,533 - 0,165 \cos(\varnothing - \delta) \quad (6)$$

Bu eşitliklerde  $G_{s,c}$  atmosferin dışına düşen güneş ışınımının birim alana düşen ortalama enerjisini,  $\omega_s$  güneşin ufuktan batma açısını,  $n$  yılın kaçınıcı günü olduğunu,  $a$  ve  $b$  lokasyona bağlı sabitleri,  $\dot{q}_h/\dot{q}_{0,h}$  atmosferin ışınımı ne kadar engellediğini (daha sonraki kısımlarda berraklık indeksi ( $K_T$ ) olarak gösterilecektir),  $n/N$  güneşin gökyüzünde ne kadar süre kaldığını,  $\delta$  belirli bir lokasyonun deklinasyon açısını,  $\varnothing$  ekvatora olan uzaklığını,  $Z$  ise deniz seviyesinden yüksekliğini temsil etmektedir.

Güneş ışınlarının atmosferdeki herhangi bir gaz veya parçacıkla etkileşime girmeden doğrudan yeryüzüne ulaşmasına direkt ışınım, atmosferdeki gazlar ve parçacıklar tarafından saçılması sonucu yeryüzüne ulaşmasına ise yayılı ışınım denir. Yatay bir düzleme düşen toplam güneş ışınımı, bu iki ışınımın toplamına eşittir. Bu ışınım miktarını hesaplamak için literatürde birçok ampirik ifade mevcuttur. Bu ifadeler genellikle berraklık indeksinin ( $K_T$ ) fonksiyonu şeklindedir (Yiğit vd., 2010). Dik bir yüzeye düşen toplam güneş ışınımı miktarı ise o yöne ait direkt, yayılı ve yansıyan ışınımın toplamına eşittir. Yansıyan ışınım, yeryüzünden uzaya geri yansıyan güneş ışınımıdır.

$$\frac{\dot{q}_{h,d}}{\dot{q}_h} = (0,703 - 0,414K_T - 0,428K_T^2) \quad (7)$$

$$R_b = \frac{\cos \theta}{\cos \theta_z} \quad (8)$$

$$\dot{q}_s = \dot{q}_h \left( 1 - \frac{\dot{q}_{h,d}}{\dot{q}_h} \right) R_b + \dot{q}_{h,d} \left( 1 + \frac{\cos \beta}{2} \right) + \dot{q}_h \rho \left( 1 - \frac{\cos \beta}{2} \right) \quad (9)$$

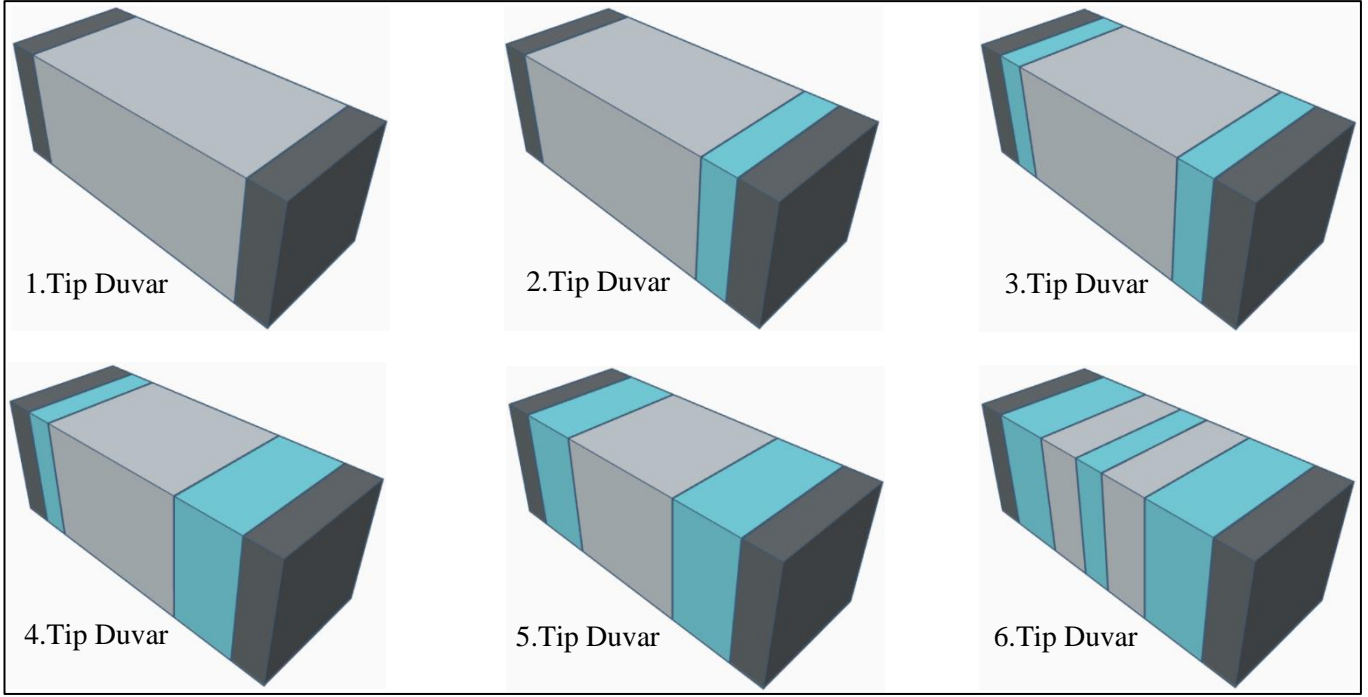
Bu eşitliklerde  $\theta$  güneş ışınımının geliş açısını,  $\rho$  yerin yansıtma oranını,  $\dot{q}_{h,d}$  yatay yüzey için ortalama günlük yayılı ışınımı temsil etmektedir. Sonuç olarak yüzeye ulaşan güneş ışınımı ( $\dot{q}_s$ ) ve dolayısıyla  $T_{güneş}$ , yukarıda verilen eşitlikler kullanılarak hesaplanabilir.

### Yıllık Enerji İhtiyacı Hesaplamaları

Güneş radyasyonu dikkate alınarak CDD değeri hesaplandıktan sonra binanın yıllık soğutma enerji ihtiyacının belirlenebilmesi için dış duvarlardan olan ısı kazancı hesaplanmalıdır. Bu çalışmada binanın klima ile soğutulduğu, dolayısıyla elektrik enerjisi harcadığı varsayılmıştır. İlk senaryoda sıfırdan yapılan bir bina olduğu ve toplam 20 cm'lik bir duvar olacağı varsayılmıştır. Buna bağlı olarak oluşturulan 6 farklı duvar yapısı Şekil 1'de, duvarı oluşturan bileşenlerin kalınlıkları ise Tablo 1'de verilmiştir. Şekil 1'de koyu gri olan bileşenler iç ve dış sıvayı, açık gri olan bileşen hafif beton bloğu, turkuaz rengindeki bileşen ise yalıtım malzemesini temsil etmektedir. Analizlerde yalıtım malzemesi olarak Ekstrüde Polistiren (XPS) kullanılmıştır.

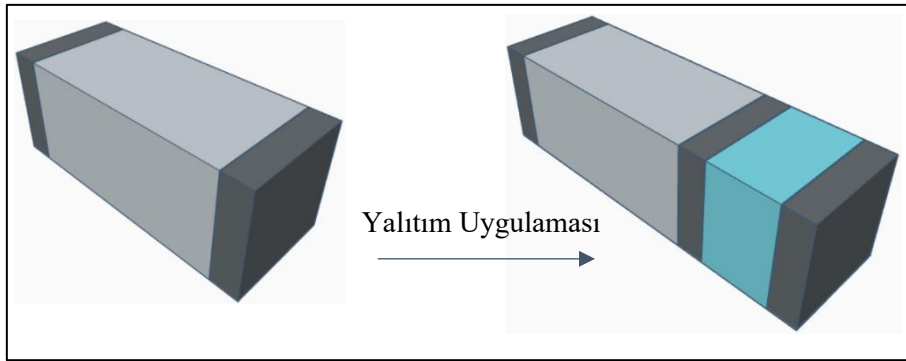
**Tablo 1.** Duvarı Oluşturan Bileşenlerin Kalınlıkları

Duvar Yapıları	İç Sıva (cm)	Beton (cm)	Yalıtım (cm)	Dış Sıva (cm)
1. Tip Duvar	2	16	-	2
2. Tip Duvar	2	14	2	2
3. Tip Duvar	2	12	4	2
4. Tip Duvar	2	10	6	2
5. Tip Duvar	2	8	8	2
6. Tip Duvar	2	6	10	2



Şekil 1. Analizlerde Kullanılan Farklı Duvar Yapıları

İkinci senaryoda hali hazırda inşa edilmiş duvarları yalıtımsız bir bina olduğu ve sonradan duvarlarına farklı kalınlıklarda yalıtım yapıldığı varsayılmıştır. Şekil 2’de bu senaryo uygulandığında, duvar yapılarının önceki ve sonraki halleri gösterilmiştir.



Şekil 2. Yalıtımsız Bir Binaya Yapılan Yalıtım Uygulaması

Bu çalışmada iç ( $h_i$ ) ve dış ( $h_o$ ) ısı transfer katsayıları sırasıyla  $8,3 \text{ W/m}^2\text{K}$  ve  $28,4 \text{ W/m}^2\text{K}$  olarak kabul edilmiştir (Kaynaklı vd., 2016; Özel, 2012). Yıllık soğutma enerji ihtiyacı ( $E_{A,C}$ ) birim alandaki yıllık ısı kazancının soğutma sisteminin performans katsayısına ( $COP$ ) bölünmesiyle hesaplanır. Literatürdeki çalışmalar referans alınarak  $COP$  değeri 2,5 alınmıştır (Bolattürk vd., 2013; Canbolat, 2023; Kon vd., 2022).

$$E_{A,C} = \frac{86400 \text{ CDD}}{(R_i + R_o + R_w + R_{ins})COP} \quad (10)$$

Bu eşitlikteki  $R_i$ , iç ortamın ısı taşınım direncini temsil ederken,  $R_o$ , ise dış ortamın ısı taşınım direncini ifade eder ve sırasıyla  $1/h_i$  ve  $1/h_o$  eşitlikleri ile hesaplanır. Ayrıca  $R_w$  yalıtımsız duvarın toplam ısı direncini,  $R_{ins}$  ise yalıtım malzemesinden kaynaklı ısı direnci ifade etmektedir.  $R_i+R_o+R_w$  ifadelerinin toplamı  $R_{t,w}$  yani yalıtılmamış duvarın toplam ısı direnci olarak da ifade edilebilir.

### **CO<sub>2</sub> Emisyonu Hesaplamaları**

Bina dış duvarlarına yalıtım uygulaması yapıldığında, soğutma sezonundaki yıllık ihtiyaç duyulan soğutma enerjisi azalacak dolayısıyla atmosfere salınan CO<sub>2</sub> miktarı da azalacaktır. Bu süreçte ortaya çıkan CO<sub>2</sub>, operasyonel



emisyonlar sınıfına girmektedir. Bunun yanında duvarı oluşturan tüm malzemelerin üretim, nakliye ve montaj süreçlerinde ortaya çıkan CO<sub>2</sub>'nin de hesaba katılması gerekmektedir. Bu gibi süreçlerde atmosfere yayılan CO<sub>2</sub> ise gömülü emisyonlar sınıfına girmektedir. Bu çalışmada yalıtım uygulamasının çevresel etkileri incelenirken hem operasyonel hem de gömülü emisyonlar dikkate alınmıştır.

Bu bağlamda operasyonel emisyon sınıfındaki klima ile binayı soğutma esnasında 1 yılda atmosfere yayılan CO<sub>2</sub> miktarı aşağıdaki eşitlik yardımıyla hesaplanabilir.

$$M_{CO_2,enerji} = \frac{0,024 CDD f_c}{\left(R_{t,w} + \frac{x}{k}\right) COP} \quad (11)$$

Bu eşitlikteki  $f_c$  elektriğin CO<sub>2</sub> emisyon faktörünü temsil etmektedir ve literatürdeki çalışmalara göre bu değer 0,588 kgCO<sub>2</sub>/kWh olarak alınarak hesaplamalar yapılmıştır (Axaopoulos vd., 2019; Canbolat, 2023).

Gömülü emisyon sınıfındaki duvar bileşenleri kaynaklı, 1 yılda atmosfere yayılan CO<sub>2</sub> miktarı aşağıdaki eşitlik yardımıyla hesaplanabilir.

$$M_{CO_2,duvar} = \frac{\rho_{siva} x_{siva} f_{siva}}{N} + \frac{\rho_{beton} x_{beton} f_{beton}}{N} + \frac{\rho_{xps} x_{xps} f_{xps}}{N} \quad (12)$$

Bu eşitlikteki  $f_{siva}$ ,  $f_{beton}$  ve  $f_{xps}$  sırasıyla sıvanın, hafif beton bloğun ve XPS'in CO<sub>2</sub> emisyon faktörünü temsil etmektedir ve Tablo 2'de verilmiştir (Anastaselos vd., 2009; Canbolat, 2023).  $N$  malzemenin ömrü (10 yıl),  $\rho$  yoğunluk (kg/m<sup>3</sup>),  $k$  ısı iletim katsayısı (W/mK),  $x$  ise kalınlıktır (m).

**Tablo 2.** Duvarı Oluşturan Bileşenlerin Termofiziksel Özellikleri ve Emisyon Faktörleri

Duvar Bileşenleri	Yoğunluk, $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	Isı iletim katsayısı, $k$ (W/mK)	Emisyon faktörü, $f$ (kgCO <sub>2</sub> /kg)
Sıva	1800	0,87	0,36
Ekstrüde Polistiren (XPS)	30	0,037	3,83
Hafif Beton Blok	1700	1,37	0,09

Aşağıdaki eşitlik yardımıyla da hem enerji kaynaklı ve hem de duvar bileşenleri kaynaklı atmosfere salınan toplam CO<sub>2</sub> miktarı hesaplanabilir.

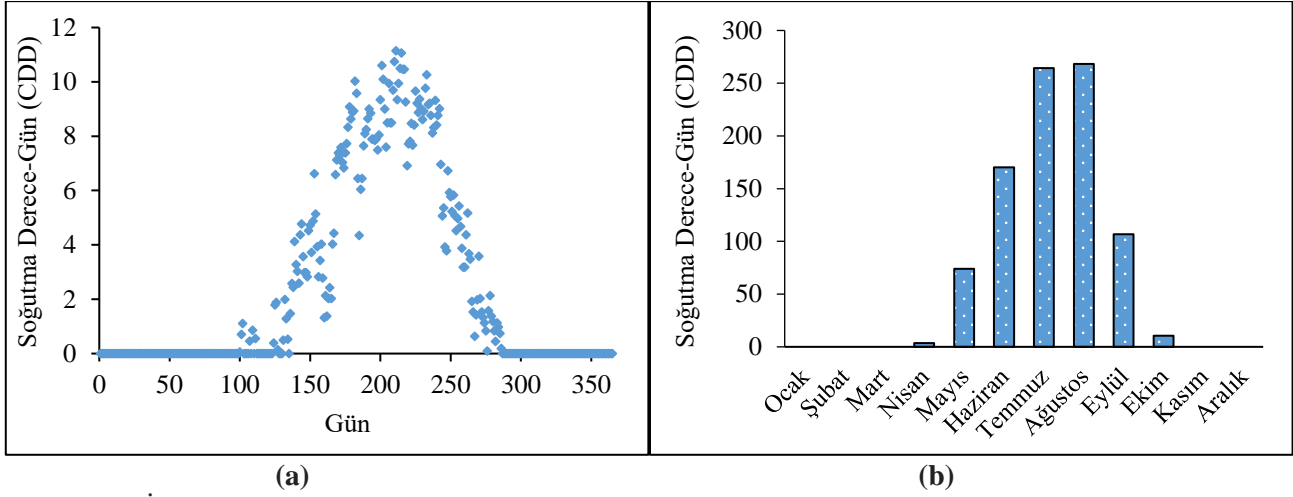
$$M_{CO_2,toplam} = \frac{0,024 CDD f_c}{\left(R_{t,w} + \frac{x}{k}\right) COP} + \frac{\rho_{siva} x_{siva} f_{siva}}{N} + \frac{\rho_{beton} x_{beton} f_{beton}}{N} + \frac{\rho_{xps} x_{xps} f_{xps}}{N} \quad (13)$$

## BULGULAR VE TARTIŞMA

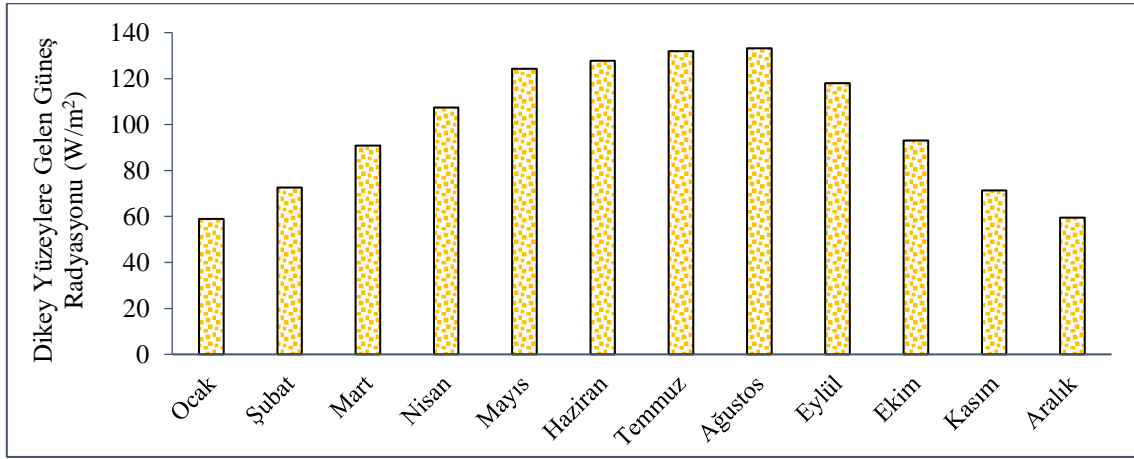
Bu çalışma Türkiye'de görece olarak sıcak iklim bölgesinde (1.Derece Gün Bölgesi) yer alan İzmir ili için yapılmıştır. İzmir'de soğutma enerji ihtiyacı, ısıtma enerji ihtiyacından daha fazla olduğu için analizler soğutma sezonu için yapılmıştır (Binalarda Isı Yalıtım Kuralları, 2013).

Yıl içindeki günlük CDD değerleri ve buna bağlı olarak aylık toplam CDD değerleri hesaplanmış ve Şekil 3'de sunulmuştur. Grafikler incelendiğinde Ağustos ve Temmuz aylarının sırasıyla 268 ve 264 CDD değeriyle en fazla soğutma enerji ihtiyacı olan aylar olduğu görülmektedir. Kasım, Aralık, Ocak, Şubat ve Mart aylarında ise CDD değerleri 0 olarak hesaplanmıştır bu da ilgili aylarda soğutma enerji ihtiyacının olmadığı anlamına gelmektedir.

Şekil 4'de dikey yüzeylere gelen güneş radyasyonu miktarının aylara göre değişimi verilmiştir. Haziran, Temmuz, Ağustos aylarının sırasıyla 127,8 W/m<sup>2</sup>, 131,9 W/m<sup>2</sup> ve 133,1 W/m<sup>2</sup> değerleriyle en fazla güneş radyasyonuna maruz kalınan aylar olduğu sonucuna varılmıştır. Kasım, Aralık, Ocak aylarının ise tersine 71,4 W/m<sup>2</sup>, 59,5 W/m<sup>2</sup> ve 58,9 W/m<sup>2</sup> değerleriyle en az güneş radyasyonuna maruz kalınan aylar olduğu görülmektedir.

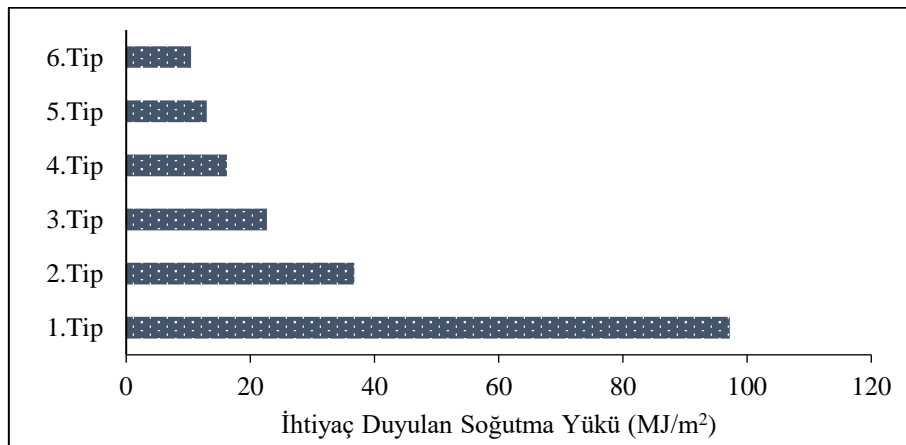


Şekil 3. Yıl İçindeki Günlük Soğutma Derece-Gün (CDD) Sayıları (a) ve Aylık Toplam Soğutma Derece-Gün (CDD) Sayıları (b)



Şekil 4. Aylık Dikey Yüzeyle Gelen Güneş Radyasyonu Miktarı

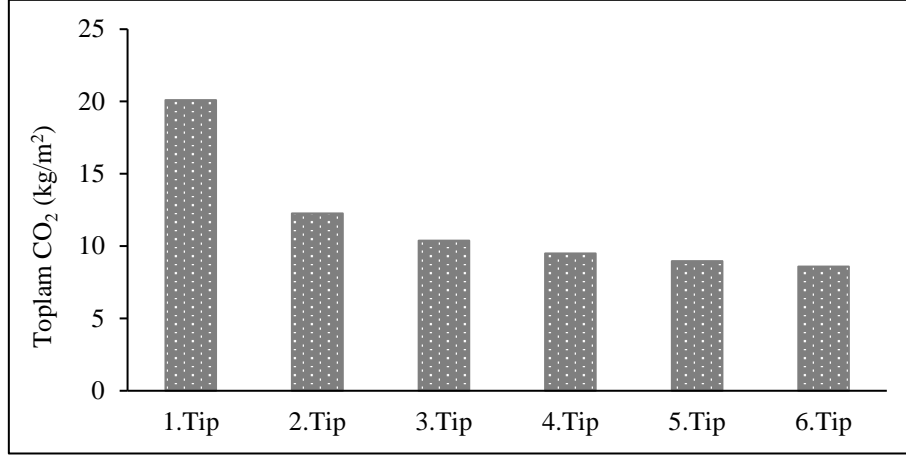
İlk senaryoda toplam duvar kalınlığı 20 cm olmak şartıyla yalıtım malzemesinin kalınlığı arttırılmıştır. 1. Tip duvar yapısında hiç yalıtım yokken, 6. Tip duvar yapısı en fazla yalıtım kalınlığına sahip duvardır. Şekil 5’de görüldüğü üzere yalıtım kalınlığı arttıkça yıllık ihtiyaç duyulan soğutma enerji ihtiyacı azalmaktadır. Sadece tüketilen enerjinin minimize edilmesi amaçlandığında en ideal duvar yapısının 6. Tip olduğu görülmektedir.



Şekil 5. Farklı Duvar Tipleri için Yıllık İhtiyaç Duyulan Soğutma Yüğü

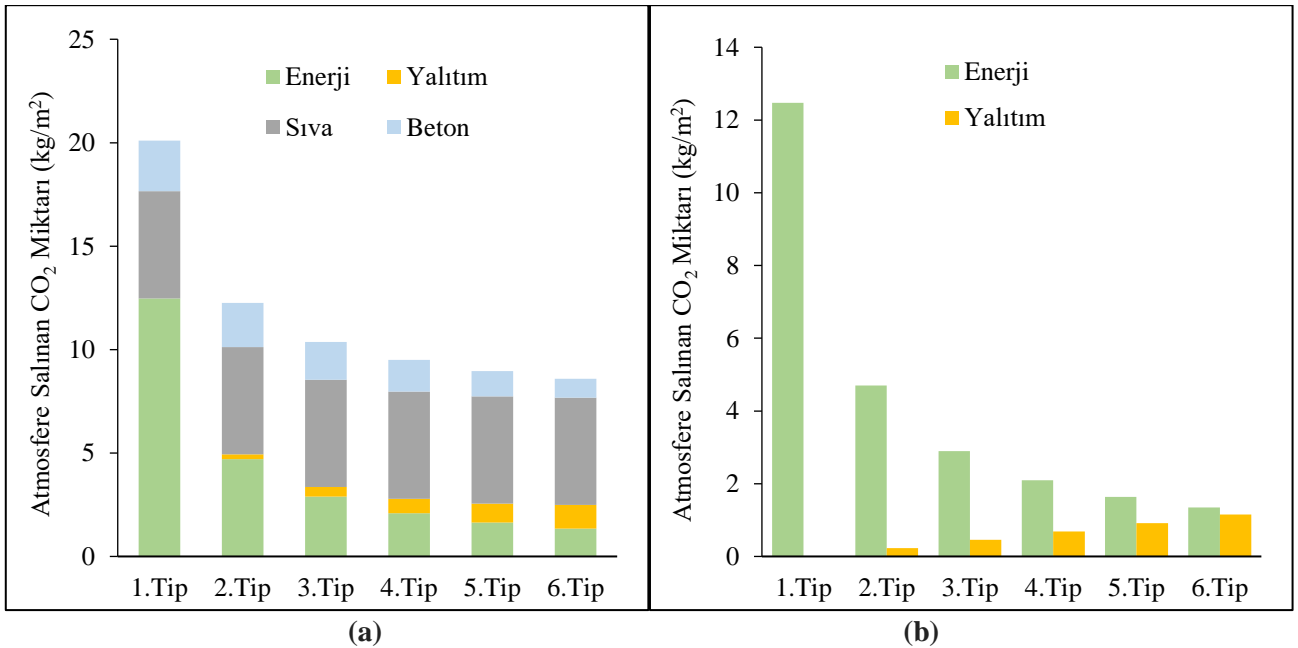
Eşitlik 13 yardımıyla 1 yılda atmosfere yayılan toplam CO<sub>2</sub> miktarı hesaplanmış ve Şekil 6 elde edilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere yalıtım kalınlığı arttıkça CO<sub>2</sub> emisyonu azalmaktadır. Fakat yalıtım kalınlığı 0 cm’den 2 cm’ye çıkarıldığında (1. Tip den 2. Tipe geçildiğinde) CO<sub>2</sub> emisyonundaki azalma %39 mertebelerindeyken, 8 cm’den 10

cm'ye çıkarıldığında (5. Tip den 6. Tipe geçildiğinde) CO<sub>2</sub> emisyonundaki azalmanın %4 seviyelerine düştüğü görülmektedir. Bu durum yalıtım kalınlığını arttırmanın CO<sub>2</sub> emisyonunu azaltacağını fakat belli bir yalıtım kalınlığını geçtikten sonra toplam emisyonun azalmayacağını hatta artabileceğini göstermektedir. Bu konu ile ilgili analizler çalışmanın ileriki kısımlarında yapılmıştır.



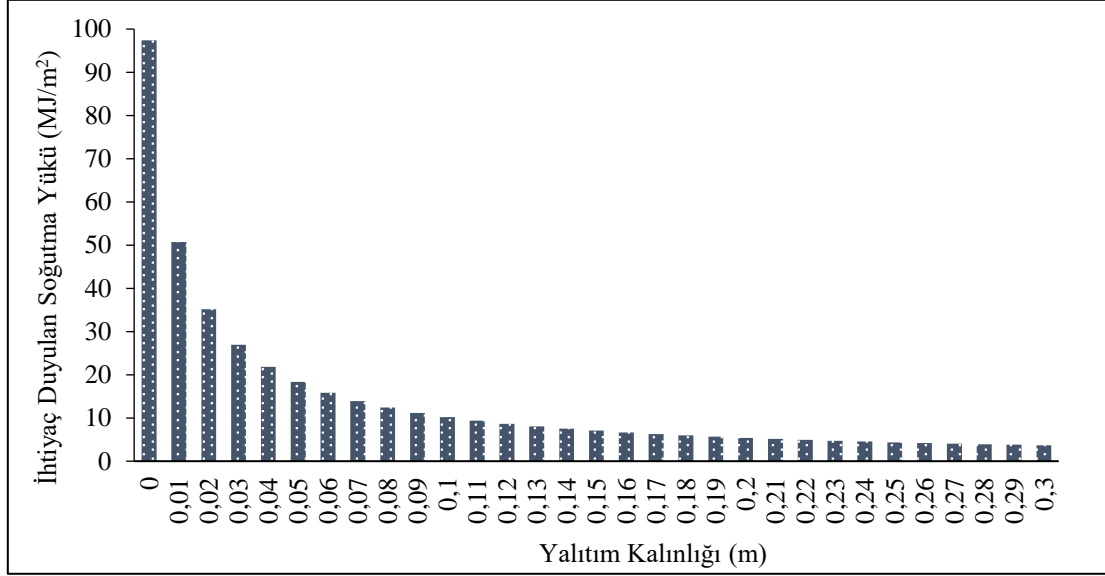
Şekil 6. Farklı Duvar Tipleri için Atmosfere Yayılan Toplam CO<sub>2</sub> Miktarı

Farklı duvar tipleri için atmosfere yayılan CO<sub>2</sub> emisyon miktarlarının hangi kaynaklardan olduğu Şekil 7.a'da gösterilmiştir. Yalıtım kalınlığı arttıkça yani 1. Tipten 6. Tipe doğru gidildikçe enerji tüketimi azaldığından enerji kaynaklı CO<sub>2</sub> salınımının da azaldığı görülmektedir. Buna bağlı olarak yalıtım kalınlığı arttığı için yalıtım malzemesi kaynaklı CO<sub>2</sub> salınımı artmaktadır. Duvarın toplam kalınlığı sabit olduğundan yalıtım kalınlığı arttıkça hafif beton blok kalınlığı azalmış, dolayısıyla beton kaynaklı CO<sub>2</sub> salınım da azalmıştır. Şekil 7.b'de sadece enerji kaynaklı ve yalıtım kaynaklı emisyon miktarları karşılaştırılmıştır. Yalıtım kalınlığı arttıkça enerji kaynaklı CO<sub>2</sub> salınımının büyük oranda azaldığı görülmektedir. 1. Tip duvar ile 6. Tip duvar arasındaki enerji kaynaklı emisyonlar kıyaslandığında %89 oranında bir azalma hesaplanmıştır. Yalıtım kalınlığı arttıkça enerji kaynaklı emisyon miktarı ile yalıtım kaynaklı emisyon miktarı arasındaki fark azalmaktadır. 6. Tip duvar yapısı 10 cm yalıtım kalınlığına sahiptir ve bu duvar yapısında enerji kaynaklı atmosfere salınan CO<sub>2</sub> miktarı 1,35 kg/m<sup>2</sup>, yalıtım kaynaklı CO<sub>2</sub> miktarı ise 1,15 kg/m<sup>2</sup>'dir. Bu durum yalıtım kalınlığı daha fazla arttırıldığında yalıtım kaynaklı emisyon miktarının enerji kaynaklı emisyon miktarını geçebileceğini göstermiştir. Bir sonraki analizlerde bu durum incelenmiştir.



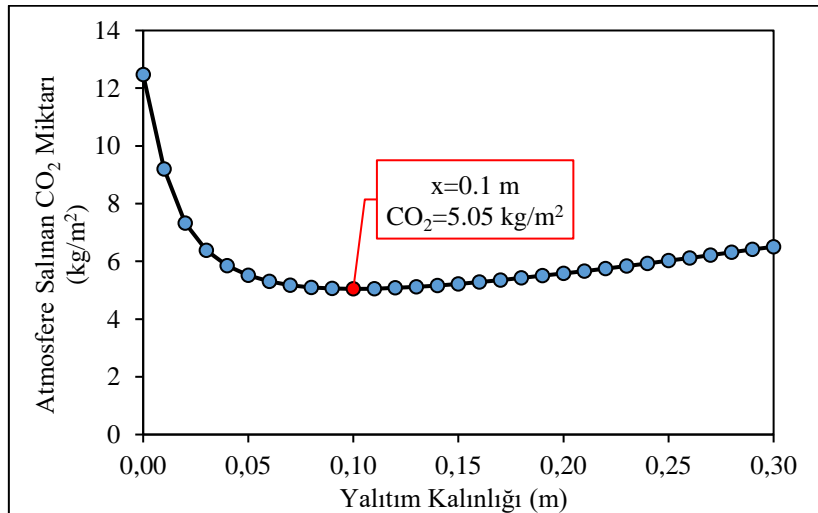
Şekil 7. Farklı Duvar Tipleri için Atmosfere Salınan CO<sub>2</sub>'in Kaynakları (a) ve Enerji-Yalıtım Kaynaklı CO<sub>2</sub> Salınımının Karşılaştırılması (b)

İkinci senaryoda hali hazırda inşa edilmiş bir bina olduğu ve duvarlarının yalıtımsız olduğu varsayılmıştır. Bu duvarlara sonradan farklı kalınlıklarda yalıtım uygulaması yapılmıştır ve buna bağlı olarak yıllık ihtiyaç duyulan soğutma yükünün yalıtım kalınlığına bağlı olarak değişimi Şekil 8’de sunulmuştur. Şekilden anlaşılacağı üzere yalıtım kalınlığı arttıkça soğutma için ihtiyaç duyulan enerji miktarı azalmaktadır. Fakat yalıtımsız durumdaki bir duvara 1 cm yalıtım yapıldığında ihtiyaç duyulan soğutma yükü %48 oranında azalırken, örneğin 10 cm yalıtımlı olan bir duvara ekstra 1 cm daha yalıtım yapıldığında ihtiyaç duyulan soğutma yükü sadece %7 oranında azalmaktadır. Bu durumdan yola çıkarak hiç yalıtım yapılmamış bir binaya yalıtım yapmanın enerji tasarrufu açısından çok daha avantajlı olduğu sonucuna varılabilir.



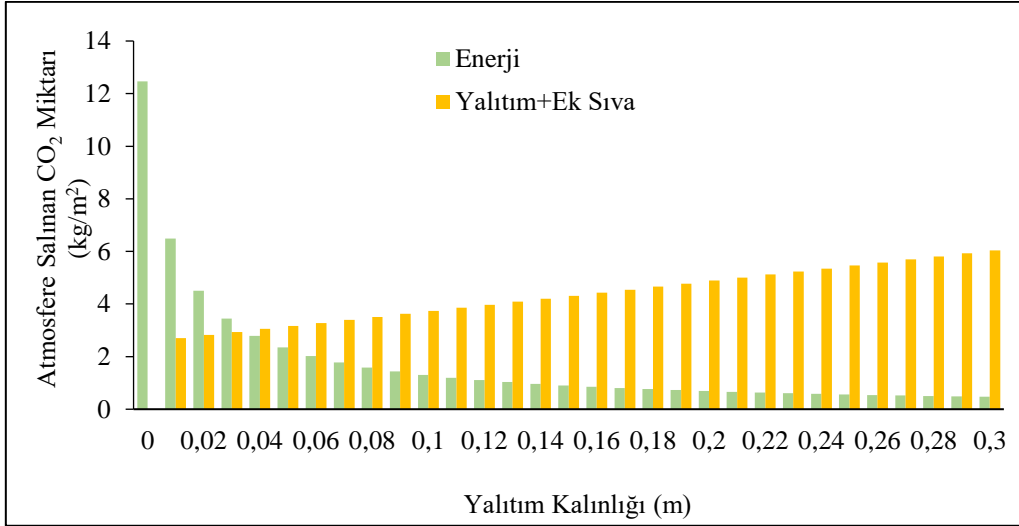
Şekil 8. Yıllık İhtiyaç Duyulan Soğutma Yükünün Yalıtım Kalınlığına Bağlı Değişimi

İkinci senaryoda hali hazırda var olan bir bina olduğu için sadece sonradan eklenen yalıtım malzemesi kaynaklı ve ek olarak eklenen dış sıva kaynaklı CO<sub>2</sub> emisyonu hesaba katılmıştır (bkz. Şekil 2). Atmosfere salınan toplam emisyon miktarı enerji, yalıtım ve ek sıva kaynaklı CO<sub>2</sub> miktarları toplanarak elde edilmiş ve Şekil 9’da sunulmuştur. Grafikten anlaşılacağı üzere belirli bir yalıtım kalınlığına kadar CO<sub>2</sub> miktarı azalmakta fakat bu kritik yalıtım kalınlığını geçtikten sonra yalıtım kalınlığı arttırmaya devam edilirse CO<sub>2</sub> miktarı tekrar artmaya başlamaktadır. Çevresel açıdan değerlendirildiğinde bu kritik yalıtım kalınlığında yalıtım yapılması atmosfere minimum düzeyde emisyon salınmasını sağlayacaktır. İzmir için soğutma sezonunda çevresel açıdan optimum yalıtım kalınlığı 10 cm olarak tespit edilmiş ve bu yalıtım kalınlığında atmosfere salınan CO<sub>2</sub> miktarı 5,05 kg/m<sup>2</sup> olarak hesaplanmıştır (Şekil 9). Bu kalınlıktan daha fazla kalınlıkta yalıtım yapmak soğutma için ihtiyaç duyulan enerjiyi azaltacak fakat atmosfere salınan emisyonu arttıracaktır.



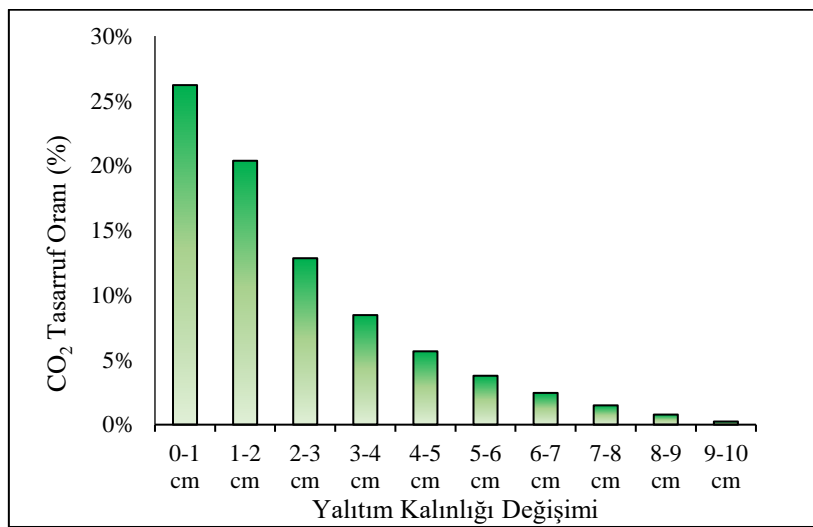
Şekil 9. Yalıtım Kalınlığına Bağlı Olarak Enerji, Yalıtım ve Ek Sıva Kaynaklı Atmosfere Salınan Toplam CO<sub>2</sub> Miktarı

Şekil 10'da enerji kaynaklı emisyonlar ile sonradan eklenen malzemelerden (yalıtım ve ek sıva) kaynaklı emisyon miktarları karşılaştırılmıştır. Yalıtımsız duvara 1 cm yalıtım yapıldığında enerji kaynaklı emisyon miktarında %48'lik bir düşüş olduğu görülmektedir. Bu düşüş oranı yalıtım kalınlığı arttıkça azalmaktadır. Örneğin 7 cm kalınlığında yalıtım olan duvara ekstra 1 cm daha yalıtım yapıldığında enerji kaynaklı emisyon miktarındaki düşüş bu defa %11 mertebelerinde gerçekleşmektedir. Diğer taraftan yalıtım ve sıva kaynaklı emisyon miktarları lineer olarak artmaktadır. 3 cm yalıtım kalınlığında enerji kaynaklı atmosfere salınan CO<sub>2</sub> miktarı 3,45 kg/m<sup>2</sup>, yalıtım ve sıva kaynaklı CO<sub>2</sub> miktarı ise 2,93 kg/m<sup>2</sup>'dir. 4 cm yalıtım kalınlığında ise yalıtım ve sıva kaynaklı atmosfere salınan CO<sub>2</sub> miktarı 3,05 kg/m<sup>2</sup>'ye çıkmış ve enerji kaynaklı CO<sub>2</sub> miktarını (2,79 kg/m<sup>2</sup>) geçmiştir.



Şekil 10. Farklı Yalıtım Kalınlıkları için Enerji ve Yalıtım-Ek Sıva Kaynaklı CO<sub>2</sub> Salınımının Değişimi

Son olarak yukarıdaki analizlerde göze çarpan farklı kalınlıklarda gözlemlenen farklı emisyon düşüş oranlarını incelemek üzere bir çalışma yapılmıştır. Bu bağlamda farklı kalınlıklarda yalıtıma sahip duvarlara yapılan 1 cm'lik ilave yalıtımın CO<sub>2</sub> miktarındaki düşüşe etkileri incelenmiş ve Şekil 11'de grafiksel olarak sunulmuştur. Şekilde görüldüğü üzere hiç yalıtıma sahip olmayan bir duvara 1 cm'lik yalıtım yapıldığında atmosfere salınan CO<sub>2</sub> miktarı %26 oranında azalmıştır. Hali hazırda 1 cm yalıtıma sahip olan duvara ilave 1 cm'lik yalıtım daha eklendiğinde ise CO<sub>2</sub> tasarruf oranı %20'ye düşmüştür. Çevresel açıdan optimum yalıtım kalınlığı 10 cm olarak tespit edildiğinden (bkz. Şekil 9) analizler en son 9 cm yalıtıma sahip olan duvara ilave 1 cm yalıtım yapılması durumu için yapılmıştır. Bu senaryoda ise CO<sub>2</sub> tasarruf oranı sadece %0,2 olarak hesaplanmıştır. Burada görülüyor ki yalıtımsız bir duvara 1 cm yalıtım uygulaması yapılması CO<sub>2</sub> tasarruf oranını büyük ölçüde artırırken, hali hazırda belirli bir yalıtıma sahip duvara sonradan eklenecek 1 cm'lik yalıtım tabakası çevresel açıdan aynı iyileştirmeye sebep olamayacaktır.



Şekil 11. Farklı Kalınlıklarda Yalıtıma Sahip Duvarlara Yapılan 1 cm'lik İlave Yalıtımın CO<sub>2</sub> Miktarındaki Düşüş Etkileri

## SONUÇ

Bu çalışmada soğutma kaynaklı enerji ihtiyacından dolayı ortaya çıkan CO<sub>2</sub> miktarı ve duvar bileşenlerinin (sıva, yalıtım malzemesi, beton) üretim sürecinden dolayı atmosfere salınan CO<sub>2</sub> miktarı hesaplanmıştır. Çalışma, iki farklı senaryo için çevresel açıdan optimum yalıtım kalınlığının bulunması üzerine yapılmış birtakım analizler içermektedir. İlk senaryoda 6 farklı duvar yapısı oluşturulmuş ve her bir duvar yapısının soğutma sezonunda atmosfere salacağı emisyon miktarları hesap edilmiştir. Ayrıca farklı duvar tipleri için atmosfere yayılan CO<sub>2</sub> emisyon miktarlarının hangi kaynaklardan olduğu grafiksel olarak gösterilmiştir. İkinci senaryoda ise hali hazırda inşa edilmiş bir bina olduğu ve duvarlarının yalıtımsız olduğu varsayılmıştır. Bu duvarlara sonradan farklı kalınlıklarda yalıtım uygulaması yapılmış ve yine soğutma sezonunda atmosfere salınan toplam emisyon miktarları, çevresel açıdan optimum yalıtım kalınlığı ve CO<sub>2</sub> tasarruf oranları hesap edilmiştir.

Sadece tüketilen enerjinin minimize edilmesi amaçlandığında en ideal duvar yapısının yalıtım kalınlığı en yüksek olan duvar olduğu görülmüştür. Fakat kalınlık arttıkça yalıtım kalınlığının etkisinin azaldığı görülmüştür. Detaylı incelendiğinde yalıtımsız durumdaki bir duvara 1 cm yalıtım yapıldığında ihtiyaç duyulan soğutma yükü %48 oranında azalırken, 10 cm yalıtımlı olan bir duvara ilave 1 cm daha yalıtım yapıldığında ihtiyaç duyulan soğutma yükü %7 oranında azalmaktadır. Buradan hiç yalıtım yapılmamış bir binaya yalıtım yapmanın enerji tasarrufu açısından çok daha avantajlı olduğu sonucuna varılmıştır.

Asıl amaç atmosfere yayılan emisyon miktarını azaltmak olduğunda, yalıtım kalınlığını artırmanın enerji kaynaklı CO<sub>2</sub> salınımını azalttığı fakat duvarı oluşturan bileşenlerden kaynaklı gömülü emisyonları arttırdığı görülmüştür. Bu nedenle 10 cm'lik yalıtım kalınlığının çevresel açıdan optimum yalıtım kalınlığı olduğu tespit edilmiştir.

Atmofere salınan CO<sub>2</sub> miktarındaki tasarruf oranları detaylı şekilde incelendiğine, hiç yalıtıma sahip olmayan bir duvara 1 cm'lik yalıtım yapıldığında atmosfere salınan CO<sub>2</sub> miktarının %26 oranında azaldığı, 9 cm yalıtıma sahip olan duvara ilave 1 cm yalıtım yapıldığında ise CO<sub>2</sub> miktarının sadece %0,2 oranında azaldığı gözlemlenmiştir. Buradan şöyle bir sonuca varılabilir: yalıtımsız bir duvara yapılacak olan belirli kalınlıktaki yalıtım uygulaması CO<sub>2</sub> tasarruf oranını büyük ölçüde artırırken, hali hazırda belirli bir yalıtıma sahip duvara sonradan eklenecek aynı kalınlıktaki yalıtım tabakası çevresel açıdan aynı iyileştirmeye sebep olamayacaktır.

Sonuç olarak bu çalışma, bireylerin kendi yaşadıkları veya çalıştıkları konutları çevresel açıdan değerlendirebilmesine, buldukları il için ideal yalıtım kalınlığını, emisyon tasarruf oranlarını hesap edebilmesine ve bireysel olarak sınırdaki karbon düzenleme mekanizmasını tamamlayıcı katkılarda bulunabilmesine olanak sağlayacaktır.

## KAYNAKLAR

- Akan, A. P., & Akan, A. E. (2022). Modeling of CO<sub>2</sub> emissions via optimum insulation thickness of residential buildings. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 24(3), 949–967. <https://doi.org/10.1007/s10098-021-02233-6>
- Anastaselos, D., Giama, E., & Papadopoulos, A. M. (2009). An assessment tool for the energy, economic and environmental evaluation of thermal insulation solutions. *Energy and Buildings*, 41(11), 1165–1171. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2009.06.003>
- Arslan, Ş., & Aydın, F. (2023). Experimental Investigation of the Effects of Insulation Materials and Concrete Strength on Temperature Transitions in FRP Reinforced Structural Elements Under High Temperature. *Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi Part C: Tasarım ve Teknoloji*, 11(1), 222–235. <https://doi.org/10.29109/gujsc.1167810>
- Axaopoulos, I., Axaopoulos, P., Gelegenis, J., & Fylladitakis, E. D. (2019). Optimum external wall insulation thickness considering the annual CO<sub>2</sub> emissions. *Journal of Building Physics*, 42(4), 527–544. <https://doi.org/10.1177/1744259118774711>
- Bademlioğlu, A. H., Canbolat, A. S., & Kaynaklı, Ö. (2018). Bina Dış Duvarlarında Yoğuşma Dikkate Alınarak Gerekli Yalıtım Kalınlığının Belirlenmesi: Bitlis İli İçin Örnek Çalışma. *Uludağ University Journal of The Faculty of Engineering*, 23(3), 333–340. <https://doi.org/10.17482/uumfd.487773>
- Bolattürk, A., & Dağdır, C. (2013). Güneş Radyasyonu Dikkate Alınarak Sıcak İklim Bölgelerindeki Binalarda Optimum Yalıtım Kalınlığının Belirlenmesi. *Journal of Thermal Science and Technology*, 33(1), 87–99.

Canbolat, A., Bademlioglu, A., Saka, K., & Kaynakli, O. (2019). Investigation of parameters affecting the optimum thermal insulation thickness for buildings in hot and cold climates. *Thermal Science*, 00, 68–68. <https://doi.org/10.2298/TSCI181105068C>

Canbolat, A. S. (2023). An integrated assessment of the financial and environmental impacts of exterior building insulation application. *Journal of Cleaner Production*, 435(September 2023), 140376. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.140376>

Cengel, Y. (2002). *Heat Transfer: A Practical Approach, 2nd Edition*. McGraw-Hill, New York.

Dombayci, O. A., Ulu, E. Y., Guven, S., Atalay, O., & Ozturk, H. K. (2020). Determination Of Optimum Insulation Thickness For Building External Walls With Different Insulation Materials Using Environmental Impact Assessment. *Thermal Science*, 24(1 Part A), 303–311. <https://doi.org/10.2298/TSCI180903010D>

European Union. (2023). REGULATION (EU) 2023/956 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 10 May 2023 establishing a carbon border adjustment mechanism. *Official Journal of the European Union*, 2023(April), 52–104.

Huang, H., Zhou, Y., Huang, R., Wu, H., Sun, Y., Huang, G., & Xu, T. (2020). Optimum insulation thicknesses and energy conservation of building thermal insulation materials in Chinese zone of humid subtropical climate. *Sustainable Cities and Society*, 52(September 2019). <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101840>

İmer Ertunga, E., & Seyhun, Ö. K. (2022). Sınırdaki Karbon Düzenleme Mekanizması ve Türkiye'nin İhracatına Olası Etkileri. *Ege Stratejik Araştırmalar Dergisi*, 13(1), 1–13. <https://doi.org/10.18354/esam.1119230>

Kaynakli, Ö., & Kaynakli, F. (2016). Determination Of Optimum Thermal Insulation Thicknesses For External Walls Considering The Heating, Cooling And Annual Energy Requirements. *Uludağ University Journal of The Faculty of Engineering*, 21(1), 229. <https://doi.org/10.17482/uujfe.27323>

Kon, O., & Caner, İ. (2022). The Effect of External Wall Insulation on Mold and Moisture on the Buildings. *Buildings*, 12(5). <https://doi.org/10.3390/buildings12050521>

Ozel, M. (2012). Cost analysis for optimum thicknesses and environmental impacts of different insulation materials. *Energy and Buildings*, 49, 552–559. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.03.002>

Binalarda Isı Yalıtım Kuralları. (2013). *TS 825*. Türk Standartları Enstitüsü.

Türkiye Cumhuriyeti Çevre Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. (2023). *Potential Impact of the Carbon Border Adjustment Mechanism on the Turkish Economy*. [https://iklim.gov.tr/db/turkce/haberler/files/20230523 Impacts of CBAM on Turkey phase 2 report FV3 \(2\)-sayfalar-1,3,5-16 \(1\) \(1\).pdf](https://iklim.gov.tr/db/turkce/haberler/files/20230523%20Impacts%20of%20CBAM%20on%20Turkey%20phase%202%20report%20FV3%20(2)-sayfalar-1,3,5-16%20(1)%20(1).pdf)

Türkiye Cumhuriyeti Dışişleri Bakanlığı. (2022). *Paris Anlaşması*. <https://www.mfa.gov.tr/paris-anlasmasi.tr.mfa#:~:text=Anlaşma onay belgesi%2C ulusal beyanımızla,sıfır emisyon hedefi ilan edilmiştir.>

Türkiye Cumhuriyeti Ticaret Bakanlığı. (2023). *Avrupa Birliği Sınırdaki Karbon Düzenleme Mekanizması Bilgi Notu*. <https://ticaret.gov.tr/dis-iliskiler/yesil-mutabakat/ab-sinirda-karbon-duzenleme-mekanizmasi/ab-skdm-bilgi-notu>

Yiğit, A., & Atmaca, İ. (2010). *Solar Energy (in Turkish)*. Alfa Aktüel.

Yüce, B. E., & Acar, M. C. (2021). Bitlis İlinde Farklı Yakıtlar Ve Duvar Bileşenleri İçin Optimum Yalıtım Kalınlığı Ve Enerji Tasarrufunun Analizi. *Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 10(4), 1426–1434. <https://doi.org/10.17798/bitlisfen.959930>



# Kahramanmaraş Sütçü İmam University Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 07.02.2024  
Kabul Tarihi : 05.03.2024

Received Date : 07.02.2024  
Accepted Date : 05.03.2024

## GÜVENDİK DAYK KARMAŞIĞI'NA AİT METAGRANİTLERİN ZİRKON U-Pb JEOKRONOLOJİSİ VE Lu-Hf İZOTOPLARI

### ZIRCON U-Pb GEOCHRONOLOGY AND Lu-Hf ISOTOPES OF METAGRANITES BELONGING TO THE GÜVENDİK DIKE COMPLEX

Abdullah SAR<sup>1\*</sup> (ORCID: 0000-0002-9752-7807)  
Sevcan KÜRÜM<sup>1</sup> (ORCID: 0000-0001-6121-5564)  
Hao-Yang LEE<sup>2</sup> (ORCID: 0000-0003-1113-3477)

<sup>1</sup> Fırat Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Elazığ, Türkiye  
<sup>2</sup> Institute of Earth Sciences, Academia Sinica, Taipei, Taiwan

\*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Abdullah SAR,asar@firat.edu.tr

#### ÖZET

Alp Himalaya Orojenik Kuşağı'nın önemli bir bölümünü oluşturan, Doğu Pontid Orojenik Kuşağı'nda yüzeyleyen Güvendik Dayk Karmaşığı'na ait birimler metagranitler ile temsil edilmektedir. Bu çalışmada inceleme konusu metagranitlere ait zirkon U-Pb jeokronolojisi ve zirkon Lu-Hf izotopları sunulmaktadır. Metagranitler petrografik olarak plajiyoklas, kuvars, K-feldspat, amfibol ve biyotit/muskovit minerallerinden oluşmakta olup granoblastik doku göstermektedir. Zirkon U-Pb jeokronoloji verilerine göre metagranit örneğinin kristalizasyon yaşı  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ ;  $146 \pm 13$  My, metamorfizma yaşı ise  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  verilerine göre  $78,3 \pm 1,4$  My. dir. Magmatik kökenli zirkon minerallerinin  $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$  izotop verileri 0,0008 ile 0,0026 aralığında değişmektedir.  $\epsilon\text{Hf}(t)$  değerleri 6,01 ile 12,7 aralığında değişmekte olup pozitif değerler göstermektedir. TDM<sub>2</sub> modal yaşları 0,40-0,81 Milyar yıldır. Metamorfik kökenli zirkon minerallerinin  $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$  izotop verileri 0,0009 ile 0,0019 aralığında değişmektedir.  $\epsilon\text{Hf}(t)$  değerleri 3,8 ile 5,9 aralığında değişmekte olup pozitif değerler sergilemektedir. TDM<sub>2</sub> modal yaşları 0,76-0,89 Milyar yıldır. Pozitif  $\epsilon\text{Hf}(t)$  değerleri metagranitlerin tüketilmiş manto kökeninden geldiğini göstermektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Güvendik Dayk Karmaşığı, Metagranit, Zirkon Lu-Hf izotopları, Zirkon U-Pb jeokronolojisi

#### ABSTRACT

The units of the Güvendik Dyke Complex, which forms an important part of the Alpine Himalayan Orogenic Belt and crops out in the Eastern Pontide Orogenic Belt, are represented by metagranites. This study presents zircon U-Pb geochronology and zircon Lu-Hf isotopes of the metagranites under investigation. Metagranites petrographically consist of plagioclase, quartz, K-feldspar, amphibole, and biotite/muscovite minerals, showing a granoblastic texture. According to zircon U-Pb geochronology data, the crystallization age of the metagranite sample is  $146 \pm 13$  Ma according to  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  data. The metamorphism age is  $78,3 \pm 1,4$  Ma according to  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  data. The  $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$  isotope values of zircon minerals of magmatic origin vary between 0,0008 and 0,0026.  $\epsilon\text{Hf}(t)$  values vary between 6,01 and 12,7 and show positive values. TDM<sub>2</sub> modal ages are 0,40-0,81 Billion years. The  $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$  isotope values of zircon minerals of metamorphic origin vary between 0,0009 and 0,0019.  $\epsilon\text{Hf}(t)$  values vary between 3,8 and 5,9 and exhibit positive values. TDM<sub>2</sub> modal ages are 0,76-0,89 Billion years. Positive  $\epsilon\text{Hf}(t)$  values indicate that metagranites come from depleted mantle origin.

**Keywords:** Güvendik Dike Complex, Metagranite, Zircon Lu-Hf isotope, Zircon U-Pb geochronology



## GİRİŞ

Alp Himalaya Orojenik Kuşağı'nın önemli bir bölümünü oluşturan Pontidler, batı, merkez ve doğu Pontidler olarak ayrılmaktadır (Şekil 1a). İnceleme alanında içerisinde yer aldığı Doğu Pontid Orojenik Kuşağı, litolojik/yapısal farklılıklara göre kuzey ve güney zon olarak ayrılmaktadır (Özsayar vd. 1981; Okay & Şahintürk 1997; Kaygusuz & Şen 2011). Kıtasal magmatik bir yay olarak kabul gören bu kuşağın (Şengör ve Yılmaz, 1981; Altherr vd., 2008; Eyüboğlu vd., 2015; Delibaş vd., 2016; Kaygusuz vd., 2016) temelinde Karbonifer yaşlı metamorfikler ve granitik kayalar yer almaktadır (Okay & Şahintürk, 1997; Topuz vd. 2007, 2010; Ustaömer & Robertson, 2010; Dokuz, 2011; Kaygusuz vd., 2016). Kuzey zon çoğunlukla Üst Kretase ve Orta Eosen yaşlı volkanik kayalar ve volkaniklastikler ile temsil edilirken, güney zon genel olarak Geç Kretase öncesi kayalar ile temsil edilmektedir (Sipahi, 2005; Şen, 2007; Karlı vd., 2012; Kaygusuz vd., 2013; Sipahi & Sadıklar, 2014; Sipahi vd., 2018, 2023; Sar vd., 2022, 2023).

Konak vd. (1992), Doğu Pontidler'in doğu kesiminde yaptıkları çalışmada yanal ve yatay hareketler sonucu yan yana veya üst üste gelen ve bir kısmı Üst Palaeosen'e kadar devamlılık gösteren, genellikle Jura-Kretase yaşlı çeşitli istiflerden bahsetmiş ve ön sınıflamasını yapmıştır. Daha sonraki yıllarda bu birimler ayrıntılı olarak çalışılmış ve farklı litostratigrafik özellikler gösteren bu istifler kuzeyden güneye olmak üzere Hopa-Borçka Zonu, Artvin – Yusufeli Zonu, Olur-Tortum Zonu ve Erzurum-Kars ofiyolit Zonu olarak dört zonda toplanmıştır (Konak & Hakyemez, 2001; 2009). Olur-Tortum Zonu kuzeydeki Artvin-Yusufeli Zonu ile güneydeki Erzurum Kars Ofiyolitik Zonu arasında yer almakta ve tektonik olarak birbirleri ile ilişkili olan Olur, Aksu ve Çardaklı birliklerini oluşturmaktadır (Konak & Hakyemez, 2009). Bu birliklerin oluşturduğu Oltu ekaylı zonu boyunca tektonik dilimler halinde Jura öncesi temele ait iki farklı kaya birimi yer almaktadır. Bu birimlerden düşük dereceli metamorfik şistler içeren birim “Kışla Metamorfitleri” olarak, metagabro ve metabazitlerden meydana gelen ve diyoritik, tonalitik, dasitik, aplitik, pegmatitik, granitik ve diyabazik dayk ve damarlarca sık sık kesilen magmatik kompleks ise “Güvendik Dayk Karmaşığı” olarak adlandırılmıştır (Konak vd., 2001). Konak ve Hakyemez, 2009'a göre Olur birliğinin temelinde Liyas-Dogger yaşlı bazik-ortaç-asidik bileşime sahip volkanik kayalar yer almaktadır. Birim, Oksfordiyen-Berriyasiyen yaşlı ve oltutaşı içeren delta çökelleri ve denizaltı yelpazesi türbiditleri üzerine keskin bir dokanla gelmektedir. Berriyasiyen-Apsiyen yaşlı yarı pelajik çörtlü karbonatlar ve Apsiyen-Santoniyen yaşlı kumtaşı-silttaşı-marn ardalanması bu birimin üzerine gelmektedir. Daha üstte Santoniyen yaşlı ortaç bileşimli volkanitler konumlanmaktadır. Geç Santoniyen-Maastrichtiyen sürecinde Marn ve killi kireçtaşlarının çökelişi devam etmekte olup bunların üzerinde ise Paleosen yaşlı çakıltaşları, Erken Paleosen yaşlı neritik kireçtaşları ve Geç Paleosen yaşlı türbiditik kumtaşı ve kireçtaşı ara katmanlı marn ve silttaşına geçmektedir. Aksu birliğinin temelinde Malm yaşlı türbiditikler yer almaktadır. Birim Erken Kretase yaşlı pelajik kireçtaşları üzerine geçişli olarak konumlanmaktadır. Üst Kretase istifinin temel kayalarını Siltli-kumlu-killi kireçtaşı, silttaşı ve kumtaşı ardalanması oluşturmaktadır. Üst bölümde ise bazik bileşimli volkanitler bulunmaktadır (Konak & Hakyemez, 2009). Liyas-Dogger yaşlı, çoğunlukla bazik bileşimli volkanit ve volkanoklastikler Çardaklı birliğinin temelini oluşturmaktadır. Malm-Erken Kretase yaşlı sığ denizel kireçtaşları ve türbiditik çökeller bunların üzerinde konumlanmaktadır. İstifin Geç Kretase yaşlı bölümü altta kireçtaşı mercekli bir flişle üstte neritik kireçtaşları ile temsil olmaktadır. Bu birimler Erken Eosen yaşlı dasidik sokulumlar tarafından kesilmektedir (Konak & Hakyemez, 2009). Sünnetçi (2018) inceleme alanı yakın çevresinde yapmış olduğu çalışmada Güvendik Dayk Karmaşığı içerisindeki asidik bileşimli derinlik ve yarı derinlik kayalarının zirkon U-Pb yaş verilerine göre 185,4+ 0,99 My. yaşında (Erken Jura) olduğunu belirterek birimi Güvendik Tronjemiti olarak adlandırmıştır.

İnceleme alanı Doğu Pontid Orojenik Kuşağı'nda Olur (Erzurum) bölgesi ve çevresinde yüzeylenmektedir (Şekil 1b). Oltu ekaylı zonu içerisinde yer alan Güvendik Dayk Karmaşığı çok çeşitli kaya türlerinden oluşmaktadır. Özellikle metagranitlerin öncel çalışmalar kapsamında zirkon U-Pb jeokronolojisi ve izotop analizleri ortaya konmamıştır. Bu kapsamda inceleme konusunu oluşturan Güvendik Dayk Karmaşığı'na ait metagranitlerin zirkon U-Pb jeokronolojisi ve Lu-Hf izotop sistematığının ortaya çıkarılması bu çalışmanın amacını oluşturmaktadır.

## MATERYAL VE YÖNTEM

OL02 nolu metagranit örneği için zirkon ayırma işlemleri Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Hidroseperasyon laboratuvarında hidroseperasyon yöntemi ile gerçekleştirildi. Bu yöntemde, ortalama 500 g ağırlığındaki kayaç örneği kırma ve öğütme işlemlerine tabi tutuldu. Öğütülen malzeme 30-55-78-115 mikronluk eleklerden elenerek yıkama işlemine geçildi. Yıkanan malzeme ped bardaklara alınarak hidroseperasyon aşamasına başlandı. Bu kapsamda bilgisayar programı tarafından kontrol edilen bir hidroseperasyon cihazı kullanıldı. Bu aşamada 30-15-8 cm'lik 3 adet farklı boyutlarda cam boru yardımıyla suyun

kaldırma kuvvetinden yararlanılarak ağır mineraller dibe çökerken hafif mineraller borudan dışarı atıldı. 3'üncü boruda kalan malzeme petri kabına alındı ve miknatıs yardımı ile içerisindeki manyetit mineralleri ayrıldı. Kalan numune 140 °C sıcaklıkta etüvde kurutulduktan sonra manyetik seperatörden geçirildi. Bu aşamadan sonra petri kabına alınan numune, binoküler mikroskop altında incelenerek zirkon mineralleri seçildi.

Zirkonların iç yapılarının belirlenmesi amacı ile katodoluminesans fotoğrafları Academia Sinica Yer Bilimleri Enstitüsü/Tayvan'da çekildi. Zirkon U-Pb jeokronoloji analizi LA-ICP MS (Agilent 7500s quadrupole ICP-MS equipped with a Photon Machines 193 nm Analyte G2 excimer laser ablation system) yöntemi kullanılarak Ulusal Tayvan Üniversitesinde gerçekleştirildi.

Zirkon U-Pb jeokronoloji analizinden sonra aynı zirkon mineralleri üzerinde Lu-Hf izotop ölçümleri MS-LA-ICP MS yöntemi kullanılarak Academia Sinica Yer Bilimleri Enstitüsü /Tayvan'da gerçekleştirildi.

## BÖLGESEL JEOLJİ

Çalışma alanı, Doğu Pontid Orojenik Kuşağı içerisinde konumlanmakta olup kuşak boyunca Paleozoyik-Miyosen sürecinde gelişen magmatizma ile ilişkili derinlik ve yüzey kayalar ve volkano-sedimanter birimler bulunmaktadır. Bununla birlikte magmatizmanın duraksadığı süreçlerde sedimanter birimler gelişmiştir. Bu kuşak, kuzey ve güney zon olarak ayrılmaktadır (Özsayar vd., 1981). Kuzey zon içerisinde konumlanan inceleme alanı Olur (Erzurum) bölgesi ve çevresinde yüzeylenmektedir. Bölgede ki temel birimleri Karbonifer yaşlı granitik kayalar ve metamorfikler meydana getirmektedir (Okay & Şahintürk, 1997; Topuz vd. 2007, 2010; Ustaömer & Robertson, 2010; Dokuz, 2011; Kaygusuz vd., 2016). İnceleme konusu kayalar Güvendik Dayk Karmaşığı'na ait metagranitler ile temsil edilmektedir.

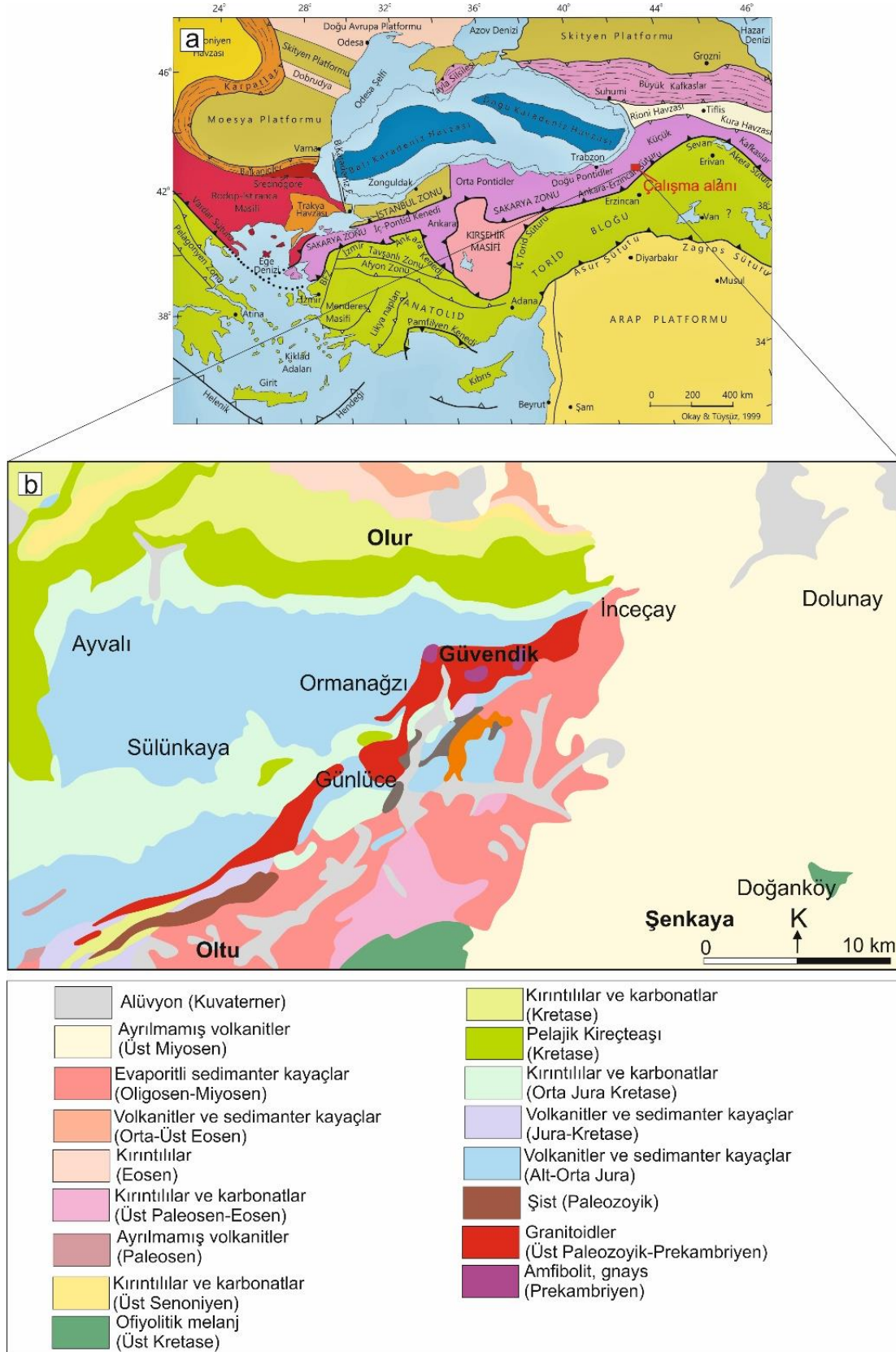
Güvendik Dayk Karmaşığı, metagranit, gnays, amfibollü gnays, mikaşist, metabazit, amfibolit gibi metamorfik kayalar ve bunları kesen tonalitik, pegmatitik, dasitik, ve diyabazik bileşimlerdeki damar kayalar ve dayklar ile temsil edilmekte olup tektonik dilim şeklinde bulunan litoloji topluluğudur (Konak vd., 1991, 2001).

Gülmez, (2015) bu kayaların, Oltu ekaylı zonu içerisinde konumlandığını, kuzey sınırı boyunca dike yakın bir dokanakra tektonik olarak Olur Birliğine ait kayalar ile yan yana geldiğini belirtmiştir. Karmaşık genel olarak derin vadiler boyunca dik bir topografya göstermektedir (Gülmez, 2015).

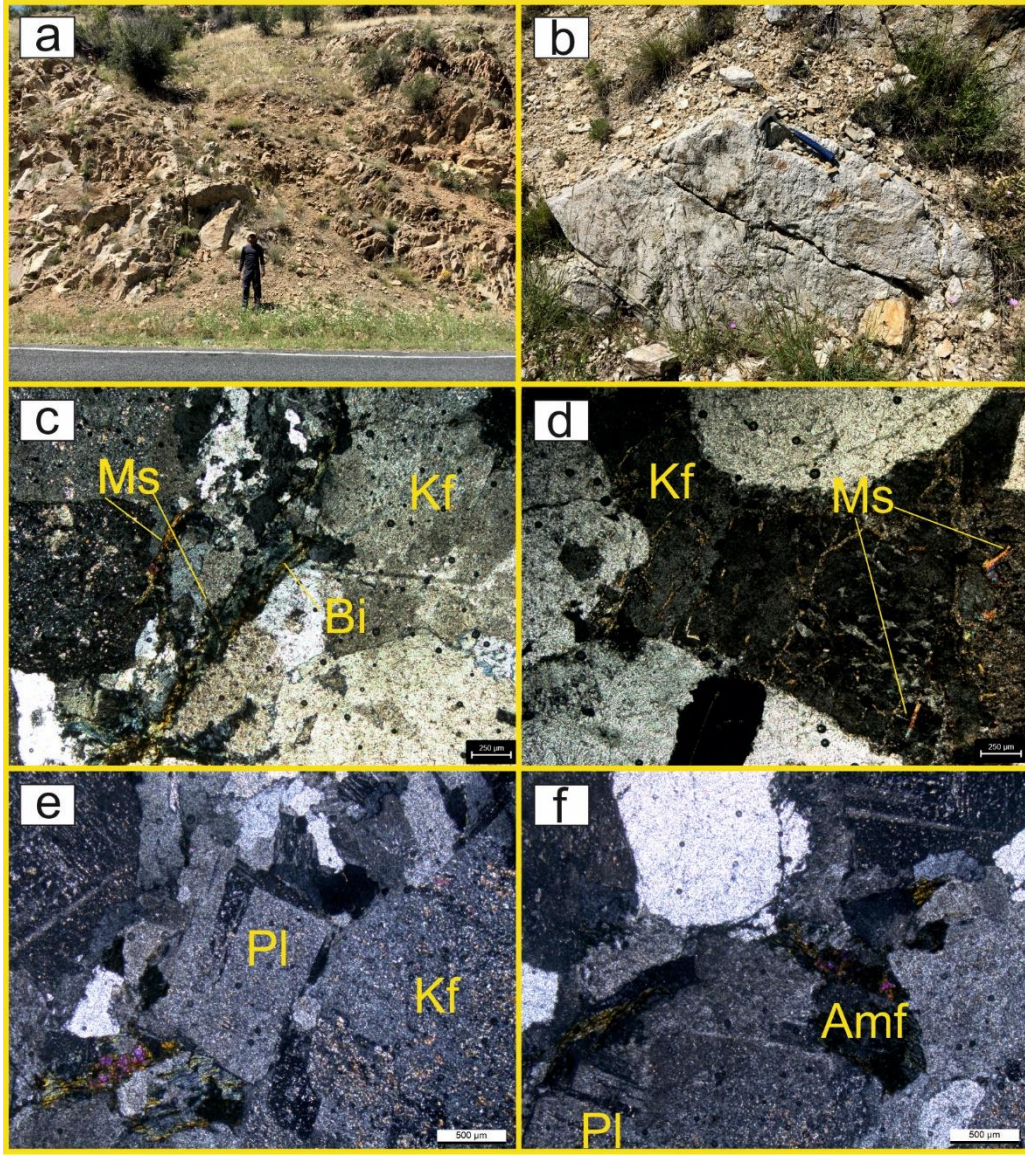
## PETROGRAFI

Araziden derlenen metagranitler makro örneklerde iri taneli olup, inceleme alanında pembemsi-toprağımsı renklerde görülmektedir (Şekil 2a,b). Esas olarak K-feldispat, plajiyoklas ve kuvars minerallerini içermekte olup mafik mineral fazı ise amfibol, biyotit ve opak mineraller ile temsil edilmektedir. Düşük dereceli metamorfikler ile temsil edilen bu kayalarda alterasyon gözlenip kayaç içerisindeki minerallerde de makro örneklerde olduğu gibi az oranda yönlendirmeler gözlenmiştir.

Metagranitlerde felsik mineral fazını kuvars (20-25 vol. %), K-feldispat (22-30 vol. %) ve plajiyoklaslar (30-34 vol. %), mafik mineral fazını ise biyotit/muskovit (5-7 vol. %) ve amfibol (4-6 vol. %) mineralleri oluşturmaktadır. Kayalarda genel olarak holokristalen doku gözlenmektedir (Şekil 2c-f). Özşekilsiz kristaller halinde görülen kuvarlar polarize ışıkta şeffaf renklerde, analize ışıkta ise açık-koyu gri tonlarında girişim renkleri sergilemektedir. Düşük optik engibeleri ile karakteristiktir. Özşekilsiz kristaller şeklinde gözlenen K-feldispatlar analize ışıkta açık-koyu gri renklerde düşük çift kırınım renklerine sahiptir. Polarize ışıkta ise toprağımsı renkler göstermektedir. Bazı kristallerinde karlsbad ikizlenmeleri gösteren K-feldispat minerallerinde bozunma orta-yüksek düzeyde olup serizitleşmeler görülmektedir. Plajiyoklaslar albit, polisentetik ve albit+karlsbat ikizlenmeleri ile karakteristiktir (Şekil 2c-f). Bozunma yüksek düzeyde olup K-feldispatlarda olduğu gibi bazı kristallerde ikiz lamelleri net olarak izlenmemektedir. Mevcut bozunma türü karbonatlaşma ve serizitleşmedir. Bozunmalardan kaynaklı olarak plajiyoklas kristallerinde sönme açısı dolayısıyla tür tespiti yapılamamıştır. Levhamsı-prizmatik kristaller şeklinde görülen biyotitler canlı girişim renkleri sergilemektedir. Polarize ışıkta açık kahveden koyu kahverengiye değişen pleokroizma göstermektedir. Paralel sönme gösteren biyotit minerallerinde tek yönde dilinimler karakteristiktir. Muskovitler canlı girişim renklerinde ince levhamsı kristaller şeklindedir. Tek nikolde şeffaftır. Canlı girişim renklerine sahip amfibol mineralleri prizmatik kristaller şeklinde görülmektedir. Polarize ışıkta yeşil tonlarında pleokroizma göstermektedir. Biyotit ve amfibol minerallerinde klorit minerallerine dönüşümler gözlenmektedir.



Şekil 1. a) Türkiye Tektonik Birlikler Haritası (Okay & Tüysüz, 1999). (b) İnceleme Alanının Genelleştirilmiş Jeolojisi Haritası (MTA, 2002).



**Şekil 2.** Güvendik Dayk Karmaşığı'na Ait Metagranitlerin (a-b) Arazi Görünümleri (c-f) İnce Kesit Görünümleri (Pl: plajiyoklas; Amf: amfibol; Kf: K-feldispat; Bi: biyotit; Ms: muskovit)

## BULGULAR

### Zirkon U-Pb jeokronolojisi

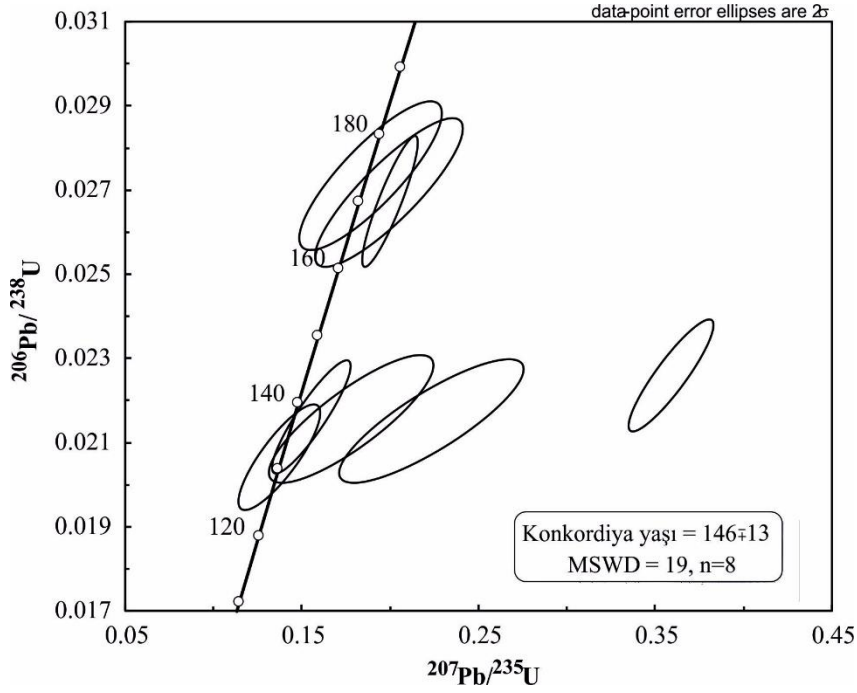
Zirkon U-Pb (OL02) jeokronolojisi ölçüm sonuçları Tablo 1'de sunulmuştur. İncelenen metagranit örneği için 16 adet zirkon minerali üzerinde 16 sayıda noktadan ölçüm gerçekleştirilmiştir. Zirkonlar genel olarak öz şekilsiz veya yarı özşekilli, kahverengi renklerde, kısa-uzun prizmatik şekillerde görülmekte olup bazı zirkon minerallerinde magmatik zonlanmalar ve mineral kapantıları görülmektedir (Şekil 3). Ölçümü yapılan 16 adet zirkon mineralinin 8 tanesi magmatik kökenli diğer yarısı ise metamorfik kökenli zirkonlardan oluştuğu düşünülmektedir. 8 adet magmatik zirkon için U değerleri 151,98-744,61 ppm, Th değerleri 50,17 ppm ile 999,34 ppm aralığında değişmekte, Th/U oranları ise 0,33 ile 1,34 aralığında değişmektedir. Metamorfik zirkonlar için U değerleri 377,80 ppm ile 1063,64 ppm aralığında, Th değerleri 159,23 ppm ile 367,04 ppm aralığında, Th/U oranları ise 0,42 ile 0,67 arasında değişmektedir. Güvendik Dayk Karmaşığı'na ait metagranitlerin kristalizasyon yaşı  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  verilerine göre  $146 \pm 13$  My. (Şekil 4) Metamorfizma yaşı ise  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  verilerine göre  $78,3 \pm 1,4$  My. olarak belirlenmiştir (Şekil 5).

### Zirkon Lu-Hf izotopları

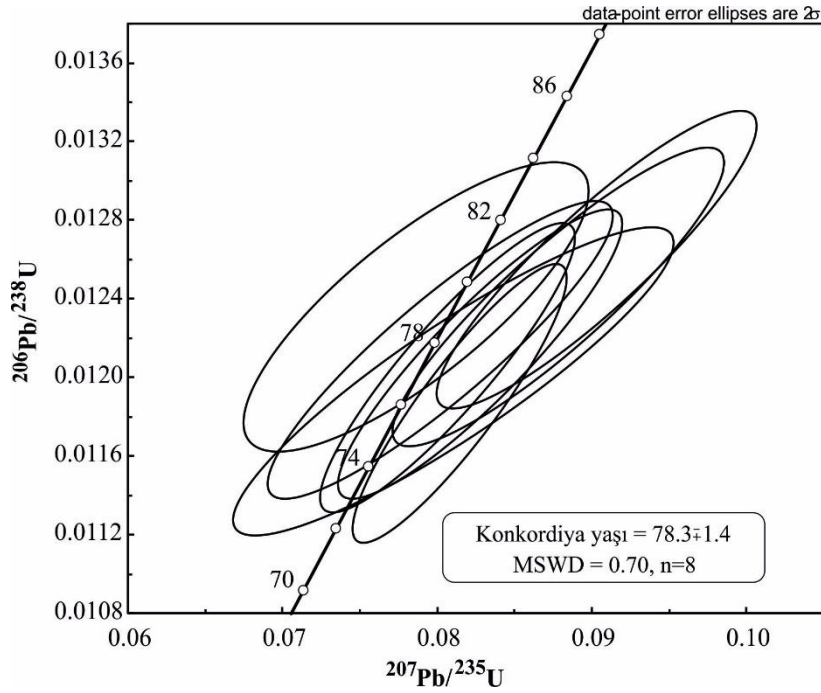
Zirkon Lu-Hf izotop (OL02) ölçüm sonuçları Tablo 2’de verilmiştir. Zirkon U-Pb izotop ölçümü yapılan 16 adet zirkon mineralinden 10 tanesi seçilerek aynı ölçüm noktalarında Lu-Hf izotop ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Magmatik kökenli zirkon minerallerinin  $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$  izotop verileri 0,0008 ile 0,0026 aralığında değişmektedir.  $\epsilon\text{Hf}(t)$  değerleri 6,01 ile 12,7 aralığında değişmekte olup pozitif değerler göstermektedir. Modal yaşları ( $\text{TDM}_2$ ) 0,40-0,81 milyar yıl aralığında değişmektedir. Metamorfik kökenli zirkon minerallerinin  $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$  izotop verileri 0,0009 ile 0,0019 aralığında değişmektedir.  $\epsilon\text{Hf}(t)$  değerleri 3,8 ile 5,9 aralığında değişmekte olup pozitif değerler sergilemektedir. Modal yaşları ( $\text{TDM}_2$ ) 0,76-0,89 milyar yıl aralığında değişmektedir. İnceleme konusu metagranitler zirkon U-Pb yaşına karşı  $\epsilon\text{Hf}(t)$  diyagramında CHUR (Kondritik Uniform Rezervuar) ile tüketilmiş manto alanı içerisinde yer alıp pozitif  $\epsilon\text{Hf}(t)$  değerlerine sahiptir (Şekil 6).



Şekil 3. Güvendik Dayk Karmaşığı'nın Metagranitlerine Ait Zirkonların Katodolüminesans Fotoğrafları



Şekil 4. Güvendik Dayk Karmaşığı'nın Metagranitlerine Ait Magmatik Zirkonlar için U-Pb Konkordiya Diyagramı



Şekil 5. Güvendik Dayk Karmaşığı'nın Metagranitlerine Ait Metamorfik Zirkonlar için U-Pb Konkordiya Diyagramı

**Tablo 1.** Güvendik Dayk Karmaşığı'ndan Alınan OL02 Nolu Metagranit Örneğinin Zirkon U-Pb Verileri

Örnek	U (ppm)	Th (ppm)	Th/U	U-Th-Pb oranları							
				<sup>207</sup> Pb/ <sup>206</sup> Pb	1σ	<sup>207</sup> Pb/ <sup>235</sup> U	1σ	<sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U	1σ	<sup>208</sup> Pb/ <sup>232</sup> Th	1σ
OL0201	4,961,283	2,622,025	0,528497	0,04824	0,00242	0,1374	0,00948	0,02066	0,00051	0,00655	0,00015
OL0202	5,128,252	3,441,327	0,671053	0,05426	0,0008	0,19982	0,00635	0,02673	0,00063	0,00849	0,00028
OL0203	3,756,473	3,580,937	0,953271	0,07533	0,00554	0,22344	0,02132	0,02151	0,0006	0,00647	0,00015
OL0204	9,646,536	4,412,317	0,457399	0,04616	0,00191	0,07867	0,00456	0,01236	0,0003	0,00394	0,00014
OL0205	181,753	671,696	0,369565	0,05366	0,00345	0,19936	0,01716	0,02695	0,00072	0,00843	0,00019
OL0206	7,690,638	3,254,959	0,423237	0,04858	0,00107	0,08069	0,00336	0,01205	0,0003	0,004	0,00019
OL0207R	1,063,645	6,235,159	0,586207	0,04978	0,00083	0,08146	0,00283	0,01187	0,00029	0,00395	0,00018
OL0208	151,986	5,017,013	0,330097	0,05009	0,00335	0,18887	0,01653	0,02734	0,00072	0,00863	0,00024
OL0209	7,446,133	9,993,494	1,342,105	0,11526	0,00138	0,35918	0,00985	0,0226	0,00054	0,00595	0,00028
OL0210	2,391,668	1,347,791	0,563536	0,05991	0,00506	0,17807	0,01908	0,02156	0,00062	0,00666	0,00015
OL0211	3,778,041	1,592,398	0,421488	0,04908	0,00242	0,08105	0,00583	0,01198	0,00032	0,00384	0,00022
OL0212	2,317,597	9,127,216	0,393822	0,05214	0,00192	0,15542	0,00902	0,02162	0,00055	0,00657	0,00038
OL0213	4,868,049	2,458,124	0,50495	0,0479	0,00171	0,08021	0,00457	0,01214	0,00031	0,00371	0,00021
OL0214	559,302	2,448,447	0,437768	0,052	0,00141	0,09032	0,00424	0,0126	0,00031	0,00434	0,00025
OL0215	5,433,702	3,670,448	0,675497	0,05133	0,00151	0,08784	0,00438	0,01241	0,00031	0,00404	0,00023
OL0216	6,640,267	279,879	0,421488	0,04954	0,00126	0,08277	0,00375	0,01212	0,0003	0,00375	0,00023

**Tablo 1.** 'in devamı

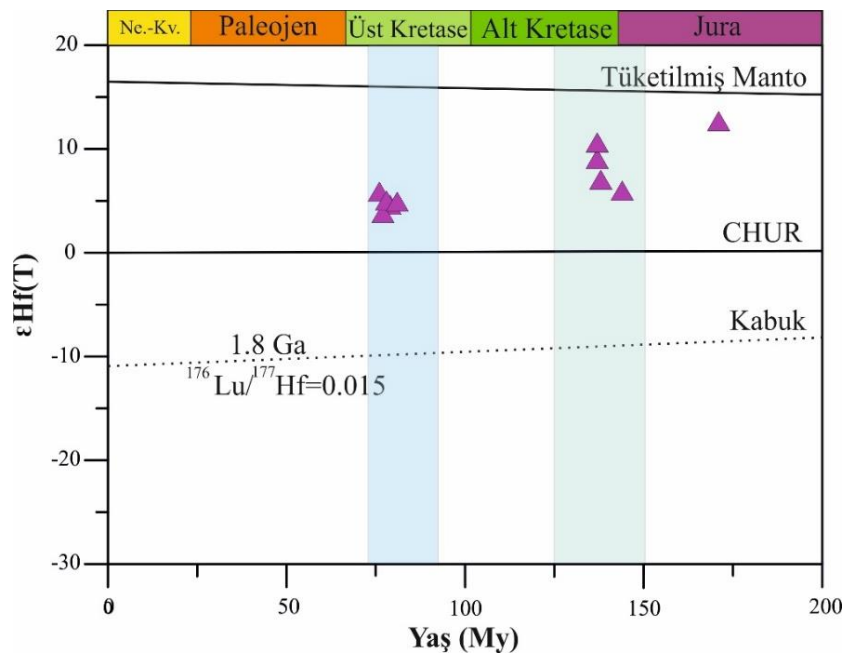
Yaş							
<sup>207</sup> Pb/ <sup>206</sup> Pb	1σ	<sup>207</sup> Pb/ <sup>235</sup> U	1σ	<sup>206</sup> Pb/ <sup>238</sup> U	1σ	<sup>208</sup> Pb/ <sup>232</sup> Th	1σ
111	97	131	8	132	3	132	3
382	29	185	5	170	4	171	6
1077	134	205	18	137	4	130	3
6	71	77	4	79	2	80	3
357	131	185	15	171	5	170	4
128	46	79	3	77	2	81	4
185	34	80	3	76	2	80	4
199	136	176	14	174	5	174	5
1884	20	312	7	144	3	120	6
600	168	166	16	137	4	134	3
152	103	79	5	77	2	77	4
292	77	147	8	138	3	132	8
94	75	78	4	78	2	75	4
285	56	88	4	81	2	88	5
256	62	85	4	80	2	81	5
173	54	81	4	78	2	76	5

**Tablo 2.** Güvendik Dayk Karmaşığı'ndan Alınan OL02 Nolu Metagranit Örneğinin Zirkon Lu-Hf Verileri

Örnek	Yaş (My)	± 1s	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$	± 2s	$^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$	± 2s	$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ (T)
OL02-3	137	4	0,282948	0,000013	0,0017322	0,000034	0,282943564
OL02-4	79	2	0,282857	0,000021	0,00171571	0,000052	0,282854468
OL02-5	171	5	0,283034	0,000014	0,00265085	0,000041	0,283025523
OL02-7	76	2	0,282895	0,000013	0,00196345	0,000074	0,282892212
OL02-9	144	3	0,282855	0,000014	0,000823919	0,000019	0,282852782
OL02-10	137	4	0,282993	0,000011	0,0017826	0,000038	0,282988435
OL02-11	77	2	0,282835	0,000011	0,000990876	0,000021	0,282833575
OL02-12	138	3	0,28289	0,000013	0,00150338	0,000036	0,282886122
OL02-13	78	2	0,282869	0,000017	0,00158431	0,000034	0,282866691
OL02-14	81	2	0,282864	0,000012	0,0013523	0,000037	0,282861953

**Tablo 2.**'nin devamı

$^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$ CHUR(T)	e Hf(0)	e Hf(T)	± 2s	T(DM) 1	T(DM) 2
0.282686973	6,224096	9,076861	0,459873	439,3346	610,7599
0.282722996	3,005955	4,650184	0,742777	570,7582	849,9342
0.282665837	9,265415	12,72478	0,495284	322,6525	402,6864
0.282724858	4,349794	5,919311	0,459811	519,3255	766,3121
0.282682622	2,935227	6,019456	0,495255	560,1039	812,1886
0.282686973	7,815484	10,66416	0,389123	374,612	508,8275
0.282724238	2,227943	3,86726	0,389072	590,9196	898,5963
0.282686351	4,172973	7,066856	0,459874	520,0696	740,4413
0.282723617	3,430325	5,060568	0,601294	551,4551	822,8989
0.282721755	3,253505	4,958895	0,424446	555,1739	831,7314

**Şekil 6.** Zirkon U-Pb Yaşına Karşı  $\epsilon\text{Hf}(t)$  Diyagramı



## TARTIŞMA VE SONUÇLAR

İnceleme konusunu oluşturan kayaçlar Güvendik Dayk Karmaşığı'na ait metagranitler ile temsil edilmektedir. Bu çalışma kapsamında inceleme konusu metagranitler üzerinde zirkon U-Pb ve Lu-Hf izotop verileri elde edilmiştir. Kıtasal kabuk içerisinde zirkonyum yoğun oranda bulunmaktadır. Rudnick & Gao, (2003)' göre alt kıtasal kabuktaki ortalama zirkon konsantrasyonu 68 ppm iken, üst kıtasal kabuk içerisinde bu değer ortalama 193 ppm'dir. Zirkon genel olarak yavaş ve dengesiz ergimenin bir sonucu olarak oluşmaktadır. Bu sebeple kabuk ergimesinin bir sonucu olarak zirkon yaygın olarak görülmektedir. Hoskin & Schaltegger (2003), metamorfik ve magmatik kökenli zirkonları ayırmak için zirkonlar üzerinde ölçülen Th/U oranlarından yararlanmıştır. Magmatik zirkonlar için Th/U oranları 0,5'ten büyük olduğunu öne sürmüşlerdir. İncelenen kayaçların Th/U değerleri 0,33-1,31 arasında değişmektedir. Buna göre incelenen metagranitler içerisindeki zirkonların hem magmatik hem de metamorfik kökenli zirkonlardan oluştuğu görülmüştür.

Zirkon içerisinde yer alan  $^{176}\text{Lu}$  ile  $^{176}\text{Hf}$  arasındaki radyoaktif bozunma mantoda kısmi ergime sürecinde Lu ve Hf'un farklı davranışlarından kaynaklı olarak kıtasal kabuğun oluşum süreci ile ilgili önemli veriler sunmaktadır. Lu Hf'ye kıyasla daha uyumludur. Hf elementi ergiyiği tercih ettiği için tüketilmiş mantoda kısmen daha yüksek Lu/Hf oranları görülmektedir (Griffin vd. 2000; Dhuime vd. 2011) ( $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf} = 0,0384 - 0,0390$ ). Hf elementinin uyumsuz davranışının bir sonucu olarak 0,008 ile 0,025 aralığında değişen kabuksal  $^{176}\text{Lu}/^{177}\text{Hf}$  izotop değerleriyle kıtasal kabukta zenginleşmesine sebep olmaktadır (Vervoort & Patchett, 1996; Vervoort & Blichert-Toft, 1999; Rudnick ve Gao, 2003; Hawkesworth ve Kemp, 2006; Wang vd., 2011).  $^{176}\text{Lu}$  ile  $^{176}\text{Hf}$ 'nin bozunması sonucu mantoda kısmen daha yüksek oranlarda  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  değerleri ve kabukta kısmen daha düşük  $^{176}\text{Hf}/^{177}\text{Hf}$  değerleri üretmektedir. Epsilon parametresi ( $\epsilon\text{Hf}(t)$ ) Lu-Hf izotop verilerinin değerlendirilmesinde yaygın şekilde kullanılmaktadır. Pozitif  $\epsilon\text{Hf}(t)$  değerlerine sahip kayaçların genel olarak tüketilmiş manto ya da juvenil alt kabuktan kaynaklandığı düşünülmektedir. Negatif  $\epsilon\text{Hf}(t)$  değerlerine sahip olanlar evrimleşmiştir ve zenginleşmiş litosferik manto kökenini temsil etmektedir (Griffin vd. 2002).

Zirkon minerallerinden elde edilen Hf izotopları ana magma kökeni ve karışım süreçlerini belirlemek amacı ile kullanılabilir (Griffin vd. 2002). Zhao vd. (2012) Hf izotoplarının, farklı kaynaklardan türetilen felsik ve mafik magmalar arasındaki karışım süreçleri hakkında en doğru ipuçlarını verdiğini öne sürmektedir. Benzer zirkon U-Pb jeokronoloji verileri içeren magmatik kayaçların değişken  $\epsilon\text{Hf}(t)$  değerlerine sahip olmasının sebebi magmaların farklı kaynak bölgelerinden türemesinin bir sonucudur (Yang vd. 2007). Ma vd. (2013), pozitif  $\epsilon\text{Hf}(t)$  değerlerinin, magmaların tüketilmiş manto kaynağından türediğini belirtmektedir. Chen vd. (2008) ve Yang vd. (2006) negatif  $\epsilon\text{Hf}(t)$  değerlerinin zenginleşmiş litosferik manto kaynağına işaret ettiğini söylemişlerdir. İnceleme konusunu metagranitlerin  $\epsilon\text{Hf}(t)$  değerleri sırasıyla (6,01-12,7/ 3,8-5,9) aralığında değişim gösteren pozitif değerlere sahiptir. Pozitif  $\epsilon\text{Hf}(t)$  değerleri bu kayaçların tüketilmiş bir manto kaynağı kökeninden türediğini göstermektedir. Zirkon U-Pb jeokronolojisi verilerine göre inceleme konusunu oluşturan metagranitlerin kristalizasyon yaşı  $146 \pm 13$  My,  $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$  verilerine göre metamorfizma yaşı ise  $78,3 \pm 1,4$  My. olarak tespit edilmiştir.

Sonuç olarak;

- ✓ Güvendik Dayk Karmaşığı'na ait inceleme konusunu oluşturan birimler metagranitler ile temsil edilmektedir.
- ✓ Birim petrografik olarak kuvars (15-20 vol. %), K-feldispat (22-30 vol. %), plajiyoklas (30-34 vol. %), biyotit/muskovit (5-7 vol. %) ve amfibol (4-6 vol. %) minerallerinden oluşmakta olup granoblastik doku göstermektedir.
- ✓ Zirkon U-Pb yaş verilerine göre metagranitlerin kristalizasyon yaşı  $146 \pm 13$  My, metamorfizma yaşı  $78,3 \pm 1,4$  My'dir.
- ✓ Zirkon Lu-Hf izotop verilerine göre metagranitler Pozitif  $\epsilon\text{Hf}(t)$  değerlerine sahip olup tüketilmiş bir manto kökeninden geldiği düşünülmektedir.

## TEŞEKKÜR

Bu çalışma birinci yazarın doktorasının bir bölümünü oluşturmakta olup, Doktora Sırası Yurtdışı Araştırma Bursu Programı tarafından desteklenmiştir (TÜBİTAK 2214A; Protokol numarası 1059B141800146). Analizlerin yapılması konusunda desteğini esirgemeyen Prof. Dr. Sun-Lin Chung'a (Ulusal Tayvan Üniversitesi) ve laboratuvar çalışmalarına yardımcı olan Yu-Chin Lin ve Jia-Huei Chen'e teşekkür ederim.

## KAYNAKLAR

- Altherr, R., Topuz, G., Siebel, W., Şen, C., Meyer, H. P., & Satır, M. (2008). Geochemical and Sr-Nd-Pb İstotopic Characteristics of Paleocene Plagioclitites from the Eastern Pontides (NE Turkey). *Lithos*, 105, 149-161. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2008.03.001>
- Chen, B., Tian, W., Jahn, B.M., & Chen, Z.C. (2008). Zircon SHRIMP U-Pb age and in-situ Hf isotopic analysis for the Mesozoic intrusion in South Taihang, North China craton: evidenc for hybridization between mantle-derived magmas and crustal components. *Lithos*, 102, 118-137. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2007.06.012>
- Delibaş, O., Moritz, R., Ulianov, A., Chiaradia, A., Saraç, C., Revan, K.M., & Göç, D. (2016). Cretaceous subduction-related magmatism and associated porphyry-type Cu-Mo prospects in the Eastern Pontides, Turkey: New constraints from geochronology and geochemistry. *Lithos*, 248-251, 119-137. <http://dx.doi.org/10.1016/j.lithos.2016.01.020>
- Dhuime, B. Hawkesworth, C., & Cawood, P. (2011). When continents formed. *Science*, 331, 154-155.
- Dokuz, A. (2011). A slab detachment and delamination model for the generation of Carboniferous high- potassium I-type magmatism in the Eastern Pontides, NE Turkey: The Köse composite pluton. *Gondwana Research*, 19, 926-944. <https://doi.org/10.1126/science.1201245>
- Dokuz, A., Karşlı, O., Chen, B., & Uysal, İ. (2010). Sources and petrogenesis of Jurassic granitoids in the Yusufeli area, Northeastern Turkey: Implications for pre- and post-collisional lithospheric thinning of the eastern Pontides. *Tectonophysics*, 480, 259-279. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2009.10.009>
- Griffin, W.L., Pearson, N.J., Belousova, E., Jackson, S.E., van Achterbergh, E., O'Reilly, S.Y., & Shee, S.R. (2000). The Hf isotope composition of cratonic mantle: LAM-MC-ICP MS analysis of zircon megacrysts in kimberlites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64, 133-147. [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(99\)00343-9](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(99)00343-9)
- Griffin, W.L., Wang, X., Jackson, S.E., Pearson, N.J., O'Reilly, S.Y., Xu, X.S., & Zhou, X.M. (2002). Zircon chemistry and magma mixing, SE China: in situ analysis of Hf isotopes, Tongluand Pingtan igneous complexes. *Lithos*, 61, 237-269. [https://doi.org/10.1016/S0024-4937\(02\)00082-8](https://doi.org/10.1016/S0024-4937(02)00082-8)
- Gülmez, G. (2015). Oltu (KD Erzurum) ve Orduzu (D Malatya) Dolaylarının Eosen Foraminifer Biyostratigrafisi ve Paleoklimsel Analizi, Yüksek Lisans Tezi, Tunceli ve Atatürk Üniversitesi Ortak Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Hawkesworth, C.J., & Kemp, A.I.S. (2006). Using hafnium and oxygen isotopes in zircons to unravel the record of crustal evolution. *Chemical Geology*, 226, 144-162. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2005.09.018>
- Hoskin, P.W.O., & Schaltegger U. (2003). The Composition of Zircon and Igneous and Metamorphic Petrogenesis. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 53 (1), 27-62. <https://doi.org/10.2113/0530027>
- Karşlı, O., Caran, Ş., Dokuz, A., Çoban, H., Chen, B., & Kandemir, R. (2012). A-type granitoids from the Eastern Pontides, NE Turkey: Records for generation of hybrid A-type rocks in a subduction-related environments. *Tectonophysics*, 530-531, 208-224. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2011.12.030>
- Kaygusuz, A., & Şen, C. (2011). Calc-alkaline I-type plutons in the eastern Pontides, NE Turkey: U-Pb zircon ages, geochemical and Sr-Nd isotopic compositions. *Chemie der Erde*, 71, 59-75. <https://doi.org/10.1016/j.chemer.2010.07.005>
- Kaygusuz, A., Sipahi, F., İlbeyli, N., Arslan, M., Chen, B., & Aydınçakır, E. (2013). Petrogenesis of the late Cretaceous Turnagöl intrusion in the eastern Pontides: Implications for magma genesis in the arc setting. *Geoscience Frontiers*, 4, 423-438. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2012.09.003>
- Kaygusuz, A., Arslan, M., Sipahi, F., & Temizel, İ. (2016). U-Pb zircon chronology and petrogenesis of Carboniferous plutons in the northern part of the Eastern Pontides, NE Turkey: Constrains for Paleozoic magmatism and geodynamic evolution. *Gondwana Research*, 39, 327-346.

- Konak, N., Ercan, T., & Bilgin, Z.R. (1991). Artvin-Oltu arasındaki Jura öncesi kayaların tanımı ve yapısal özellikleri. Ankara Üniversitesi Suat Erk Jeoloji Sempozyumu, Bildiri Özleri.
- Konak, N., Hakyemez, Y., Bilgiç, T., Bilgin, R., Hepşen, N., & Ercan, T. (2001). Kuzeydoğu Pontidlerin (Oltu- Olur-Şenkaya- Narman-Tortum-Uzundere-Yusufeli) Jeolojisi. MTA Genel Müdürlüğü, Rapor No 10489, Ankara (Yayımlanmamış).
- Konak, N., & Hakyemez, H.Y. (2001). Tectonic units of the easternmost part of the Pontides: Stratigraphical and structural implications, Proceedings of the 2nd Int. Symp. on the Petroleum Geology and Hydrocarbon Potential of the Black Sea Area, 93-103, Turkish Association of Petroleum Geologists, Special Publication. 4.
- Konak, N., & Hakyemez H.Y. (2009). 1: 100.000 ölçekli Türkiye Jeoloji Haritaları, Tortum-G47 Paftası No: 105. MTA Genel Müdürlüğü yayını, Ankara
- Ma, X., Chen, B., Chen, J.F., & Niu, X.L. (2013). Zircon SHRIMP U–Pb age, geochemical, Sr– Nd isotopic, and in-situ Hf isotopic data of the Late Carboniferous–Early Permian plutons in the northern margin of the North China Craton. *China Earth Sciences*, 56, 126–144. <https://doi.org/10.1007/s11430-012-4456-6>
- MTA, (2002). 1:500,000-Scale Map of Turkey. MTA, Ankara.
- Okay, A.I., & Şahintürk, Ö. (1997). Geology of the Eastern Pontides. In: Robinson, A.G., Regional and Petroleum Geology of the Black Sea and Surrounding Region, AAPG Memoir, 68, 291-310.
- Okay, A.I., & Tüysüz, O. (1999). Tethyan Sutures of Northern Turkey. In: Durand, B., Jolivet, L., Horváth, F., Séranne, M., (Eds), The Mediterranean Basins: Tertiary Extension within the Alpine Orogen. *Geological Society London Special Publications*, 156, 475-515.
- Özsayar, T. Pelin, S., & Gedikoğlu, A. (1981). Artvin Yöresi Yastık Lavlarının Yaşına İlişkin Paleontolojik Veriler. *KTÜ Yerbilimleri Dergisi*, 2, 1-2,
- Rudnick, R.L., & Gao, S. (2003). Composition of the continental crust. In: Rudnick, R.L. (Ed.), Treatise on Geochemistry: The Crust. Elsevier, pp. 1–64.
- Sar, A., Kürüm, S., & Bingöl, A.F. (2023). Early Cretaceous to Middle Eocene Magmatic Evolution of Eastern Pontides: Zircon U-Pb Ages and Hf Isotopes, and Geochemical and Sr-Nd Isotopic Constraints from Multiphase Granitoids, NE Turkey. *Journal of Earth Science*, 34, 518-534. doi: <https://doi.org/10.1007/s12583-022-1640-2>
- Sar, A., Kürüm, S., & Lee, H.-Y. (2022). Çamlıkaya (İspir/Erzurum) Köyü Çevresinde Yüzeyleyen Kaçkar Batoliti'ne ait Granitoidlerin Petrografik ve Jeokimyasal Özellikleri. *Int. J. Pure Appl. Sci.* 8(1), 224-238. <https://doi.org/10.29132/ijpas.991777>
- Sipahi, F. (2005). Zigana dağı (Torul-Gümüşhane) volkanitlerindeki hidrotermal ayrışmaların mineraloji ve jeokimyası / Mineralogy and geochemistry of hydrothermal alterations in Zigana mountain (Torul-Gümüşhane) volcanics, Doktora Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Sipahi, F., & Sadıklar, M.B. (2014). Geochemistry of dacitic volcanics in the Eastern Pontides NE Turkey. *Geochemistry International*, 52, 296–315. <https://doi.org/10.7868/S0016752514040086>
- Sipahi, F., Gücer, M.A., Dokuz, A., Yi, K., Kaygusuz, A., Akaryalı, E., Saydam Eker, Ç., & Doruk, C. (2023). The Sr, Nd, Pb, and Hf isotopes and crystallization conditions of the middle Eocene Dağdibi Pluton in the eastern Sakarya Zone, Turkey. *Geological Magazine*, 160, 1193-1210. doi: <https://doi.org/10.1017/S001675682300033X>
- Sipahi, F., Kaygusuz, A., Saydam, Ç., Vural, E.A., & Akpınar, İ. (2018). Late Cretaceous arc igneous activity: the Eğrikar Monzogranite example. *International Geology Review*, 60, 382–400. <https://doi.org/10.1080/00206814.2017.1336120>
- Sünnetçi, K. (2008). Erken Jura Yaşlı Asidik Kayaçların (Olur-Erzurum) Jeokimyasal Ve İzotopik Özellikleri, Yüksek Lisans Tezi, Gümüşhane Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 72 s.
- Şen, C. (2007). Jurassic volcanism in the eastern Pontides: is it rift related or subduction related. *Turkish Journal of Earth Sciences*, 16, 523–539.
- Şengör, A.M.C., & Yilmaz, Y. (1981). Tethyan evolution of Turkey: a plate tectonic approach. *Tectonophysics*, 75, 181–241. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(81\)90275-4](https://doi.org/10.1016/0040-1951(81)90275-4)

- Topuz, G., Altherr, R., Schwarz, W.H., Dokuz, A., & Meyer, H.P. (2007). Variscan amphibolite-facies rocks from the Kurtoğlu metamorphic complex. Gümüşhane area, Eastern Pontides, Turkey. *International Journal of Earth Sciences*, 96, 861-873. <https://doi.org/10.1007/s00531-006-0138-y>
- Topuz, G., Altherr, R., Siebel, W., Schwarz, W.H., Zack, T., Hasözbeğ, A., Barth, M., Satır, M., & Şen, C. (2010). Carboniferous high-potassium I-type granitoid magmatism in the Eastern Pontides: The Gümüşhane pluton (NE Turkey). *Lithos*, 116, 92–110. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2010.01.003>
- Vervoort, J.D., & Blichert-Toft, J. (1999). Evolution of the depleted mantle: Hf isotope evidence from juvenile rocks through time. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 63, 533–556. [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(98\)00274-9](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(98)00274-9)
- Vervoort, J.D., & Patchett, J. (1996). Behavior of hafnium and neodymium isotopes in the crust: Constraints from Precambrian crustally derived granites. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 60, 3717–3733. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(96\)00201-3](https://doi.org/10.1016/0016-7037(96)00201-3)
- Wang, C.Y., Campbell, I.H., Stepanov, A.S., Allen, C.M., & Burtsev, I.N. (2011). Growth rate of the preserved continental crust: II. Constraints from Hf and O isotopes in detrital zircons from Greater Russian Rivers. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 75, 1308–1345. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2010.12.010>
- Yang, J.H., Wu, F.Y., Chung, S.L., Wilde, S.A., & Chu, M.F. (2006). A hybrid origin for the Qianshan A-type granite, northeast China: Geochemical and Sr-Nd-Hf isotopic evidence. *Lithos*, 89, 89-106. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2005.10.002>
- Yang, J.H., Wu, F.Y., Wilde, S.A., Xie, L.W., Yang, Y.H., & Liu, X.M. (2007). Tracing magma mixing in granite genesis: in situ U–Pb dating and Hf isotope analysis of zircons. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 53, 177–179. <https://doi.org/10.1007/s00410-006-0139-7>
- Zhao, K.D., Jiang, S.Y., Yang, S.Y., Dai, B.Z., & Lu, J.J. (2012). Mineral chemistry, trace elements and Sr–Nd–Hf isotope geochemistry and petrogenesis of Cailing and Furong granites and mafic enclaves from the Qitianling batholith in the SiHang zone, South China. *Gondwana Research*, 22, 310–324. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2011.09.010>



# Kahramanmaraş Sütçü İmam University Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 08.02.2024  
Kabul Tarihi : 11.03.2024

Received Date : 08.02.2024  
Accepted Date : 11.03.2024

## HAM PERLİT ESASLI HAFİF GEOPOLİMERLERDE HİDROJEN PEROKSİT KAYNAKLI GENLEŞME: DENEYSEL BİR YAKLAŞIM

### HYDROGEN PEROXIDE-INDUCED EXPANSION IN RAW PERLITE BASED LIGHTWEIGHT GEOPOLYMERS: AN EXPERIMENTAL APPROACH

Ali İhsan ÇELİK<sup>1</sup> (ORCID: 0000-0001-7233-7647)  
Mehmet Cemal ACAR<sup>2</sup> (ORCID: 0000-0002-3241-5353)  
Ufuk TUNÇ<sup>1\*</sup> (ORCID: 0000-0002-9986-9456)  
Ramazan KAYABAŞI<sup>1</sup> (ORCID: 0000-0001-6195-7445)  
Ahmet ŞENER<sup>1</sup> (ORCID: 0000-0001-7562-7631)

<sup>1,2</sup> Kayseri Üniversitesi, İnşaat Bölümü, Kayseri, Türkiye

\*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Ufuk TUNÇ: ufuktunc@kayseri.edu.tr

#### ÖZET

Modern yapılarda yığma duvarların hafif ve dayanıklı malzemelerle inşa edilmesi, aynı zamanda düşük ısı iletkenliğe sahip olması büyük önem taşımaktadır. Bu tür elemanlarda hafiflik, dayanıklılık ve ısı geçişine karşı direncin artırılması bina yükünü azaltırken ısıtma ve soğutma yüklerini azaltmaya katkı sunmaktadır. Özellikle ham perlit temelli hafif betonların üretiminde, Hidrojen Peroksit ( $H_2O_2$ ) ilavesiyle genleşme sağlanabilmektedir. Bu çalışmada ise %1, %2, %3 ve %4 oranlarda  $H_2O_2$  ilavesinin kullanıldığı ham perlit esaslı hafif yapı elemanlarının deneysel olarak incelemesi yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar, %3 oranında  $H_2O_2$  ilavesinin en iyi sonuçları verdiğini, %4 ilavesiyle perlit taneciklerinde aşırı şişme ve yapısal dağılma meydana geldiğini göstermiştir. Ayrıca, eğilme dayanımı, basınç dayanımı ve ısı iletkenlik performansı arasındaki ilişki, kullanılan  $H_2O_2$  oranıyla değerlendirilmiştir. TGA ve DTA analizine göre numunenin kütle kaybına uğradığı sıcaklık dereceleri belirlenmiştir.

**Anahtar kelimeler:** Hafif geopolimer beton, ham perlit, hafif geopolimer beton dayanımı, perlit genleşmesi, TGA, DTA

#### ABSTRACT

In modern buildings, it is of great importance that masonry walls are constructed with light and durable materials and at the same time have low thermal conductivity. Increasing lightness, durability and resistance to heat transfer in such elements contributes to reducing heating and cooling loads while reducing the building load. Especially in the production of raw perlite-based lightweight concretes, expansion can be achieved by adding Hydrogen Peroxide ( $H_2O_2$ ). In this study, raw perlite-based lightweight structural elements using 1%, 2%, 3% and 4%  $H_2O_2$  addition were experimentally examined. The results obtained showed that the addition of 3%  $H_2O_2$  gave the best results, while the addition of 4% caused excessive swelling and structural disintegration in the perlite particles. Additionally, the relationship between bending strength, compressive strength and thermal conductivity performance was evaluated with the  $H_2O_2$  ratio used.

**Keywords:** Lightweight geopolymer concrete, raw perlite, lightweight geopolymer concrete strength, perlite expansion, TGA, DTA

#### GİRİŞ

ToCite: ÇELİK, A.İ., ACAR, M.C., TUNÇ, U., KAYABAŞI, R., & ŞENER, A., (2024). HAM PERLİT ESASLI HAFİF GEOPOLİMERLERDE HİDROJEN PEROKSİT KAYNAKLI GENLEŞME: DENEYSEL BİR YAKLAŞIM. Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 27(3), 886-895.

Alkaliyle aktive edilen çimentolu malzemelerin küresel iklim değişikliği potansiyeli, normal Portland çimentosu içeren çimentolu malzemelerden yaklaşık %55-75 daha düşüktür. Alkali ile etkinleştirilmiş betonun üretimi sırasında atmosfere salınan karbondioksit (CO<sub>2</sub>) emisyonları, normal Portland çimento içeren betonlardaki CO<sub>2</sub> salınımının sadece %20'sine denk gelmektedir (Yang, Song, ve Song, 2013). Bu nedenle, alkaliyle aktive edilen beton, çevreye daha az karbon salınımı yaparak çevre dostu bir seçenek sunar. Alkali ile aktif hale getirilen malzemeler (bağlayıcılar), geleneksel Portland çimentosunun yerini almak için hızla büyüyen bir alternatif olarak öne çıkar çıkar (McLellan vd., 2011; Provis, Palomo, ve Shi, 2015).

Günümüzde binaların ısı verimliliği ekonomik ve çevresel sorunlar nedeniyle yeniden değerlendirilmektedir. Bu amaca ulaşmak için, malzemelerin ısı iletkenlik ve güneş ışınlarını yansıtma yeteneği gibi termal performans, binalardaki enerji tüketimi açısından önemlidir. Gözenekli çimentolu malzemeler genellikle termal bariyer olarak kullanılır ve termal enerjinin bir binadan kolayca kaçmasını önler. Gözenek boyutu, dağılımı, malzemenin yoğunluğu ve dolgu maddesi türü malzemenin termal özelliklerini belirleyen en önemli faktörlerdir. Bunun için gözenek oluşturuca ajan olarak H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> mekanik, fiziksel ve termal etkisini belirlemek amacıyla hafif (lightweight) geopolimer macunlar ve harçlar hazırlandı. H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> konsantrasyonunun hafif geopolimere etkisi değerlendirildi.

Bu çalışmanın amacı, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> konsantrasyonunun, alkaliyle aktive edilmiş geopolimer macun ve harçların yoğunluğu, basınç dayanımı, mineral bileşimi, gözenek dağılımı, ısı iletkenlik ve mikro yapısı üzerindeki etkisini belirlemektir. H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> gibi bir köpürme ajanı kullanarak gözenekli numuneler oldukça kolay bir şekilde oluşturulabilir. Uygulamada en çok kullanılan köpürücü maddeler, reaksiyon sırasında oksijen açığa çıkaran H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>'dur. Aktivasyon işleminin bu dizisi, malzemenin kapalı gözenek ağının oluşmasını sağlar (Ducman ve Korat, 2016). Köpürücü madde olan H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> miktarına bağlı oldukça gözenekli macun ve harç üretilmesini sağlar ve nihai özelliklerini belirler. Böylece, yeni malzemelerin ısı yalıtımı uygulamalarında çimentoya alternatif olarak kullanılmasının uygulanabilirliğini ortaya koyar (Łach, Korniejenko, ve Mikula, 2016).

H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> konsantrasyonunun hafif geopolimer macun ve harç üretiminde kullanılması ve etkisi konusunda oldukça farklı literatür çalışmaları vardır. H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>'nin termal iletkenlik ve dayanıklılık özellikleri üzerindeki etkisi yaklaşık %0,6'lık bir konsantrasyona kadar anlamlı olduğunu; bu konsantrasyonun üzerinde gözenek oluşumunda herhangi bir artış olmaksızın sabit bir davranış sergilediği gösterilmiştir (Alves vd., 2023). S. Li vd. (2022), farklı H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> dozajlarının, %0,1 polypropylene elyaf, %5 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ve %4 silis dumanı içeren Fly Ash Foam Concrete (FAFC)'nin basınç dayanımı ve ısı iletkenlik parametreleri üzerindeki test sonuçları incelemiştir. FAFC'nin basınç dayanımı ve ısı iletkenliğinin H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> dozajının artarak %4 olmasıyla ve FAFC için en yüksek basınç dayanımının 0,670 MPa ve termal iletkenliği 0,0596 W/(m·K) olmuştur. Bu karışımlarda, en düşük ısı iletkenlik değeri elde etmek için H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> dozunun %5 olması tavsiye edilmiştir. Şahin, Erdoğan, ve Bayer (2018) yaptıkları çalışmada, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> köpürtücü ajan olarak kullanılmış ve kütle yoğunluğu 516 kg/m<sup>3</sup> ile 1199 kg/m<sup>3</sup> arasında değişen, basınç dayanımı 0,5–30,0 MPa ve termal iletkenliği 0,117 ile 0,206 W/(m·K) arasında değişen alkaliyle aktive edilmiş hafif ögütülmüş yüksek fırın cüruf geopolimer numuneleri üretmeyi başarmıştır.

Esmaily ve Nuranian (2012), basınç dayanımı büyük oranda gözenek yapısından etkilendiğini belirtmişler. Hüresel alkali ile aktifleştirilen cüruf üzerinde yapılan çalışmada, sodyum silikat modülünün optimize edilmesiyle optimal gözenek yapısı oluşturulmuştur. Gözenekli malzemenin fiziksel ve mekanik özellikleri, malzeme içindeki gözeneklerin farklı boyutlardaki dağılımına bağlı olarak büyük ölçüde değişebilir. Aynı toplam gözeneğe sahip malzemeler, büyük gözenek sayısı az veya küçük gözenek sayısı fazla olduğu durumlarda tamamen farklı özelliklere sahip olduğu ifade edilir.

H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> kullanılarak sentezlenen hafif geopolimer macunlarda ve harçlarda gözenek yapısının etkisi, çeşitli araştırmalarda ele alınmıştır. Örneğin, uçucu kül ve metakaolinden üretilen hafif geopolimer macunlarında köpük oluşturuca madde olarak H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> kullanılmıştır (Bai ve Colombo, 2018; Novais vd., 2016). Bu çalışmalardan birinde, alkali aktive edici madde olarak sodyum hidroksit (NaOH) ve şişirme maddesi olarak %35 konsantrelili H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> çözeltisi, fırın cürufu ile %2 oranında karıştırılmıştır. Demirli cüruf ve fosfojips, alkali ile aktive edilerek geopolimer üretimi gerçekleştirilmiştir. Bu gözenekli betonun basınç dayanımı 2,12–7,95 MPa aralığında, yoğunluğu 830 kg/m<sup>3</sup> ile 1142 kg/m<sup>3</sup> aralığında, ısı iletkenliği ise 0,0985–0,2618 W/(m·K) aralığında belirlenmiştir (Tamošaitis vd., 2023).

Başka bir çalışmada, çimento bazlı uçucu kül köpük betonunun hazırlanmasında köpük oluşturuca madde olarak H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> kullanılmıştır. Bu çalışmada, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> içeriğinin artmasıyla (%5,5~7,5), gözeneklilik artmış ve gözenek boyutu artma eğilimi göstermiştir. Az miktarda uçucu kül (%10-20) eklenmesi, köpük betonunun gözenek yapısını

iyileştirmiş ve gözenek boyutunu küçültmüştür. En iyi performansın elde edildiği durum, uçucu kül içeriğinin %40 olduğu durumdur. Bu durumda gözeneklilik en yüksek seviyededir, gözenek boyutu dağılımı daha düzgündür. Bu durum, gözenek yapısını kontrol etmeyi, köpük betonunun kuru kütle yoğunluğunu önemli ölçüde azaltmayı ve termal iletkenliği önemli ölçüde azaltmayı mümkün kılmıştır (Zhang vd., 2022). Diğer bir çalışmada, köpüklü hafif çimentolu kompozitlerin (FLCC) gözenekliliği, çimento ağırlığına göre aerojel (%1) ve %35 konsantreli H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (%3) birlikte eklenmesiyle %221'e kadar artırılabilirliği belirtilmiştir. Minimum mukavemet ve 0,16 W/m·K minimum termal iletkenlik elde etmek için ise FLCC'deki maksimum aerojel ve H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> içeriğinin sırasıyla %1 ve %3 olması önerilmiştir (Tan vd., 2022). Başka bir çalışmada, köpüklü fosfoalçılı çimentolu malzemelerin H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> katkısıyla performans değişiklikleri araştırılmıştır. H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> içeriğinin artmasıyla köpüklü fosfojips bazlı çimentolu malzemelerin basınç dayanımı ve termal iletkenliği azalmıştır. Örneğin, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> içeriği %1 olduğunda, 28 günlük basınç dayanımı 21,33 MPa, termal iletkenlik 0,3343 W/(m·K) olmuştur. H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> içeriği %2,5 olduğunda ise 28 günlük basınç dayanımı sadece 1,19 MPa, termal iletkenlik 0,1338 W/(m·K) olmuştur. Çalışmada, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>'nin fosfojips esaslı çimentolu malzemeler üzerindeki köpürme etkisi açıkça gözlemlenmiştir. H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> içeriği %3 olduğunda, malzemenin tüm kısımlarının gözeneklerle dolu olduğu ve gözenek çaplarında artış olduğu belirtilmiştir (Chen vd., 2022).

Öte yandan, hafif köpüklü geopolimer betonun prizlenmesi sırasında H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> sürekli olarak ayrışarak mikro yapının oluşumunu bozduğunu ve bu nedenle geopolimerin prizlenme süresini uzattığını belirten bir çalışma bulunmaktadır (Hermann vd., 2022). Diğer bir çalışma, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>'in suyla her oranda karışabilen, etkili ayrışma hızına sahip, diğer köpük yapıcı maddelere göre daha ekonomik olan inorganik bir sıvı olduğunu ve bu özellikleri nedeniyle çevre kirliliğine neden olmadığını vurgulamaktadır (T. Li vd., 2019). Literatürdeki bu çeşitli çalışmalar, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> kullanımının alkali ile aktive edilmiş geopolimer malzemelerin gözenek yapısı, basınç dayanımı ve termal özellikleri üzerinde önemli bir etkisi olduğunu göstermektedir.

Bu bağlamda, bu çalışmanın amacı, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> konsantrasyonunun alkali ile aktive edilmiş ham perlit esaslı geopolimer malzemelerin yoğunluğu, basınç dayanımı, mineral bileşimi, gözenek dağılımı, ısıl iletkenlik ve mikro yapısı üzerindeki etkilerini detaylı bir şekilde belirlemektir. Bu çalışmanın sonuçları, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> çeşitli yüzdelerde kullanımının, hafif geopolimer malzemelerin performansını optimize etme potansiyelini ve çevresel sürdürülebilirlik açısından sağladığı avantajları aydınlatması beklenmektedir. Bu bulgular, çevre dostu alternatiflerin geliştirilmesi ve kullanılması yolunda önemli bir adım olabilir. Geopolimer karışımlarda optimum H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> oranının belirlenmesi, literatüre daha geniş bir bakış açısı sunarak, bu alanda gelecek çalışmalar için bir temel oluşturabilir.

## MATERYAL VE METOT

Bu çalışmada, ham perlit Fixmax firmasının Ankara'ya 120 kilometre uzaklıktaki Çankırı Çerkeş'teki maden sahası ve tesisinden elde edilen öğütülmüş ham perlit kullanılmıştır. Ham perlitin yaklaşık ortalama tanecik çapı 40 mikron ve özgül ağırlığı 2,36 gr/cm<sup>3</sup>. Ham perlite ait kimyasal içerik Tablo 1'de yer verilmiştir.

**Tablo 1.** Ham Perlit Kimyasal İçeriği

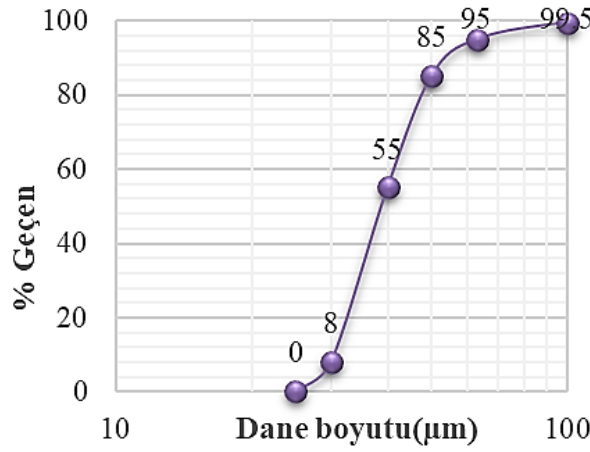
İçerik	%
SiO <sub>2</sub>	71-73
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13.1-14.2
Na <sub>2</sub> O	3-3.5
K <sub>2</sub> O	2.4-4.7
CaO	1-1.3
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1-1.1
MgO	0.15-0.22
TiO <sub>2</sub>	0-0.13
H <sub>2</sub> O	3-4

Bu çalışma kapsamında hazırlanan macun ve harç numunelerine ait karışım oranları Tablo 2'de gösterilmiştir. Macun karışımlarında sadece ham perlit kullanılırken, harç karışımlarında kum ham perlit ile ikame edilmiştir. Alkali aktivatörler olarak sodyum silikat (Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>) ve 13 Molarite sodyum hidroksit (NaOH) tercih edilmiş olup, numunelerde hacim kazanılmasını sağlama adına H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> tercih edilmiştir. Perlitin dane boyutu dağılımına ait eğri Şekil 1'de gösterilmiştir. Bu çalışmada kullanılan harç karışımlarının hazırlanmasında CEN standart kumu kullanıldı.

Limak Çimento Fabrikası'nda CEN Standardında (%100 'ü 2 mm'yi, %1'i 0,08 mm'yi geçer) şekilde dane dağılımı tercih edilmiştir.

**Tablo 2.** Macun ve Harç Karışımlarına Ait Oranları

Numune Adı	Numune No	Ham Perlite (gr)	Rilem Kum (gr)	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> (gr)	NaOH (13M) (gr)	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (%)
Macun 1	1	525	-	180	120	0
Macun 2	2	525	-	180	120	1
Macun 3	3	525	•	180	120	2
Macun 4	4	525	-	180	120	3
Macun 5	5	525	-	180	120	4
Harç 1	6	262,5	262,2	180	120	0
Harç 2	7	262,5	262,2	180	120	1
Harç 3	8	262,5	262,2	180	120	2
Harç 4	9	262,5	262,2	180	120	3
Harç 5	10	262,5	262,2	180	120	4



**Şekil 1,** Ham Perlit Dane Dağılımı

Karışım oranları verilen macun ve harç numunelerine ait karışım oranlarında eğilme ve basınç test numuneleri hazırlanmıştır. Karışımların hazırlanmasında tüm macun ve harç numuneleri için 10 lt kapasiteli laboratuvar mikseri kullanılmıştır. Eğilme ve basınç dayanımları ile yoğunlukların belirlenmesi için 40x40x160 mm kalıplar, basınç dayanımları ve genleşmelerin belirlenmesi için ise 70x70x70 mm kalıplar kullanılmıştır.

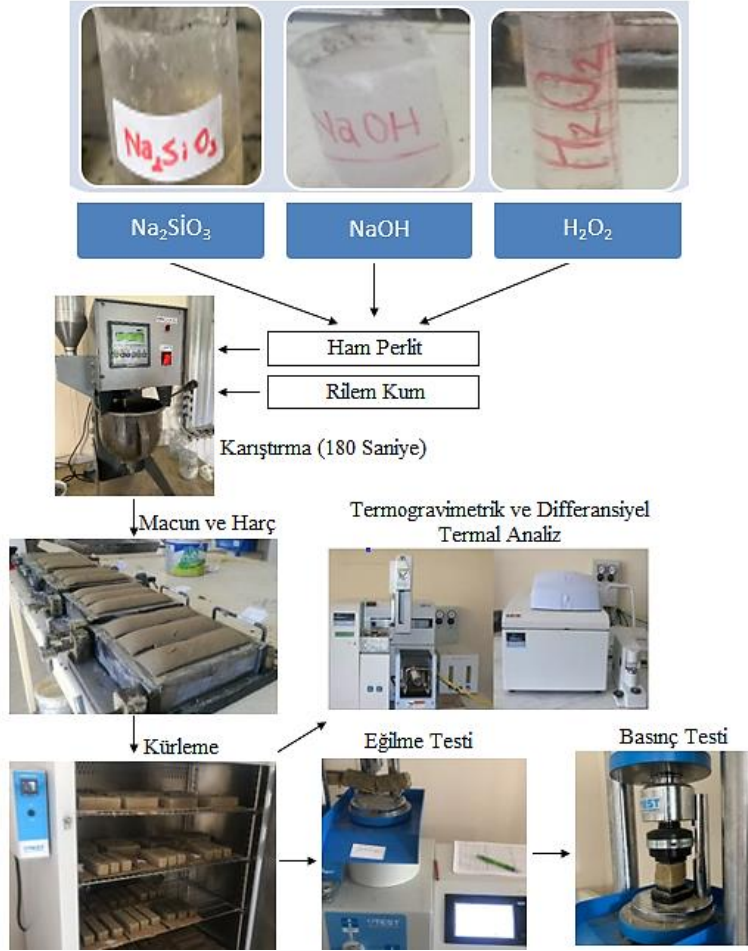


**Şekil 2,** Hazırlanan Numunelerin Kürlenme ve Testleri

Numuneler kalıplara yerleştirildikten sonra numunelerin yaklaşık iki saat boyunca serbestçe genişmesine izin verildi. Daha sonra priz süresinden hemen önce (yani tam sertleşmeden önce), numunelerin genişleyen ve kalıptan taşan kısımlarının üst yüzeyleri maket bıçağı kullanılarak kesildi ve düzeltildi. Oda sıcaklığında bekletilen numuneler ardından iki gün sonra numuneler 80 °C'de kuru bir fırında 48 saat boyunca kürlendi. Çalışma kapsamında, numunelerin hazırlanıp kürlenmesi ve test aşamasına dair görsel Şekil 2'de yer verilmiştir. Çalışmanın akış diyagramı Şekil 3'te verilmiştir. Öncelikle hazırlanan alkali aktivatörler mikser içerisine dökülmüş ve hassas olarak tartılan ham perlit ve rilem kumu Tablo 2'de verilen oranlarda hazırlanarak mikserine eklenmiştir. Karıştırıcıda 180 saniye karıştırılan numuneler kalıp yağı ile yağlanmış numune kalıplarına alınarak sıkıştırılmış ve 1 gün süreyle atmosfer



koşullarında bekletilmiştir, Numunelerin fazlası gün sonunda numuneden kesilerek alınmış ve 24 saat süre ile 85 °C’de fırında kürlenmiştir, 24 saat sonrası kür fırınından çıkarılan numuneler soğuduktan sonra çıkarılarak atmosfer koşullarında bekletilmiş ve 7 gün sonrasında ilk kırım işlemi yapılmıştır, Ayrıca termogravimetrik ve diferansiyel termal analiz için basınç dayanımı en iyi çıkan numuneden bir parça dövülerek toz haline getirilmiştir,



Isıl iletkenlik ve ısıl direnç malzemelerin fiziksel özelliklerini tanımlamada önemli bir yere sahiptir, Ayrıca bu özellikler malzemelerin kullanım alanlarının belirlenmesinde önemli rol oynamaktadır, Isıl iletkenliği yüksek malzemeler ısı geçişinin yüksek olması gereken yerlerde aranılan bir özellik olduğu gibi düşük ısıl iletkenlik ısıl direncin yüksek olması istenilen yerlerde aranılan bir özelliktir, Isıl iletkenlik malzemenin birim kalınlığı boyunca birim alandan birim sıcaklıkta ısı transfer hızıdır ve bu değer, malzemede (k) değeri olarak bilinmektedir, K değerinin yüksek olması malzemenin ısıyı iyi ilettiğini, düşük olması ısıl direncinin yüksek olduğunu göstermektedir, Malzemenin K değeri çok düşük ise malzemenin ısıl direnci yüksek olması nedeniyle yalıtım malzemesi olarak kullanılabilir demektir, Yapı bileşeni üretirken yapı bileşeninde kullanılan ham maddelerin özellikleri eklenen bağlayıcılar ve yüzey pürüzlülüğü dâhil birçok etken ısıl iletkenliği etkilemektedir, Burada önemli olan malzemenin beklenen ısıl iletkenliğinin yüksek mi, düşük mü olmasıdır, Beklenen duruma göre malzemenin özelliklerini etkileyecek olumlu ham maddelerin ve imalat yöntemlerinin kullanılması yararlı olacaktır,

Yapı malzemesi olarak kullanılan yapının taşıyıcı veya tamamlayıcı bileşenlerinde ısıl iletkenliği düşük malzemelerin kullanımı yapılarada ısı geçişini azaltmakta ve dolayısıyla ısıtma ve soğutma giderlerini azaltmaktadır, Ayrıca yapının termal konfor şartlarında daha uzun süre kalmasını ve ısıtıcı ve soğutucu cihazların devreye girme sürelerini uzatarak daha az çalışmasını sağlamaktadır, Bu durum enerji tüketimini düşürmesi nedeniyle CO<sub>2</sub> üretimini azaltarak yapının çevreye daha duyarlı hale gelmesini sağlamaktadır,



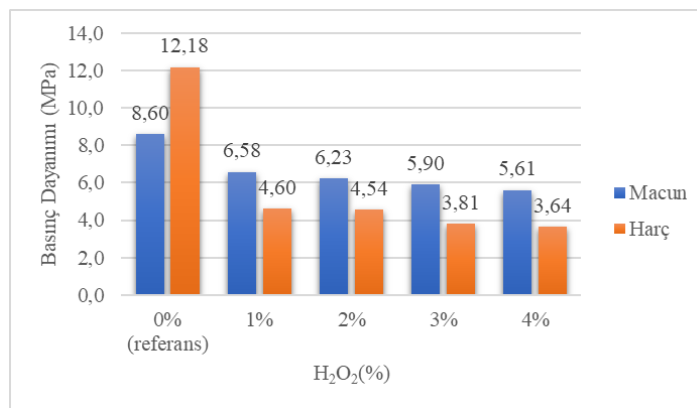
Şekil 4, Termogravimetrik ve Diferansiyel Termal Analiz Cihazı (TG/DTA)

Numunelerin 400 °C'ye kadar artan sıcaklığa veya zamana bağlı olarak kütle değişimini Termogravimetrik analiz cihazı (TGA), ve referans ve örnek arasındaki sıcaklık farkı (DTA), numunenin ağırlık kaybına uğrayıp uğramadığını ve bu kaybın miktarını (TG) göstermektedir, TG/DTA artan sıcaklığa veya zamana bağlı olarak organik veya anorganik numunelerin kütle değişimini, TGA referans ve örnek arasındaki sıcaklık farkını aynı anda ölçmektedir, TGA sıcaklığa değişkenine bağlı numunedeki ağırlık değişikliklerini tanımlamak için kullanılan bir test türüdür ve ağırlık kaybı hızı, sıcaklığın veya sürenin fonksiyonu olarak kaydedilir, Bu analiz kapsamında numunede ağırlık, sıcaklık ve sıcaklık değişimi yüksek hassasiyetle ölçülerek analiz edilmektedir (Şekil 4),

## BULGULAR VE TARTIŞMA

### *Basınç Dayanımı*

Perlit esaslı geopolimer hafif beton numuneler 80 °C'lik fırın küründen sonra dış ortamda toplam 28 gün bekletildikten sonra basınç dayanımları test edilmiştir, Şekil 5'te basınç dayanım sonuçlarını göstermektedir, Toplam 10 numunenin 5 adeti macun diğer 5 adeti harçtır, Her iki grubun ilk numunesi referans olarak alınmıştır, Referans numunelerde H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ilavesi bulunmamaktadır, Macun ve harçların referans numunelerinin basınç dayanım sonuçlarına bakıldığında harç numunesi 12,18 MPa ve macunun 8,60 MPa olduğu görülmektedir, Burada harçların macundan daha yüksek basınç dayanımına sahip olması beklentileri doğrulamaktadır, Devamında, %1 den %4'e kadar artırılan H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ilavesine bağlı olarak hem macunda hem de harçlarda basınç dayanımını düşüğü görülmektedir, Fakat, referans numunede harcın dayanımı macundan yüksek iken H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ilavesi içeren bütün numunelerde macunun basınç dayanımı harçlardan daha yüksek çıkmıştır, Bu çalışmada elde edilen önemli bir bulgu olarak, standart kum ile üretilen ham perlit esaslı harçların basınç dayanımı daha düşük çıktığından macun üretiminin hafiflik ve basınç dayanımı açısından daha avantajlı olduğu söylenebilir, Grafiğe göre H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ilavesi %1 olduğunda macunda 6,58 MPa ve harçta 4,60 MPa basınç dayanımı elde edilmiştir, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ilavesi %2 olduğunda macunda 6,23 MPa ve harçta 4,54 MPa basınç dayanımı elde edilmiştir, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ilavesi %3 olduğunda macunda 5,90 MPa ve harçta 3,81 MPa basınç dayanımı elde edilmiştir, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ilavesi %4 olduğunda macunda 5,61 MPa ve harçta 3,64 MPa basınç dayanımı elde edilmiştir,

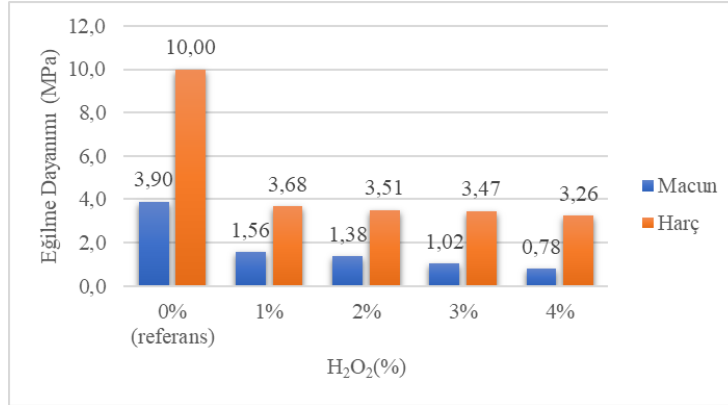


Şekil 5, Macun ve Harç Numunelerde H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> Oranına Göre Dayanımları

### *Eğilme Dayanımı*

Bu çalışma kapsamında elde edilen bütün numunelerin eğilme dayanım testleri de gerçekleştirilmiştir, Elde edilen sonuçlar Şekil 6'da gösterilmektedir, Sonuçlara göre referans numunelerde harç dayanımının macuna göre çok yüksek olduğu görülmektedir, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> içermeyen macunda eğilme dayanımı 3,9 MPa olurken harçta 10 MPa olmuştur, Devamında, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> oranı arttıkça benzer bir davranış ile harçların eğilme dayanımlarının macunlardan daha yüksek olduğu görülmektedir, Genel bir değerlendirme ile H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ilavesi ile harçlardaki eğilme dayanımları 3,68 MPa ile 3,26 MPa arasında yaklaşık değerler alırken, macunlarda 1,56 MPa dan 0,78 MPa kadar eğilme dayanımı değişimi ilgi

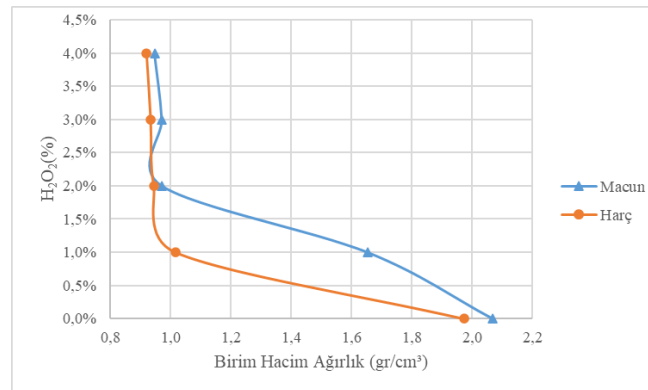
çekicidir, Elde edilen sonuçlara göre sırasıyla, göre H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ilavesi %1 olduğunda macunda eğilme dayanımı 1,56 MPa ve harçta 3,68 MPa basınç dayanımı elde edilmiştir, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ilavesi %2 olduğunda macunda 1,38 MPa ve harçta 3,51 MPa basınç dayanımı elde edilmiştir, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ilavesi %3 olduğunda macunda 1,02 MPa ve harçta 3,47 MPa basınç dayanımı elde edilmiştir, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ilavesi %4 olduğunda macunda 0,78 MPa ve harçta 3,26 MPa basınç dayanımı elde edilmiştir,



Şekil 6, Macun ve Harç Numunelerde H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> Oranına Göre Eğilme Dayanımlar

### Birim Hacim Ağırlık

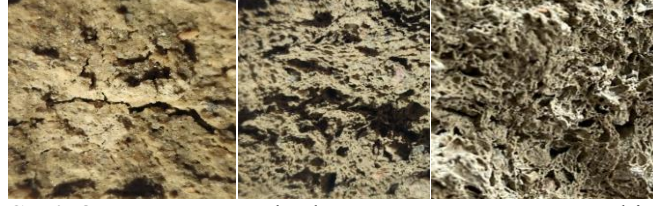
Hafif beton söz konusu olduğunda, birim hacim ağırlık değerleri önem kazanmaktadır, Şekil 7’de macun ve harç numuneler için H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> oranı ile birim hacim ağırlık değerleri arasındaki değişimi göstermektedir, Sonuçlara göre harç ve macun numunelerde H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> oranı arttıkça birim hacim ağırlık değerlerinin azaldığı gözlemlenmektedir, Harç ve macun numunelerde H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> oranı %4 den %3’e azalırken birim hacim ağırlık değerlerinde artma görülmektedir, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> oranı %0(referans) olduğunda ise birim hacim ağırlığının 2,1 gr/cm<sup>3</sup> olduğu görülmektedir,



Şekil 7, Macun ve Harç Numunelerde H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> Oranı ile Birim Hacim Ağırlık Arasındaki İlişki

### Termogravimetrik ve Diferansiyel Termal Analiz

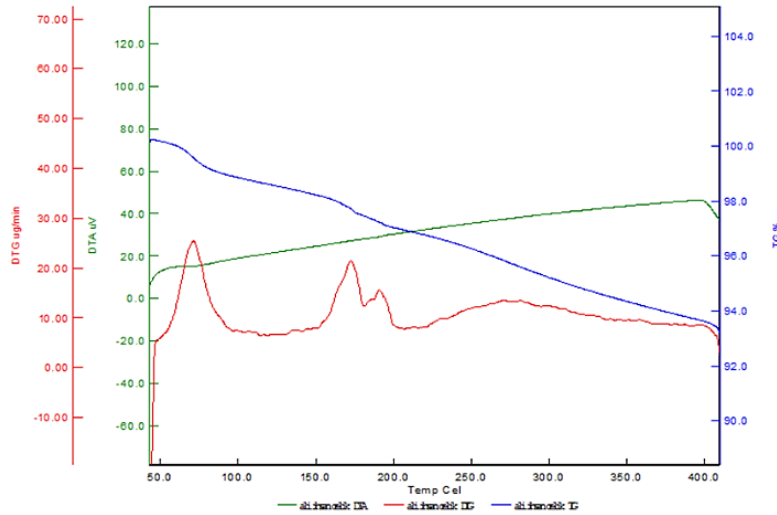
Şekil 9 da analiz sonuçları incelendiğinde numunenin kütle kaybına uğradığı sıcaklık dereceleri TG grafiğinde 80°C, 180°C ve 400°C seviyelerinde görülmektedir, 50°C ile 100°C arasında ve 150°C ile 200°C arasında egzotermik durumlar gerçekleşmiş ve bu durumlarda kütle kaybı görülmüştür, Şekil 8’de göre sabit ısıtma sürecinde ekzotermik veya endotermik reaksiyonlar bir pik veya bir çukur olarak görülmektedir, Numune ısıtılması esnasında ekzotermik olayların meydana gelmesi sonrasında endotermik olaylarda görülmektedir, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> oranı artırıldığında numunelerde genleşme artmaktadır, Bu durumda kalıp içerisinde malzemenin yoğunluğunun düşmesini sağlamakta dolayısıyla numune ağırlığı azalmaktadır, Hafifleşen malzeme içerisinde hava boşluklarının artması nedeniyle ısıl iletkenlik azalmakta ve ısı geçişine karşı bu boşluklar direnç oluşturmaktadır, Bu durumda dolgu malzemesi olarak duvarlarda kullanılması halinde hem hafifliği nedeniyle ağırlık azalacak hem de ısıl direncin artması nedeniyle bina ısı kontrolünün sağlanması için kış ve yaz şartlarında daha az enerji harcanan hacimler üretilebilecektir, Isıl direncin artması nedeniyle yakıt tüketimi azalması sebebiyle CO<sub>2</sub> üretimi azalacak olup daha çevreci binaların üretilmesini sağlayacaktır,

Şekil 8, Harç Numunelerde Artan H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> Oranının Etkisi

Tablo 2 de belirtilen miktarlar kullanılarak oluşturulan numunelerde H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> etkisiyle genişleme gerçekleşmiştir, Şekil 8 de tablo 2 de verilen harç 1, harç 3 ve harç 5' in eğilme dayanımı testi sonrası en kesit fotoğrafları görülmektedir, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> oranı arttığında numunelerde gözeneklilik artmaktadır, Bu duruma paralel olarak numunelerin birim hacim ağırlıkları azalmaktadır, Gözeneklilik oranının artması, numunelerin termal direncin artmasına dolayısıyla ısı iletkenliğini azaltmaktadır, Tablo 3'te görüldüğü gibi H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> oranının %1 ila %5 arasında olması ile numunelerin genişlemesinden kaynaklı ortalama ağırlıklar referans numunede 307,25 gram iken H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> oranına bağlı olarak diğer numunelerde azalmaktadır,

Tablo 3, Macun ve Harç Numunelerin Test Sonuçları

Numune No	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (%)	Ortalama Ağırlık (gr)	Ortalama Eğilme Dayanımı (MPa)	Ortalama Basınç Dayanımı (MPa)
Macun 1	0% (referans)	307,25	3,90	8,60
Macun 2	1	247,25	1,02	5,90
Macun 3	2	217,65	1,38	6,23
Macun 4	3	212,13	1,56	6,58
Macun 5	4	208,57	0,78	5,61
Harç 1	0% (referans)	441,77	18,59	12,18
Harç 2	1	227,55	3,68	3,64
Harç 3	2	211,40	3,51	4,60
Harç 4	3	209,07	2,86	4,54
Harç 5	4	206,07	3,47	3,81



Şekil 9, 400°C Sıcaklığa Kadar DTA, TG, DTG Analizi

## SONUÇLAR

Öğütülmüş ham perlit hafif yalıtım malzemeleri üretiminde kullanımı yaygınlaşırken, hafifliği, dayanımı ve çevresel etkiyi artırmak amacıyla yapılan araştırmalar önem kazanmaktadır, Ham perlitin NaOH ve Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> gibi alkali aktivatörler ile aktive edilmesi çimentosuz yapı elemanı açısından önemli çevresel etkiler yapmaktadır, Buna ek olarak elde edilen macun ve harçların H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ile optimum genişleme performansının artırılması ve mekanik

özelliklerinin belli korunması önem arz etmektedir. Bu çalışmada, 4 farklı H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> oranı kullanılarak elde edilen macun ve harç numunelerin basınç, eğilme testleri gerçekleştirilmiştir. Numuneler ayrıca tartılarak birim hacim ağırlıkları karşılaştırılmıştır. Elde edilen önemli sonuçlar aşağıdaki gibidir,

H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ilavesi ile ham perlit içinde oluşan hava boşlukları yapı içinde hapsediği için genleşme meydana geliyor, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> oranı %1-%3'e kadar yapı bütünlüğü açısından iyi performansı gösterirken, %4'lük ilavenin aşırı şişmeye neden olduğu ve şekilsel bozukluklara neden olduğu tespit edilmiştir,

Basınç testi sonucunda H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> içermeyen harç numunesinin dayanımının macundan yüksek çıkmıştır. Fakat H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ilave edilmiş numunelerin hepsinde macunların basınç dayanımı harçlardan daha yüksek çıkmıştır. Buda hem hafif hem de daha iyi basınç dayanımına sahip hafif yapı elemanı için macunun daha avantajlı olduğunu göstermektedir. H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ilavesi ile macunlar ile harçlar arasındaki basınç farkı %60 civarında olmuştur, %3 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ilavesi ile iyi bir genleşme sağlayan macunda %6,23 MPa ve harçta %3,81 MPa basınç dayanımı elde edilmiştir,

Eğilme dayanımı davranışı basınç dayanımının tam tersi olmuştur. Eğilme dayanımı hem referans hem de H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ilaveli numunelerde harç numunelerin daha üstünlüğü ile neticelenmiş. Referans numunelerde macunun eğilme dayanımı 3,90 MPa olurken, harç numunesi 10 MPa kadar çıkmıştır. %4 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ilavesi ile macundaki eğilme dayanımının 0,78 MPa kadar düştüğü fakat harç numunesinin 3,26 MPa kalması önemli bir farktır. İyi bir genleşme ve düzgün yapı elemanı göz önüne alındığında %3 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ilavesi ile harç numunesinde eğilme dayanımının 3,47 MPa olduğu görülmektedir,

Hafif yapı elemanı söz konusu olduğunda birim hacim ağırlık çok önemli bir parametredir. Genel olarak H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ilavesi ile birim hacim ağırlığının hem macunda hem de harçta düştüğü görülmektedir. H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> ilavesi %2-%4 arasında bütün numunelerde birim hacim ağırlıklarının 1 gr/cm<sup>3</sup> olduğu görülmektedir,

TGA Analiz sonuçları incelendiğinde numunenin kütle kaybına uğradığı sıcaklık derecelerinin 80°C, 180°C ve 400°C seviyelerinde görülmektedir. 50°C ile 100°C arasında ve 150°C ile 200°C arasında egzotermik durumlar gerçekleşmiş ve bu durumlarda kütle kaybı görülmüştür,

## ÇIKAR ÇATIŞMASI

Yazarlar çıkar çatışması olmadığını beyan etmektedir,

## KAYNAKLAR

- Alves, C., Pelisser, F., Labrincha, J., & Novais, R. (2023), Effect of Hydrogen Peroxide on the Thermal and Mechanical Properties of Lightweight Geopolymer Mortar Panels, *Minerals*, 13(4), 542, doi:https://doi.org/10,3390/min13040542,
- Bai, C., & Colombo, P. (2018), Processing, properties and applications of highly porous geopolymers: A review, *Ceramics International*, 44(14), 16103-16118, doi:https://doi.org/10,1016/j.ceramint,2018,05,219,
- Chen, M., Liu, P., Kong, D., Wang, Y., Wang, J., Huang, Y., Wu, N. (2022), Influencing factors of mechanical and thermal conductivity of foamed phosphogypsum-based composite cementitious materials, *Construction and Building Materials*, 346, 128462, doi:https://10,1016/j.conbuildmat,2022,128462,
- Ducman, V., & Korat, L. (2016), Characterization of geopolymer fly-ash based foams obtained with the addition of Al powder or H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> as foaming agents, *Materials characterization*, 113, 207-213,
- Esmaily, H., & Nuranian, H. (2012), Non-autoclaved high strength cellular concrete from alkali activated slag, *Construction and Building Materials*, 26(1), 200-206,
- Hermann, D. T., Tome, S., Shikuku, V. O., Tchuigwa, J. B., Spieß, A., Janiak, C., Joh Dina, D. D. (2022), Enhanced performance of hydrogen peroxide modified pozzolan-based geopolymer for abatement of methylene blue from aqueous medium, *Silicon*, 14(10), 5191-5206,
- Łach, M., Korniejenko, K., & Mikuła, J. (2016), Thermal insulation and thermally resistant materials made of geopolymer foams, *Procedia Engineering*, 151, 410-416, doi:https://doi.org/10,1016/j.proeng,2016,07,350,
- Li, S., Li, H., Yan, C., Ding, Y., Zhang, X., & Zhao, J. (2022), Investigating the Mechanical and Durability Characteristics of Fly Ash Foam Concrete, *Materials*, 15(17), 6077, doi:https://doi.org/10,3390/ma15176077,

- Li, T., Wang, Z., Zhou, T., He, Y., & Huang, F. (2019), Preparation and properties of magnesium phosphate cement foam concrete with H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> as foaming agent, *Construction and Building Materials*, 205, 566-573, doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.02.022>,
- McLellan, B. C., Williams, R. P., Lay, J., Van Riessen, A., & Corder, G. D. (2011), Costs and carbon emissions for geopolymer pastes in comparison to ordinary portland cement, *Journal of Cleaner Production*, 19(9-10), 1080-1090,
- Novais, R. M., Buruberri, L., Ascensão, G., Seabra, M., & Labrincha, J. (2016), Porous biomass fly ash-based geopolymers with tailored thermal conductivity, *Journal of Cleaner Production*, 119, 99-107,
- Provis, J. L., Palomo, A., & Shi, C. (2015), Advances in understanding alkali-activated materials, *Cement and Concrete Research*, 78, 110-125,
- Şahin, M., Erdoğan, S. T., & Bayer, Ö. (2018), Production of lightweight aerated alkali-activated slag pastes using hydrogen peroxide, *Construction and Building Materials*, 181, 106-118, doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.05.267>,
- Tamošaitis, G., Vaičiukynienė, D., Jaskaudas, T., Mockiene, J., & Pupeikis, D. (2023), Development of alkali-activated porous concrete composition from slag waste, *Materials*, 16(4), 1360, doi:<https://doi.org/10.3390/ma16041360>,
- Tan, T. H., Shah, S. N., Ng, C. C., Putra, A., Othman, M. N., & Mo, K. H. (2022), Insulating foamed lightweight cementitious composite with co-addition of micro-sized aerogel and hydrogen peroxide, *Construction and Building Materials*, 360, 129485, doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129485>,
- Yang, K.-H., Song, J.-K., & Song, K.-I. (2013), Assessment of CO<sub>2</sub> reduction of alkali-activated concrete, *Journal of Cleaner Production*, 39, 265-272, doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.08.001>,
- Zhang, D., Ding, S., Ma, Y., & Yang, Q. (2022), Preparation and Properties of Foam Concrete Incorporating Fly Ash, *Materials*, 15(18), 6287, doi:<https://doi.org/10.3390/ma15186287>,



# Kahramanmaraş Sütçü İmam University

## Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 12.02.2024  
Kabul Tarihi : 15.05.2024

Received Date : 12.02.2024  
Accepted Date : 15.05.2024

### LANDFILL LEACHATE TREATMENT VIA NANO ZERO VALENT IRON PARTICLES (nZVI) OF ADSORPTION PROCESS

### ADSORPSİYON PROSESİNİN NANO SIFIR DEĞERLİ DEMİR PARÇACIKLARI (NZVI) YOLUYLA ÇÖP SIZINTI SUYU ARITIMI

Serdar GÖÇER<sup>1\*</sup> (ORCID: 0000-0003-0443-8045)  
Zeynep ZAIMOĞLU<sup>1</sup> (ORCID: 0000-0002-9573-4781)  
Kevser CIRK<sup>2</sup> (ORCID: 0000-0002-1756-553X)

<sup>1\*</sup>Cukurova University, Department of Environmental Engineering, 01000, Adana

<sup>2</sup>Kahramanmaraş Sütçü İmam University, Department of Environmental Engineering, 46100, Kahramanmaraş

\*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Serdar GÖÇER, serdargocer33@hotmail.com

#### ABSTRACT

Landfill leachate (LFL) is a significant environmental threat due to the complexity and diversity of contaminants. There are various physical, chemical, and biological treatment methods recommended for LFL treatment. Magnetic nanoparticles are widely used adsorbents with a successful effect compared to traditional adsorbents. Magnetic adsorbents are adsorbents with suitable stability, high adsorption capacity, high removal efficiency, and reusable capabilities. Nano zero-valent iron (nZVI) is an effective adsorbent to remove contaminants found in wastewater, especially LFL. In this study, nZVI was used in the LFL pretreatment. In the adsorption study, it was tested at increasing concentrations from 50 to 500mg nZVI/L, pHs from 3 to 8, and contact times from 15 to 330 minutes. System performance was evaluated with various pollutant parameters such as chemical oxygen demand (COD), dissolved organic carbon (DOC), total nitrogen (TN), nitrate (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>), and ammonium (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) found in garbage leachate. The removal efficiencies obtained at the end of the study were determined as 60%, 60%, 74%, 56% and 33%, respectively. As a result, the optimum conditions for the treatment of LFL by adsorption process using nZVI were determined as 50 mg nZVI/L, pH 8, and contact time 120 minutes.

**Keywords:** Zero valent iron, landfill leachate, adsorption processes, magnetic adsorbent

#### ÖZET

Çöp sızıntı suyu (LFL), kirlenici maddelerin karmaşıklığı ve çeşitliliği nedeniyle önemli bir çevresel tehdittir. LFL arıtımı için önerilen çeşitli fiziksel, kimyasal ve biyolojik arıtma yöntemleri bulunmaktadır. Manyetik nanopartiküller, geleneksel adsorbanlarla karşılaştırıldığında başarılı etkiye sahip, yaygın olarak kullanılan adsorbanlardır. Manyetik adsorbanlar, uygun stabiliteye, yüksek adsorpsiyon kapasitesine, yüksek giderim verimliliğine ve yeniden kullanılabilirlik özelliklerine sahip adsorbanlardır. Nano sıfır değerlikli demir (SDD), atık sularda, özellikle de LFL' de bulunan kirlenici maddeleri gidermek için etkili bir adsorbandır. Bu çalışmada LFL ön arıtımında nZVI kullanılmıştır. Adsorpsiyon çalışmasında, 50'den 500 mg nZVI/L' ye artan konsantrasyonlarda, 3'ten 8'e pH' larda ve 15'ten 330 dakikaya kadar temas sürelerinde test edilmiştir. Sistem performansı, çöp sızıntı suyunda bulunan Kimyasal Oksijen İhtiyacı (KOİ), Çözünmüş Organik Karbon (ÇOK), Toplam Azot (TN), Nitrat (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) ve Amonyum (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) gibi çeşitli kirlenici parametrelerle değerlendirilmiştir. Çalışma sonunda elde edilen giderim verimleri sırasıyla %60, %60, %74, %56 ve %33 olarak belirlenmiştir. Sonuç olarak LFL' nin nZVI kullanılarak adsorpsiyon prosesi ile arıtılması için optimum koşullar 50 mg nZVI/L, pH 8 ve temas süresi 120 dakika olarak belirlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Sıfır değerlikli demir, çöp sızıntı suları, adsorpsiyon prosesi, manyetik adsorbanlar

To Cite: GÖÇER, S., ZAIMOĞLU, Z., & CIRIK, K., (2024). LANDFILL LEACHATE TREATMENT VIA NANO ZERO VALENT IRON PARTICLES (nZVI) OF ADSORPTION PROCESS. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 27(3), 896-907.

## INTRODUCTION

LFL is characterized by many factors such as volume, age, production, organic and inorganic substances, content, and pollutant parameters (Mukherjee et al., 2015; Renou et al., 2008; Jovanov et al., 2018; Kjeldsen et al., 2002). LFL production is also affected by many factors such as rainfall amount, groundwater level, surface flow, waste amount, type, humidity, and design of the landfill (Brennan et al., 2016; Aquino and Stuckey, 2004; Li et al., 2010; Tsarpali et al., 2012; Umar et al., 2010; Xu et al., 2010). LFL is a dark brown colored, odorous, very strong, and complex mixture that is difficult to treat and contains various pollutant parameters. Therefore, it causes environmental concerns (Shah et al., 2022; Atmaca, 2009; Gotvajn et al., 2009; Lou et al., 2009; Bhatt et al., 2017; Gajski et al., 2012; Kjeldsen et al., 2002). LFL treatment is very complex, expensive, and difficult, therefore combined treatment processes are required (such as physical, biological, and chemical methods) (Bashir et al., 2010; Ilmasari et al. 2022a). For the treatment of LFL, biological methods are generally used for nitrogen removal, while physico-chemical methods (adsorption, coagulation/flocculation, and advanced oxidation) are used for other pollutants (Spagni and Marsili-Libelli 2009; Chen et al. 2016; Kulikowska et al. 2016; Wu et al. 2004; Amor et al. 2015). In LFL treatment, the adsorption process is one of the important treatment technologies. Therefore, preferred as pre-treatment or post-treatment due to ease of operation and high removal efficiency (Brasil et al. 2021; Kurniawan and Lo, 2009). In recent years, nanoparticles (NPs) have attracted the attention of researchers due to their effectiveness in water and wastewater treatment (Yantasee et al., 2007; Chang and Chen, 2005). Zero-valent metals, metal oxides, carbon nanotubes, and nanocomposites are widely used in water and wastewater treatment. (Hu et al., 2004; Yuan et al., 2010). In a study, nZVI nanoparticle materials were used, and effective results were obtained in the removal of various pollutants such as COD, DOC, TN,  $\text{NH}_4^+$ , and  $\text{NO}_3^-$  (Ghasemzadeh et al, 2014, Galdames et al., 2020). In addition, the adsorption process of LFL with nZVI was preferred over other enhancement methods due to obtaining effective results.

The aim of this study was to evaluate the treatment performance of LFL in terms of COD, DOC, nitrogen compounds, organic and inorganic matter under operating conditions such as pH (3-8), reaction time (15-330 min), and nZVI concentration (50-500mg nZVI/L).

## MATERIALS AND METHOD

### *Preparation of nZVI*

The synthesis, preparation, and characterization of nZVI were prepared in our previous study under laboratory conditions. In our previous study by Göçer et al. (2019), the synthesis and characterization of nZVI were determined using XRD, SEM-EDX, FTIR, and BET analysis techniques. According to XRD, the  $2\theta$  peak at  $44.8096^\circ$ , representing 100% intensity, indicates the presence of nZVI NPs. According to SEM and EDX, the surface roughness of nZVI is indicated to have a core-shell structure, where the shell represents the oxidized part surrounding the Fe core and protects it from further oxidation. Also, based on EDX results of nZVI, the Fe element content was determined to be 98%. The Brunauer-Emmett-Teller (BET) surface area of nZVI was determined to be  $36.8063 \text{ m}^2/\text{g}$ . The peaks indicating the presence of nZVI were detected in FTIR analysis to be between  $500 \text{ cm}^{-1}$  and  $1,200 \text{ cm}^{-1}$  (Göçer et al. 2019; Göçer et al. 2024).

### *LFL Characterization*

LFL samples were taken from the sanitary landfill in Kahramanmaraş/Turkey. This facility has an area of 55 ha and has been operating since 2013, producing approximately 815-830 tons of LFL per day. The LFL samples used in our adsorption study were collected in 40 L plastic bottles. It was stored at  $4^\circ\text{C}$  under laboratory conditions and characterized. The characteristics of LFL are summarized in Table 1.

**Table 1.** LFL Characterization

Parameters	Concentration	Parameters	Concentration
DOC	2446±400(mg/L)	$\text{NO}_2^-$	320±20(mg/L)
COD	8885±1500(mg/L)	$\text{NO}_3^-$	275±40(mg/L)
BOD	1500±300(mg/L)	Pt-Co (Color unit)	6380±300
$\text{NH}_4^+$	3101±200(mg/L)	Total Nitrogen (TN)	982±100(mg/L)



### Adsorption Experiments

The study consists of two stages. In the first stage, the effect of different pH and reaction times was investigated. Then, in the second stage, different nZVI concentrations were examined at the determined optimum pH and reaction time. In the adsorption experiment, the effects of pH, contact time, and nZVI concentration on the treatment performance of LFL were investigated. It was tested by increasing pH from 3 to 8, contact time from 15 to 330 minutes, and nZVI concentration from 50 mg/L to 500mg/L. To determine the optimum conditions, the removal efficiency of parameters such as  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}_3^-$ , DOC, and COD in LFL was determined. The experimental plan used in the study is shown in Table 2.

**Table 2.** Experimental Plan

	<b>Initial COD concentration (mg/L)</b>	<b>Adsorbent concentration (mg nZVI/L)</b>	<b>pH</b>	<b>Mixing Rate (rpm)</b>	<b>Contact Time (min)</b>	<b>Temperature (°C)</b>
<b>Nano Zero Valent Iron (nZVI)</b>	8885	50	3-4-5-6-7-8	200	15-330	Room Temperature (25°C)
		100				
		200				
		300				
		400				
		500				
					Optimum contact time 120min	

### Analyses

LFL samples were centrifuged at 4000 rpm for 5 minutes after the adsorption experiments (Eppendorf Centrifuge 5415R, Hamburg, Germany). It was then filtered using a 0.45µm filter (Sartorius AG, Göttingen, Germany). In LFL, the following values were measured: pH (Thermo, Orion 4 Star, Indonesia), DOC and TN (Shimadzu TOC-VCPN, Kyoto, Japan), ammonium and nitrate (Dionex ICS-3000, Sunnyvale, CA, USA). In the fractions of LFL, COD (Standard Methods, 5220 D), and color (Pt-Co, spectrophotometrically at 465 nm) were measured.

### RESULTS AND DISCUSSION

In the first stage of the study, the effect of pH and contact time was determined at optimum conditions at a concentration of 50mg/L nZVI. The adsorption results of 50 mg/L nZVI under different pH and reaction time conditions to determine the optimum conditions are given in Table 3-8. In the first stage, the average COD values of influent and effluent were 8885 mg/L, and 3641 mg/L, corresponding to COD removal efficiency of %60, respectively. However, As shown in Table 4.1-6, it can be seen that the COD removal efficiency was as high as 60%, so optimum conditions were determined at 120 min and pH 8. The highest COD removal efficiency was observed as 67% (pH 8, 60 min, and 50 mg/L nZVI) (Table 8). The optimum nZVI concentration, pH, and contact time were determined as 50mg/L nZVI, 8, and 120 min. Under the optimum conditions COD, DOC,  $\text{NH}_4^+$ , and  $\text{NO}_3^-$  removal efficiency was observed as 60%, 60%, 34%, and 56%, respectively.

**Table 3.** Adsorption Performance Of 50mg/L nZVI at pH 3

<b>pH 3 → 50mg/L nano Zero Valent Iron (nZVI)</b>					
<b>Time(min)</b>	<b>COD (mg/L)</b>	<b>DOC (mg/L)</b>	<b>TN (mg/L)</b>	<b>NO<sub>3</sub><sup>-</sup> (mg/L)</b>	<b>NH<sub>4</sub><sup>+</sup> (mg/L)</b>
<b>15</b>	9570	2526	566	125	2504
<b>30</b>	10713	2313	548	126	2508
<b>45</b>	8999	2168	514	120	2515
<b>60</b>	8028	2234	550	123	2517
<b>75</b>	8713	2182	503	119	2417
<b>90</b>	9628	2211	538	119	2404
<b>105</b>	10999	2516	552	119	1845
<b>120</b>	8485	2008	497	119	2557
<b>150</b>	10199	2030	488	118	2305
<b>180</b>	7970	1754	422	123	2251
<b>210</b>	8828	2231	481	124	2234
<b>270</b>	10199	2235	522	122	2525
<b>330</b>	11342	2079	467	119	2496

**Table 4.** Adsorption Performance Of 50mg/L nZVI at pH 4

<b>pH 4 → 50mg/L nano Zero Valent Iron (nZVI)</b>					
<b>Time(min)</b>	<b>COD (mg/L)</b>	<b>DOC (mg/L)</b>	<b>TN (mg/L)</b>	<b>NO<sub>3</sub><sup>-</sup> (mg/L)</b>	<b>NH<sub>4</sub><sup>+</sup> (mg/L)</b>
<b>15</b>	10485	1856	495	167	1655
<b>30</b>	9856	2876	645	128	2801
<b>45</b>	9113	2079	469	124	2333
<b>60</b>	9799	2484	542	124	2411
<b>75</b>	8999	2311	506	126	2289
<b>90</b>	7685	2553	495	135	2532
<b>105</b>	8428	2087	473	120	2507
<b>120</b>	8656	2092	496	127	2490
<b>150</b>	8313	2364	496	120	2498
<b>180</b>	8999	2193	435	120	2495
<b>210</b>	10142	2424	545	123	2192
<b>270</b>	7685	2485	503	123	2402
<b>330</b>	8256	2361	475	126	2522

According to Table 4 when evaluated in terms of DOC, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, and TN, the highest removal efficiencies were observed as 59%, 56%, 56%, and 78%, respectively. However, no removal efficiency was observed in terms of COD (pH 5, 270min, 50 mg/L nZVI). COD removal by nZVI of biodegradable, nonbiodegradable, and humic substances are found in LFL and contribute to COD (Jun et al. 2009; Lai et al. 2007). The initial COD concentration was determined as 8885 mg/L and it was observed that it decreased after 120 minutes during the adsorption experiment (Table 8). Wang et al. (2010), according to their study, used modified MP-nZVI and S-nZVI as adsorbents, and reported the corresponding COD removal efficiencies as 56% and 50%, respectively. According to studies conducted in the literature, it has been reported that COD removal performance decreases as a result of precipitation of iron as a result of the adsorption of organic compounds with iron. In another study, under the optimum condition, the removal efficiencies of COD of the stabilized LFL were up to 86%, by the combined adsorption process (Wang et al. 2010).

**Table 5.** Adsorption Performance Of 50mg/L nZVI at pH 5  
**pH 5 → 50mg/L nano Zero Valent Iron (nZVI)**

Time(min)	COD (mg/L)	DOC (mg/L)	TN (mg/L)	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/L)	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (mg/L)
15	12828	2095	402	120	2528
30	7513	2577	482	118	2547
45	12256	2514	463	122	2322
60	12085	2647	473	118	2535
75	12028	2353	431	118	2648
90	12942	2351	440	121	2393
105	12142	2069	399	123	2362
120	12199	2192	398	122	2522
150	11742	2063	379	124	2287
180	10770	1575	311	122	2288
210	12313	2477	470	123	2598
270	9742	982	216	120	1622
330	13056	2128	384	124	2574

**Table 6.** Adsorption Performance Of 50mg/L nZVI at pH 6  
**pH 6 → 50mg/L nano Zero Valent Iron (nZVI)**

Time(min)	COD (mg/L)	DOC (mg/L)	TN (mg/L)	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/L)	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (mg/L)
15	9628	1671	332	128	2253
30	10313	1963	379	123	2314
45	8313	1934	345	125	2543
60	10028	1772	342	125	2553
75	9628	1829	358	126	2547
90	12085	1825	338	128	2520
105	11513	1684	333	124	2158
120	9913	1559	303	125	2422
150	9628	1660	343	127	2465
180	11513	1755	327	125	2447
210	10599	1904	361	121	2380
270	11170	1670	299	122	2402
330	13799	1877	356	121	2254

**Table 7** Adsorption Performance Of 50mg/L nZVI at pH 7  
**pH 7 → 50mg/L nano Zero Valent Iron (nZVI)**

Time(min)	COD (mg/L)	DOC (mg/L)	TN (mg/L)	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/L)	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (mg/L)
15	5641	1900	342	123	2435
30	7641	2051	364	131	2382
45	16641	1841	343	139	2379
60	5784	1773	311	127	2404
75	8070	1888	349	150	2433
90	10498	1991	353	128	2453
105	8212	1766	291	124	2446
120	8641	1547	277	124	2312
150	9641	2010	332	128	2399
180	4784	1788	308	126	2331
210	9498	2057	335	125	2361
270	11927	1652	300	125	2335
330	6927	1791	293	128	2384

**Table 8.** Adsorption Performance Of 50mg/L nZVI at pH 8  
**pH 8 → 50mg/L nano Zero Valent Iron (nZVI)**

Time(min)	COD (mg/L)	DOC (mg/L)	TN (mg/L)	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/L)	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (mg/L)
15	10641	1074	304	125	2437
30	6212	1074	316	122	2494
45	8070	1298	325	125	2413
60	2927	1261	317	123	2255
75	7498	1247	309	121	2400
90	6498	1366	317	123	2336
105	8641	1268	293	124	2219
120	3641	965	249	121	2050
150	7498	1362	299	122	2292
180	10641	1230	285	123	2240
210	5070	1255	300	121	2383
270	6355	1366	326	122	2342
330	11070	1440	320	122	2219

The adsorption process has long been used to remove simultaneous TN, DOC, and COD from wastewater (Foo et al., 2009). It is known that COD concentration plays an important role in the adsorption process of nano zero valent iron nanoparticles, which directly affects removal efficiency (Fu et al 2014). COD, DOC, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, and NH<sub>4</sub><sup>+</sup> effluent concentrations are demonstrated in Table 9-14. In the first stage, the optimum conditions were determined as pH 8 and 120 min contact time. The COD removal efficiency of 60% was obtained at a nZVI concentration of 50 mg/L and reaction time of 120min, the corresponding effluent COD concentration of about 3641 mg/L (Table 9). In the second stage, when nZVI concentration was increased to 50 mg/L and 500 mg/L, COD effluent concentrations were obtained, which were the average maximum values obtained in this part. While the nZVI concentration increased, no increase was observed in the COD removal efficiency. The adsorption of nZVI under the determined optimum conditions was evaluated in terms of all pollutant parameters (Table 9-14).

**Table 9.** Adsorption Performance Of 50mg/L nZVI at pH 8 and 120 min Contact Time  
**pH 8 → 50mg/L nano Zero Valent Iron (nZVI)**

Time(min)	COD(mg/L)	DOC (mg/L)	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/L)	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (mg/L)
15	10641	1074	125	2437
30	6212	1074	122	2494
45	8070	1298	125	2413
60	2927	1261	123	2255
75	7498	1247	121	2400
90	6498	1366	122	2336
105	8641	1268	124	2219
120	3641	965	121	2050

**Table 10.** Adsorption Performance Of 100mg/L nZVI at pH 8 and 120 min Contact Time  
**pH 8 → 100mg/L nano Zero Valent Iron (nZVI)**

Time(min)	COD (mg/L)	DOC (mg/L)	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/L)	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (mg/L)
15	9498	1809	122	2563
30	6641	1789	119	2331
45	2927	2006	118	2568
60	3070	1713	123	2360
75	5070	1838	123	2346
90	5355	2050	122	2296
105	4212	1977	121	2438
120	3212	1662	119	2488

**Table 11.** Adsorption Performance Of 200mg/L nZVI at pH 8 and 120min Contact Time  
**pH 8 → 200mg/L nano Zero Valent Iron (nZVI)**

Time(min)	COD (mg/L)	DOC (mg/L)	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/L)	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (mg/L)
-----------	------------	------------	-------------------------------------	-------------------------------------

15	4784	1697	128	2410
30	15070	1615	124	2454
45	3070	1701	126	2511
60	5927	1697	128	2495
75	7355	2098	123	2547
90	7070	1886	127	2451
105	7641	1677	126	2399
120	3784	1735	125	2485

**Table 12.** Adsorption Performance Of 300mg/L nZVI at pH 8 and 120min Contact Time

pH 8 → 300mg/L nano Zero Valent Iron (nZVI)				
Time(min)	COD (mg/L)	DOC (mg/L)	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/L)	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (mg/L)
15	8212	1940	128	2485
30	8927	1964	124	2441
45	7927	2007	126	2542
60	10070	1914	128	2577
75	13498	1836	123	2431
90	10212	2096	127	2509
105	10641	1734	126	2454
120	10212	1624	125	2475

**Table 13.** Adsorption Performance Of 400mg/L nZVI at pH 8 and 120min Contact Time

pH 8 → 400mg/L nano Zero Valent Iron (nZVI)				
Time(min)	COD (mg/L)	DOC (mg/L)	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/L)	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (mg/L)
15	4661	1745	124	2504
30	5070	1948	122	2398
45	1641	1645	127	2328
60	1927	1858	121	2136
75	2842	1912	121	2430
90	2355	1591	122	2498
105	2070	1675	135	2346
120	1641	1590	122	2511

**Table 14.** Adsorption Performance Of 500mg/L nZVI at pH 8 and 120min Contact Time

pH 8 → 500mg/L nano Zero Valent Iron (nZVI)				
Time(min)	COD (mg/L)	DOC (mg/L)	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/L)	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (mg/L)
15	5070	1987	158	2424
30	5070	1738	157	2441
45	2641	2014	158	2465
60	3784	2093	157	2443
75	3498	1867	156	2433
90	3355	1427	155	2202
105	3498	1625	162	2481
120	3927	2552	165	2538

According to Table 9-14, the optimum nZVI concentration was determined to be 50mg/L, with corresponding COD, DOC, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>, and NO<sub>3</sub><sup>-</sup> removal efficiencies of 59%, 60%, 33%, and 56%, respectively (pH 8-120min). The highest COD removal efficiency was observed at pH 8, 120 min, and nZVI concentration of 400mg/L, and the corresponding removal efficiency was determined to be approximately 81%. However, it is observed that the removal efficiency decreased with increasing nZVI concentration. Rahmani et al. (2011) observed in their study that the removal efficiency of arsenic (III) with a nZVI concentration of 1g/L in 10 minutes and under pH 7 conditions increased up to 99.9%. In addition, factors such as temperature, pH, ionic strength, adsorbent concentration, and reaction time play an important role in adsorption studies. According to the literature, there have been very few studies using magnetic adsorbents for the purification of LFL (Zhang et al., 2016; Zhang et al., 2018). According to another study, for magnetic adsorbents, the removal efficiency of COD reached 30% (Augusto et al., 2019). Bashir et al. (2015)

reported that adsorption through a novel carbon-mineral composite was effective in the removal efficiency of both COD (68.4%) and NH<sub>3</sub>-N (92.6%) from LFL. Kargi and Pamukoglu (2004) reported that PAC was effective in COD removal at a concentration of 5 g/L and zeolite reached a higher removal efficiency of NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N than PAC at a concentration of 1g/L. In general, according to literature studies, activated carbon adsorption (GAC or PAC) studies on landfill leachates have been reported to be effective in the removal of organic compounds, but not in the removal of nitrogenous compounds (Kurniawan et al., 2006). Amokrane et al. (1994) in their study, they obtained COD removal with ferric chloride and alum at 55% and 42%, respectively. In another study, they reported that they achieved a COD removal efficiency of 39% with Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> and 56% with FeCl<sub>3</sub> (Diamadopoulos, E., 1997). Low-cost adsorbents such as nZVI and metal oxides can be used to reduce the COD load of LFL. Recently, the removal of organic and inorganic pollutants from contaminated LFL using nZVI has received great attention. Aziz et al. (2007) reported in their study that the color removal efficiency was 94% using ferric chloride at a concentration of 800 mg/L at pH 4. Additionally, Wang et al. (2002) reported that LFL showed effective results at lower pH values through the coagulation-photo-oxidation process. According to previous studies, PACs, GACs, and nanoparticulate substances have been used as adsorbents for organic matter removal in LFL treatment (Kulikowska et al., 2016). When our study was compared with the literature, similar results were obtained. Additionally, they reported that ammonium removal from LFL by the adsorption process was low (Halim et al. 2010). It is similar to our study. According to our study, the approximate ammonium removal efficiency was observed to be 10-17%. The results clearly supported the use of nZVI instead of conventional adsorbent for effective COD and NH<sub>4</sub><sup>+</sup> removal from leachate (Stefaniuk et al., 2016). Finally, it is also stated that the number of studies on large-scale production of magnetic adsorbents is limited and indicates their necessity. Our studies are similar to the literature. Increasing nanoparticle concentration did not affect pollutant removal efficiency. These results indicated that nZVI concentration of 50 mg/L, pH of 8, and reaction time of 120 min were favorable for the adsorption process of LFL. As a result, adsorption is a surface phenomenon that is common for the removal of organic and inorganic substances. The adsorption process (for nZVI) is the most promising advanced removal strategy for its easy operation, high removal efficiency, high specific surface area, excellent adsorption property, high surface energy, and strong reducing ability (Jia et al., 2022; Kassem et al., 2022; Shu et al., 2020; Abdelfatah et al., 2021). Therefore, nZVI is one of the most popular magnetic nanoparticles for wastewater treatment due to its high and fast removal efficiency (such as pH, concentration, and contact time).

## CONCLUSION

The experiments were conducted to investigate whether the adsorption process with nZVI is an effective treatment method for LFL. In this study, it was observed that the adsorption process was an effective method for LFL as pre-treatment. COD removal efficiency was determined as 80% at 400mg/L nZVI concentration, pH 8, 120 minutes reaction time. However, when evaluated in terms of all pollutant parameters, the optimum conditions were determined as 50 mg nZVI/L, pH of 8, and reaction time of 120 min, corresponding to COD, DOC, NO<sub>3</sub><sup>-</sup> and NH<sub>4</sub><sup>+</sup> removal efficiency was approximately 75%, 60%, 57%, and 33%, respectively. In the treatment of LFL with the adsorption process with nZVI, fluctuations were observed only in COD removal efficiency with increasing adsorbent concentration. However, due to the high pollutant concentration and toxicity of LFL, pretreatment is not sufficient to ensure discharge standards and additional treatment is required. Therefore, it is suggested that the results should be supported or should be used after biological treatment and advanced treatment technologies.

## ACKNOWLEDGE

This article was supported by the Scientific Research Unit of the Çukurova University. Project No: FDK-2019-11782.

## REFERENCES

- Abdelfatah, A. M., Fawzy, M., El-Khouly, M. E., & Eltaweil, A. S. (2021). Efficient adsorptive removal of tetracycline from aqueous solution using photosynthesized nano-zero valent iron. *Journal of Saudi Chemical Society*, 25(12), 101365. <https://doi.org/10.1016/j.jscs.2021.101365>.
- Amokrane, A. Comel, C. & Veron, J. (1997). Landfill leachates pretreatment by coagulation–flocculation. *Water Res.* 31. 2775–2782. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(97\)00147-4](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(97)00147-4).
- Amor, C., Lucas, M.S., Garcia, J., Dominguez, J.R., De Heredia, J.B., & Peres, J.A. (2015). Combined treatment of olive mill wastewater by Fenton's reagent and anaerobic biological process. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, 50(2), 161-168. <https://doi.org/10.1080/10934529.2015.975065>.
- Aquino, S.F., & Stuckey, D.C. (2004). Soluble microbial products formation in anaerobic chemostats in the presence of toxic compounds. *Water research*, 38(2), 255-266.
- Atmaca, E. (2009). Treatment of landfill leachate by using electro-Fenton method. *J Hazard Mater*, 163(1):109–114. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.06.067>.
- Augusto, P.A., Castelo-Grande, T., Merchan, L., Estevez, A.M., Quintero, X., & Barbosa, D. (2019). Landfill leachate treatment by sorption in magnetic particles: preliminary study. *Science of the Total Environment*, 648, 636-668. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.08.056>.
- Aziz, H.A., Alias, S., Adlan, M.N., Asaari, A. H., & Zahari, M.S. (2007). Colour removal from landfill leachate by coagulation and flocculation processes. *Bioresource technology*, 98(1), 218-220. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2005.11.013>.
- Bashir, M.J., Aziz, H.A., Yusoff, M.S., & Adlan, M.N. (2010). Application of response surface methodology (RSM) for optimization of ammoniacal nitrogen removal from semi-aerobic landfill leachate using ion exchange resin. *Desalination*, 254(1-3), 154-161. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2009.12.002>.
- Bashir, M.J.K., Aziz, H.A., Amr, S.S.A., Sethupathi, S., Ng, C.A., & Lim, J.W. (2015). The competency of various applied strategies in treating tropical municipal landfill leachate. *Desalin. Water Treat.* 54, 2382–2395. <https://doi.org/10.1080/19443994.2014.901189>.
- Bhatt, A.H., Karanjekar, R.V., Altouqi, S., Sattler, M.L., Hossain, M.S., & Chen, V.P. (2017). Estimating landfill leachate BOD and COD based on rainfall, ambient temperature, and waste composition: Exploration of a MARS statistical approach. *Environmental Technology & Innovation*, 8, 1-16. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2017.03.003>.
- Brasil, Y.L., Silva, A.F., Gomes, R. F., & Amaral, M.C. (2021). Technical and economic evaluation of the integration of membrane bioreactor and air-stripping/absorption processes in the treatment of landfill leachate. *Waste Management*, 134, 110-119. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.08.013>.
- Brennan, R.B., Healy, M.G., Morrison, L., Hynes, S., Norton, D., & Clifford, E. (2016). Management of landfill leachate: The legacy of European Union Directives. *Waste management*, 55, 355-363. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.10.010>.
- Chang, Y.C., & Chen, D.H. (2005). Preparation and adsorption properties of monodisperse chitosan-bound Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> magnetic nanoparticles for removal of Cu (II) ions. *Journal of colloid and interface science*, 283(2), 446-451. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2004.09.010>.
- Chen, Z., Wang, X., Yang, Y., Mirino Jr, M.W., & Yuan, Y. (2016). Partial nitrification and denitrification of mature landfill leachate using a pilot-scale continuous activated sludge process at low dissolved oxygen. *Bioresource technology*, 218, 580-588. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.07.008>.
- Diamadopoulou, E. (1994). Characterization and treatment of recirculation stabilized leachate, *Water Res.* 28, 2439–2445. [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(94\)90062-0](https://doi.org/10.1016/0043-1354(94)90062-0).
- Foo, K.Y., & Hameed, B. H. (2009). An overview of landfill leachate treatment via activated carbon adsorption process. *Journal of hazardous materials*, 171(1-3), 54-60. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.06.038>.
- Fu, F., Dionysiou, D. D., & Liu, H. (2014). The use of zero-valent iron for groundwater remediation and wastewater treatment: a review. *Journal of hazardous materials*, 267, 194-205. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2013.12.062>.

- Gajski, G., Oreščanin, V & Garaj-Vrhovac, V. (2012). Chemical composition and genotoxicity assessment of sanitary landfill leachate from Rovinj, Croatia. *Ecotoxicology and environmental safety*, 78, 253-259. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2011.11.032>.
- Galdames, A., Ruiz-Rubio, L., Orueta, M., Sánchez-Arzálluz, M., & Vilas-Vilela, J.L. (2020). Zero-valent iron nanoparticles for soil and groundwater remediation. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(16), 5817. <https://doi.org/10.3390/ijerph17165817>.
- Ghasemzadeh, G., Momenpour, M., Omidí, F., Hosseini, M.R., Ahani, M., & Barzegari, A. (2014). Applications of nanomaterials in water treatment and environmental remediation. *Frontiers of environmental science & engineering*, 8, 471-482. <https://doi.org/10.1007/s11783-014-0654-0>.
- Göçer S., Kozak M., Akgül V., Duyar A., Zaimoğlu Z. & Cırık K. (2019) Synthesis Of Nanoscale Zero-Valent Iron (nZVI), *International Symposium on Advanced Engineering Technologies (ISADET)*, 02-04 May 2019, p:828-833, Kahramanmaraş/Turkey.
- Göçer, S., Zaimoğlu, B. Z., & Cırık, K. (2024). Removal of pollutants from landfill leachate by adsorption with nano zero-valent iron particles: adsorption isotherms and kinetic studies. *Water Practice & Technology*, 19(2), 401-418. <https://doi.org/10.2166/wpt.2024.029>.
- Gotvajn AZ, Tisler T. & Zagorc-Koncan J. (2009). Comparison of different treatment strategies for industrial landfill leachate. *J Hazard Mater*, 162(2–3):1446–1456. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.06.037>.
- Halim, A.A., Aziz, H.A., Johari, M.A.M. & Ariffin, K.S. (2010). Comparison study of ammonia and COD adsorption on zeolite, activated carbon and composite materials in landfill leachate treatment. *Desalination*, 262(1-3), 31-35. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2010.05.036>.
- Hu, J., Johnston, K.P., & Williams III, R.O. (2004). Nanoparticle engineering processes for enhancing the dissolution rates of poorly water soluble drugs. *Drug development and industrial pharmacy*, 30(3), 233-245. <https://doi.org/10.1081/DDC-120030422>.
- Ilmasari, D., Kamyab, H., Yuzir, A., Riyadi, F.A., Khademi, T., Al-Qaim, F.F., & Krishnan, S. (2022). A review of the biological treatment of leachate: Available technologies and future requirements for the circular economy implementation. *Biochemical Engineering Journal*, 187, 108605. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2022.108605>.
- Jia, Y., Sun, S., Wang, S., Yan, X., Qian, J., & Pan, B. (2023). Phosphorus in water: A review on the speciation analysis and species specific removal strategies. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 53(4), 435-456. <https://doi.org/10.1080/10643389.2022.2068362>.
- Jovanov, D., Vujić, B., & Vujić, G. (2018). Optimization of the monitoring of landfill gas and leachate in closed methanogenic landfills. *Journal of environmental management*, 216, 32-40. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.08.039>.
- Jun D, Yongsheng Z, Weihong Z, Mei H (2009). Laboratory study on sequenced permeable reactive barrier remediation for landfill leachate-contaminated groundwater. *J Hazard Mater* 161:224–230. doi:10.1016/j.jhazmat.2008.03.086.
- Kargi, F. & Pamukoglu, M.Y. (2004). Adsorbent supplemented biological treatment of pretreated landfill leachate by fed-batch operation. *Bioresour. Technol.* 94, 285–291. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2004.01.003>.
- Kassem, A. H., Ayoub, G. M., & Zayyat, R. (2022). Advances in nanomaterials for phosphates removal from water and wastewater: a review. *Nanotechnology for environmental engineering*, 7(3), 609-634. <https://doi.org/10.1007/s41204-022-00258-w>.
- Kjeldsen, P., Barlaz, M.A., Rooker, A.P., Baun, A., Ledin, A., & Christensen, T.H. (2002). Present and long-term composition of MSW landfill leachate: a review. *Critical reviews in environmental science and technology*, 32(4), 297-336. <https://doi.org/10.1080/10643380290813462>.
- Kulikowska, D., Bernat, K., Parszuto, K., & Sulek, P. (2016). Efficiency and kinetics of organics removal from landfill leachate by adsorption onto powdered and granular activated carbon. *Desalination and Water Treatment*, 57(10), 4458-4468. <https://doi.org/10.1080/19443994.2014.991763>.
- Kurniawan, T.A. Lo, W.H. & Chan, G.Y.S. (2006). Physico-chemical treatment for removal of recalcitrant contaminants from landfill leachate. *J. Hazard. Mater.* B129, 80–100. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2005.08.010>.



- Lai P, Zhao HZ, Wang C, & Ni, JR (2007). Advanced treatment of coking wastewater by coagulation and zero valent iron process. *J Hazard Mater* 147:232–239. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.12.075>.
- Li, W., Zhou, Q., & Hua, T. (2010). Removal of organic matter from landfill leachate by advanced oxidation processes: a review. *International Journal of Chemical Engineering*, 2010. <https://doi.org/10.1155/2010/270532>.
- Lou Z, Dong B, Chai X, Song Y, Zhao Y, & Zhu N (2009). Characterization of refuse landfill leachates of three different stages in landfill stabilization process. *J Environ Sci*, 21(9):1309–1314. [https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(08\)62400-6](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(08)62400-6)
- Mukherjee, S., Mukhopadhyay, S., Hashim, M.A., & Sen Gupta, B. (2015). Contemporary environmental issues of landfill leachate: assessment and remedies. *Critical reviews in environmental science and technology*, 45(5), 472-590. <https://doi.org/10.1080/10643389.2013.876524>.
- Rahmani, A.R., Ghaffari, H.R., & Samadi, M.T. (2011). A comparative study on arsenic (III) removal from aqueous solution using nano and micro sized zero-valent iron. *Journal of Environmental Health Science & Engineering*, 8(2), 157-166. <https://doi.org/10.1080/19443994.2014.991763>.
- Renou, S., Givaudan, J. G., Poulain, S., Dirassouyan, F., & Moulin, P.J.J.O.H.M. (2008). Landfill leachate treatment: Review and opportunity. *Journal of hazardous materials*, 150(3), 468-493. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.09.077>.
- Shah, A.V., Singh, A., Mohanty, S.S., Srivastava, V.K., & Varjani, S. (2022). Organic solid waste: Biorefinery approach as a sustainable strategy in circular bioeconomy. *Bioresource Technology*, 349, 126835. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2022.126835>.
- Shu, Y., Ji, B., Cui, B., Shi, Y., Wang, J., Hu, M., & Guo, D. (2020). Almond shell-derived, biochar-supported, nano-zero-valent iron composite for aqueous hexavalent chromium removal: performance and mechanisms. *Nanomaterials*, 10(2), 198. <https://doi.org/10.3390/nano10020198>.
- Spagni, A., & Marsili-Libelli, S. (2009). Nitrogen removal via nitrite in a sequencing batch reactor treating sanitary landfill leachate. *Bioresource Technology*, 100(2), 609-614. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.06.064>.
- Stefaniuk, M., Oleszczuk, P., & Ok, Y.S. (2016). Review on nano zerovalent iron (nZVI): From synthesis to environmental applications. *Chemical Engineering Journal*, 287, 618-632. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2015.11.046>.
- Tsarpali, V., Kamilari, M., & Dailianis, S. (2012). Seasonal alterations of landfill leachate composition and toxic potency in semi-arid regions. *Journal of hazardous materials*, 233, 163-171. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2012.07.007>.
- Umar, M., Aziz, H.A., & Yusoff, M.S. (2010). Trends in the use of Fenton, electro-Fenton and photo-Fenton for the treatment of landfill leachate. *Waste management*, 30(11), 2113-2121. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2010.07.003>.
- Wang KS, Lin CL, Wei MC, Hsui WL, Li HC, Chang CH, Fang YT & Chang SH (2010). Effect of dissolved oxygen on dye removal by zero valent iron. *J Hazard Mater* 182:886–895. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.07.002>.
- Wang, Z.P., Zhang, Z., Lin, Y.J., Deng, N.S., Tao, T., & Zhuo, K. (2002). Landfill leachate treatment by a coagulation-photo oxidation process. *Journal of Hazardous Materials*, B95, 153–159. [https://doi.org/10.1016/S0304-3894\(02\)00116-4](https://doi.org/10.1016/S0304-3894(02)00116-4).
- Wu, J.J., Wu, C.C., Ma, H.W., & Chang, C.C. (2004). Treatment of landfill leachate by ozone-based advanced oxidation processes. *Chemosphere*, 54(7), 997-1003. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2003.10.006>.
- Xu, Z. Y., Zeng, G.M., Yang, Z.H., Xiao, Y., Cao, M., Sun, H.S., & Chen, Y. (2010). Biological treatment of landfill leachate with the integration of partial nitrification, anaerobic ammonium oxidation and heterotrophic denitrification. *Bioresource technology*, 101(1), 79-86. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.07.082>.
- Yantasee, W., Warner, C.L., Sangvanich, T., Addleman, R.S., Carter, T.G., Wiacek, R. J., & Warner, M. G. (2007). Removal of heavy metals from aqueous systems with thiol functionalized superparamagnetic nanoparticles. *Environmental science & technology*, 41(14), 5114-5119. <https://doi.org/10.1021/es0705238>.

Yuan, P., Liu, D., Fan, M., Yang, D., Zhu, R., Ge, F., & He, H. (2010). Removal of hexavalent chromium [Cr(VI)] from aqueous solutions by the diatomite-supported/unsupported magnetite nanoparticles. *Journal of hazardous materials*, 173(1-3), 614-621. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2009.08.129>.

Zhang, C., Jiang, S., Tang, J., Zhang, Y., Cui, Y., Su, C., & Quan, J. (2018). Adsorptive performance of coal based magnetic activated carbon for perfluorinated compounds from treated landfill leachate effluents. *Process Safety and Environmental Protection*, 117, 383-389. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2018.05.016>.

Zhang, X.H., Xu, Y.B., He, X.L., Huang, L., Ling, J.Y., Zheng, L., & Du, Q.P. (2016). Occurrence of antibiotic resistance genes in landfill leachate treatment plant and its effluent-receiving soil and surface water. *Environmental pollution*, 218, 1255-1261. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.08.081>.



# Kahramanmaraş Sütçü İmam University Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 15.02.2024  
Kabul Tarihi : 14.04.2024

Received Date : 15.02.2024  
Accepted Date : 14.04.2024

## MANTO PERİDOTİTLERİNDE KISMİ ERGİME VE METAZOMATİZMA ETKİSİ: KIZILDAĞ OFİYOLİTİ ÖRNEĞİ (HATAY, TÜRKİYE)

### PARTIAL MELTING AND METASOMATISM EFFECTS IN MANTLE PERIDOTITES: THE CASE OF KIZILDAĞ OPHIOLITE (HATAY, TURKEY)

Mustafa Eren RİZELİ\* (ORCID: 0000-0003-3725-3063)

A. Feyzi BİNGÖL<sup>1</sup> (ORCID: 0000-0000-0000-0000)

Abdullah SAR<sup>1</sup> (ORCID: 0000-0002-9752-7807)

Kuo-Lung WANG<sup>2,3</sup> (ORCID: 0000-0002-6447-2168)

<sup>1</sup> Fırat Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Elazığ, Türkiye

<sup>2</sup> Yer Bilimleri Enstitüsü, Sinica Akademisi, Taipei, Tayvan

<sup>3</sup> Ulusal Tayvan Üniversitesi, Yer Bilimleri Bölümü, Taipei, Tayvan

\*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Mustafa Eren RİZELİ, m.erenrizeli@gmail.com

#### ÖZET

Kızıldağ Ofiyoliti GD Anadolu Ofiyolit Kuşağı'nda yer alır ve tabandan tavana doğru manto peridotitleri, mafik/ultramafik kümülatlar, izotropik gabrolar, levha-dayk karmaşığı, plajiyogranitler ve volkanik kayalardan oluşmaktadır. Manto peridotitlerinde yapılan detaylı arazi çalışmaları ve petrografik gözlemler neticesinde seçilen örneklerin tüm kayaç ana oksit ve iz ve NTE içerikleri belirlenmiştir. Genellikle harzburjit ve az miktarda dünitten oluşan kayaçlar taneli ve elek dokular sergilemektedir. İlkel üst mantoya bileşimine kıyasla farklı derecelerde tüketilmiş olan kayaçlar; düşük Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO, TiO<sub>2</sub> ve yüksek MgO içeriklerine sahiptir. Bazı örneklerde yüksek çekim alanlı elementler ve büyük iyon çaplı elementlerin bir kısmında zenginleşmeler görülmektedir. Arazide peridotitleri kesen ortopiroksenit kanallarının varlığı; petrografik olarak ikincil klinopiroksen oluşukları, kurtçuk şekilli (worm-like) piroksen-spinel simplektitler, olivinlerin spineller içinde kapanımı; jeokimyasal olarak bazı örneklerdeki iz element zenginleşmeleri (Cs, Rb, Ti, Sr, Pb, Ce, Zr/Hf ve Th/La) yiten levhadan türeyen sulu akışkanların ve ergiyiklerin metazomatizmasının bir sonucudur. Sonuç olarak Kızıldağ manto peridotitleri, %20'den fazla oranda tüketilmiş ve yitim zonu ortamını karakterize eden metazomatizma kanıtları gösteren yay önü peridotitleridir.

**Anahtar Kelimeler:** Jeokimya, kısmi ergime, Kızıldağ Ofiyoliti, metazomatizma

#### ABSTRACT

The Kızıldağ ophiolite is located in the SE Anatolian Ophiolite Belt and composed, from bottom to top, of mantle peridotites, mafic-ultramafic cumulates, isotropic gabbros, sheeted-dyke complex, plagiogranites and volcanic rocks. Based on detailed field studies and petrographic observations in mantle peridotites, selected samples' major oxide, trace, and REE contents were determined for the whole rock. The investigated rocks, generally composed of harzburgite and a small amount of dunite, display granoblastic and mesh textures. Rocks that have been depleted to different degrees compared to the composition of the primordial upper mantle have low Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO, TiO<sub>2</sub>, and high MgO contents. Enrichments in high-field strength elements and large ion lithophile elements are observed in some samples. Presence of orthopyroxene channels cutting peridotites in the field; petrographically, secondary clinopyroxene formations, worm-like pyroxene-spinel symplectites, olivine inclusions within spinels; geochemically, trace element enrichments (Cs, Rb, Ti, Sr, Pb, Ce, Zr/Hf and Th/La) in some samples are a result of the metasomatism of aqueous fluids and melts derived from the subducted slab. As a result, Kızıldağ mantle peridotites are fore-arc peridotites that have been depleted by more than 20% and show evidence of metasomatism that characterizes the subduction zone environment.

**Keywords:** Geochemistry, partial melting, Kızıldağ ophiolite, mantle peridotite, metasomatism

ToCite: RİZELİ, M.E., BİNGÖL, A.F., SAR, A., WANG, K.-L. (2021). MANTO PERİDOTİTLERİNDE KISMİ ERGİME VE METAZOMATİZMA ETKİSİ: KIZILDAĞ OFİYOLİTİ ÖRNEĞİ (HATAY, TÜRKİYE). *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 27(3), 908-928.

## GİRİŞ

Eski okyanus kabuğunun parçaları ve mantonun üst kısmını temsil eden ofiyolitler, zaman içinde okyanus kabuğunun evrimine dair kritik ipuçları içerdiklerinden, genellikle eski okyanusların ve onların yerini alan orojenik kuşakların tektonik evrimini ortaya çıkartmak için önemli bilgiler sağlamaktadır (Furnes & Safonova, 2019; Kusky vd., 2013; Inwood vd., 2009; Dilek, 2006; Maruyama vd., 1996). Ofiyolitik birimlerden elde edilen jeokimyasal ve petrolojik veriler okyanusal havza oluşumu, deniz tabanı yayılımı, yitim olayları, söz konusu okyanusal havzanın kapanması ve sonuç olarak kıta kenarlarına yerleşmesi gibi evrelerin daha iyi anlaşılmasına ışık tutabilir (Saccani, 2015; Pearce & Robinson, 2010; Page vd., 2009; Uysal vd., 2007). Özellikle ofiyolitlerin manto kayaçları, üst mantonun zaman içindeki evrimini anlamak için magmatik süreçleri yorumlamada kullanılır.

Peridotitler okyanusal kabuğun oluşumu sırasında mantodan farklı derecelerde ergiyik ayrılımı sonucu kalan “kalıntı”yı temsil eder. Söz konusu manto kalıntılarının bileşimsel farklılıkları tektonik süreçlerdeki kısmi ergime, ergiyik taşınımı (göçü) sulu akışkan-ergiyik-manto etkileşimi gibi olaylarla ilgili çok önemli bilgiler barındırır (Birner vd., 2017; Aldanmaz vd., 2009; Parkinson & Pearce, 1998). Manto peridotitlerinin mineralojik ve jeokimyasal özelliklerinden yola çıkarak ofiyolit oluştuğu tektonik ortam hakkında yorumlar yapılabilmektedir (Hinsbergen vd., 2015; Stern vd., 2012). Ofiyolitler okyanusal yayılma bölgeleri (okyanus ortası sırtı), yay ardı ve yay önü gibi çeşitli tektonik ortamlarda oluşur. Dilek & Furnes (2014) ofiyolitleri “yitimle ilişkili” ve “yitimle ilişkisiz” olmak üzere iki farklı gruba ayırmıştır. Farklı tektonik ortamlarda oluşmuş manto peridotitlerinin mineralojik ve kimyasal bileşimindeki farklılıkların nedeni büyük ölçüde, kalıntı kayaçlardan geçen (süzülen) ergiyiklerin peridotitlerle etkileşim sonrasında gelişen metazomatizmanın bir sonucudur (Niu, 2004; Parkinson & Pearce 1998; Kelemen vd., 1997).

Araştırmacıların ofiyolitler üzerinde yaptıkları jeokimyasal çalışmalarda manto peridotitlerinden daha çok kabuk kayaçlarını seçmelerinin bazı gerekçeleri şu şekilde özetlenebilir: (a) manto peridotitlerinde görülen yüksek oranda serpantinleşme, (b) genellikle oldukça düşük iz element bileşimlerine sahip olmaları ve (c) analiz için örnek çözdürme sırasında refrakter fazların yol açtığı zorluklar. Fakat son yıllarda gelişen teknoloji ve yeni teknikler ışığında eski okyanusal litosferdeki ergiyik oluşumu, ergiyik-manto etkileşimi gibi metazomatizma olayları ve ofiyolitlerin oluşum ortamının aydınlatılmasında, üzerindeki kabuğu oluşturan ergiyiğin esas türediği kaynağı temsil eden manto peridotitler üzerine yapılan çalışmalar kilit bir rol oynamaktadır (Aldanmaz vd., 2009; Uysal vd., 2012; Niu, 2004; Pearce vd., 2000; Parkinson & Pearce, 1998; Arai, 1994; Dick & Bullen, 1984).

Bu çalışma kapsamında materyal olarak GD Anadolu Ofiyolit Kuşağı’nda Bitlis-Zagros Kenet Kuşağı’nın en batı ucunda bulunan Kızıldağ (Hatay) Ofiyoliti manto peridotitlerinde detaylı saha çalışmaları akabinde alınan örneklerde detaylı petrografik çalışmalarla birlikte tüm kayaç ana oksit, iz ve NTE analizleri yapılmıştır. Tüm bu verilerden hareketle, Kızıldağ Ofiyoliti manto peridotitlerinin petrografik ve jeokimyasal özellikleri tartışılarak ergiyik oluşumu ve kısmi ergime (tüketilme) derecesi, sulu akışkan-ergiyik-manto etkileşimi gibi metazomatik süreçlere yorumlar getirilerek söz konusu ofiyolit oluştuğu tektonik ortam irdelenecektir.

## GEREÇ VE YÖNTEM

Arazi çalışmalarında hem MTA (2002) hem de farklı araştırmacılar (Dilek & Thy, 1998; Erendil, 1984; Selçuk, 1981) tarafından hazırlanan jeolojik haritalar kullanılarak peridotitlerin dağılımı ve yan kayaçlarla olan ilişkisi irdelenmiştir. Manto peridotitlerini yayılım gösterdiği, oldukça dağlık ve sık ormanla örtülü araziye en iyi şekilde temsil edebilmesi için arazi koşullarının elverdiği ölçüde saha çalışmaları ve örneklemeler gerçekleştirilmiştir. Örneklemeye çalışmaları Kale-Çevlik arası, Kisecik’in kuzeybatısı ve Serinyol’un güneybatısı olmak üzere üç ana bölgede gerçekleştirilmiştir. Özellikle ileri derecede serpantinleşme gösteren, ilksel mineralojik bileşimini kaybetmiş kayaçlarda yapılan jeokimyasal analizler önemli yorumlama hatalarına neden olabileceğinden peridotitlerin yayılım sunduğu alanlar taranarak alterasyondan en az oranda etkilenmiş her biri en az 2 kg ağırlığında 26 adet peridotit örneği alınmış ve bölgenin jeoloji haritasına işlenmiştir (Şekil 1b).

Manto peridotitlerinde yapılan petrografik tayinlere göre serpantinleşme oranı en az olduğu düşünülen toplamda dokuz adet manto peridotitinin tüm kayaç ana oksit analizlerinden yedi tanesi Acme Laboratuvarı’nda (Kanada) iki tanesi (HA-9 ve HA29T) ise Ulusal Tayvan Üniversitesi (Tayvan)’de İndüktif Eşleşmiş Plazma Emisyon Spektrometresi (ICP-ES) yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Lityum borat (LiBO<sub>2</sub>) ile eritilmiş toz halindeki örnekler

(yaklaşık 2 g), çeşitli asitlerle seyreltme işlemlerine tâbi tutulmuş ve *ICP-ES* ile analiz edilmiştir. Analizlerle ilgili deteksiyon limitleri Tablo 1b'de verilmiştir.

Tüm kayaç ana oksit analizi yapılan dokuz adet manto peridotinin iz ve NTE analizleri Yer Bilimleri Enstitüsü Sinica Akademisi (Tayvan)'nde gerçekleştirilmiştir. Peridotitlerin oldukça düşük iz element bollukları ve krom-spinellerin çözünmesindeki zorluklar nedeniyle manto peridotiti örneklerinin iz ve NTE içeriklerinin tespiti için Lin vd. (2020)'nde detayı verilen İndüktif Eşleşmiş Plazma Dört Kutuplu Kütle Spektrometresi (*ICP-QMS*: Eggins vd., 1997) yönteminin optimize edilmiş bir hali kullanılmıştır. Bu yöntem özetle iki basamaktan oluşmaktadır. İlk aşamada, krom-spinelleri tamamen çözmek için HCl + HF'ye maruz bırakılan örneklerde oluşturulacak yüksek sıcaklık ve basınç koşullarına dayanabilen Ultem Soket kapaklarına sahip Teflon şişeleri kullanmıştır. İkinci aşamada, hem standartların hem de numunelerin seyreltme faktörleri, çoğu eser elementin aşırı düşük konsantrasyonunu hassas bir şekilde kalibre etmek için revize edilmiştir. Bağlı standart sapma birçok elementte %5'in altında olup ortaç NTE'ler için bu değer çoğunlukla %10-20 oranındadır. Ölçümlerin doğruluğunun belirlenebilmesi için USGS dünit standardı (DTS-1) bilinmeyen olarak analize tâbi tutulmuş ve bu değerler Tablo 1b'de verilmiştir.

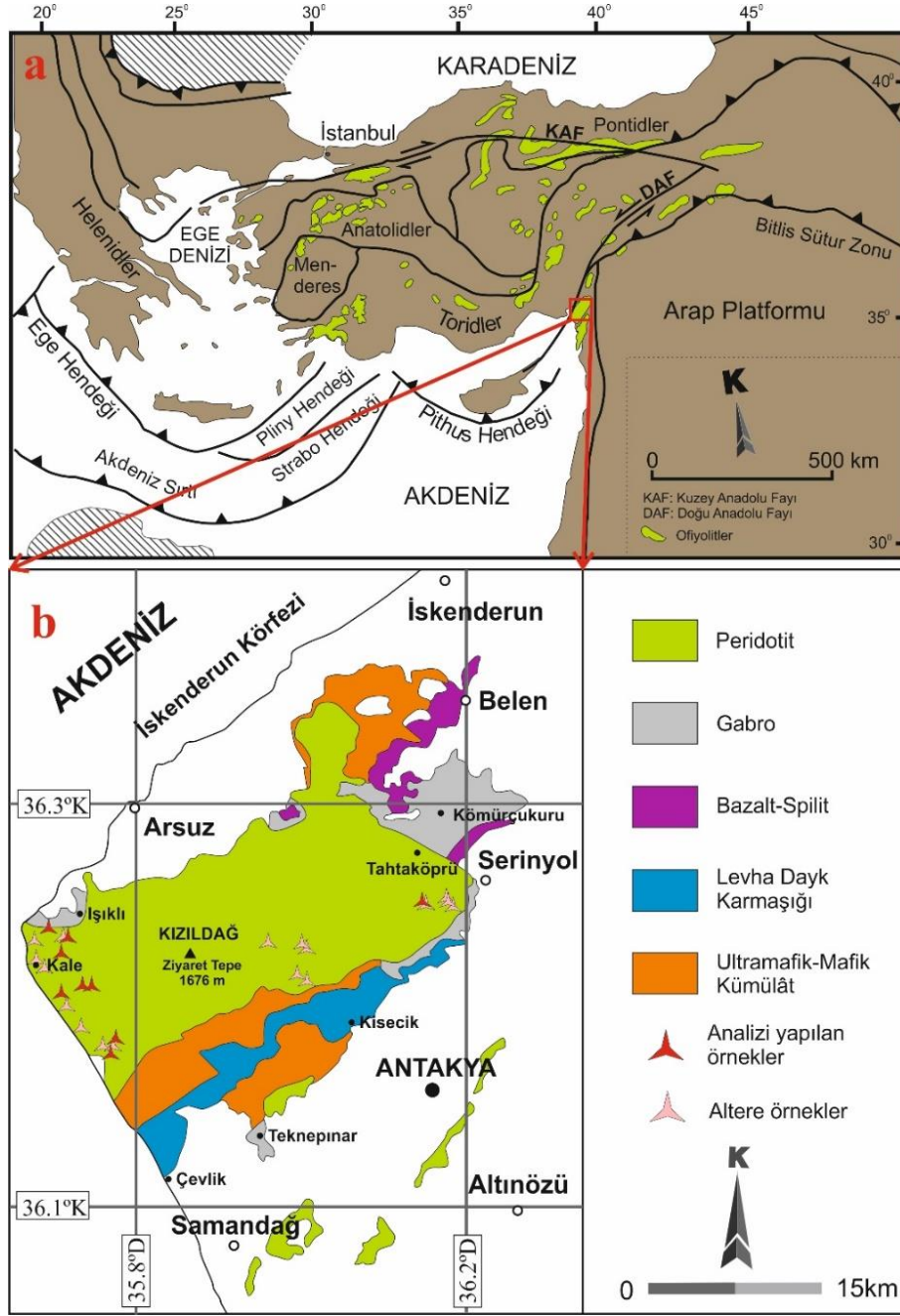
## BULGULAR

### *Genel Jeoloji*

Amanos Dağları'nın ofiyolit napları yaklaşık 1300 km<sup>2</sup>'lik bir alanı kaplayan dağmık klipler ve naplar halinde görülmektedir. Kızıldağ Ofiyoliti Amanosların en güneyinde yer alan en büyük naptır (Tekeli & Erendil, 1986). Türkiye'nin güneyinde yer alan KD-GB gidişli Kızıldağ Ofiyoliti (Şekil 1), 25 km genişliğinde, 45 km uzunluğunda, 7 km'ye kadar kalınlıkta olup ~950 km<sup>2</sup>'lik bir alanı kaplamaktadır (Tekeli vd., 1983; Tinkler vd., 1981). Kızıldağ Ofiyoliti, ideal bir ofiyolit istifinde bulunması gereken birimleri eksiksiz olarak içeren, Güney Türkiye'nin en iyi yüzeyleme veren ofiyolitlerinden biridir. Tabandan tavana doğru manto peridotitleri, mafik-ultramafik kümülatlar, izotropik gabrolar, levha-dayk karmaşığı, plajiyogranitler ve volkanik bir seriyle temsil edilmektedir (Parlak vd., 2009; Bağcı vd., 2005, 2008; Dilek & Thy, 1998; Tekeli & Erendil, 1986; Erendil, 1984; Selçuk, 1981; Tinkler vd., 1981; Şekil 1). Ofiyolitik birimler, Kambriyen-Kretase döneminde çökelmiş kalın bir şelf birimi (Arap Otoktonu) üzerine yerleşmiştir. Ofiyolit yerleşiminden sonra çökelmiş olan sığ su deniz çökeltileri, altta bulunan ofiyolit birimlerinden türeyen çakıllardan oluşan bir taban konglomerası seviyesiyle başlar. Üst kesimlere doğru, fosilli Paleosen kumlu kireçtaşları, Eosen-Erken Miyosen kireçtaşları ve geç Miyosen'de fliş tipi sedimantasyonla devam ederek ofiyoliti örtmektedir (Tekeli & Erendil, 1986).

Manto peridotitleri, Kızıldağ Ofiyoliti'nin yayılım gösterdiği engebeli iç kesimlerinde yüzeyleme vermektedir. Kızıldağ Ofiyoliti birimlerinin yaklaşık %85'ini oluşturan peridotitlerin kayaç türü, arazide kırmızı-bordo renklerde görülen, az oranda dünit bant ve mercikleri ve baskın oranda harzburjitlerdir (Şekil 2a). Peridotitlerin tabanında iri kireçtaşı blokları bulunmaktadır ve ofiyolit yerleşimi sırasında peridotitlere dahil oldukları açıklanmıştır (Tinkler vd., 1981). 3 km'den daha kalın, bol kırık çatlaklı ve farklı derecede serpantinleşmiş ve manyezitleşmiş manto peridotitleri (Şekil 2b) bazı alanlarda mafik (dolerit, pegmatitik gabro; Şekil 2c) ve ultramafik (piroksenit; Şekil 2d) dayklar tarafından kesilmektedir. Manto peridotitleri ayrıca harzburjit ve dünitleri kesen ağsı yapıda ortopiroksenit kanalları da içerir (Şekil 2e). Dilek & Furnes (2009) bu kanalların, magmanın kabuğa doğru yükselişi ve manto kaması içerisinde akışkanların dolaşmasına bağlı olarak geliştiğini açıklamaktadır. Küçük-orta boyutlu kütleler halinde görülen kromitler genellikle etrafları bir dünit zarfıyla çevrenir şekilde nodüler (Şekil 2f), bantlı-saçınımlı (Şekil 2g) ve masif şekillerde gözlenmektedir. Moho geçiş zonu olarak adlandırılan ve üst kabuk ile manto peridotitleri arasında bulunan sınırda dünitik bir zon bulunmaktadır (Bingöl vd., 2018). Bazı bölgelerde olivin gabronorit, olivince zengin gabro, traktolit ve verlit merciklerinin birkaç mm ilâ onlarca m kalınlıklara kadar değişen kütleler halinde yüzeylemektedir (Tinkler vd., 1981). Dünit, verlit, klinopiroksenit ve gabro litolojilerinin ardalanması, gabro ile moho geçiş zonu arasındaki kümülat kısmı oluşturmaktadır (Bingöl vd., 2018). Gabrolar kümülat (Şekil 2h) ve izotropik gabro türdedir. Küçük plajiyogranit kütleleri Karaçay Vadisi civarında izotropik gabroların üst kesimiyle, Çevlik civarında ise levha-dayk karmaşığı ile intrüzif olarak ilişkilidir (Bağcı vd., 2005). Genellikle diyabaz bileşimli kayaçlardan oluşan dayklar izotropik gabroları keser ve daha üst kesimde levha-dayk karmaşığı görülmektedir (Şekil 2i). Levha-dayk karmaşığı 1.5 km kalınlığında olup, esas olarak Akdeniz kıyısı boyunca 60 km<sup>2</sup>'lik bir yüzeyleme alanı kaplamaktadır (Pişkin vd., 1990; Erendil, 1984; Tekeli vd., 1983). Paralel-yarı-paralel yönelimli dayklar, ofitik-intersertal dokulu diyabaz ve kuvars-mikrodiyorit hakimdir ve plajiyoklas, klinopiroksen, amfibol, epidot, klorit, sfen, zeolit ve opak mineraller içerir (Bağcı vd., 2005). Kesme-kesilme

ilişkileri, dokusal ve bileşimsel farklılıklarına göre levha-dayk karmaşığının en az üç farklı nesil dayk sokulumundan ibaret olduğu belirlenmiştir (Dilek & Thy, 1998). Volkanik kayalar arazide genel olarak bazaltik akıntılar ve yastık yapıları bazaltlar (Şekil 2j) şeklinde takip edilmektedir. Çeşitli bölgelerde bu volkanik kayaları kesen farklı kalınlıkta diyabaz daykları mevcuttur.



Şekil 1. a. Türkiye’deki Ofiyolitik Kayaların Dağılımı (Dilek & Flower, 2003) Yer Bulduru Haritası, b. Kızıldağ Ofiyoliti’nin Sadeleştirilmiş Jeoloji Haritası (MTA, 2002; Dilek & Thy, 1998; Tekeli & Erendil, 1986; Erendil, 1984; Selçuk, 1981)

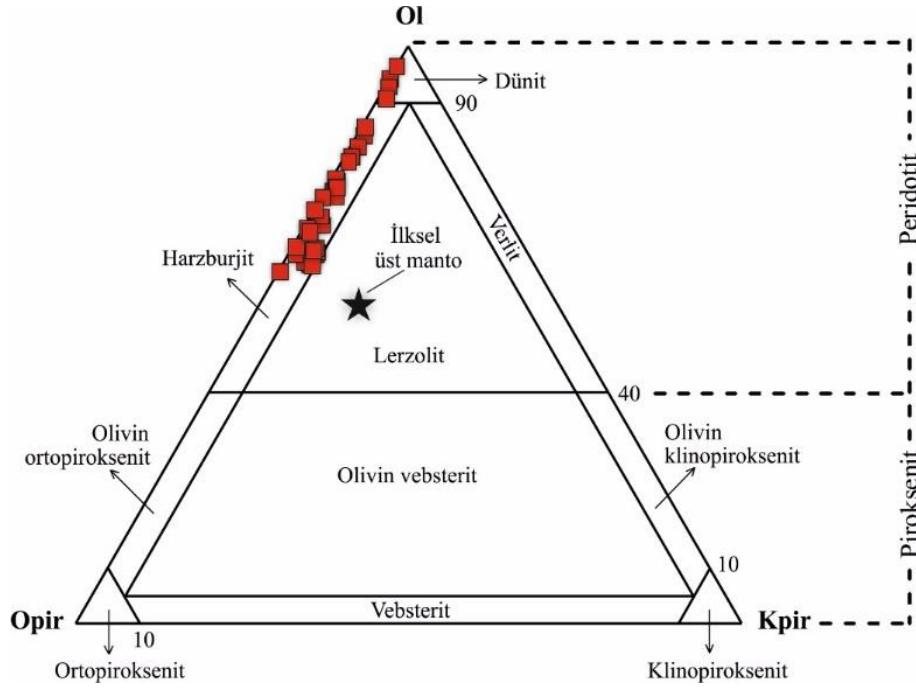


**Şekil 2.** Kızıldağ Ofiyoliti Kayaçlarının Genel Görünümü **a.** Harzburgit, **b.** Peridotitlerde Görülen Manyezitleşme, **c.** ve **d.** Peridotitleri Kesen Dayk ve Damarlar, **e.** Ağsı Ortopiroksenit Kanalları, **f.** Dünit-Nodüler Kromit, **g.** Dünit- Bantlı/Saçınımlı Kromitit, **h.** Kumulat Gabro, **i.** Levha-Dayk Karmaşığı, **j.** Yastık Yapılı Bazaltlar

Kızıldağ Ofiyoliti plajiyogranitlerine ait zirkon minerallerinin U-Pb ve gabrolarının Sm-Nd izokron yaş tayinlerine göre Kızıldağ Ofiyoliti magmatizma yaşı 91-92 milyon yıldır (Karaoğlan vd., 2013; Dilek & Thy, 2009). Lökogabrolardan ve harzburjitleri kesen diyabaz dayklarından yapılan zirkon U-Pb yaş tayinlerine göre sırasıyla  $91 \pm 1$  ve  $82,6 \pm 3,6$  milyon yıl yaşları elde edilmiştir (Bingöl vd., 2018). Söz konusu yaşlar, lökogabroların ofiyolit oluşumunun erken evresinde; harzburjit ve volkanik birimleri kesen bazı diyabaz dayklarının ise ofiyolit oluşumunun geç evresinde oluştuğunu göstermektedir (Bingöl vd., 2018).

### Petrografi

Detaylı petrografik incelemeler sonucu Kızıldağ Ofiyoliti manto peridotitleri kayaç türleri genellikle harzburjit ve daha az oranda dünitten oluşmaktadır (Şekil 3). Dünit bileşimindeki kayaçlar genellikle %95-98 olivin, %5'ten az ortopiroksen, %1'den az klinopiroksen ve %2'den az oranda spinel içermektedir. Genellikle harzburjitler içinde farklı boyutlarda mercerler ve bantlar şeklinde görülen dünitler, kromit kütlelerini bir zarf gibi çevreler şekilde de görülmektedir (Şekil 2f, g). Dünitlerdeki olivin kristalleri genellikle canlı girişim renklerinde olup kenar ve çatlaklarından itibaren serpantinleşmeye maruz kaldıklarından dolayı ağsı bir görünüme (elek/mesh dokusu) sahiptir (Şekil 4a, c). Modal olarak çok düşük miktarda (<%5) ortopiroksen içeren dünitlerde spineller öz şekilsiz kristaller halinde olup bazı spinel kristallerinin, özellikle geri yansımali elektron görüntülerinde (BSE) kırıklı-çatlaklı yapısı dikkat çekmektedir (Şekil 4b).



Şekil 3. Olivin-Ortopiroksen-Klinopiroksen Sınıflama Diyagramı. Ol: Olivin, Opir: Ortopiroksen, Kpir: Klinopiroksen

Harzburjit bileşimindeki kayaçlar modal olarak genellikle %65-85 olivin, %10-30 ortopiroksen, %4'ten az klinopiroksen, %1-2 oranında spinel içermektedir. Tıpkı dünitlerde olduğu gibi, minerallerin kenar ve çatlaklarından itibaren gelişen serpantinleşme sonucu kayaçlar ağsı bir yapı sunmaktadır (Şekil 4c, d). İnce kesit görüntülerinde canlı girişim renklerine sahip bol kırık-çatlaklı öz şekilsiz olivin kristallerinin merkez kısımları serpantinleşmeden daha az şekilde etkilenmiş olarak görülmektedir. Genellikle taneli ve elek doku gözlenen kayaçlarda, daha az kırık-çatlaklı, tek yönde belirgin dilinim gösteren gri girişim renklerine sahip ortopiroksen mineralleri yarı öz şekilliden öz şekilsiz kadar değişen şekillerde gözlenmektedir (Şekil 4d, e). Ortopiroksen kristallerinde, maruz kaldıkları plastik deformasyon nedeniyle (Mercier & Nicolas, 1975) bükülmüş/eğilmiş dilinimleriyle kristal içi kayma (kinkbant) yapıları görülmektedir (Şekil 4f). Klinopiroksenlere, ince kesit görüntülerinde çok nadir rastlanmakta olup genellikle bu mineraller BSE çalışmalarında gözlemlenmiştir (Şekil 4g, h, i). Ayrıca klinopiroksenler ortopiroksenlerin içinde, olivin ve spinellerin çevresinde ikincil olarak bulunmaktadır (Şekil 4h). Hacimsel olarak en az miktarda bulunan spinel mineralleri bazı örneklerde kurtçuk şekilli olarak (worm-like) piroksen ve olivinlerle

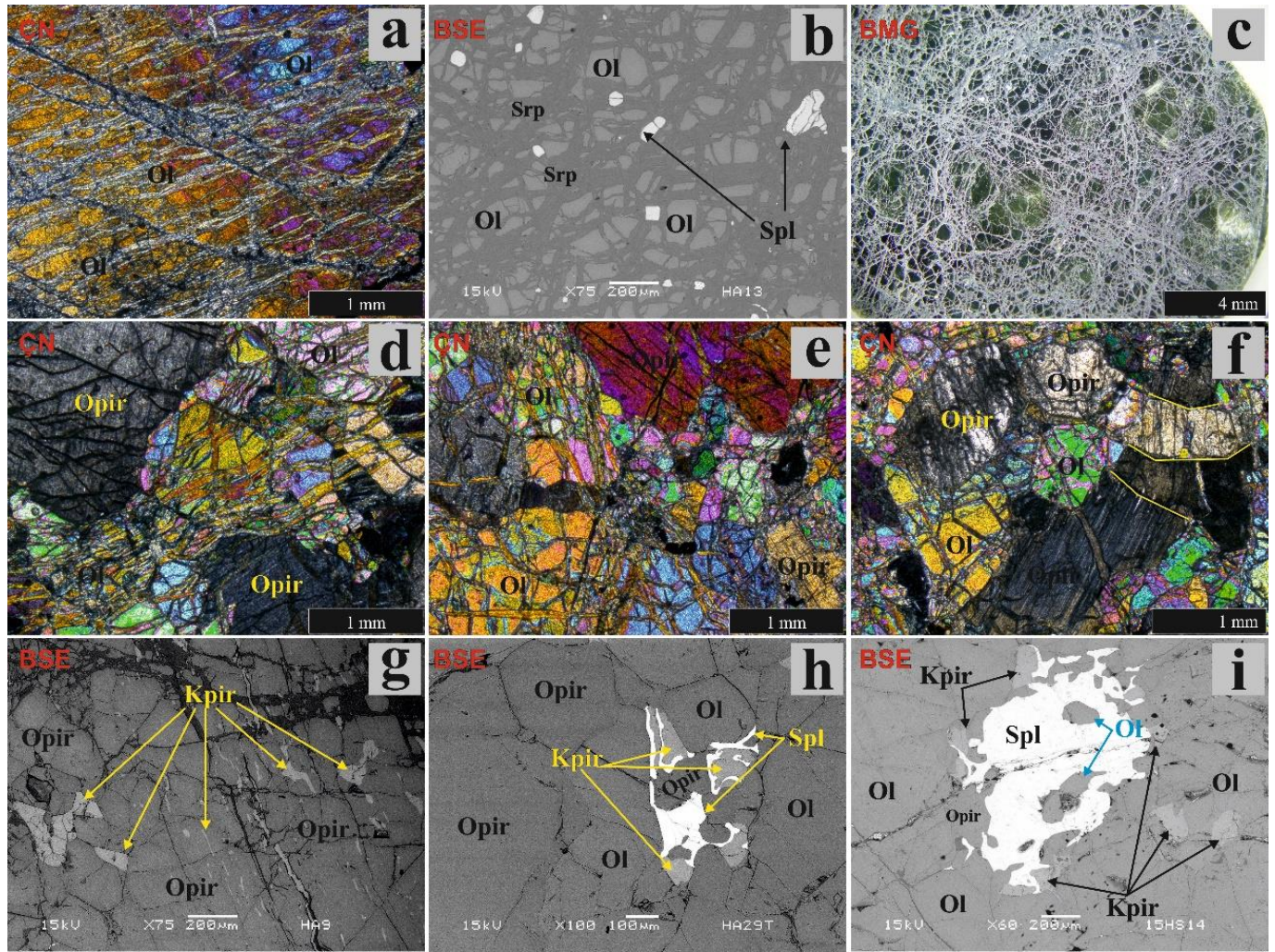


birlikte gözlenmektedir (Şekil 4h; Rizeli, 2020). BSE görüntülerinde bazı spinel fazlarının içerisinde olivin kapantılarına rastlanmaktadır (Şekil 4i).

### Tüm Kayaç Ana Oksit Jeokimyası

Çeşitli oranlarda serpantinleşmiş manto peridotitlerinin ateşte kayıp (AK) değerleri %11'den az olup  $Al_2O_3$  ve CaO içerikleri açısından ilksel üst manto değerlerine ( $Al_2O_3 = \%ağ. 4,49$  ve  $CaO = \%ağ. 3,65$ ; Palme & O'Neill, 2014) kıyasla farklı oranlarda tüketilmiştir.

CaO ve  $Al_2O_3$  içerikleri sırasıyla %ağ. 0,15-0,92 ve 0,37-0,93 aralığında değişen manto peridotitlerinin  $TiO_2$  içerikleri genelde deteksiyon limitinin (%0,01) altında olmakla birlikte, ölçülebilen en büyük değer %ağ. 0,012'dir. Söz konusu örneklerin MgO değerleri %ağ. 39,85-44,88 aralığında iken,  $Fe_2O_3$  değerleri %ağ. 7,85-9,79 aralığında değişmektedir (Tablo 1a). MgO değerlerine karşılık bazı ana oksit değerlerindeki dağılım doğrusal ölçekte verilmiştir (Şekil 5). Manto peridotitlerinin artan tüm kayaç MgO değerlerine karşılık  $TiO_2$  içeriğinde herhangi bir yönseme görülmezken;  $SiO_2$  ve CaO içeriklerinde belirgin,  $Al_2O_3$ 'te hafif bir negatif yönseme bulunmaktadır (Şekil 5).



**Şekil 4.** Kızıldağ Ofiyoliti'ne ait Dünit ve Harzburgitlerin Polarizan Mikroskop, BSE ve BMG Görüntüleri. Dünitlerde Gözlenen **a.** Elek (*Mesh*) Doku ve **b.** Öz Şekilsiz, Kırık-Çatlaklı Spineller. Harzburgitlerde **c.** BMG'de Görülen Ağsı Yapı, **d.** Taneli Doku, **e.** Plastik Deformasyona Bağlı Ortopyroksenlerde Gelişen Kristal İçi Kayma Yapıları, **f.** Ortopyroksenler İçinde İkincil Klinopyroksenler, **g.** Olivin ve Spinel Kristallerinin Etrafında Oluşan İkincil Klinopyroksen ve Kurtçuk Şekilli (*Worm-like*) Öz Şekilsiz Spineller, **h.** Spinel İçerisindeki Olivin Kapantıları. Ol: Olivin, Opir: Ortopyroksen, Kpir: Klinopyroksen, Spl: Spinel, BMG: Binoküler Mikroskop Görüntüsü, BSE: Geri Yansımali Elektron Görüntüsü, ÇN: Çapraz Nikol

**Tablo 1a.** Kızıldağ Ofiyoliti'ne Ait Manto Peridotitlerinin Tüm Kayaç Ana Oksit (%ağ.) İçerikleri.  
AK: Ateşte Kayıp, dl: Deteksiyon Limiti, dla: Deteksiyon Limitinin Altında, a.y.: Analiz Yok

Litoloji	Dünit	Harzburjit								% dl
		HA13	HA9	HA15	HA22	HA23	HA26	HA29T	HA32	
Örnek #	HA13	HA9	HA15	HA22	HA23	HA26	HA29T	HA32	15HS32-2	% dl
SiO <sub>2</sub>	34,68	41,90	38,13	42,24	45,21	39,46	43,37	42,35	38,5	0,01
TiO <sub>2</sub>	dla	0,012	dla	dla	dla	dla	0,010	dla	dla	0,01
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,53	0,60	0,54	0,56	0,93	0,54	0,45	0,55	0,37	0,01
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	8,45	9,31	7,85	8,45	8,43	8,14	9,79	8,88	8,05	0,04
MnO	0,11	0,14	0,11	0,12	0,12	0,11	0,14	0,12	0,11	0,01
MgO	43,8	44,88	42,14	42,18	41,17	43,62	45,01	44,41	39,85	0,01
CaO	0,15	0,87	0,61	0,72	0,92	0,68	0,88	0,65	0,71	0,01
Na <sub>2</sub> O	dla	0,00	dla	dla	dla	dla	0,00	dla	dla	0,01
K <sub>2</sub> O	dla	0,00	dla	dla	dla	dla	0,00	dla	dla	0,01
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	dla	0,03	dla	dla	dla	dla	0,03	dla	dla	0,01
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,68	a.y.	0,36	0,44	0,44	0,39	a.y.	0,36	0,42	0,002
AK	10,6	2,9	9,3	4,3	1,8	6,1	0,2	1,6	11,0	
Toplam	99,00	100,68	99,04	99,01	99,02	99,04	99,91	98,92	99,01	
Mg#	90,24	89,58	90,54	89,90	89,70	90,52	89,13	89,92	89,82	

$$Mg\# = 100 \times (MgO/40,30) / [(MgO/40,30) + (Fe_2O_3/71,85)]$$

**Tablo 2b.** Kızıldağ Ofiyoliti'ne Ait Manto Peridotitlerinin Tüm Kayaç İz Element ve NTE (ppm) İçerikleri. dla: Deteksiyon Limitinin Altında, a.y.: Analiz Yok

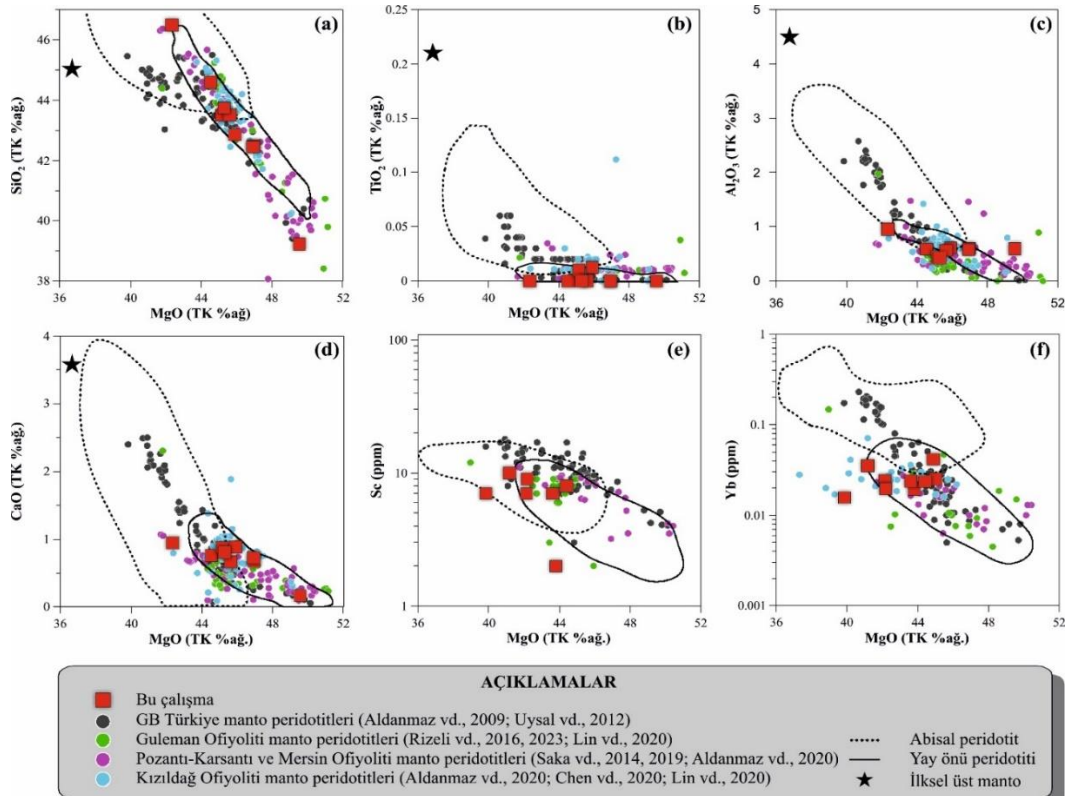
Litoloji	Dünit	Harzburjit								Dünit Standardı	
		HA13	HA9	HA15	HA22	HA23	HA26	HA29T	HA32	15HS32-2	DTS-1 Bu çalışma
Örnek#	HA13	HA9	HA15	HA22	HA23	HA26	HA29T	HA32	15HS32-2	DTS-1 Bu çalışma	DTS-1 Jochum vd. (2016)
İz Element (ppm)											
Ti	33,1	42,8	20	14,5	39	19,6	18,8	17,2	15,5	a.y.	a.y.
Ni	2328	a.y.	2057	2347	2250	2161	a.y.	2482	2207	a.y.	a.y.
Sc	2	a.y.	7	9	10	7	a.y.	8	7	a.y.	a.y.
Cs	0,0008	0,0010	0,0010	0,0013	0,0015	0,0014	0,0005	0,0020	0,0042	0,0063	0,0060
Rb	0,0068	0,0167	0,0091	0,0096	0,0184	0,0118	0,0076	0,0147	0,0865	0,0676	0,0660
Ba	0,0961	0,4199	0,1119	0,0486	0,0466	0,0605	0,1899	0,0844	0,4376	0,3314	0,3420
Sr	0,1390	1,2587	0,9247	0,0975	0,1348	0,2105	0,1108	0,1041	0,3277	0,3125	0,3000
Zr	0,0450	0,0067	0,0268	0,0037	0,0121	0,0070	0,0048	0,0034	0,2443	0,1481	0,1530
Y	0,0672	0,1407	0,0664	0,0339	0,0776	0,0644	0,0460	0,0460	0,0448	0,0417	0,0363
Hf	0,0019	0,0007	0,0010	0,0004	0,0006	0,0006	0,0004	0,0003	0,0061	0,0046	0,0053
Th	0,0006	0,0003	0,0010	0,0003	0,0005	0,0006	0,0005	0,0003	0,0122	0,0092	0,0098
Pb	0,0166	0,0343	0,0247	0,0219	0,0264	0,0258	0,0216	0,0212	0,0303	7,6600	a.y.
U	0,0010	0,0008	0,0014	0,0008	0,0013	0,0008	0,0010	0,0006	0,0030	0,0045	0,0032
Nb	0,0139	0,0206	0,0087	0,0304	0,0436	0,0221	0,0697	0,0239	0,0284	0,0165	0,0154
NTE (ppm)											
La	0,0021	0,0005	0,0020	0,0059	0,0009	0,0015	0,0011	0,0005	0,0336	0,025	0,026
Ce	0,0047	0,0013	0,0045	0,0013	0,0020	0,0032	0,0021	0,0013	0,0675	0,052	0,050
Pr	0,0008	0,0002	0,0007	0,0002	0,0003	0,0004	0,0003	0,0002	0,0081	0,007	0,006
Nd	0,0045	0,0011	0,0033	0,0007	0,0011	0,0020	0,0010	0,0008	0,0299	0,025	0,023
Sm	0,0022	0,0007	0,0015	0,0004	0,0005	0,0010	0,0005	0,0005	0,0059	0,005	0,004
Eu	0,0014	0,0004	0,0009	0,0001	0,0002	0,0006	0,0002	0,0003	0,0013	0,001	0,001

Gd	0,0034	0,0021	0,0021	0,0004	0,0007	0,0021	0,0004	0,0005	0,0056	0,005	0,000
Tb	0,0009	0,0010	0,0006	0,0002	0,0004	0,0006	0,0002	0,0002	0,0008	0,001	0,001
Dy	0,0080	0,0133	0,0069	0,0025	0,0059	0,0066	0,0033	0,0033	0,0051	0,005	0,005
Ho	0,0023	0,0047	0,0024	0,0011	0,0026	0,0022	0,0015	0,0016	0,0016	0,001	0,001
Er	0,0096	0,0208	0,0103	0,0068	0,0137	0,0103	0,0086	0,0084	0,0066	0,005	0,005
Tm	0,0021	0,0046	0,0025	0,0018	0,0035	0,0023	0,0023	0,0023	0,0016	0,001	0,001
Yb	0,0194	0,0415	0,0245	0,0196	0,0355	0,0238	0,0252	0,0237	0,0157	0,010	0,010
Lu	0,0042	0,0084	0,0053	0,0045	0,0074	0,0051	0,0058	0,0053	0,0036	0,002	0,002

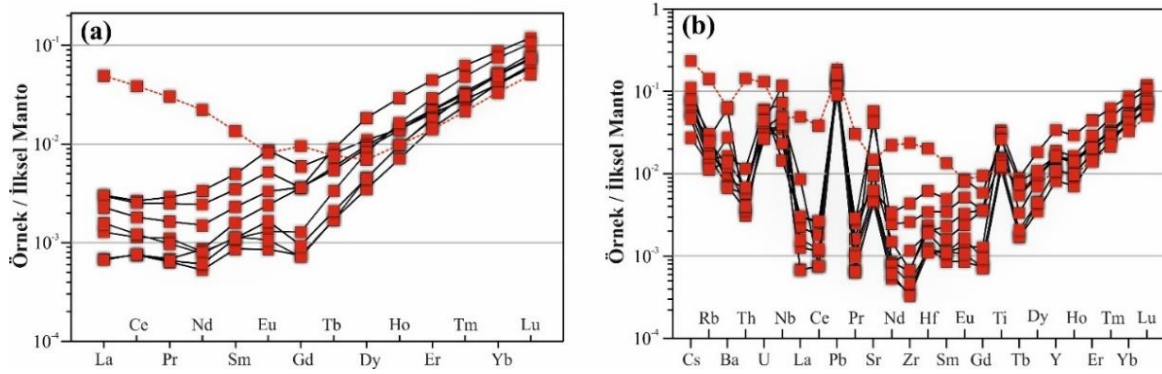
### Tüm Kayaç İz ve NTE Jeokimyası

Kızıldağ Ofiyoliti manto peridotitlerinden tüm kayaç iz ve NTE analizleri sonuçları Tablo 1b’de gösterilmiştir. Artan MgO içeriği karşısında kısmi ergime sırasında uyumsuz davranış sergileyen Yb ve Sc elementleri negatif bir yönseme göstermektedir. Tüm kayaç iz ve NTE değerleri Palme & O’Neill (2014)’in ilksel manto değerlerine oranlanarak NTE ve çoklu element diyagramları oluşturulmuştur (Şekil 6). Manto fazlarında ağır NTE’ler hafif NTE’lere kıyasla daha uyumlu davranış sergilemektedir. Şekil 6’da manto peridotitlerinin ağır NTE özelliğindeki Lu, Yb ve Tm gibi elementlerinin ilksel mantoya oranlandıklarında 10 kat ve daha fazla oranda tüketildikleri görülmekteyken ağır NTE içerikleri ise genellikle 100 kattan daha fazla oranda tüketilmiştir. Yalnızca bir örneğin hafif NTE’leri diğerlerinden ayrı olarak daha az oranda tüketilmiş/sonraki süreçlerde zenginleşmiştir. Ağır larda ortaç NTE’lere doğru belirgin bir negatif bir yönseme varken ortaçlardan hafif NTE’lere doğru çoğunlukla yataya yakın düşük oranda da negatif yönseme görülmektedir. Yalnızca bir örnekte pozitif bir yönseme görülmektedir. Söz konusu 15HS32-2 örneği diğer örneklerle karşılaştırıldığında ilksel mantoya göre özellikle ortaç ve hafif NTE’leri açısından daha az tüketildiği veya sonraki süreçlerde metazomatizmaya uğradığı düşünülmektedir (Şekil 6a).

Uyumsuz karakterlerinden ötürü büyük iyon çaplı elementlerinden Th, Ba, Rb ve Cs ilksel mantoya oranlandıkları desenlerde çoğunlukla 10 kat ve daha fazla oranda tüketilmiştir. Bu elementler (Th, Ba, Rb ve Cs) çoklu element diyagramında, manto fazlarında kısmen daha uyumlu davranış sergileyen ortaç NTE’lere kıyasla önemli derecede zenginleşme göstermektedir. Kızıldağ Ofiyoliti manto peridotitleri belirgin bir pozitif Ti, Sr, U ve Pb anomalileri göstermektedir (Şekil 6b).



**Şekil 5.** Kızıldağ Ofiyoliti’ne Ait Manto Peridotitlerinin Tüm Kayaç MgO bileşimlerinin SiO<sub>2</sub>, TiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CaO, Sc, Yb ve Y ile karşılaştırılması. Abisal ve Yay Önü Peridotit Alanları Sırasıyla Niu vd. (1997) ve Parkinson & Pearce (1998)’ten, İlksel Üst Manto Bileşimi ise Palme & O’Neill (2014)’den Alınmıştır.



Şekil 6. Kızıldağ Ofiyoliti'ne Ait Manto Peridotitlerinin Palme & O'Neill (2014)'in İlkse Manto Değerlerine Oranlanan a. NTE ve b. Çoklu Element Diyagramları

## TARTIŞMA

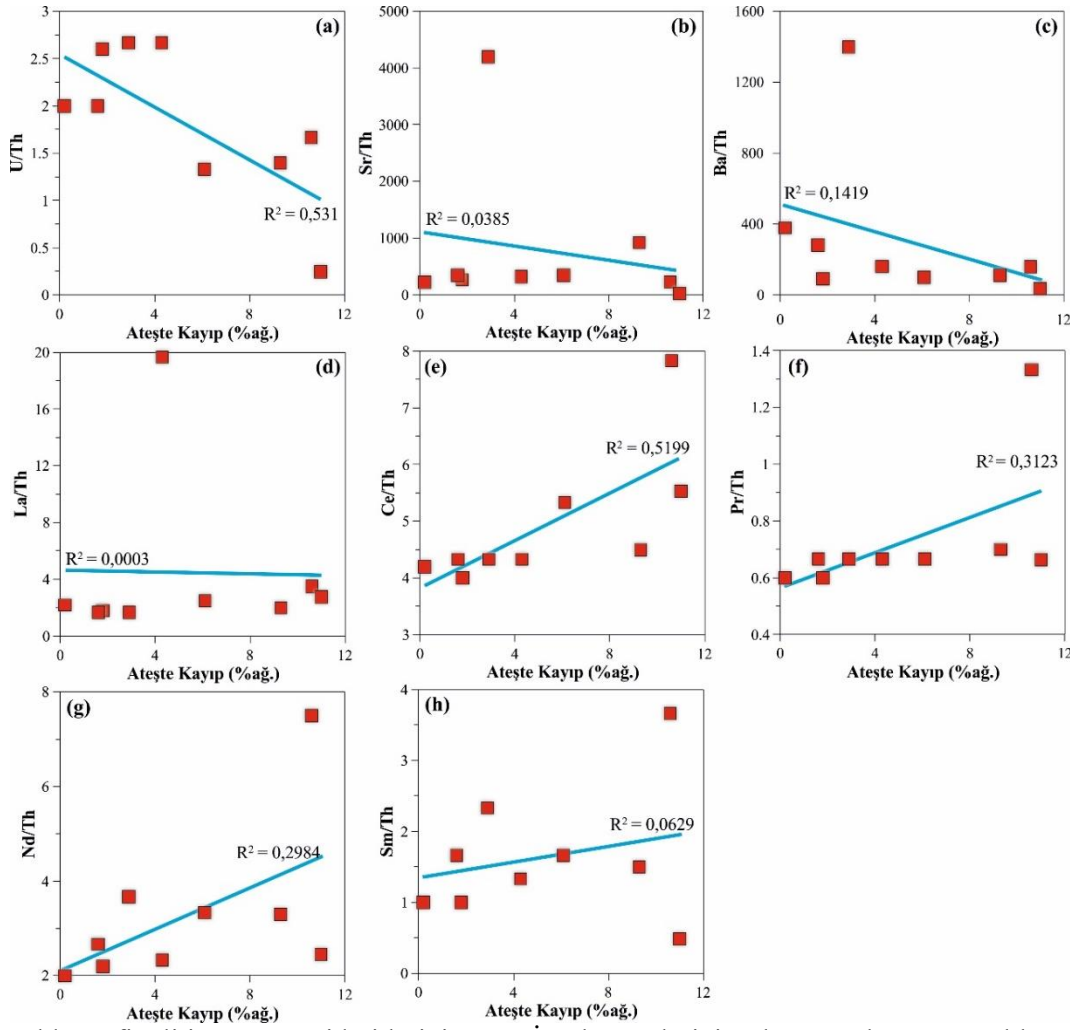
### Serpantinleşmenin İz Elementler Üzerindeki Etkisi

Manto peridotitleri genellikle farklı derecelerde serpantinleşmeye maruz kalırlar ve bu durum peridotitlerin ilksel bileşimlerinin, ana oksit bileşimlerinden ziyade iz elementleri açısından değişime uğramasına neden olmaktadır. Dolayısıyla jeokimyasal yorumlamalarda söz konusu elementlerin serpantinleşme süreçlerinden ne ölçüde etkilendiğinin değerlendirilmesi oldukça önemlidir. Manto peridotitlerindeki kısmi ergime süreçlerinin doğasını anlamak için, ergime sonrası düşük sıcaklık alterasyonu süreçlerinden (ör. serpantinleşme) en az derecede etkilenen (Niu, 2004; Pearce vd., 2000) elementlerden olan yüksek çekim alanlı elementlerin (Ti, Nb, Ta, Zr, Hf, Y, Th, Al ve ağır NTE) manto fazları hakkında önemli bilgiler sağladığı bilinmektedir (Frisby vd., 2016).

Deneysel çalışmalar hidrotermal süreçlerin diğer bazı elementlerin hareketli olmasına yol açtığını gösterse de (özellikle NTE'ler; Allen & Seyfried, 2005) bazı çalışmalar yüksek derecede serpantinleşmeye maruz kalan peridotitlerin halen ilksel bileşimleri yansıttıklarını göstermektedir. Frisby vd. (2016) Güneybatı Hint Sırtı'ndaki (SWIR) serpantinleşmiş abisal peridotitlerde, serpantinleşmenin ana mineral fazlarının iz elementleri üzerindeki etkileri ortaya çıkarılmaya çalışmıştır. Bu çalışmada araştırmacılar deniz suyunun akışkan-hareketli (*fluid-mobile*) elementler (B, Ba, U, Sr, Pb) yanı sıra hafif NTE'leri de serpantinleşmiş peridotitlerin bünyesine katabileceğini göstermişlerdir (Frisby vd., 2016). NTE'lerin ilksel manto değerlerine oranlandıkları diyagramlarda negatif Ce anomalisi görülebilir (deniz suyunun tipik bir özelliğidir; Elderfield & Greaves, 1982). Dolayısıyla bu çalışmada serpantinleşme süreçlerinde hareketli olabilecek hafif NTE'lerin (La, Ce, Pr, Nd ve Sm) ve akışkan-hareketli (*fluid-mobile*) elementlerin (U, Sr ve Ba) davranışları birlikte değerlendirilerek söz konusu elementlerin jeokimyasal yorumlamadaki güvenilirlikleri belirlenmeye çalışılmıştır.

Kızıldağ Ofiyoliti manto peridotitleri herhangi bir Ce anomalisi görülmemektedir (Şekil 6a). Şekil 7'de seçilen iz elementler hareketsiz karakterdeki Th elementine oranlanarak serpantinleşme ve alterasyon olaylarının bir göstergesi olarak kabul edilen AK değerlerine göre dağılım diyagramları çizilmiştir. Söz konusu diyagramda akışkan-hareketli (*fluid-mobile*) elementlerden U'nun Kızıldağ peridotitlerinin AK içerikleriyle orta dereceli bir korelasyona ( $R^2=0,531$ ) sahip olduğu açıkça görülmektedir (Şekil 7a). Bu da serpantinleşme sırasında sistemden U'nun uzaklaştığı (negatif ilişki) anlamına gelmektedir. Dolayısıyla söz konusu elementin jeokimyasal yorumlamalarda kullanılması konusunda çok dikkatli olunmalıdır. Sr ve Ba elementlerinin beklenen aksine AK ile herhangi bir korelasyon göstermemesi (sırasıyla  $R^2=0,0385$  ve  $R^2=0,1419$ ) söz konusu elementlerin serpantinleşme süreçlerinden etkilenmediklerine işaret eder (Şekil 7b ve c).

Hafif NTE'lerden Ce elementi AK değeri ile orta derecede ( $R^2=0,5199$ ) bir korelasyon gösterirken (Şekil 7e) diğer hafif NTE'lerde önemli bir korelasyon görülmemektedir ( $R^2<0,3123$ ; Şekil 7d, f, g ve h). Dolayısıyla Ce'nin serpantinleşme süreçlerinde sisteme eklendiği düşünüldüğünden (pozitif ilişki) Ce dışındaki diğer hafif NTE'lerin jeokimyasal yorumlamalarda dikkate alınması daha mühimdir.



Şekil 7. Kızıldağ Ofiyoliti Manto Peridotitlerinin Bazı İz Elementlerinin Th'a Oranlarına Karşılık Ateşte Kayıp Değerlerinin Değişim Diyagramları

### Kısmi Ergime ve Metazomatizma Süreçleri

Baskın olarak harzburjüt bileşimli kayalardan oluşan Kızıldağ Ofiyoliti manto peridotitleri, farklı oranlarda serpantinleşmeye maruz kalmış ve petrografik olarak dinamik metamorfizma etkisinde kaldığını gösteren dokulara sahiptir. Manto peridotitlerinin tüm kayaç MgO bileşimi, söz konusu kayaların tüketilme derecesini yansıtan bir veri olarak pek çok çalışmada kullanılmaktadır. Artan MgO içeriği kısmi ergime derecesinin (tüketilme) büyüklüğü ile doğru orantılıdır. Ana oksit jeokimyası açısından değerlendirildiğinde, manto peridotitleri  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , CaO ve  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  gibi bazı ana oksit içeriklerinin MgO içeriklerine kıyaslandığı ikili değişim diyagramları tüm örneklerin ilksel üst manto modal bileşimine kıyasla farklı derecede tüketildiklerini göstermektedir (Şekil 5). Özellikle peridotitlerin artan MgO içeriklerine karşılık  $\text{SiO}_2$  ve CaO içeriklerinde belirgin bir azalış görülürken  $\text{Al}_2\text{O}_3$  içeriğinde hafif ve  $\text{TiO}_2$  içeriklerinde ise belirgin bir korelasyon görülmemektedir (Şekil 5). Dolayısıyla söz konusu kayalar üst mantonun farklı derecelerde kısmi ergime süreçlerine maruz kalması ve ergiyik ayrılımindan sonra kalan kalıntı kayalar olduklarını göstermektedir.

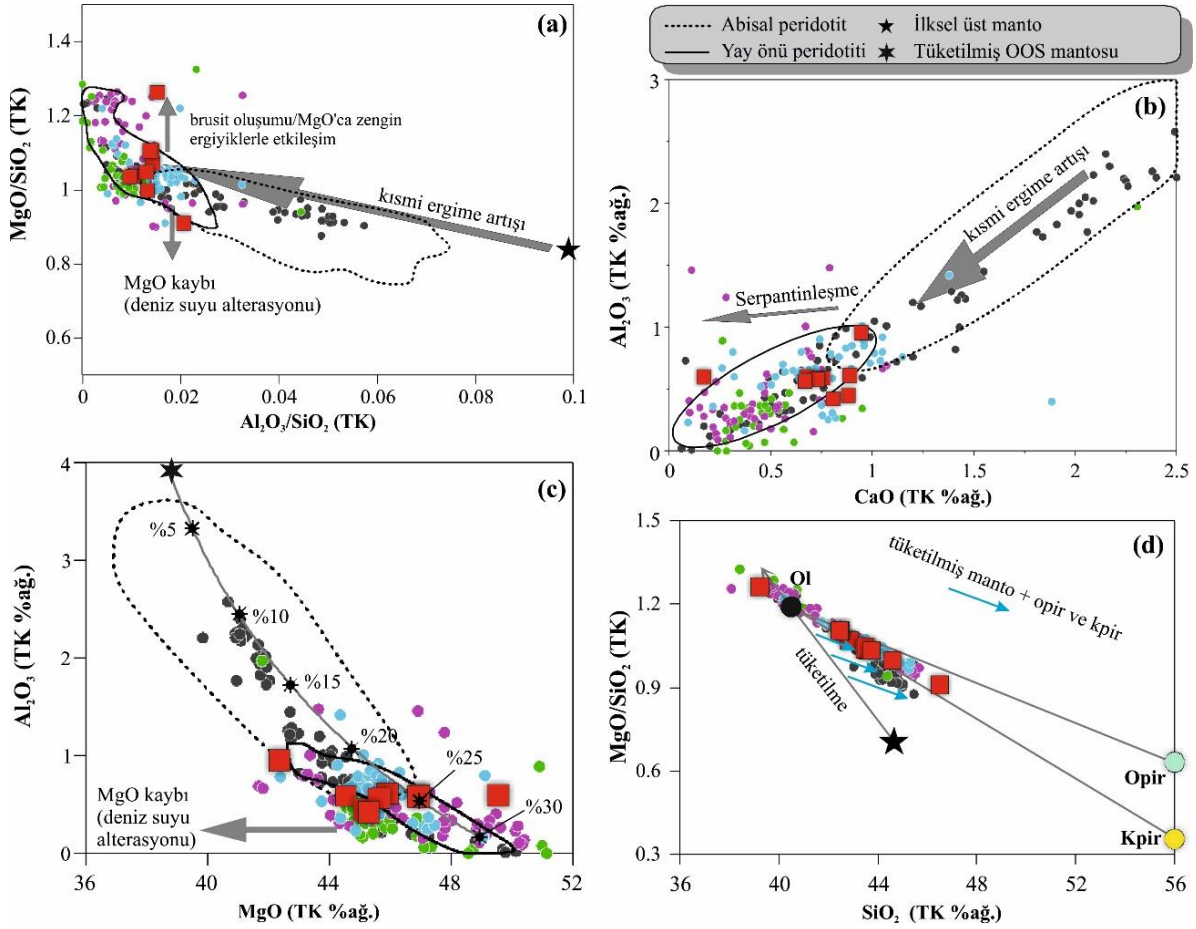
MgO/ $\text{SiO}_2$  -  $\text{Al}_2\text{O}_3$ / $\text{SiO}_2$  içeriklerindeki değişimin gösterildiği diyagramda, Kızıldağ Ofiyoliti manto peridotitlerinin Snow & Dick (1995) tarafından tanımlanan kısmi ergime artışı yönsemesine benzer bir dağılım bulunduğu görülmektedir (Şekil 8a). Bir örneğin manto yönsemesi alanının üst kısmında kısmen yüksek MgO/ $\text{SiO}_2$  oranına sahip olması söz konusu kayadaki brusit minerali oluşumuyla ya da MgO içeriği zengin ergiyiklerle oluşan bir metazomatizmayla ilişkilendirilebilir. Petrografik incelemeler sonucu brusit mineraline rastlanılmamış olması ikinci senaryonun söz konusu örnek için geçerli olduğunu düşündürmektedir. Grafiğin alt kısmına yakın kısmında yer alan, AK miktarı % 1,8 olan bir örneğin (HA23) ise serpantinleşmeye nazaran deniz suyu alterasyonunun yol açtığı MgO kaybı ile ilişkili olduğu düşünülmektedir (Niu, 2004; Hart & Zindler, 1986; Jagoutz vd., 1979). Genel olarak değerlendirildiğinde manto peridotitleri yay önü peridotitleri alanında yayılım sunmaktadır (Şekil 8a).

Manto peridotitlerinin klinopiroksen ve krom spinel modal bollukları, bu kayaçların CaO ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> içeriklerini kontrol eden en önemli etmendir. Bu kalıntı kayaçların ilksel mantoya göre daha düşük CaO ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> içermeleri, üst mantoda maruz kaldıkları farklı derecelerdeki kısmi ergime olaylarında bünyelerindeki klinopiroksen fazlarını oluşturan bileşenlerin ergiyiğe katılarak söz konusu kalıntı kayaçlardan uzaklaşması olayının bir sonucudur. CaO ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> içeriklerinin incelendiği Şekil 8b’de, örneklerin çoğunlukla yay önü peridotitleri alanı ve yakın bölgesinde yayılım sundukları görülmektedir.

Abisal peridotitler, okyanus ortası sırtı (OOS) ortamında susuz ergime koşulları altında üst mantonun düşük derecede kısmi ergimesinden (%2-15) sonra kalan kalıntı manto kayaçları olarak tanımlanır. Yay önü peridotitleri ise daha önce bir miktar tükenmiş olan üst mantonun yitim zonu ortamında, sulu koşullar altında yeniden tüketilmesiyle oluşan yüksek kısmi ergime derecesine (>%20) sahip kalıntı manto kayaçlarıdır (Üner, 2020; Uysal vd., 2012; Jean vd., 2010; Aldanmaz vd., 2009; Pearce vd., 2000; Arai, 1994; Ishii vd., 1992). Tüm kayaç Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-MgO değişim diyagramında, Kızıldağ manto peridotitlerinin ilksel üst mantoya kıyasla %20-28 civarında tüketilmiş üst manto ürünleri oldukları belirlenmiştir ve bu kayaçların yitim zonu ortamında oluşmuş yay önü peridotitleri olduğu bu diyagramla da doğrulanmıştır. Grafiğin sol tarafına yakın dağılım sunan örneklerin MgO tüketilmesi (olası deniz suyu alterasyonu) ile ilişkilendirilmiştir (Şekil 8c).

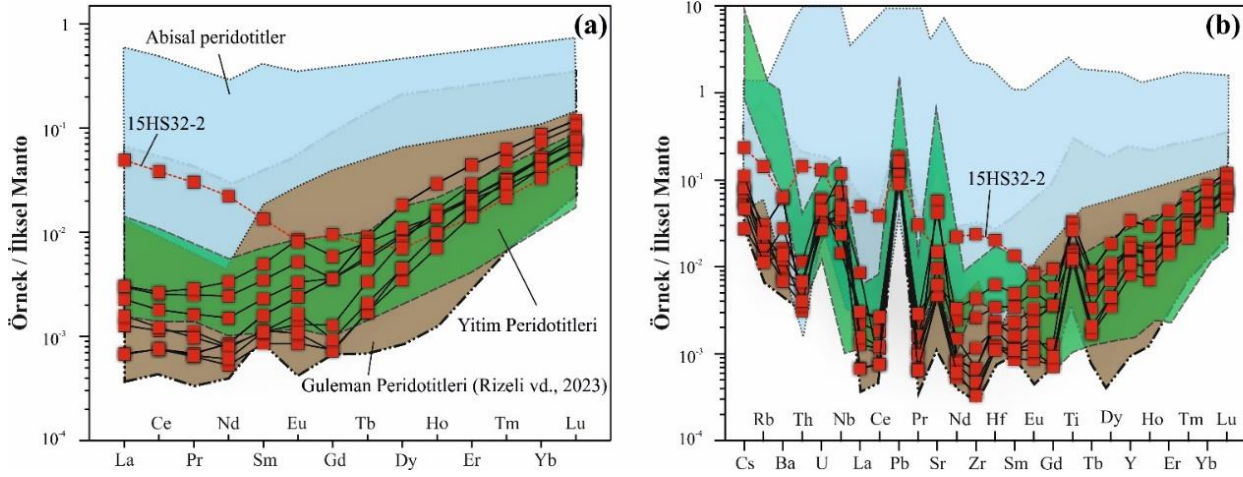
Ergiyik-kayaç etkileşiminin açıklanması için kullanılan MgO/SiO<sub>2</sub> - SiO<sub>2</sub> diyagramında (Şekil 8d), Kızıldağ Ofiyoliti manto peridotitleri genellikle ilksel üst manto bileşimi bölgesinden (siyah yıldız) olivin bileşimini temsil eden noktaya doğru dağılım sunması beklenmektedir. Fakat genellikle bu dağılım olivin-klinopiroksen, daha az oranda da olivin-ortopiroksen doğrusu üzerinde dağılım göstermektedir (Şekil 8d). Önceki çalışmalarda ergiyik-manto etkileşimi sonucu genel olarak olivin ve ortopiroksen arasında görülen dağılımın, kayaçların tüketilmiş karakterleriyle uyumlu olduğu belirtilmektedir (ör. Kelemen vd., 1992). Fakat bu genellemenin aksine Kızıldağ manto peridotitlerinin ağırlıklı olarak olivin-klinopiroksen doğrusu üzerinde/yakınında dağılım sunduğu görülmektedir. Söz konusu kayaçlara ait BSE görüntüleri incelendiğinde, bunun sebebinin özellikle ortopiroksen ile daha düşük oranda olivin minerallerinin arası ve sınırlarında ayrıca spinellere eşlik eden ikincil klinopiroksen minerallerinin varlığı olarak yorumlanabilir (Şekil 4g, h, i). Tüketilmiş karaktere sahip olan manto peridotitlerindeki söz konusu ikincil klinopiroksenlerin varlığı ergime olaylarının ardından gelişen ergiyik-kayaç metazomatizması süreçleriyle ilişkili olmalıdır.

Manto peridotitlerinin kısmi ergime derecelerinin belirlenmesi, kısmi ergime (tüketilme) olaylarından sonra bir ergiyik-kayaç etkileşiminin (metazomatizma süreçleri) olup olmadığının ve bu kayaçların hangi tektonik ortamda oluşmuş olabileceklerinin ortaya çıkartılmasında iz element çalışmaları oldukça önemli bir rehberdir (Niu, 2004; Pearce vd., 2000). Kızıldağ Ofiyoliti manto peridotitlerinin ilksel mantoya oranlanmış NTE ve bazı iz element içerik desenleri abisal peridotitler, yitim peridotitleri ve Guleman Ofiyoliti manto peridotitleriyle karşılaştırılmıştır (Şekil 9). Her iki diyagramda da açıkça görülebileceği üzere söz konusu kayaçlar genellikle yitim peridotitleri alanı ve yakınlarında dağılım sunmaktadır. Özellikle “15HS32-2” numaralı harzburjit örneğinin yüksek çekim alanlı elementlerden Th ve hafif NTE’leri La, Pr, Nd ve Sm içeriklerinde belirgin zenginleşmeler görülmektedir. Benzer şekilde söz konusu örneğin büyük iyon çaplı elementlerden Cs ve Rb elementlerinde de görülen bu zenginleşmeler (Şekil 9a), bir yitim zonu ortamında yiten levhadan ayrılan ergiyik ve/veya akışkanların manto kamasındaki ergime bölgesine taşınması ve bu bölgeyi metazomatizmaya uğratmasıyla ilgilidir. Bu metazomatizmanın izlerini belirgin pozitif Ti, Sr ve Pb anomalilerinin varlığı da kanıtlamaktadır (Şekil 9b).



**Şekil 8.** Kızıldağ Manto Peridotitlerinin Tüm Kayaç **a.** MgO/SiO<sub>2</sub> - Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub>, **b.** Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - CaO, **c.** Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - MgO ve **d.** MgO/SiO<sub>2</sub> - SiO<sub>2</sub> Diyagramları. Abisal Peridotit Alanları ve Kısmi Ergime Oranları Niu vd. (1997)'nden, Yay Önu Peridotitleri Alanı Parkinson vd. (1998) ve Ishii (1992)'den, Kısmi Ergime Artışı Yönsemesi Snow & Dick (1995)'ten Alınmıştır. İlksel Üst Manto ve Tüketilmiş OOS Mantosu Bileşimi Sırasıyla Palme ve O'Neill (2014) ile Workman & Hart (2005)'dan Alınmıştır. Tüketilmiş OOS Mantosunun 10 kbar Basınç Koşullarında Farklı Derecelerdeki (%5, %10, %15, %20, %25 ve %30) Kısmi Ergimeler Sonucu Oluşan Kimyasal Bileşimi pMELTS ile Hesaplanmıştır (Ghiorso vd., 2002).

Sulu ergiyikler harzburjitlerin içinden kanallar yardımıyla geçerek yan kayaçtaki ortopiroksenin ergimesine ve dolayısıyla ilksel bileşimi harzburjit olan kayacın önemli ölçüde kısmi ergimeye uğraması sonucu kalıntı dunitlerin oluşmasına yol açmaktadır (Zhou vd., 2005). Bu kanalların büyüklüğüne bağlı olarak harzburjit/dunit oranı farklı boyutlarda gelişir. Sulu ergiyiklerin oluşup bu şekilde manto kamasını etkileyebileceği en muhtemel tektonik ortam yitim zonudur (Uysal vd., 2007). Sulu ergiyiklerin taşındığı piroksenit litolojisindeki bu kanallar kromitlerin oluşumunda oldukça önemli rol oynamaktadır (Proenza vd., 1999; Zhou ve Robinson, 1994). Önceki çalışmalarda Türkiye'de Ortaca bölgesinde (Uysal vd., 2007) ve Guleman Ofiyotiti manto peridotitlerinde görülen bu piroksenit kanalları (Rizeli vd., 2023) dünyada farklı ofiyolitlerde de rapor edilmiştir (ör. Dilek & Morishita, 2009; Varfalvy vd., 1996; Edwards, 1995; Orberger vd., 1995). Kökensel olarak boninitik ergiyiklerin manto kamasından ayrılması ve taşınmasıyla ilişkili damarlar olarak yorumlanan bu kanallar Arsuz-Çevlik arasında peridotitleri keser halde görülmektedir (Şekil 2e). Dolayısıyla ergiyik-kayaç etkileşimi olarak açıklanan bu durum söz konusu boninitik ergiyiklerin kanallar boyunca manto peridotitlerini metazomatizmaya uğrattığını desteklemektedir.



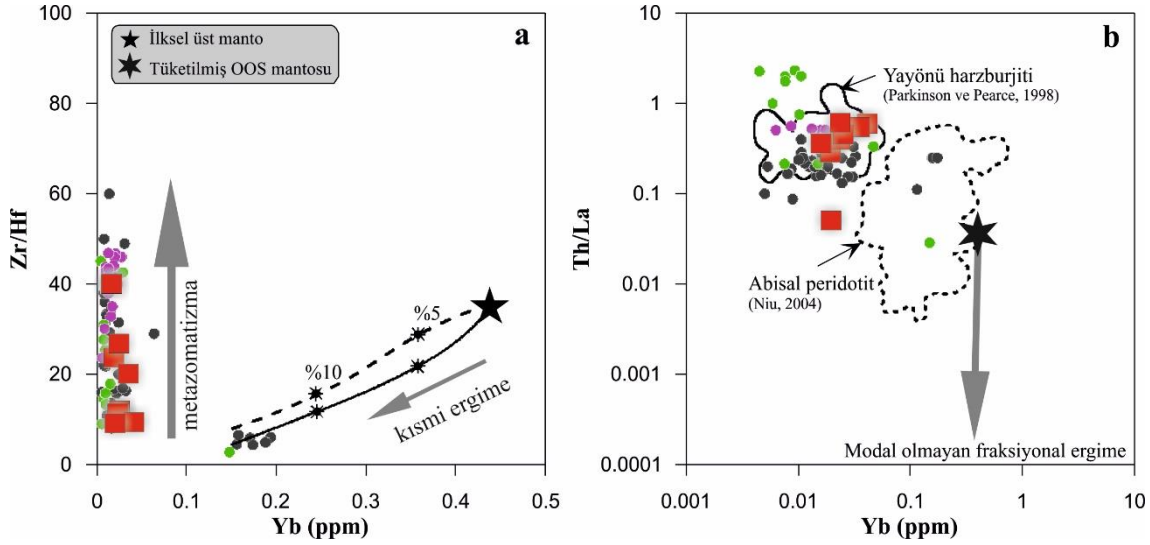
**Şekil 9.** Kızıldağ Ofiyoliti'ne Ait Manto Peridotitlerinin Palme & O'Neill (2014)'in İlkse Manto Değerlerine Oranlanan **a.** NTE ve **b.** Çoklu Element Dağılımlarının Abisal, Yitim ve Guleman Peridotitleri ile Karşılaştırılması. Abisal Peridotit Alanı Hellebrand vd. (2002), Johnson & Dick (1992) ve Niu vd. (1997) 'nden; Yitim Peridotitleri Alanı Parkinson & Pearce (1998)'ten; Guleman Peridotitleri Alanı ise Rizeli vd. (2016, 2023) ve Lin vd. (2020)'nden Alınmıştır.

Simplektit tanımı metamorfik ve magmatik kayalarda görülen, farklı mineral fazlarının karmaşık vermiküler (kurtçuk şekilli; *worm-like*) iç içe büyümeleridir (Vernon, 2004). Manto simplektitlerinin oluşumu için önerilen en genel kabul, ergiyik-kayaç etkileşimleri ve ergiyikten mineral fazlarının çökmesi olayıdır (ör. Godard vd., 2008; Suhr vd., 2008; Seyler vd., 2007). Benzer yapılar, Orta Atlantik Sırtı peridotitlerinde de tanımlanmıştır ve bunların varlığı, OOS tipi veya alkalin ergiyiklerin yan kayaçla etkileşimine atfedilir ve bu da spinel-ortopiroksen-klinopiroksen iç içe büyümelerinin çok fazlı çökmesine neden olur (Suhr vd., 2008; Seyler vd., 2007). Kızıldağ manto peridotitlerinde olivinin spinellerde kapanım şeklinde bulunması (Şekil 4i), kurtçuk şekilli (*worm-like*) klinopiroksen-ortopiroksen-spinel simplektitlerin varlığı (Şekil 4h, i) dokusal özellikler, söz konusu kayalardaki ergiyik-kayaç metazomatizmasının tipik bir kanıtıdır (Bédard vd., 2009; Dilek & Morishita, 2009; Hellebrand vd., 2002).

Kalıntı peridotitlerde klinopiroksenlerin bolluğuyla kontrol edilen Zr/Hf değeri (Hart & Dunn, 1993) söz konusu kayaların artan tüketilme oranıyla azalması beklenir. Kızıldağ peridotitlerinin belirgin bir Zr/Hf-Yb dağılımının olmaması mantodaki kısmi ergimelerden sonra gelişen metazomatizmanın bir sonucu olarak yorumlanmaktadır (Takazawa vd., 2000; Şekil 10a).

Yitim zonu magmatizması için peridotitlerin solidüsünü düşürmek için hemen hemen her zaman sulu akışkan fazlar gereklidir (Grove vd., 2012; Shervais & Jean, 2012). Aslında Kızıldağ peridotitlerindeki yüksek Pb içeriği (dolayısıyla daha düşük Ce/Pb oranları) sulu fazların ilavesinden kaynaklanabilir (Şekil 9b). Söz konusu akışkan fazlarla birlikte silikat ergiyikler de manto kamasını metazomatize etmiş olabilir. Kızıldağ manto peridotitlerinde gözlemlenen petrografik ve jeokimyasal özelliklere göre bu sulu akışkan fazlar tek başına etkin olduğunu söylemek yeterli değildir. Kızıldağ peridotitlerinin iz element jeokimyasında (Şekil 9b) yüksek uyumsuzluğa sahip elementlerin önemli derecede zenginleşmesi nedeniyle metazomatizma süreçlerinde silikat ergiyiklerin etkisi sulu akışkanlara kıyasla tercih edilmelidir. Yüksek derecede uyumsuz elementler ergiyiklerde daha fazla zenginleşirken, sulu akışkan fazlar belirli koşullar altında daha yüksek çözünürlüğe sahip akışkan-hareketli (*fluid-mobile*) elementleri harekete geçirme ve zenginleştirme eğilimindedir. Şekil 10b'de, Kızıldağ peridotitlerinin ya yönü harzburjileri alanında yüksek Th/La oranına sahip olduğu görülmektedir. Bu durum peridotitlerin tüketilmiş doğasına aykırı görülmekte, yüksek Th/La oranına sahip bir ergiyiğin sisteme olduğu (metazomatizmaya uğrattığı) anlamına gelmektedir. "Th" genellikle bir yitimle ilişkilendirilir ve OOS bazaltlarıyla karşılaştırıldığında genellikle yay ile ilişkili magmalarda yüksektir (Pearce, 2008). Ayrıca yay magmatizmasında, yiten sedimanların etkisiyle yüksek Th/Nb ve Th/La değerlerine sahip olduğu da rapor edilmiştir (Plank, 2005). Bu nedenle, Kızıldağ peridotitlerinin, sulu sedimanlardan kaynaklı ergiyiklerin de dâhil olduğu bir metazomatizmaya maruz kalmış olması mümkündür. Yitim başlangıcı (*subduction initiation: SI*) magmatizması sırasında sediman ergimelerinin varlığını öne süren son çalışmalar da bu durumu destekler niteliktedir (Kusano vd., 2017; Haase vd., 2015).





Şekil 10. Kızıldağ Manto Peridotitlerinin a. Zr/Hf ve b. Th/La Oranlarının Yb İçeriğine Göre Değişim Grafikleri

## SONUÇLAR

GD Anadolu Ofiyolit Kuşağı'nda bulunan Kızıldağ (Hatay) Ofiyoliti manto peridotitlerinin materyal olarak kullanıldığı bu çalışmada petrografik ve tüm kayaç jeokimyası yorumlanarak aşağıdaki sonuçlara ulaşılmıştır:

Kızıldağ Ofiyoliti manto peridotitlerinde ikincil klinopiroksenin varlığı, olivinin spinel içindeki kapanımları ve özellikle kurtçuk şekilli (*worm-like*) piroksen-spinel birliktelikleri bu kayaçların oluşumunda gerçekleşen ergiyik kayaç etkileşiminin (metazomatizmanın) petrografik bir kanıtıdır. Ayrıca özellikle saha gözlemlerinde harzburjitleri kesen ortopiroksen damarlarının varlığı bir yitim zonu ortamını işaret etmesi yanı sıra ergiyiklerin (boninitik) yan kayacını metazomatizmaya uğratarak taşındığı kanallar olarak yorumlanmıştır. Esas olarak harzburjit ve az oranda dünitten ibaret olan manto peridotitlerinin bazı ana oksit ( $\text{CaO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ve  $\text{TiO}_2$ ) içeriklerinin önemli ölçüde düşük bollukta olması tüketilmiş doğalarıyla uyumludur. Hem ana oksit hem de ilkel mantoya normalize edilmiş iz ve NTE değerleri söz konusu peridotitlerin %20 ilâ %28 arasında bir kısmi ergimeye (tüketilmeye) maruz kalan yay önu ortamda oluşmuş kalıntı kayaçlar olduğunu göstermektedir. Bazı örneklerde görülen U şekilli NTE desenleri, Cs, Rb zenginleşmeleri, pozitif Ti, Sr ve Pb desenleri bu uyumsuz elementlerce zengin ergiyik ve/veya akışkanların söz konusu kalıntı kayaçlarla oluşturduğu metazomatizmanın bir sonucudur. Yüksek Zr/Hf - Yb ve Th/La - Yb içerikleri de tüketilmiş karakterdeki peridotitlerin metazomatizma süreçlerinin bir sonucu olarak ortaya çıkmıştır. Metazomatizma sonucunda sulu akışkanlar, boninitik ergiyikler ve yiten levhadaki sulu sedimanların ergimesi sonucu oluşan ergiyiklerin söz konusu metazomatizmada rol oynadığı düşünülmektedir. Özetle Kızıldağ manto peridotitleri, %20 ilâ %28 oranında kısmi ergimeye maruz kalan kalıntı kayaçlar olup yitim zonu tektonik ortamında oluşmuş ve yitim zonu ortamını karakterize eden metazomatizma kanıtları gösteren yay önu peridotitleridir.

## TEŞEKKÜR

Bu çalışma TÜBİTAK tarafından 117Y303 numaralı 1002-Hızlı Destek Projesi ile maddi olarak desteklenmiştir. Saha çalışmalarındaki desteklerinden ötürü arkadaşım rahmetli Furkan CANSIZ'a minnettarım. Tüm kayaç iz ve NTE analizleri 2017 yılında Yer Bilimleri Enstitüsü, Sinica Akademisi, Tayvan'da gerçekleştirilmiştir. Analizlerin ücretsiz olarak yapılması için laboratuvarlarına bizleri davet eden Sun-Lin CHUNG'a ve oldukça düşük deteksiyon limitlerinde iz ve NTE analizlerinin yapılmasında büyük katkısı olan Fu-Lung LIN'e teşekkür ederiz. Bu çalışma Mustafa Eren RİZELİ'nin doktora tezinin bir parçasından niteliğindedir.

## KAYNAKLAR

Aldanmaz, E., van Hinsbergen, D. J. J., Yıldız-Yüksekol, Ö., Schmidt, M. W., McPhee, P. J., Meisel, T., Güçtekin, A., Mason, P. R. D. (2020). Effects of reactive dissolution of orthopyroxene in producing incompatible element depleted melts and refractory mantle residues during early fore-arc spreading: constraints from ophiolites in eastern Mediterranean. *Lithos*, 360–361, 105438. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2020.105438>

Aldanmaz, E., Schmidt, M. W., Gourgaud, A., & Meisel, T. (2009). Mid-ocean ridge and supra-subduction geochemical signatures in spinel–peridotites from the Neotethyan ophiolites in SW Turkey: Implications for upper mantle melting processes. *Lithos*, 113(3–4), 691–708.

<https://doi.org/10.1016/j.lithos.2009.03.010><https://doi.org/10.1016/j.lithos.2009.03.010>

Allen, D.E., ve Seyfried, W.E. (2005). REE controls in ultramafic hosted MOR hydrothermal systems: An experimental study at elevated temperature and pressure. *Geochim. Cosmochim. Acta* 69, 675–683. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2004.07.016>

Arai, S. (1994). Characterization of spinel peridotites by olivine-spinel compositional relationships: Review and interpretation. *Chemical Geology*, 113(3), 191–204. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(94\)90066-3](https://doi.org/10.1016/0009-2541(94)90066-3)

Bağcı, U., Parlak, O., & Höck, V. (2008). Geochemistry and tectonic environment of diverse magma generations forming the crustal units of the Kızıldağ (Hatay) Ophiolite, southern Turkey. *Turkish Journal of Earth Sciences*, 17(1), 43–71.

Bağcı, U., Parlak, O., & Höck, V. (2005). Whole-rock and mineral chemistry of cumulates from the Kızıldağ (Hatay) ophiolite (Turkey): clues for multiple magma generation during crustal accretion in the southern Neotethyan ocean. *Mineralogical Magazine*, 69(1), 53–76. <https://doi.org/10.1180/0026461056910234>

Bédard, É., Hébert, R., Guilmette, C., Lesage, G., Wang, C.S., Dostal, J. (2009). Petrology and geochemistry of the Saga and Sangsang ophiolitic massifs, Yarlung Zangbo Suture Zone, Southern Tibet: evidence for an arc–back-arc origin. *Lithos* 113,48–67.

Bingöl, A. F., Beyarslan, M., Lin, Y.-C., & Lee, H.-Y. (2018). Geochronological and geochemical constraints on the origin of the Southeast Anatolian ophiolites, Turkey. *Arabian Journal of Geosciences*, 569(11), 1–40. <https://doi.org/10.1007/s12517-018-3880-0>

Birck, J.L., Barman, M.R. ve Capmas, F. (1997). Re-Os isotopic measurements at the femtomole level in natural samples, . *Geostand Newsletter*, cilt 21, ss. 19-27. [doi.org/10.1111/j.1751-908X.1997.tb00528.x](https://doi.org/10.1111/j.1751-908X.1997.tb00528.x)

Birner, S.K., Warren, J.M., Cottrell, E., Davis, F.A., Kelley, F.A., Fallon, T.J. (2017). Forearc peridotites from Tonga record heterogeneous oxidation of the mantle following subduction initiation. *J. Petrol.* 58, 1755–1780.

Chen, C., Su, B.-X., Xiao, Y., Uysal, İ., Lin, W., Chu, Y., Jing, J.-J., Sakyi, P. A. (2020). Highly siderophile elements and Os isotope constraints on the genesis of peridotites from the Kızıldağ ophiolite, southern Turkey. *Lithos*, 368–369, 105583. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2020.105583>

Cohen, A.S. ve Waters, F.G. (1996). Separation of osmium from geological materials by solvent extraction for analysis by thermal ionisation mass spectrometry, *Anal. Chim. Acta*, cilt 332, ss. 269-275. [doi.org/10.1016/0003-2670\(96\)00226-7](https://doi.org/10.1016/0003-2670(96)00226-7)

Creaser, R.A., Papanastassiou, D.A. ve Wasserburg, G.J. (1991). Negative thermal ion mass spectrometry of osmium, rhenium, and iridium, *Geochim. Cosmochim. Acta*, cilt 55, ss. 397-401. [doi.org/10.1016/0016-7037\(91\)90427-7](https://doi.org/10.1016/0016-7037(91)90427-7)

Dick, H.J.B., Bullen, T. (1984). Chromium spinel as a petrogenetic indicator in abyssal and Alpine-type peridotites and spatially associated lavas. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 86, 54–76.

Dilek, Y., & Furnes, H. (2009). Structure and geochemistry of Tethyan ophiolites and their petrogenesis in subduction rollback systems. *Lithos*, 113(1–2), 1–20. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2009.04.022>

Dilek, Y., & Morishita, T. (2009). Melt migration and upper mantle evolution during incipient arc construction: Jurassic Eastern Mirdita ophiolite, Albania. *Island Arc* 18(4), 551–554. <https://doi.org/10.1111/j.1440-1738.2009.00692.x>

Dilek, Y., and Thy, P. (2009). Island arc tholeiite to boninitic melt evolution of the Cretaceous Kızıldağ (Turkey) ophiolite: Model for multi-stage early arc-forearc magmatism in Tethyan subduction factories. *Lithos*, 113(1–2), 68–87. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2009.05.044>

Dilek, Y. (2006). Collision tectonics of the Mediterranean region: Causes and consequences. *Special Paper of the Geological Society of America*, 409(May), 1–13. [https://doi.org/10.1130/2006.2409\(01\)](https://doi.org/10.1130/2006.2409(01))

- Dilek, Y., and Flower, M. F. J. (2003). Arc-trench rollback and forearc accretion: 2. A model template for ophiolites in Albania, Cyprus, and Oman. *Geological Society, London, Special Publications*, 218(1), 43–68. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.2003.218.01.04>
- Dilek, Y. and Thy, P. (1998). Structure, petrology and seafloor spreading tectonics of the Kızıldağ ophiolite, Turkey, edited by R.A. Mills, K. Harrison (Ed.), *Modern Ocean Floor Processes and the Geological Record*, London, Geological Society, *London, Special Publications*, 148, 43–69. [doi.org/10.1144/GSL.SP.1998.148.01.04](https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1998.148.01.04)
- Edwards, S. J. (1995). Boninitic and tholeiitic dykes in the Lewis Hills mantle section of the Bay of Islands ophiolite: implications for magmatism adjacent to a fracture zone in a backarc spreading environment. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 32(12), 2128–2146. <https://doi.org/10.1139/e95-166>
- Eggins, S. M., Woodhead, J. D., Kinsley, L. P. J., Mortimer, G. E., Sylvester, P., McCulloch, M. T., Hergt, J. M., Handler, M. R. (1997). A simple method for the precise determination of  $\geq 40$  trace elements in geological samples by ICPMS using enriched isotope internal standardisation. *Chemical Geology*, 134(4), 311–326. [https://doi.org/10.1016/S0009-2541\(96\)00100-3](https://doi.org/10.1016/S0009-2541(96)00100-3)
- Elderfield, H., and Greaves, M.J. (1982) The rare earth elements in seawater. *Nature* 296, 214–219. <https://doi.org/10.1038/296214a0>.
- Erendil, M. (1984). Petrology and structures of the upper crustal units of the Kızıldağ ophiolite, O. Tekeli, M.C. Göncüoğlu (Ed.), *Proceedings of International Symposium on the Geology of the Tauride Belt, Mineral Research and Exploration Institute (MTA) of Turkey Publications* (pp. 269–284). Ankara.
- Feng, G., Yang, J., Niu, X., Liu, F., Qiu, T., Dilek, Y. (2021). Formation processes and tectonic implications of mantle peridotites of the Yushigou ophiolite in the North Qilian Orogenic Belt, NW China. *Lithos*, 400–401(July), 106430. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2021.106430>
- Frisby, C., Bizimis, M., and Mallick, S. (2016). Seawater-derived rare earth element addition to abyssal peridotites during serpentinization. *Lithos* 248–251, 432–454. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2016.01.025>
- Furnes, H., and Safonova, I. (2019). Ophiolites of the Central Asian Orogenic Belt: Geochemical and petrological characterization and tectonic settings. *Geoscience Frontiers*, 10(4), 1255–1284. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2018.12.007>
- Ghiorso, M.S., Hirschmann, M.M., Reiners, P.W., Kress, V.C. (2002). The pMELTS: a re- vision of MELTS aimed at improving calculation of phase relations and major element partitioning involved in partial melting of the mantle at pressures up to 3 GPa. *Geochem. Geophys. Geosyst.* 3.
- Godard M., Lagabrielle Y., Alard O. Harvey J., 2008. Geo- chemistry of the highly depleted peridotites drilled at ODP Sites 1272 and 1274 (Fifteen-Twenty Fracture Zone, Mid-Atlantic Ridge): Implications for mantle dynamics beneath a slow spreading ridge. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 267: 410-425.
- Griffin, W. L., O'Reilly, S. Y., Afonso, J. C., Begg, G. C. (2009). The composition and evolution of lithospheric mantle: A re-evaluation and its tectonic implications. *Journal of Petrology*, 50(7), 1185–1204. <https://doi.org/10.1093/petrology/egn033>
- Grove, T.L., Till, C.B., and Krawczynski, M.J. (2012). The role of H<sub>2</sub>O in subduction zone magmatism. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* 40, 413–439. <https://doi.org/10.1146/annurev-earth-042711-105310>.
- Haase, K.M., Freund, S., Koepke, J., Hauff, F., Erdmann, M. (2015). Melts of sediments in the mantle wedge of the Oman ophiolite. *Geology* 43, 275–278. <https://doi.org/10.1130/G36451.1>.
- Hart, S. R., and Dnnn, T. (1993). Experimental cpx/melt partitioning of 24 trace elements. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 113, 1–8. <https://doi.org/10.1007/BF00320827>
- Hart, S. R., and Zindler, A. (1986). In search of a bulk-Earth composition. *Chemical Geology*, 57(3–4), 247–267. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(86\)90053-7](https://doi.org/10.1016/0009-2541(86)90053-7)
- Hellebrand, E., Snow, J. E., Hoppe, P., Hofmann, A. W. (2002). Garnet-field melting and late-stage refertilization in “residual” abyssal peridotites from the Central Indian Ridge. *Journal of Petrology*, 43(12), 2305–2338. <https://doi.org/10.1093/petrology/43.12.2305>
- Iizuka, Y., Bellwood, P., Hung, H.C., Dizon, E.Z. (2005). A non-destructive mineralogical study of nephritic artifacts from Itbayat Island, Batanes, Northern Philippines, *Journal of Austronesian Studies*, cilt 1(1), ss. 80-105

- Inwood, J., Morris, A., Anderson, M. W., Robertson, A. H. F. (2009). Neotethyan intraoceanic microplate rotation and variations in spreading axis orientation: Palaeomagnetic evidence from the Hatay ophiolite (southern Turkey). *Earth and Planetary Science Letters*, 280(1–4), 105–117. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2009.01.021>
- Ishii, T., Robinson, P. T., Maekawa, H., Fiske, R. (1992). Petrological Studies of Peridotites from Diapiric Serpentine Seamounts in the Izu-Ogasawara-Mariana Forearc, Leg 125. In *Proceedings of the Ocean Drilling Program, 125 Scientific Results*. Ocean Drilling Program. <https://doi.org/10.2973/odp.proc.sr.125.129.1992>
- Jagoutz, E., Palme, H., Baddenhausen, H., Blum, K., Cendales, M., Dreibus, G., Spettel, B., Lorenz, V. Vanke, H. (1979). The abundance of major, minor and trace elements in the earth's mantle as derived from primitive ultramafic nodules, *Geochimica et Cosmochimica Acta* 11, 2031–2050.
- Jean, M. M., Shervais, J. W., Choi, S.-H., Mukasa, S. B. (2010). Melt extraction and melt refertilization in mantle peridotite of the Coast Range ophiolite: an LA-ICP-MS study. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 159(1), 113–136. <https://doi.org/10.1007/s00410-009-0419-0>
- Jochum, K.P., Weis, U., Schwager, B., Stoll, B., Wilson, S.A., Haug, G.H., Andreae, M.O., Enzweiler, J. (2016). Reference values following ISO guidelines for frequently requested rock reference materials. *Geostand. Geoanal. Res.* 40, 333–350. <https://doi.org/10.1111/j.1751-908X.2015.00392.x>
- Johnson, C.M. and Beard, B.L. (1999). Correction of instrumentally produced mass fractionation during isotopic analysis of Fe by thermal ionization mass spectrometry, *Inter J Mass Spectrom* 193, 87–99. [doi.org/10.1016/S1387-3806\(99\)00158-X](https://doi.org/10.1016/S1387-3806(99)00158-X)
- Johnson K. T. M. and Dick H. J. B. (1992) Open-system melting and temporal and spatial variation of peridotite and basalts at the Atlantis II Fracture Zone. *J. Geophys. Res.* 97, 9219–9241.
- Karaoğlan, F., Parlak, O., Klötzli, U., Thöni, M., Koller, F. (2013). U-Pb and Sm-Nd geochronology of the Kızıldağ (Hatay, Turkey) ophiolite: Implications for the timing and duration of suprasubduction zone type oceanic crust formation in the southern Neotethys. *Geological Magazine*, 150(2), 283–299. <https://doi.org/10.1017/S0016756812000477>
- Kelemen, P.B., Hirth, G., Shimizu, N., Spiegelman, M., Dick, H.J.B., 1997. A review of melt migration processes in the adiabatically upwelling mantle beneath oceanic spreading ridges. *Philos. Trans. R. Soc. London, A* 355 (1723), 283–318.
- Kelemen, P. B., Dick, H. J. B., and Quick, J. E. (1992). Formation of harzburgite by pervasive melt/rock reaction in the upper mantle. *Nature*, 358(6388), 635–641. <https://doi.org/10.1038/358635a0>
- Kusano, Y., Umino, S., Shinjo, R., Ikei, A., Adachi, Y., Miyashita, S., Arai, S. (2017). Contribution of slab-derived fluid and sedimentary melt in the incipient arc magmas with development of the paleo-arc in the Oman Ophiolite. *Chem. Geol.* 449, 206–225. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2016.12.012>
- Kusky, T. M., Windley, B. F., Safonova, I., Wakita, K., Wakabayashi, J., Polat, A., Santosh, M. (2013). Recognition of ocean plate stratigraphy in accretionary orogens through Earth history: A record of 3.8 billion years of sea floor spreading, subduction, and accretion. *Gondwana Research*, 24(2), 501–547. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2013.01.004>
- Lin, K. Y., Wang, K. L., Chung, S. L., Bingöl, A. F., Iizuka, Y., Lee, H. Y. (2020). Tracking the magmatic response to subduction initiation in the forearc mantle wedge: Insights from peridotite geochemistry of the Guleman and Kızıldağ ophiolites, Southeastern Turkey. *Lithos*, 376–377, 105737. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2020.105737>
- Maruyama, S., Liou, J. G., and Terabayashi, M. (1996). Blueschists and eclogites of the world and their exhumation. *International Geology Review*, 38(6), 485–594. <https://doi.org/10.1080/00206819709465347>
- Mercier, J.-C. C and Nicolas, A. (1975). Textures and fabrics of upper-mantle peridotites as illustrated by xenoliths from basalts. *Journal of Petrology*, 16(2), 454–487. <https://doi.org/10.1093/petrology/16.2.454>
- MTA. (2002). *1/500000 Türkiye Jeoloji Haritası (M. Genel)*. Maden Tetkik ve Arama Genel Müdürlüğü, Ankara
- Niu, Y. (2004). Bulk-rock major and trace element compositions of abyssal peridotites: Implications for mantle melting, melt extraction and post-melting processes beneath Mid-Ocean ridges. *Journal of Petrology*, 45(12), 2423–2458. <https://doi.org/10.1093/petrology/egh068>
- Niu, Y. (1997). Mantle melting and melt extraction processes beneath ocean ridges: Evidence from abyssal peridotites. *Journal of Petrology*, 38(8), 1047–1074. <https://doi.org/10.1093/petroj/38.8.1047>

- Orberger, B., Lorandb, J. P., Girardeau, J., Merciera, J. C. C., Pitragool, S. (1995). Petrogenesis of ultramafic rocks and associated chromitites in the Nan Uttaradit ophiolite, Northern Thailand. *Lithos* 35, 153–182.
- Pagé, P., Bédard, J.H., and Tremblay, A. (2009). Geochemical variations in a depleted fore-arc mantle: The Ordovician Thetford Mines ophiolite. *Lithos*, 113, 21–47, doi:10.1016/j.lithos.2009.03.030.
- Palme, H., and O'Neill, H. S. C. (2014). Cosmochemical Estimates of Mantle Composition. *Treatise on Geochemistry*, 1–39. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-095975-7.00201-1>
- Parkinson, I. J., and Pearce, J. A. (1998). Peridotites from the Izu-Bonin-Mariana Forearc (ODP Leg 125): Evidence for Mantle Melting and Melt-Mantle Interaction in a Supra-Subduction Zone Setting. *Journal of Petrology*, 39(9), 1577–1618. <https://doi.org/10.1093/petroj/39.9.1577>
- Parlak, O., Rızaoğlu, T., Bağci, U., Karaoğlan, F., Hock, V. (2009). Tectonic significance of the geochemistry and petrology of ophiolites in southeast Anatolia, Turkey. *Tectonophysics*, 473(1–2), 173–187. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2008.08.002>
- Pearce, J. A., and Robinson, P. T. (2010). The Troodos ophiolitic complex probably formed in a subduction initiation, slab edge setting. *Gondwana Research* 18(1), 60–81. <https://doi.org/10.1016/J.GR.2009.12.003>
- Pearce, J. A., Barker, P. F., Edwards, S. J., Parkinson, I. J., Leat, P. T. (2000). Geochemistry and tectonic significance of peridotites from the South Sandwich arc-basin system, South Atlantic. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 139(1), 36–53. <https://doi.org/10.1007/s004100050572>
- Pearce, J. A., van der Laan, S. R., Arculus, R. J., Murton, B. J., Ishii, T., Peate, D. W., Parkinson, I. J. (1992). Boninite and harzburgite from leg 125 (Bonin-Mariana Forearc): a case study of magma genesis during the initial stages of subduction. In *Proceedings of the Ocean Drilling Program, 125 Scientific Results*. Ocean Drilling Program. <https://doi.org/10.2973/odp.proc.sr.125.172.1992>
- Pearce, J.A. (2008). Geochemical fingerprinting of oceanic basalts with applications to ophiolite classification and the search for Archean oceanic crust. *Lithos* 100, 14–48. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2007.06.016>
- Pişkin, O.E., Delaloye, M., Moritz, R., Wagner, J.J. (1990). Geochemistry and geothermometry of the Hatay complex Turkey: implication for genesis of the ophiolite sequence. Pp. 329-337 in: Proceedings of Troodos Ophiolite Symposium (J. Malpas, E. Moores, A. Panayiotou and C. Xenophontos, editors). Geological Survey, Cyprus.
- Plank, T. (2005). Constraints from Thorium/Lanthanum on sediment recycling at subduction zones and the evolution of the continents. *J. Petrol.* 46, 921–944. <https://doi.org/10.1093/petrology/egi005>.
- Proenza, J., Gervilla, F., Melgarejo, J. C., Bodinier, J. L. (1999). Al- and Cr-rich chromitites from the Mayari-Baracoa ophiolitic belt (Eastern Cuba): Consequence of interaction between volatile-rich melts and peridotites in suprasubduction mantle. *Economic Geology*, 94(4), 547–566. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.94.4.547>
- Rizeli, M. E. (2020). *GD Anadolu Orojenik Kuşağı ofiyolitlerinin manto peridotitleri bileşimleri ve petrolojisi: ana elementi, iz element jeokimyası, mineral kimyası ve Fe, Mg ve Os izotopları*. Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ.
- Rizeli, M. E., Bingöl, A. F., Wang, K., Lee, H. (2023). Abyssal and forearc features of mantle peridotites in the Guleman ophiolite in SE Turkey. *Lithos*, 436–437, 106958. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2022.106958>
- Rizeli, M. E., Beyarslan, M., Wang, K.-L., Bingöl, A. F. (2016). Mineral chemistry and petrology of mantle peridotites from the Guleman ophiolite (SE Anatolia, Turkey): Evidence of a forearc setting. *Journal of African Earth Sciences*, 123, 392–402. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2016.08.013>
- Saccani, E., Dilek, Y., Marroni, M., Pandolfi, L. (2015) Continental margin ophiolites of neotethys: Remnants of ancient Ocean–Continent Transition Zone (OCTZ) lithosphere and their geochemistry, mantle sources and melt evolution patterns. *Episodes*, 38, 230–249, doi: 10.18814/epiugs/2015/v38i4/82418.
- Saka, S., Uysal, I., Kapsiotis, A., Bağcı, U., Ersoy, E. Y., Su, B.-X., Seitz, H.-M., Hegner, E. (2019). Petrological characteristics and geochemical compositions of the Neotethyan Mersin ophiolite (southern Turkey): Processes of melt depletion, refertilization, chromitite formation and oceanic crust generation. *Journal of Asian Earth Sciences*, 176, 281–299. <https://doi.org/10.1016/J.JSEAES.2019.01.003>

- Saka, S., Uysal, I., Akmaz, R. M., Kaliwoda, M., Hochleitner, R. (2014). The effects of partial melting, melt-mantle interaction and fractionation on ophiolite generation: Constraints from the late Cretaceous Pozanti-Karsanti ophiolite, southern Turkey. *Lithos*, 202–203, 300–316. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2014.05.027>
- Selçuk, H. (1981). *Étude géologique de la partie méridionale du Hatay (Turquie)*. Thèse de doctorat, Université de Genève, Switzerland
- Seyler M., Lorand J.-P., Dick H.J.B. Drouin M. (2007). Pervasive melt percolation reactions in ultra-depleted refractory harzburgites at the Mid-Atlantic Ridge, 15° 20'N: ODP Hole1274A. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 153: 303-319.
- Shirey, S.B. and Walker, R.J. (1995). Carius tube digestion for low-blank rhenium-osmium analyses, . *Anal. Chim. Acta*, cilt 67, ss. 2136-2141
- Snow, J. E., and Dick, H. J. B. (1995). Pervasive magnesium loss by marine weathering of peridotite. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59(20), 4219–4235. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(95\)00239-V](https://doi.org/10.1016/0016-7037(95)00239-V)
- Stern, R.J., Reagan, M., Ishizuka, O., Ohara, Y., Whattam, S. (2012). To understand subduction initiation, study forearc crust: to understand forearc crust, study ophiolites. *Lithosphere* 4, 469–483
- Suhr, G., Kelemen, P., and Paulick, H. (2008). Microstructures in Hole 1274A peridotites, ODP Leg 209, Mid-Atlantic Ridge: Tracking the fate of melts percolating in peridotite as the lithosphere is intercepted. *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 9 (Q03012), 1–23. <https://doi.org/10.1029/2007GC001726>
- Takazawa, E., Frey, F. A., Shimizu, N., Obata, M. (2000). Whole rock compositional variations in an upper mantle peridotite (Horoman, Hokkaido, Japan): Are they consistent with a partial melting process? *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64(4), 695–716. [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(99\)00346-4](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(99)00346-4)
- Tekeli, O., and Erendil, M., 1986. Geology and Petrology of the Kızıldağ Ophiolite (Hatay). *Maden Tetk. ve Aram. Derg.* 107, 21–37.
- Tekeli, O., Aksay, A., Urgan, B. M., Işık, A. (1983). Geology of the Aladağ Mountains. In Proceedings of International Symposium on the Geology of the Taurus Belt (eds O. Tekeli & M. C. Göncüoğlu), pp. 143–58. MTA-Ankara, Turkey.
- Tinkler, C., Wagner, J.J., Delaloye, M., Selçuk, H. (1981). Tectonic history of the Hatay ophiolites (south Turkey) and their interpretation with the Dead Sea rift. *Tectonophysics*, 72, 23–41. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(81\)90085-8](https://doi.org/10.1016/0040-1951(81)90085-8)
- Üner, T. (2020). Multi-stage evolution of forearc mantle peridotites of Kağızman Ophiolite (Ağrı-eastern Anatolia). *Journal of African Earth Sciences*, 161(April 2019), 103667. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2019.103667>
- Uysal, İ., Ersoy, E. Y., Karşı, O., Dilek, Y., Sadıklar, M. B., Ottley, C. J., Tiepolo, M., & Meisel, T. (2012). Coexistence of abyssal and ultra-depleted SSZ type mantle peridotites in a Neo-Tethyan Ophiolite in SW Turkey: Constraints from mineral composition, whole-rock geochemistry (major–trace–REE–PGE), and Re–Os isotope systematics. *Lithos*, 132–133, 50–69. <https://doi.org/10.1016/J.LITHOS.2011.11.009>
- Uysal, İ., Kaliwoda, M., Karşı, O., Tarkian, M., Sadıklar, M.B., Ottley, C.J. (2007). Compositional variations as a result of partial melting and melt-peridotite interaction in an upper mantle section from the Ortaca area, southwestern Turkey. *Can. Mineral.* 45, 1471-1493.
- van Hinsbergen, D.J.J, Peters, K., Maffione, M., Spakman, W., Guilmette, C., Thieulot, C., Plümpner, O., Gürer, D., Brouwer, F.M., Aldanmaz, E., Kaymakci, N. (2015) Dynamics of intraoceanic subduction initiation: 2. Suprasubduction zone ophiolite formation and metamorphic sole exhumation in context of absolute plate motions. *Geochem Geophys Geosyst* 16:1771–1785
- Varfalvy, V., Hébert, R., Bedard, J. H., Laflèche, M. R. (1997). Petrology and geochemistry of pyroxenite dykes in upper mantle peridotites of the North Arm Mountain massif, Bay of Islands Ophiolite, Newfoundland: Implications for the genesis of boninitic and related magmas. *Canadian Mineralogist*, 35(2), 543–570. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(95\)00140-9](https://doi.org/10.1016/0009-2541(95)00140-9)
- Vernon R.H. (2004). *A practical guide to rock microstructure*. Cambridge Univ. Press, 606 pp.
- Völkening, J., Walczyk, T. and Heumann, K.G. (1991). Osmium isotope ratio determinations by negative thermal ionization mass spectrometry, *Int. J. Mass Spectrom. Ion Process.* cilt 105, ss. 147-159

- Workman, R. K., and Hart, S. R. (2005). Major and trace element composition of the depleted MORB mantle (DMM). *Earth and Planetary Science Letters*, 231(1–2), 53–72. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2004.12.005>
- Xiong, F., Yang, J., Robinson, P. T., Xu, X., Liu, Z., Zhou, W., Feng, G., Xu, J., Li, J., Niu, X. (2017). High-Al and high-Cr podiform chromitites from the western Yarlung-Zangbo suture zone, Tibet: Implications from mineralogy and geochemistry of chromian spinel, and platinum-group elements. *Ore Geology Reviews*, 80, 1020–1041. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2016.09.009>
- Zhou, M.-F, Robinson, P.T., Malpas, J., Edwards, S.J., Qi, L. (2005): REE and PGE geochemical constraints on the formation of dunites in the Luobusa ophiolite, southern Tibet. *J. Petrol.* 46, 615–639.
- Zhou, M. -F., Robinson, P. T., Malpas, J., Li, Z. (1996). Podiform chromitites in the Luobusa ophiolite (Southern Tibet): Implications for melt-rock interaction and chromite segregation in the upper mantle. *Journal of Petrology*, 37(1), 3–21. <https://doi.org/10.1093/petrology/37.1.3>



# Kahramanmaraş Sütçü İmam University

## Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 16.02.2024  
Kabul Tarihi : 21.02.2024

Received Date : 16.02.2024  
Accepted Date : 21.02.2024

### ALAŞIMLI ALÜMİNYUM BORU MALZEMELERDE BÜZME/ÇAP AZALTMA UYGULAMALARI

### SWAGING/DIAMETER REDUCTION APPLICATIONS IN ALUMINUM ALLOY PIPE MATERIALS

Mustafa TAŞ<sup>1\*</sup> (ORCID: 0009-0008-5742-4169)  
Abdul Kadir EKŞİ<sup>2</sup> (ORCID: 0000-0003-2227-8006)

<sup>1</sup> Çukurova Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Adana, Türkiye  
<sup>2</sup> Çukurova Üniversitesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Adana, Türkiye

\*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Mustafa TAŞ, mustafa.tas@gmail.com

#### ÖZET

Sanayide alüminyum malzemelere olan ilgi gün geçtikçe artmaktadır, özellikle ağırlık azaltma hedeflerini yakalayabilmek için malzeme değişikliklerinin temelinde çelikten alaşımlandırılmış alüminyum malzemelere geçiş yer almaktadır. Alaşımlandırılmış alüminyumlar yüksek korozyon direnci gerektiren havacılık uygulamalarında da ağırlık azaltma yönünde ön plana çıkmaktadır. Yüksek mukavemet sağlayarak ürünlerin ömürlerinde de artış ile olumlu katkı sağlamaktadır. Bu çalışmada 12,7-28,6 mm arasında farklı çaplarda Al2024 T3 boru numunelere farklı büzme/çap azaltma işlemleri gerçekleştirilmiş ve T0, T42 ve kriyojenik ısıtma işlemler uygulanmıştır. Büzme operasyonunun ürünlerin çap değişken parametresine göre deformasyon seviyeleri ölçülmüştür. Deformasyon yoğunluğunun arttığı ve bu artışın çekme dayanımı ve sertlik değerleri ile doğru orantılı olduğu gözlemlenmiştir. T3 ısıtma işlemli borulara, T0-T42 ve kriyojenik ısıtma işlem uygulamaları yapılmıştır. Bu uygulamalar ile mekanik dayanım, sertlik ve mikro yapı incelemeleri raporlanmıştır. Bu veriler ile büzme ve ısıtma işlemin etkisi kıyaslanmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Büzme kalıbı, büzme operasyonu, kriyojenik ısıtma işlem, mekanik dayanım, termofiziksel özellikler.

#### ABSTRACT

The interest in aluminum materials in the industry is increasing day by day, especially in order to achieve weight reduction targets, the basis for material changes is the transition from steel to alloyed aluminum materials. Alloyed aluminum also comes to the fore in terms of weight reduction in aviation applications that require high corrosion resistance. It contributes positively to the increase in the lifespan of the products by providing high strength. In this study, different swaging/diameter reduction processes were performed on Al2024 T3 pipe samples with different diameters between 12.7-28.6 mm and T0, T42 and cryogenic heat treatments were applied. Deformation levels of the swaging operation were measured according to the diameter variable parameter of the products. It has been observed that the deformation intensity increases and this increase is directly proportional to the tensile strength and hardness values. T0-T42 and cryogenic heat treatment applications were applied to T3 heat treated pipes. Mechanical strength, hardness and microstructure investigations were reported with these applications. The effects of swaging and heat treatment were compared with these data.

**Keywords:** Swaging mould, swaging operation, cryogenic heat treatment, mechanical strength, thermophysical properties.



## GİRİŞ

Günümüzde hızla gelişen teknoloji her sektörde olduğu gibi imalat sektöründe de yeni boyut arayışı içindedir. Hassasiyet gerektiren uygulamalarda bu sektörün yeni teknolojileri kullanma eğilimi artarken, malzemelere de dikkat edilmesi gerekiyor. Özellikle alüminyum ve alüminyum bazlı alaşımlar, çok iyi özgül mukavemetleri ve yüksek korozyon dirençleri nedeniyle havacılık endüstrisinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Son zamanlarda alüminyum alaşımlarına kaynaklanabilirlik özelliğinin de eklenmesiyle bu endüstride kullanımları önemli ölçüde artmıştır (Akdogan, 2000; Güler, 2003).

Havacılık uygulamalarına yönelik çubukların, kolay bağlantı sağlamak için uçlarında farklı şekiller olması gerekir. Büzme işlemi bu şekle ulaşmayı sağlar. Büzme, eksenel simetrik çalışma parçaları için yerleşik bir artımlı soğuk şekillendirme üretim tekniğidir. Diğerleri arasında çalışma sertleşmesi ve net şekle yakın şekillendirme bu üretim tekniğinin avantajlarıdır. Artan açık kalıpta büzme prosesi nedeniyle döner büzme, proses kontrolüne bağlı olan karmaşık bir malzeme akış geçmişine neden olur. Bu malzeme akış geçmişi, çalışma sertleşmesi ve artık gerilimler gibi malzeme değişikliklerini etkiler (Akdogan, 2000). Döner büzme, boru, çubuk ve tellerin çaplarının tamamen veya lokal olarak azaltılması olarak tanımlanabilir. Bu işlemde yüksek frekansta kısa darbeler ve küçük deformasyonlar kullanılır. Yüzey kalitesini iyileştirmesi, zamandan ve malzemedan tasarruf sağlaması gibi avantajları vardır (Wang et al., 2022).

Statik ve dinamik yükler altında döner büzme yoluyla üretilen bileşenlerin kullanılması nedeniyle, mekanik özellikleri tahmin edebilmek ve kontrol edebilmek için artık gerilim oluşum mekanizmalarının araştırılması gerekiyordu. Ameli ve Movahhedy, döner büzme işleminden sonra artık gerilim dağılımını araştırdılar ve bunların, sonuçta ortaya çıkan deformasyonun artan derecesinden önemli ölçüde etkilendiğini buldular. Boru şeklindeki bileşenler için dış yüzeyde esas olarak çekme ve iç yüzeyde esas olarak basma artık gerilmelerinin mevcut olduğu bulunmuştur. (Ameli & Movahhedy, 2007).

Çeşitli malzemelere döner dövme uygulandığında; çelik boru dövme prosesinde yüzey sertliği artmış ve yüzey pürüzlülüğü artmıştır (Lima et al., 2009). 1050 alüminyum alaşımına uygulandığında yüksek dislokasyon birikimi nedeniyle çekme mukavemeti artmış ve çekme sünekliği önemli ölçüde azalmıştır (Abdulstaar et al., 2013). Mg alaşımlarına uygulandığında Mg kafesinin taban düzlemi dövme yönünün paralel olduğunu ve dönme geçişinin bu dokuyu etkilediğini göstermiştir (Gan et al., 2013). 5083 alüminyum alaşımına döner büzme uygulandığında ötektik fazdaki tanelerin incelendiği belirtildi (Abdulstaar et al., 2013).

Yaptıkları çalışmada döner büzme ve ardından gelen T6 ısıl işleminin etkilerini araştırmışlardır. Bu araştırmalar neticesinde çap azaltma işleminin tane boyutunda iyileşme sağladığı, malzeme faz yapı oranını azalttığı, mekanik mukavemeti iyileştirdiği ve fiziksel boy sünmesini azalttığı gözlemlendi (Hung et al., 2018). Al 2024 boru numuneleri, 2 saat boyunca 510 °C ve 490 °C'de katı çözelti, sonrasında ise suda ve 210 °C'de 3 saat boyunca yapay yaşlandırma uygulanmıştır. Sonuç olarak döner dövmenin boyut küçültme yanında mekanik mukavemeti, özellikle akma mukavemetini arttırmada etkili bir işlem olduğu, daha yüksek katı çözelti sıcaklığı ile daha yüksek çekme mukavemeti değerlerine ulaşabileceği ifade edilmiştir (Hung et al., 2018).

Isıl işlem metodlarının metal bileşenlere uygulanması ve bunun sonucu olarak malzemenin mekanik özelliklerinin iyileştirilmesi endüstride uzun zamandır kullanılan yöntemdir. Geliştirilen proseslerin çoğu, proseslerin oda sıcaklığından daha yüksek bir sıcaklık aralığında uygulanmasıdır. Sıfırın altındaki işlemleri gerçekleştirmeye yönelik ilk girişimler 20. yüzyılın başında araştırıldı, ancak kriyojenik işleme (veya kriyo işlemi, CT) konusundaki gerçek ilgi yüzyılın son yıllarında gelişti (Baldissera and Delprete, 2008). Düşük sıcaklıklarda malzemenin arıtılması ve oda sıcaklığının altına soğutulması, bir stres giderme metodolojisidir. Kriyojenik işlem (CT), yüksek hassasiyetli malzemelerin imalatında çokça kullanılan sıfırın altındaki bir ısıl işlemdir. Alüminyum alaşımları gibi geleneksel malzemelerin hiçbir özelliğinden ödün vermeden özelliklerini arttırmayı amaçlayan kriyojenik işlem, bileşenlerin belirlenen sıcaklığa kadar kademeli olarak soğutulması, belirli bir süre tutulması ve daha sonra kademeli olarak oda

sıcaklığına getirilmesidir. Aşınma direnci, tokluk, kırılma direnci, sertlik, termal iletkenlik, boyutsal stabilite ve kimyasal bozunma gibi mikroyapısal iyileştirmeyi ve malzeme özelliği iyileştirmelerini destekler (Pavan et al.,2014).

Bu çalışma; Alüminyum malzemelerden üretilen borulara özel büzme işlemi ve iki çeşit ısıl işlem uygulanarak mukavemet artışı sağlanması amaçlanmaktadır. Homojen iç yapılar elde etmek amacıyla 2024-T3 alüminyumdan mekanik tezgahlarda dövülerek ve ardından kristalizasyon ısıl işlemiyle üretilen çubuklar üzerinde deneysel çalışmalar yapılacaktır. Hem büzme hem de kristalizasyon ısıl işleminde optimizasyon çalışmaları uygulanacaktır. Hedeflenen nihai dayanım değerlerine ulaşmak için; konvansiyonel ve kriyojenik tip olmak üzere iki tip ısıl işlem uygulanacaktır. Bu uygulamalarda; malzemenin iç yapısı ve tane boyutu hem optik mikroskop hem de SEM cihazları ile gözlemlenecek, hem fiziksel hem de mekanik özellikleri değerlendirilecek, sertlik değerleri kontrol edilecek, operasyon öncesi ve sonrası çekme testi yapılacaktır.

## MATERYAL

Bu çalışmada kullanılan malzemeler, TW Metals Ltd, Southampton/İngiltere'den temin edilen Şekil 1'de gösterildiği gibi 6000 mm uzunluğunda AA 2024-T3 borulardır.



Şekil 1. 6000 mm Uzunluğunda AA 2024-T3 Borular

Bu çalışmada kullanılan AA 2024-T3'ün kimyasal bileşimi ve parçacık boyutu özellikleri Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Al 2024'ün Kimyasal Bileşimleri (Ağırlıkça%)

Al	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Diğer	Diğerleri Toplam
Balans	0,5	0,5	3,8-4,9	0,3-0,9	1,2-1,8	0,1	0,25	0,15	0,05	0,15

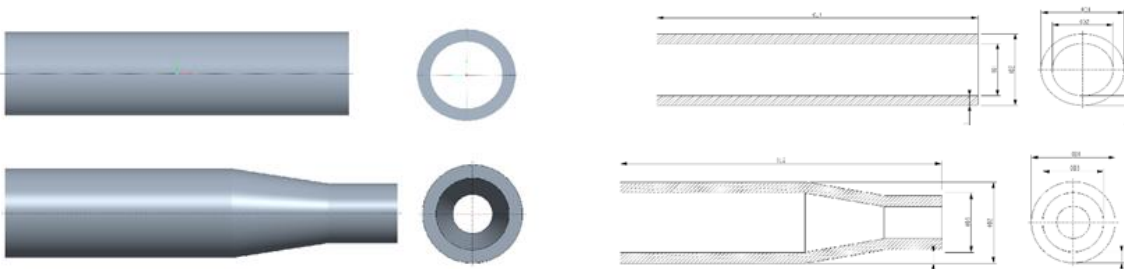
## METOD

### Numune Hazırlama Yöntemi

Bu çalışmada AA 2024-T3 alüminyum alaşımlı boru numuneleri önceden hazırlanmıştır. Borular 300 mm uzunluğundaki numunelerle parçalara ayrıldı.

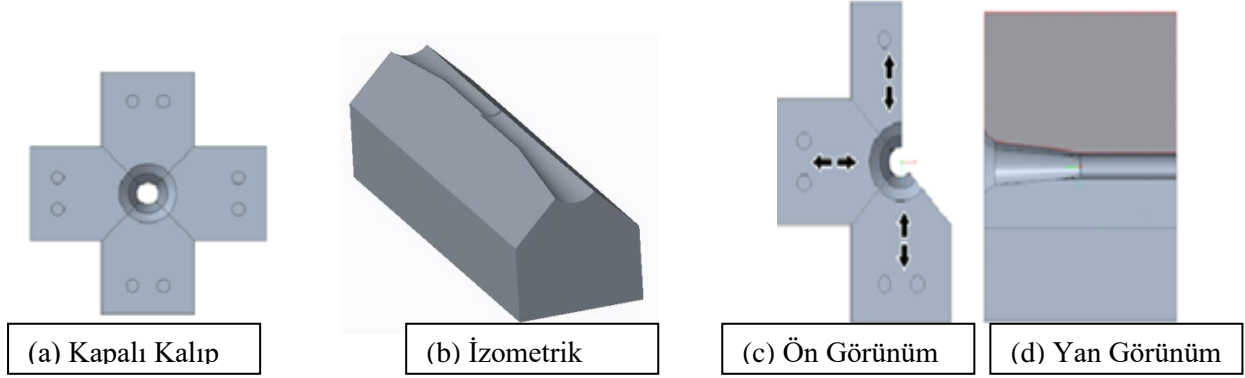
### Büzme İşleminde Kullanılan Kalıpların Tasarımı

Bu çalışmada özel olarak tasarlanmış kalıp ile büzme işlemi uygulanmıştır. Kalıp tasarımına başlamadan önce büzme operasyonunu etkileyen hedef tasarım parametreleri detaylı olarak incelenmelidir. Bunlar Şekil 2 'de görsel olarak verilmiştir.

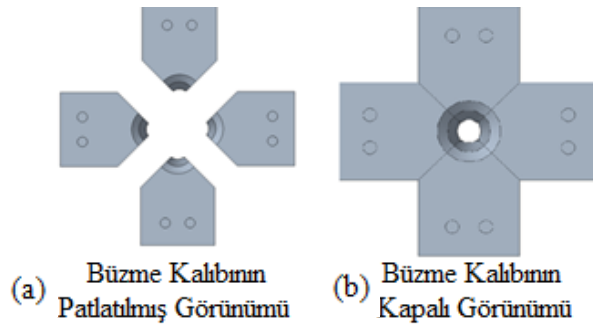


Şekil 2. Büzme Operasyonunu Etkileyen Hedef Tasarım Parametreleri

Bu kalıp 1.2369 kalıp çeliği malzemeden üretilmekte ve Şekil 3'te görüldüğü gibi 44 HRC'de sertleştirilmektedir. Büzme kalıbı, kalıbın makinenin rotor kısmına yerleştirilmesi nedeniyle 4 parçadan oluşmaktadır. Büzme kalıbının görünüşleri Şekil 3'te verilmiştir. Büzme makinesinde kalıplar rotor içerisinde dönerken açılıp kapanır ve bu sayede kalıp halindeki boru veya mil gibi malzemelerin çaplarının daraltılması mümkün olur. (Şekil 4).



**Şekil 3.** Dövme Kalıbının Tasarım Görünüşleri (a) Kapalı Kalıp; (b) İzometrik; (c) Ön Görünüm; (d) Yan Görünüm



**Şekil 4.** Sallama Hareketleri ve Büzmenin Boylamındaki Genişlemenin Gösterilmesi; (a) Büzme Kalıbının Patlatılmış Görüntüsü; (b) Büzme Kalıbının Kapalı Görünümü

Boru büzme işlemi Şekil 5'te gösterildiği gibi 4 noktadan vuruşlu dövme makinesinde gerçekleştirildi. Bu makine dakikada 60 defa açılıp kapanarak soğuk büzme işlemini gerçekleştirir. Alüminyum boru tezgaha ve kalıpların arasına girerek tezgah dönüşü sırasında açılıp kapanarak borunun içini şekillendirir. Bu işlemler mandrel kullanılmadan, boru iç çapı dikkate alınmadan gerçekleştirildi. Bunun nedeni daha sonra  $\varnothing 6,5$  matkapla delinmesidir.



**Şekil 5.** Büzme İşleminde Kullanılan Büzme Makinesi

Bu çalışmanın ilk aşamasında Alüminyum 2024 alaşımı T3 ısıl işlemine tabi tutulmuştur. T3 ısıl işlem görmüş Al alaşımı için T42, yapay yaşlandırmaya ve kriyojenik ısıl işlemlere tabi tutuldu. T3 ısıl işlem görmüş parçalar 410 °C'de 2,5 saat bekletildi ve fırında 2 saat kontrollü olarak soğutuldu. Bu işlemde sonra T0 ısıl işlemi yapılmıştır. Elde edilen T0 ve T3 ısıl işlemine tabi tutulan numuneler 495 °C'de 40 dakika bekletildikten sonra 30 °C sıcaklıktaki su içerisinde anında soğutuldu. Bu işlemle T42 ısıl işlemi gerçekleştirilmiştir. Son olarak T42 ısıl işlemine tabi tutulan numuneler -100 °C'de 1 saat tutularak kriyojenik ısıl işleme tabi tutuldu. Bu durum Tablo 2'de açıklanmaktadır. Bu yaşlandırma operasyonlarından sonra; Farklı ısıl işlem işlemlerine tabi tutulan numuneler için sertlik, çekme testleri ve mikro yapı incelemeleri yapılmış, karşılaştırma tablosu oluşturularak ısıl işlemin etkileri incelenmiştir.

**Tablo 2.** Proseslerin Uygulanmasına Göre Isıl İşlem Seçenekleri

Isıl İşlem Seçenekleri	Sürecin Uygulanması
T3	Isıl işlem görmüş alüminyum 2024 alaşımını T3 ile birlikte verilir.
T3 >> T0	410 °C'de 2,5 saat bekletildi ve 2 saat fırında kontrollü olarak soğutuldu.
T3 >> T0 >> T42	T3'ten T0'a kadar alınan numuneler 495 °C'de 40 dakika bekletildi ve 30°C sıcaklıktaki suda anında soğutuldu.
T3 >> T42	495 °C sıcaklıkta 40 dakika bekletildi ve 30 °C su ile hemen soğutuldu.
T3 >> T0 >> T42 >> CR	T3>>T0>>T42 ısıl işleminden sonra -100 °C'de 1 saat bekletildi.
T3 >> T42 >> CR	T3>>T42 ısıl işleminden sonra -100 °C'de 1 saat bekletildi.

## SONUÇLAR VE TARTIŞMA

### Al 2024 Boru Malzemelerinde Büzme/Çap Küçültme Sonuçları

Metal şekillendirme kalıplarında kalıp tasarımı ve taslak açısı önemlidir. Bu çalışma kapsamında 7 derecelik tek draft açısı ile kalıp tasarımı ve imalatı gerçekleştirilmiştir. Bu konseptte 11,5 mm ve 19 mm çapında iki farklı büzme kalıbı kullanıldı. Farklı çap ve et kalınlıklarına sahip 6 farklı tip boru, döner büzme işlemine tabi tutuldu. Burada öncelikle borunun çapı ve alan daralmaları dikkate alınır. %50'nin üzerindeki alan daralmalarında boyuna uzama miktarı artarken buna paralel olarak çatlak oluşma riski de artar. Bu durum dikkate alınarak yapılan çalışmadaki çap ve alan daralmaları aşağıda Tablo 3'te verilmiştir.

**Tablo 3.** Farklı Çaplardaki Al2024-T3 Tüplerde Kalıplama Öncesi ve Sonrası Ölçüm Sonuçları

Nominal Boyut	Büzme Çapı	Büzme Öncesi			Büzme Sonrası			D-R (%)	A-R (%)
		OD1 (mm)	OD2 (mm)	OT1 (mm)	OD3 (mm)	OD4 (mm)	OT2 (mm)		
12,7 x 2,1	11,5	12,72	8,62	2,1	11,41	6,94	2,31	10,3	19,5
15,9 x 1,6	11,5	15,87	12,55	1,66	11,37	6,95	2,43	28,3	48,7
19,1 x 3,05	19	19,1	13	3,05	18,98	7,9	3,12	0,6	1,25
22,2 x 2,2	19	22,19	17,4	2,47	19,02	13,64	2,68	14,3	26,5
25,4 x 3,05	19	25,4	19,3	3,06	19,21	12,9	3,4	23,4	42,8
28,6 x 3,05	19	28,6	22,5	3,05	19,13	9,94	4,6	33,1	55,2

Tabloda tanımlanan her bir kısaltmanın açıklaması şu şekilde sıralanabilir:

OD1: Dış Büzmeden Önce Boruların Çapı,  
OD2: Büzmeden Önce Boruların İç Çapı,  
OD3: Büzme Sonrası Boruların Dış Çapı,  
OD4: Büzme Sonrası Boruların İç Çapı,

OT1: Büzmeden Önce Duvar Kalınlığı  
OT2: Büzme Sonrası Duvar Kalınlığı  
D-R: Çap Küçültme  
A-R: Alan Azaltma

11,5 mm çapındaki büzme kalıbı ile çap küçültme yapılan tüplerde başlangıç çaplarına oranla sırasıyla %19,5 ve %48,7 oranında alan daralması gözlemlendi. Bu durum 19 mm çaplı kalıpla şekillendirilen tüpler için geçerlidir. Öyle ki boru çapına bağlı olarak deformasyon miktarı ve alan küçülme oranı artmıştır. Buradaki alan ve çap daralmaları aşağıdaki formüller kullanılarak hesaplanır (Semiatin, 2005).

$$\text{Alan Azaltma (AR)} = 100 * \left[ 1 - \left( \frac{OD3^2}{OD1^2} \right) \right] \quad (1)$$

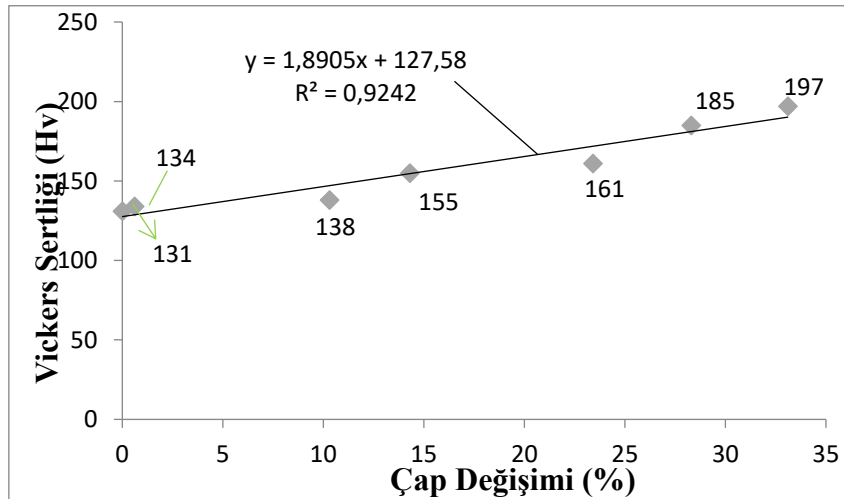
$$\text{Çap Küçültme (DR)} = 100 * \left[ 1 - \left( \frac{OD3}{OD1} \right) \right] \quad (2)$$

### Sertlik Sonuçları

Farklı çap ve et kalınlıklarına sahip alüminyum borular büzme işlemine tabi tutularak büzme işleminin boruların mekanik özelliklerine etkisi araştırıldı. Bu çalışmada tüm ürünler alüminyum 2024-T3 tüp malzemesi olmasına rağmen farklı boyutlara sahip olup, iki farklı dövme kalıbı kullanılarak işlem tamamlanarak 1 ve 2 nolu tüp numuneleri 19 mm çapa, 3 ve 4 numaralı numuneler ise yaklaşık olarak 19 mm çapa düşürülmüştür. 11,5 mm çapında. Tablo 4'te görüldüğü gibi büzme işleminin neden olduğu deformasyon miktarına ve alanı ve çapındaki değişime bağlı olarak sertlik değerlerinde artış görülmektedir (Şekil 6).

**Tablo 4.** Al 2024'ün Büzme İşlemi Sonrası Ölçüm Sonuçları

Nominal Boyut	Büzme Çapı (mm)	Dış Çap (mm)	İç Çap (mm)	Et Kalınlığı Değişimi (%)	Çap Değişimi (%)	Alan Çapı Değişimi (%)	Sertlik (Hv)
Referans Tüp Malzemesi Büzülmeden				0	0	0	131
19,1 x 3,05	19	3,05	3,12	2,3	0,6	1,25	134
12,7 x 2,1	11,5	2,1	2,31	10	10,3	19,5	138
15,9 x 1,6	11,5	1,66	2,43	46,4	28,3	48,7	185
22,2 x 2,2	19	2,47	2,68	8,5	14,3	26,5	155
25,4 x 3,05	19	3,06	3,4	11,1	23,4	42,8	161
28,6 x 3,05	19	3,05	4,6	50,8	33,1	55,2	197



**Şekil 6 .** Vickers Sertliği ve Çap Değişimi Grafiği (%)

Başlıca bulgular şunlardır: Dış yüzeydeki malzeme radyal dögüsel deformasyona maruz kalırken, iç yüzeydeki malzeme aksel dögüsel deformasyona maruz kalmıştır. Bu nedenle birleşik bir sertleştirme modelinin oluşturulması gerekmektedir; Yönlendirilmiş malzeme akışının görüldüğü yerlerde, duvar kalınlığı, gerilim yoğunlaşmasından dolayı azalma eğilimindedir. Yapılan gözlemin ince olmayan tüplerde daha belirgin olduğu görüldü (Liu et al., 2020)

### Çekme Mukavemeti Testi Sonuçları

Büzme operasyonu sonrası sertlik ölçümleri gerçekleştirilen parçalar, çekme testlerine tabii tutulmuş ve farklı boyutlardaki alüminyum boruların büzme operasyonu, test sonuçları Tablo 5’de listelenmiştir. Tabloda da görüldüğü üzere, büzme işlemi parçanın akma ve çekme dayanımlarını arttırmış olmasına rağmen, yüzde uzama değerlerini deformasyon oranına bağlı olarak düşürmüştür. Büzülmüş numunelerin çekme testi sonrası kırılma yüzeylerine dikkat bakıldığında, gevrek bir kırılma olduğu görülmektedir. Çap daraltma miktarı daha düşük olan numunelerde boyun verme daha belirgindir.

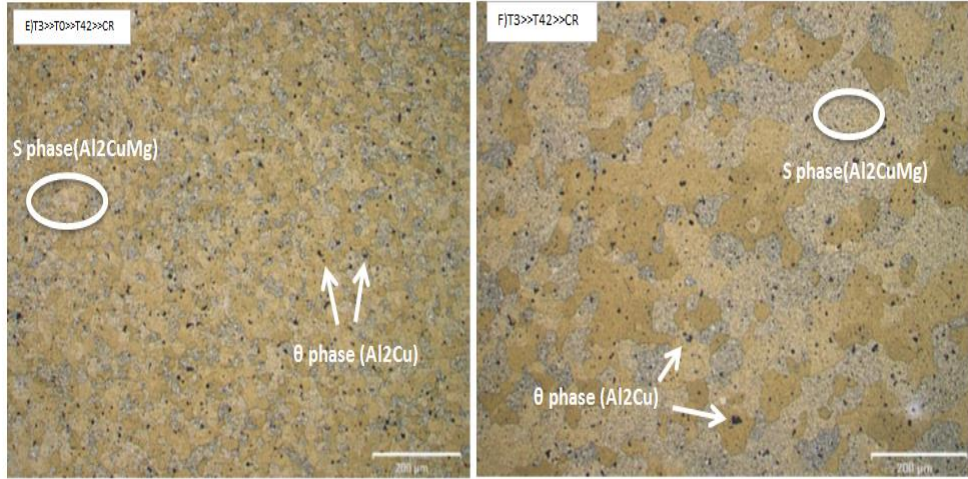
**Tablo 5.** Al 2024’ün Farklı Isıl İşlemler Sonrası Çekme Testi Sonuçları ve Sertlik Değerleri

	Akma Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Uzama (%)	Sertlik (HV)
<b>T3</b>	348	491	18,5	131,6
<b>T3 &gt; T0</b>	153	313	17	75
<b>T3 &gt; T42</b>	325	537	21	134,72
<b>T3 &gt; T0 &gt; T42</b>	347	505	13	140,7
<b>T3 &gt; T42 &gt; KR</b>	332	543	19	131,2
<b>T3 &gt; T0 &gt; T42 &gt; KR</b>	338	526	14	129,3

### Mikroyapı Sonuçları

Mikro yapı incelemesinde tane boyutlarının homojen bir yapıya sahip olduğu görülmektedir. Siyah noktalar halinde görünen yapılar alüminyum olmayan element ve fazlardır. Şekil 7’ye bakıldığında; boyuna kesit esas olarak gözlenir ve koyu renkli parçacıklar CuMgAl, CuMnAl ve CuFeAl’dir. Daha düşük soğutma hızı, CuMgAl’nin tane sınırlarında daha fazla çökmesine neden olmuştur.

T0 koşulundaki AA2024 ve AA2055 alaşımları için eş aksel bir tane morfolojisi mevcut olup, bu yeniden kristalleşmenin ürünüdür. Alaşım yüzeyinde koyu görünen rastgele dağılmış metaller arası parçacıklar ve tane sınırı yüzey enerjisi tarafından yönlendirilen tane sınırlarında heterojen bir çökme oluşturmaktadır. Çökmeden arındırılmış bölgeler, dislokasyon hareketi için tercihli bir yol oluşturur ve alaşımın genel olarak zayıflamasına neden olur (Samaniego et al., 2021; Queiroz, 2008). Isıl işlemlerin farklı uygulamalarında kontrast farklılıkları bulunmaktadır ve bu çok iyi gözlemlenmektedir. Mikroyapıdaki tane sınırı konumları iyi gözlemlenir ve fazlar belirlenebilir. Metallerarası parçacıkların türleri dikkate alındığında başlıca S ve  $\Theta$  fazlarının olduğu görülmektedir. Son durumda gözlenen sertleşmenin sebebi incelendiğinde denge fazlarının çökmesi ile olduğu görülmektedir. (OHMORI et al., 1999; Feng et al., 2010).



Şekil 7. AA 2024 Numunelerinin Isıl İşlemleri İçin Mikroyapı İncelemesi

## DEĞERLENDİRMELER

Bu çalışmada, farklı ısıl işlem işlemleri uygulanmış ve mikroyapısal farklılıklar açısından incelenmiştir. mikroyapı görüntülerinde tane yapılarının oluştuğu açıkça görülmektedir. Isıl işlemlerin farklı uygulamalarında kontrast farklılıkları bulunmaktadır ve bu çok iyi gözlemlenmektedir. Metallerarası parçacıkların türleri dikkate alındığında başlıca S ve  $\Theta$  fazlarının oluştuğu görülmektedir. Son durumda gözlenen sertleşmenin sebebi incelendiğinde denge fazlarının çökmesi ile olduğu görülmektedir.

## KAYNAKLAR

- Abdulstaar M. A., E. A. El-Danaf, N. S. Waluyo, & L. Wagner (2013). Severe plastic deformation of commercial purity aluminum by rotary swaging: microstructure evolution an mechanical properties. *Materials Science and Engineering: A*, 565, pp.351-358. DOI: 10.1016/j.msea.2012.12.046
- Akdogan A. (10-12 Mayıs 2000). “Uçak Endüstrisinde Kullanılan Metal ve Metal Dışı Malzemeler ve Bu Malzemelerin Muayene Yöntemleri”, Y.T.Ü. Makine Fak., *Kayseri 3. Havacılık Sempozyumu*.
- Ameli. A. & Movahhedy M. R. (2007). “A parametric study on residual stresses and forging load in cold radial forging process”. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 33: 7–17. DOI:10.1007/s00170-006-0453-2.
- Baldissera P. and Delprete C. (2008). Deep Cryogenic Treatment: A Bibliographic Review. *The Ope Mechanical Engineering Journal*, 2008, 2, 1-11.
- Feng ZQ, Yang YQ, Huang B, Han M, Luo XA, Ru JG (2010). Precipitation process along dislocations in Al-Cu-Mg alloy during artificial aging. *Mater Sci Eng A* , 528:706e14. DOI: 10.1016/j.msea.2010.09.069
- Gan W. M., Y. D. Huang, R. Wang, Z. Y. Zhong, N. Hort, K.U. Kainer, N. Schell, H. G. Brokmeier, & A. Schreyer (2013). Bulk and local textures of pure magnesium processed by rotary swaging. *Journal of Magnesium and Alloys*: pp. 341-345. DOI: 10.1016/j.jma.2013.12.004.
- Güler K.A. (2003). Uçak Yapımında Kullanılan Malzemeler ve Özelliklerinin İncelenmesi, *Yıldız Teknik Üniversitesi, Metalurji Ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Bitirme Tezi*.
- Hung F.Y, Lin C.W, Lui T.S, & Chen H.P. (2018). Effects of Rotary Swaging on Microstructure and Mechanical Properties of 2024 Aluminum Tubes, *International Journal of Research Science & Management*, 5(2): ISSN: 2349-5 DOI:10.1016/j.matchar.2022.112575.
- Lima S. J., H. J. Choia, & C. H. Leeb (2009). Forming characteristics of tubular product through the rotary swaging process. *Journal of Materials Processing Technology*. pp. 283-288. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2007.08.086
- Liu Y, Liu J, Herrmann M, Schenck C, & Kuhfuss B. (2020 Dec 24). Material Flow in Infeed Rotary Swaging of Tubes. *Materials(Basel)* 14(1):58. <https://doi.org/10.3390/ma14010058>

- OHMORI, Y., ITO, S., NAKAI, K., (1999). *Metall. Mater. Trans:A* , 30, p.741. <https://hal.science/hal-00863168>
- Pavan K.M., Sachin.L.S, Mayur.S, Chandrashekar A, & Ajaykumar B.S, (2014). Effect of Cryogenic Treatment on the Mechanical and Microstructural Properties of Aluminium Alloys- A Brief Study, *International Journal Of Mechanical And Production Engineering*, 2(5), 95-99.
- Samaniego-Gómez, P.O., Almeraya-Calderon, F., Maldonado-Bandala, E., Cabral-Miramontes, J., Nieves-Mendoza, D., Olguin- Coca, J., Lopez-Leon, L.D., Silva Vidaurri, L.G., Zambrano-Robledo, P., & Gaona-Tiburcio, C. (2021). Corrosion Behavior of AA2055 Aluminum-Lithium Alloys Anodized in the Presence of Sulfuric Acid Solution. *Coatings*, 11, 1278. <https://doi.org/10.3390/ma15186401>
- Semiatin S.L. (2005), *ASM Handbook Metalworking: Bulk Forming, Vol.14A*. DOI ONLINE NO - IJMPE-IRAJ-DOI ONLINE-778
- Queiroz, F.M. (2008). Estudo Do Comportamento de Corrosao Dos Intermetálicos Presentes Na Liga AA2024-T3, *Por meio De Técnicas De Microscopia Associadas A Técnicas Electroquímicas. Ph.D. Thesis*, Universidade de Sao Paulo, Sao Paulo, Brazil. <https://doi.org/10.3390/met11060980>
- Wang D, Zhang WX, Huang SQ, Yi YP, & He HL (2022). Effect of threedimensional deformation at different temperatures on microstructure, strength, fracture toughness and corrosion resistance of 7A85 aluminum alloy. *J Alloys Compd*, 928:167200. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2022.167200>





# Kahramanmaraş Sütçü İmam University Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 18.02.2024  
Kabul Tarihi : 05.06.2024

Received Date : 18.02.2024  
Accepted Date : 05.06.2024

## ELAZIĞ'IN METEOROLOJİK VE TARIMSAL KURAKLIĞININ FARKLI KURAKLIK İNDİSLERİ KULLANILARAK DEĞERLENDİRİLMESİ

### EVALUATION OF METEOROLOGICAL AND AGRICULTURAL DROUGHT IN ELAZIĞ USING DIFFERENT DROUGHT INDICES

Veysi KARTAL<sup>1</sup> (ORCID: 0000-0003-4671-1281)

<sup>1</sup> Siirt Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Siirt, Türkiye

\*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Veysi KARTAL, veysikartal@siirt.edu.tr

#### ÖZET

Su insan hayatı için elzem olduğu gibi yaşayan tüm canlılar için de bir ihtiyaçtır. Dolayısıyla, suyun varlığı yaşamın devamı için gereklidir. Bu bağlamda suyun varlığını ya da eksikliğini yani kuraklığı incelemek için kuraklık indisleri yaygın olarak kullanılmaktadır. Sonuç olarak, nedeni veya etkisi ne olursa olsun sürekli değişen iklim, su açığının sınırını zorlamaktadır. Elazığ gölleri, akarsuları ve yeraltı suları olmak üzere çeşitli su kaynaklarına sahip ve Türkiye'nin tarımında (kayısı meyvesi üretimi) önemli bir şehirdir. Bu çalışmada, Türkiye'nin Doğu bölgesinde yer alan Elazığ'ın kuraklığını araştırmak için 1979-2022 yılları arasında 8 meteoroloji istasyonundan elde edilen uzun vadeli yağış, sıcaklık ve buharlaşma kayıtları kullanılmıştır. Mevcut çalışmada, kuraklığı değerlendirmek için aylık ve yıllık zaman periyodları kullanılarak meteorolojik kuraklık için Standartlaştırılmış Yağış İndeksi (SPI) ve Keşif Kuraklık İndeksi (RDI), tarımsal kuraklık için ise Etkili Keşif Kuraklık İndeksi (eRDI) kullanılmıştır. Veri analizi için Sen eğimi ve Pettitt testi kullanılmıştır. Çalışma alanı boyunca kuraklık indis sonuçlarının neredeyse aynı olduğu tespit edilmiştir. Özellikle Ağın ve Baskil ilçelerinin kuraklıkla karşı karşıya olduğu tespit edilmiştir. Mevcut çalışmada, meteorolojik ve tarımsal kuraklık için şiddetli kuraklık dönemler olmasına rağmen, genel olarak normal kuraklık seviyeleri gözlemlenmiştir. Ancak yine de bazı istasyonlarda aşırı kurak veya aşırı yağışlı dönemler de gözlemlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Elazığ, kuraklık, SPI, RDI, eRDI

#### Abstract

Water is essential for both human life and all living creatures. For this reason, the presence of water is the key to survival. Drought indices are widely used to analyze the availability or lack of water. Climate change, regardless of its cause or effect, challenges the limit of water scarcity. Elazığ is an agricultural city in Türkiye with a variety of water resources including lakes, rivers and groundwater. This study employed long-term precipitation, temperature, and evaporation data from 8 meteorological stations between 1979 and 2022 to assess drought in Elazığ. Standardized Precipitation Index (SPI) and Reconnaissance Drought Index (RDI) for meteorological drought and the Effective Reconnaissance Drought Index (eRDI) for agricultural drought were used to assess drought using monthly, seasonal and annual scales. Sen slope and Pettitt test were used for data analysis. The results revealed that the drought results at monthly scales gave almost the same results. It was determined that especially Ağın and Baskil regions are facing drought. Although there were periods of severe drought for meteorological and agricultural drought, generally normal drought levels were observed. However, extreme dry or extreme wet periods were also observed at some stations.

**Keywords:** Elazığ, drought, SPI, RDI, eRDI

#### GİRİŞ

ToCite: KARTAL, V., (2024). ELAZIĞ'IN METEOROLOJİK VE TARIMSAL KURAKLIĞININ FARKLI KURAKLIK İNDİSLERİ KULLANILARAK DEĞERLENDİRİLMESİ. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 27(3), 938-962.

Günümüz iklim koşulları dikkate alındığında Türkiye'de küresel iklim değişikliğinin etkileri su kaynaklarının yanlış kullanımı veya azalması, sıcak hava dalgaları, kuraklık, sellerdeki artış ve tarımda verimliliğin düşmesi olarak kendini göstermektedir. Bunların başında ülkemizde yaşanan ve ileride de şiddetlenerek artacağı düşünülen kuraklık sıkıntısı gelmektedir. Kuraklık, sonuçları dikkate alındığında günümüzde yaşayan tüm varlıkların geleceğini tehdit eden en önemli küresel ve bölgesel çevre sorunlarının başında gelmektedir (WMO, 2023). Kuraklık, yağış miktarının uzun yıllar boyunca gerçekleşen yağışların ortalama değerinden daha az olması ile ortaya çıkan bir olaydır. Anadolu'nun yüksek ve dağlık bir bölgesi olan Doğu Anadolu Bölgesi, doğu-batı doğrultusunda uzanan dağlar ve bunların arasında kalan dağlar nedeniyle, bölgenin fiziki ve coğrafik açıdan zengin olmasına olanak sağlamıştır. Bu bölgede yüksek dağlar önemli birer otlak sahası iken aynı zamanda tektonik verimli tarım alanları yer almaktadır. Bu nedenle Doğu Anadolu Bölgesi Türkiye'nin tarım ve hayvancılık alanında etkili bir bölgedir. Mevcut çalışmada elde edilen sonuçlar, kuraklığın tarımda verimliliği olumsuz etkilediğini ve hayvancılık için son derece önemli olan ot verimi ve otlakların verimini düşürdüğünü ortaya koymaktadır. Özellikle tarım ve hayvancılığı büyük ölçüde etkileyen kuraklığın incelenmesi, kurak olan dönemlerin tespiti ve bu bağlamda alınacak tedbirler büyük önem arz etmektedir. Kuraklık, sadece insan ve yaşayan canlı hayatı için değil aynı zamanda gıda ve tarım ürünlerinin üretiminde karşılaşılan en büyük zorluklardan biridir. Kuraklığın nedeni ne olursa olsun, sürekli değişen iklim, su mevcudiyeti konusunda ciddi endişelere yol açmaktadır. Bu nedenle, su ve gıda bağları arasındaki bağlantılar dünya çapında giderek daha fazla dikkat çekmektedir. Türkiye de su kıtlığı konusunda ciddi endişeleri olan ülkeler arasında yer almaktadır (Sokollu, 2014). Doğu Anadolu Bölgesinde bulunan Elazığ, gölleri, akarsuları ve yeraltı suyu rezervleri dahil olmak üzere su kaynakları açısından büyük bir potansiyele sahiptir. Gerek ovaları gerekse tarıma elverişli alanları tarım alanında öncü olmasına özellikle kayısı meyvesinin üretiminde çok önemli bir paya sahiptir. Bun nedeniyle geçmişte meydana gelen kuraklık olaylarının ölçülmesi ve değerlendirilmesi bölgenin planlanması ve kalkınmasında büyük önem taşımaktadır. Standartlaştırılmış Yağış İndeksi (SPI), Etkili Kuraklık İndeksi (EDI), Ondalık İndeks (DI), Yüzde Normal (PNI), Kuraklık Alan İndeksi (DAI), Palmer Kuraklık Şiddet İndeksi (PDSI), Çin-Z İndeksi (CZI) ve yeni geliştirilen Standartlaştırılmış Yağış Evapotranspirasyon İndeksi (SPEI) kuraklık değerlendirmesinde kullanılan değerlendirme araçları arasında yer alırken, bu kuraklık indekslerinin yönlerini araştırmak için çok sayıda çalışma yapılmıştır (Bakanoğulları, 2020; Batan, 2021; Dikici, 2018; Dikici ve Aksel, 2021; Katipoğlu vd., 2020; Katipoğlu ve Acar, 2021; Katipoğlu ve Sarıgöl, 2023; Mersin, Gulmez, vd., 2022; Şener ve Davraz, 2021; Yüce vd., 2022).

Yacoub ve Tayfur (Yacoub ve Tayfur, 2017) yağış veri verilerini kullanarak Moritanya'nın Trarza bölgesindeki kuraklığı değerlendirmiştir. Araştırmacılar, normal Standartlaştırılmış Yağış İndeksi (normal-SPI), log normal Standartlaştırılmış Yağış İndeksi (log-SPI) ve Gamma-SPI, Yüzde Normal (PNI), Çin-Z indeksi (CZI) Standartlaştırılmış Yağış İndeksi kullanılırken, kuraklık durumunun belirlenmesi için 1, 3, 6 ve 12 aylık zaman dilimleri dikkate alınmıştır. Keşif Kuraklık İndeksi (RDI), yaygın olarak kullanılan Standartlaştırılmış Yağış İndeksi (SPI) ile doğrudan karşılaştırılabilen ancak su dengesi koşullarını daha iyi temsil eden yeni bir meteorolojik kuraklık indeksidir (Tsakiris ve Vangelis, 2005). Keşif Kuraklık İndeksi, yağışa ek olarak potansiyel evapotranspirasyon verilerini de kullanır. Pashiardis ve Michaelides (2008) çalışmalarında Kıbrıs adasının tamamında bulunan yağış istasyonlarından elde ettikleri verileri RDI ve SPI indekslerini kullanarak kuraklığın şiddetini, süresini ve mekansal yayılımını hesaplamışlardır. Yürekli vd. (2010) çalışmalarında Karaman ilinin kuraklığını SPI ve RDI indekslerini kullanarak kuraklığı analiz etmişlerdir. Dabanlı vd. (2017) Türkiye'deki uzun dönemli kaydedilmiş verileri kullanarak bir kuraklık çalışması yapmıştır. Karaer ve Gültaş (2018) Bilecik ilinde 1, 3, 6, 12, 24 aylık periyotlarda SPI indeksini kullanarak kuraklık analizi yapılmıştır. Çelik (2019) Akdeniz için meteorolojik verileri kullanarak mevsimsel SPI kuraklık analizi yapmıştır. Katipoğlu vd. (2020) kuraklığı incelemek için beş farklı kuraklık indeksini karşılaştırarak kuraklığın analizinde en etkili kuraklık indeksini belirlemişlerdir. Kuraklık ile ilgili yaptıkları analizlerde, 1966- 2017 yılları için SPI-1, SPI-3, SPI-6 VE SPI-12, İstatistiksel Z-Skor İndeksi (ZSI), Yağış Anomali İndeksi (RAI), Standardize Yağış Evapotranspirasyon İndeksi (SPEI) ve Keşif Kuraklık İndeksi (RDI) kullanmışlardır. Yağış tabanlı SPI ile ZSI'nin, yağış ve sıcaklık tabanlı SPEI ile RDI'nin birbirine benzer özellikler taşıdığı RAI indeksinin ise aşırı kurak ve yağışlı dönemlerin belirlenmesinde ZSI, SPEI, RDI'e göre daha etkili olduğu görülmüştür. Topçu ve Seçkin (2022) yaptıkları çalışmada RDI indeksiyle Asi, Ceyhan, Seyhan, Doğu Akdeniz havzalarını içine alan bölgede 35 istasyonun verilerini kullanarak kuraklık analizi yapmışlardır. Aktürk vd. (2022) Kırıkkale ilinde SPI ve SPEI yöntemlerini kullanarak kuraklık analizi yapmışlardır. Topçu vd. (2022) Doğu Akdeniz, Seyhan, Ceyhan ve Asi Havzalarında meteorolojik kuraklığı incelemiştir. Elde edilen sonuçlara göre, çalışma bölgesi genelinde şiddetli bir kuraklık oluşumunun hakim olmadığını, ancak bazı istasyonlarda aşırı kuraklık olaylarının meydana geldiği tespit edilmiştir.

Sarış ve Gedik (2021) Konya Kapalı Havzasındaki meteorolojik kuraklık durumunu farklı zaman ölçekleri için SPI ile analiz etmişlerdir. Yaptıkları çalışmada, Konya, Kulu ve Karapınar en fazla kurak yıl sayısına sahip olduğu tespit

etmişlerdir. Öztürk ve Ünlü (2022) Türkiye’de yapılan kuraklık çalışmaları ile ilgili bir derleme çalışması yapmışlardır. Varol vd. (2023) Yukarı Sakarya Havzası kuraklığı incelemek için Kopula tabanlı çok değişkenli standartlaştırılmış kuraklık indeksi (MSDI) ve Standartlaştırılmış Akış İndeksi (SRI) kullanmışlardır. Bu çalışmada 1, 3, 6 ve 12 ay zaman ölçekleri için modellemeden elde edilen MSDI değerlerinin SRI değerlerine kıyasla SPEI değerlerine daha yakın olduğu tespit edilmiştir. Tüm veriler dikkate alındığında, 6 aylık ölçekte 2007 ve 2016 yıllarının havza için en kurak yıllar olduğu, 12 aylık ölçekte ise 2016 ve 2021 yıllarının en kurak yıllar olduğu tespit edilmiştir. Pekpostalci vd. (2023) Akdeniz Bölgesindeki meteorolojik kuraklığı incelemek için, bulanık c-ortalama kümelenmesi (FCM) ve yenilikçi eğilim analizi (ITA) kullanmışlardır. Kartal (2023) Elazığ için farklı test ve analizler yaparak Elazığ için bir meteorolojik kuraklık çalışması yürütmüştür. Yapılan bu çalışmada meteorolojik kuraklık dikkate alınarak Elazığ’ın kuraklık durumu araştırılmıştır. Elazığ için tüm zaman ölçeklerinde özellikle 2000 yılı ve sonrasında kurak dönemlerin arttığı tespit edilmiştir. Ayrıca, Kartal (2023)’ün çalışmasında yağış verilerinde azalma eğilimi tespit edilirken, sıcaklık ve buharlaşma verilerinde ise artış eğilimi tespit edilmiştir. Benzer şekilde, Aydın (2023) Elazığ ili için bir yağış trend analizi gerçekleştirmiştir. Bu çalışma sonucunda, Keban istasyonunda ilkbahar mevsimi yağış değerlerinde, Palu istasyonunda ise kış mevsimi yağış değerlerinde Mann-Kendall, Şen’in Yenilikçi Trend Analizi ve Spearman-Rho testlerine göre azalan yönde bir trend olduğu saptanmıştır. Elazığ ili önemli yer altı ve yer üstü su kaynaklarına sahip olmakla birlikte aynı zamanda Türkiye kayısı üretiminde önemli yer tutmaktadır. Bu nedenle Elazığ için sadece meteorolojik kuraklık değil aynı zamanda tarımsal kuraklığın da incelenmesi gerekmektedir. Sonuç olarak, özellikle Elazığ il ve ilçelerinde tarımsal kuraklığın incelenmesi, önemli bir kayısı üretim yeri olan Elazığ için faydalı olacaktır.

Bu çalışma, Türkiye'nin Doğu Anadolu Bölgesi'nde yer alan Elazığ'da 1979-2022 yılları arasında meydana gelen kuraklıkları, kuraklık için kullanılan farklı indekslerin davranışlarını gözlemleyerek ve indekslerden elde edilen sonuçları karşılaştırarak değerlendirmeyi amaçlamaktadır. Bunun için, Dünya Meteoroloji Örgütü tarafından önerilen metodoloji ve yaklaşımlar bölgedeki kuraklık modellerini değerlendirmek için kullanılmıştır. Elazığ il ve ilçeleri için meteorolojik kuraklığın (SPI ve RDI) yanı sıra tarımsal kuraklığın (eRDI) zamansal davranışı da incelenmiştir, zira bu konu ile ilgili bilgi eksikliği mevcuttur. Bu nedenle, bu çalışma en güncel veri kayıtları ve çalışma alanı içerisinde yer alan toplam 8 meteoroloji istasyonunun veri seti ile gerçekleştirilmiştir. Bunu yapmak için bu çalışmada, meteorolojik kuraklık (Standartlaştırılmış Yağış İndeksi (SPI)) ve Keşif Kuraklık İndeksi (RDI)) ve tarımsal kuraklık (Etkili Keşif Kuraklık İndeksi (eRDI)) indisleri kullanılarak Elazığ il ve ilçeleri için tarımsal ve meteorolojik kuraklığın tarihsel değişimi irdelenmiştir. Bu kuraklık indisleri, aylık, mevsimlik, dönemlik ve yıllık periyodlar için hesaplanarak sonuçlar değerlendirilmiştir. Ayrıca, mevcut çalışmada kullanılan verilerin homojen olup olmadığı tespit etmek için Pettitt testi analizi de yapılmıştır.

## ÇALIŞMA ALANI VE VERİ

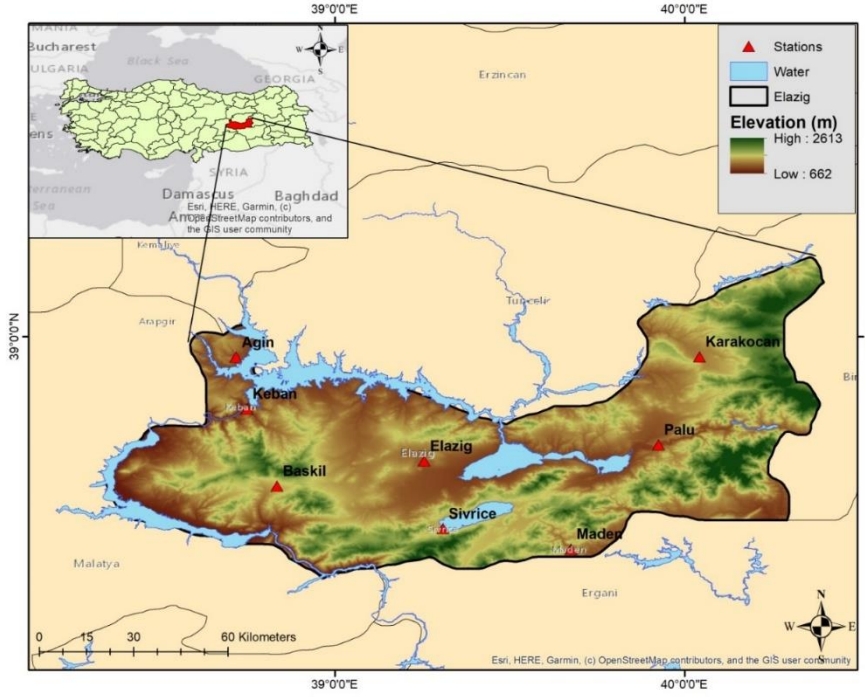
Elazığ ili, Doğu Anadolu Bölgesinin güneybatısında, Yukarı Fırat Bölümünde yer almaktadır. 9153 km<sup>2</sup>'i bulan yüzölçümü ile Türkiye topraklarının %0.12' sini oluşturmaktadır. 40°0'21'' ile 38°0'30'' doğu boylamları, 38°0'17'' ile 39°0'11'' kuzey enlemleri arasında kalan İl, doğudan Bingöl, kuzeyden (Keban Baraj Gölü aracılığı ile) Tunceli, batı ve güney batıdan (Karakaya Baraj Gölü aracılığıyla) Malatya, güneyden ise Diyarbakır illerinin arazileri ile çevrilidir. Bu kapsamda meteoroloji istasyonlarının sıcaklık (maksimum, ortalama ve minimum) ve yağış değerleri kullanılmıştır (Elazığ Valiliği Çevre Şehircilik ve İklim Değişikliği İl Müdürlüğü, 2022).

Bu çalışmada 8 meteoroloji istasyonunun 1979-2022 yılları arasındaki yağış ve sıcaklık (maksimum, ortalama ve minimum) ve buharlaşma verileri kullanılmıştır. Bu verileri kullanarak zaman serilerinin istatistiksel özellikleri belirlenmiştir. Bu verilerle ilgili istatistiksel bilgiler Tablo 2'de gösterilmiştir.

## METOT VE MATERYAL

### Veri Analizi

Sıcaklık verileri günlük ortalama, günlük maksimum ve günlük minimum formatında ve yağış verileri ise günlük toplam yağış formatında Meteoroloji Genel Müdürlüğü'nden temin edilmiştir. Bu çalışmada, homojenlik yöntemi kullanılarak eksik veriler tamamlanmış ve ardından zaman serileri aylık formata dönüştürülmüştür. SPI, RDI ve eRDI değerleri kuraklık indekslerine dayalı bir kuraklık analiz programı olan DrinC (Drought Indices Calculator) kullanılarak hesaplanmıştır. DrinC yazılım programı, Atina Ulusal Teknik Üniversitesi Doğal Tehlikeleri Değerlendirme ve Proaktif Planlama Merkezi ile Islah ve Su Kaynakları Yönetimi Laboratuvarı'nda geliştirilmiştir (Tigkas vd., 2013).



Şekil 1. Çalışma Alanı

### Standartlaştırılmış Yağış İndeksi (SPI)

Meteorolojik kuraklığın hesaplanmasında sadece yağış verilerini kullanan Standartlaştırılmış Yağış İndeksi (SPI) McKee vd. (1993) tarafından geliştirilmiştir. SPI değerinin hesabı aşağıda verilmiştir (McKee vd., 1993).

$$g(x) = \frac{p^{\alpha-1} e^{-\frac{x}{\beta}}}{\beta^{\alpha} \Gamma(\alpha)} \quad (1)$$

$$T(\alpha) = \int_0^{\infty} y^{(\alpha-1)} e^{-y} dy \quad (2)$$

$$\alpha = \frac{1}{4} \left( 1 + \sqrt{1 + \frac{4A}{3}} \right) \quad (3)$$

$$\beta = \frac{\bar{x}}{\alpha} \quad (4)$$

$$A = \ln(\bar{x}) - \frac{\sum \ln(\bar{x})}{n} \quad (5)$$

$$H(x) = q + (1 - q)G(x) \quad (6)$$

Burada  $\alpha$  şekil parametresi,  $\beta$  ölçek parametresi, P yağış miktarı,  $\bar{x}$  aritmetik ortalama T entegrasyona göre Gama fonksiyonudur ve n gözlem sayısıdır. q sıfır olasılığdır ve G(x) istenen ay ve zaman ölçeği için kümülatif dağılımdır. Kümülatif dağılım H(x) daha sonra SPI değerini temsil eden standart normal rastgele değişken Z'ye dönüştürülür (Tsakiris vd., 2007).

SPI'e kuraklık sınıflandırılması Tablo 1'de verilmiştir. SPI değerinin sıfırın altında ve üstünde olduğu dönemler sırasıyla kurak ve yağışlı dönemler olarak tanımlanır. SPI değerlerinin, sürekli olarak negatif olduğu zaman periyodu "kurak dönem" olarak tanımlanır. SPI'nin sıfırın altına ilk düştüğü ay kuraklığın başlangıcı olarak kabul edilirken indisin pozitif değere yükseldiği ay kuraklığın bitimi olarak değerlendirilir.

### Keşif Kuraklık İndeksi (RDI)

Keşif Kuraklık İndeksi “bir su kaynağı sisteminde girdi verileri ile çıktı verileri arasındaki dengeyi gözeterek, sistemdeki su eksikliği hakkında diğer kuraklık indekslerine kıyasla daha doğru bir yaklaşım sunmak için geliştirilmiştir. Keşif Kuraklık İndeksi, ölçülen yağışlar ve hesaplanan evapotranspirasyonu esas alarak, başlangıç, normalize edilmiş (ortalamaya bölünmüş) ve standartlaştırılmış (standart sapmaya bölünmüş) değerler olmak üzere” üç farklı sonuç ifade etmektedir. Sonuç olarak; elde edilen indis değerleri, Standartlaştırılmış Yağış İndeksinin indis değerleri ile benzerdir bu yüzden iki indeksin sonuçları karşılaştırılabilir. RDI yönteminde indis değerlerinin hesap edilmesi için girdi parametresi olarak aylık ortalama, minimum ve maksimum sıcaklık verileri ve yağış değerleri kullanılmaktadır. RDI olarak adlandırılan Keşif Kuraklık İndeksinde üç farklı sonuç Denklem (7), (8) ve (9)’te görüldüğü gibi hesaplanmaktadır. Keşif Kuraklık İndeksinin başlangıç değeri  $\alpha_k^{(i)}$ , ele alınan bir yıl ( $i$ ) için ve aylık ( $k$ ) zaman ölçeğine göre şu şekilde hesaplanabilir (Tsakiris vd., 2007).

$$\alpha_k^{(i)} = \frac{\sum_{j=1}^k P_{ij}}{\sum_{j=1}^k PET_{ij}} \quad i = 1 \dots N \quad (7)$$

Denklemden bulunan  $P_{ij}$  ve  $PET_{ij}$   $i$  yılının ve  $j$  ayının yağış ve hesaplanan (potansiyel) evapotranspirasyonu ve  $N$  ise sahip olunan verilerin toplamdaki kaç yıla ait olduğunu ifade etmektedir (Tigkas, 2008; Tigkas vd., 2017). İkinci bir ifade olan Normalleştirilmiş RDI ( $RDI_n$ ), her yıl için aşağıdaki Denklem (3) kullanılarak hesaplanır. Denklemden bulunan  $\bar{\alpha}_k$  parametresi,  $N$  yıllık veri için hesaplanan  $\alpha_k^i$  değerlerinin aritmetik ortalamasıdır (Tsakiris vd., 2007).

$$RDI_n^i = \frac{\alpha_k^i}{\bar{\alpha}_k} - 1 \quad (8)$$

$\bar{\alpha}_k$   $\alpha_k^i$ 'nin aritmetik ortalamasıdır.

Diğer bir ifade ile Standartlaştırılmış RDI ( $RDI_{st}$ ), SPI'nin hesaplanması için kullanılan benzer bir yol izlenerek hesaplanır. Standartlaştırılmış RDI için ifade şöyledir (Tsakiris vd., 2007):

$$RDI_{st}^{(i)} = \frac{y^i - \bar{y}}{S_x} \quad (9)$$

Burada  $y^i = \ln(\alpha_k^{(i)})$ ,  $\bar{y}$ , aritmetik ortalama ve  $S_x$  ise standart sapmayı ifade eder (Tsakiris vd., 2007).

RDI ve SPI ile elde edilen kuraklık indis değerleri aynı kuraklık sınıflandırmasına tabidir (Tsakiris vd., 2007). RDI yönteminde kullanılan kuraklık sınıfları ve aralıkları aşağıda verilmiştir (Tablo 1).

Birçok araştırma  $\alpha_k$  değerlerinin hem ln hem de gama dağılımı değerlerini takip ettiğini göstermiştir, ancak çoğu durumda gama dağılımının daha başarılı olduğu kanıtlanmıştır (Tsakiris vd., 2008; Tsakiris ve Vangelis, 2005). Bu nedenle,  $RDI_{st}$ 'in hesaplanması, verilen  $\alpha_k$  frekans dağılımına gama olasılık yoğunluk fonksiyonunun uydurulmasıyla daha iyi gerçekleştirilebilir. Gama dağılımı, frekans veya olasılık yoğunluk fonksiyonu ile tanımlanır:

$$g(x) = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} x^{\alpha-1} \times e^{-\frac{x}{\beta}}, \quad x > 0 \quad (10)$$

### Etkili Keşif Kuraklık İndeksi (eRDI)

Tarımsal kuraklık için kullanılan Etkili Keşif Kuraklık İndeksi (eRDI), RDI indeksine benzer olmasına rağmen bu indekste RDI’de kullanılan toplam yağışın yerini etkili yağış ( $P_e$ ) almaktadır. Bu indekste eRDI indeksi ( $\alpha_{ek}^{(i)}$ ), aşağıdaki gibi elde edilmektedir (Tigkas vd., 2016) :

$$\alpha_{ek}^{(i)} = \frac{\sum_{j=1}^k P_{ej}}{\sum_{j=1}^k PET_{ij}} \quad i = 1 \dots N \quad (11)$$

Burada  $P_{ej}$  efektif yağış ve  $PET_{ij}$  potansiyel evapotranspirasyon değeridir. Gama fonksiyonu  $x=0$  için tanımlanmadığından ve yağış sıfır olabileceğinden, kümülatif olasılık olur (Rassoul vd., 2019):

$$H(x) = q + (1 - q)G(x) \quad (12)$$

Burada  $q$  sıfır yağış olasılığı ve  $G(x)$  eksik gama fonksiyonunun kümülatif olasılığıdır. Eğer  $m$  bir  $\alpha_k$  zaman ölçeğindeki sıfır sayısı ise,  $q$  şu şekilde tahmin edilebilir ( $m/n$ ). RDI ve eRDI kuraklık sınıflandırması benzerdir (Rassoul vd., 2019).

### Etkili Yağış Hesabı

Her bilim dalı veya farklı araştırma hedefleri, etkili yağış ( $P_e$ ) kavramı için farklı yorumlara sahip olabilir (Tigkas vd., 2016). Tigkas vd. (2016) tarımsal kuraklığı değerlendirmek için eRDI'yi önermiştir. Mevcut çalışmada da tarımsal kuraklığı temsil eden etkili yağış tanımı dikkate alınmıştır. Dolayısıyla, efektif yağış, mahsulün su ihtiyacını doğrudan karşılayan yağış yüzdesidir (Rahman vd., 2008). Bu çalışmada, efektif yağışı hesaplamak için ABD Islah Bürosu yöntemi (USBR) kullanılmıştır (Stamm, 1967). Ayrıca, bu yöntem genellikle kurak veya yarı kurak bölgeler için önerilmektedir (Tigkas vd., 2016, 2019).

$$\left\{ \begin{array}{l} P_e = \left( \frac{P \times (125 - (0.2 \times P))}{125} \right) \quad P \leq 250 \text{ mm} \\ P_e = (0.1 \times P) + 125 \quad P > 250 \text{ mm} \end{array} \right. \quad (13)$$

Burada  $P_e$  etkili yağışı,  $P$  ise toplam yağışı temsil etmektedir.

**Tablo 1.** RDI, eRDI ve SPI için Kuraklık Sınıflandırılması (Barua vd., 2011)

Sınıflandırma	Aralık
Olağan üstü yağışlı	değer $\geq 2.00$
Şiddetli yağışlı	$1.50 \leq \text{değer} < 2.00$
Ilıman (orta) yağışlı	$1.00 \leq \text{değer} < 1.50$
Normal	$-1.00 \leq \text{değer} < 1.00$
Ilıman kurak	$-1.50 \leq \text{değer} < -1.00$
Şiddetli kurak	$-2.00 \leq \text{değer} < -1.50$
Çok şiddetli kurak	değer $\leq -2.00$

### Pettitt Testi (PT)

Tartışmalı veriler içeren hidro-meteorolojik zaman serilerinde tek bir değişim noktasını belirlemek için Pettitt testi kullanılabilir.  $\{X_1, X_2, \dots, X_n\}$ , olmak üzere  $n$  gerçeklemeli bir zaman serisi için değişim noktasının zamanı  $m$  olsun. Örneğin  $\{X_1, X_2, \dots, X_n\}$ , ve  $\{X_{m+1}, X_{m+2}, \dots, X_n\}$  zaman serilerini göz önünde bulundurulduğunda, test istatistiği zaman serisini  $m$  zamanına bölünerek elde edilir.

Test istatistiği  $U_m$  şu şekilde yazılabilir (Chen vd., 2009).

$$U_m = \sum_{i=1}^m \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(x_i - x_j) \quad (14)$$

$$\text{sgn}(x) = \begin{cases} 1 & x > 0 \\ 0 & x = 0 \\ -1 & x < 0 \end{cases} \quad (15)$$

Daha sonra,  $|U_t|$   $t$  zamanında ana değişim noktası olarak kabul edilir. Böylece, dönüm noktası için yaklaşık önemli değişim olasılığı  $P(t)$  ile verilir:

$$P(t) = 1 - e^{-\frac{6U_t^2}{n^3 + n^2}} \quad (16)$$

Değişim noktası, yaklaşık olasılık  $(1-\alpha)$  değerini aştığında istatistiksel olarak önemli olan  $\alpha$  seviyesidir.

### Sen Eğilim Metodu

Sen (1968) tarafından geliştirilen ve bir trendin büyüklüğünü (eğimini) belirlemek için kullanılan parametrik olmayan bir testtir. Bu yöntem, büyük veri hatalarından veya aykırı değerlerden etkilenmeyen yapısıyla, verilerin zaman serisinde doğrusal bir eğilim varsa birim zamandaki değişimi hesaplamak için uygulanır (Yu vd., 1993). Doğrusal zaman serilerinin gerçek eğimi (birim zamandaki değişim) eğilimi Sen (1968) tarafından belirlenmiştir.

$$F(x) = ax + b \quad (17)$$

Burada  $f(t)$  doğrusal eğilim fonksiyonudur,  $a$  ve  $b$  ise sırasıyla denklemin eğimi ve sabitidir. Bu yöntem trendin büyüklüğünü aşağıdaki gibi tahmin eder (Adnan vd., 2018; Mersin, Tayfur, vd., 2022):

$$\beta = \text{median} \left( \frac{x_i - x_j}{t_i - t_j} \right) \quad (18)$$

Burada  $x_i$  ve  $x_j$  sırasıyla  $t_i$  ve  $t_j$  zamanındaki veri değerleridir ( $i > j$ ).  $\beta$  ise trendin büyüklüğünü gösterir.

## BULGULAR VE TARTIŞMA

### Elazığ İçin İklim Verisi Analizi

Mevcut çalışmada Elazığ için aylık sıcaklık (ortalama) ve yağış verileri 1979-2022 yılları için Sen eğimi ve Pettitt testi uygulanarak veriler analiz edilmiş ve Tablo 2'te gösterilmiştir. Yağış verilerinde %95 güven aralığında bütün meteorolojik istasyonları için azalma eğilimi tespit edilirken, aynı şekilde ortalama sıcaklık için bütün istasyonlarda artış eğilimi tespit edilmiştir. Bu eğilimler Sen'in eğim yöntemi ile de değerlendirilmiştir.

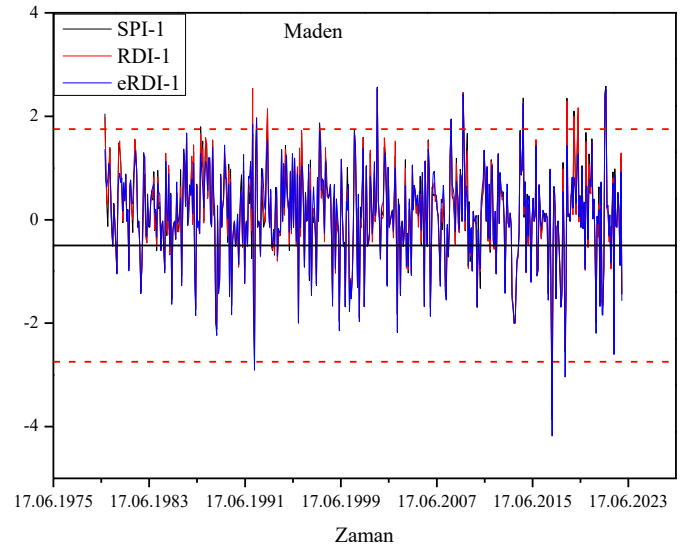
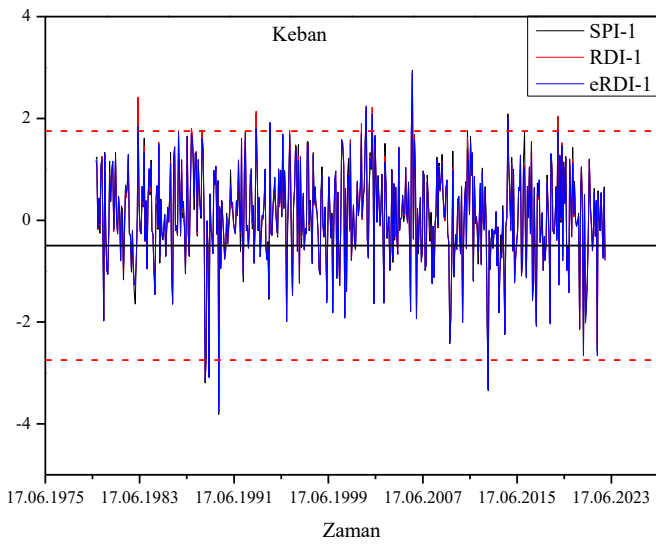
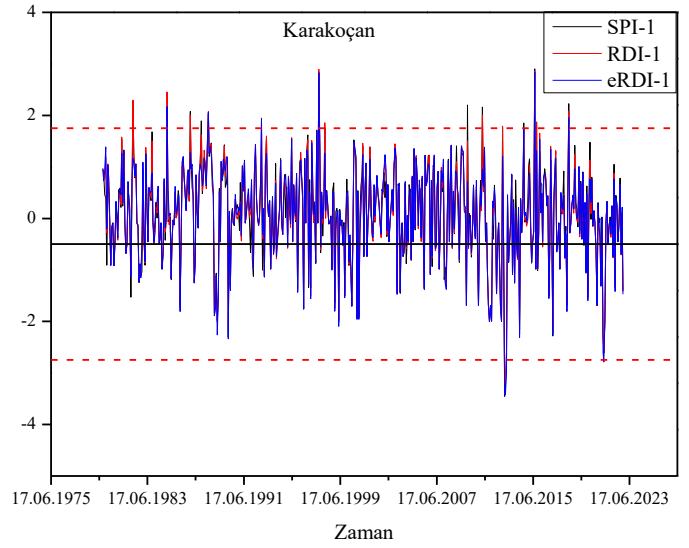
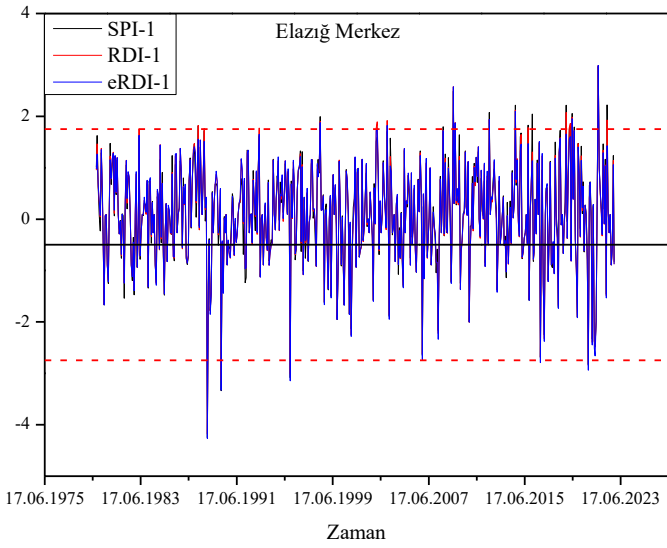
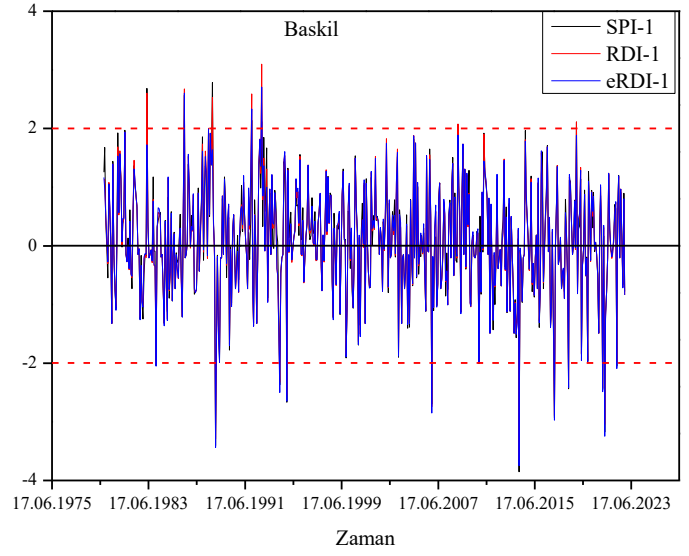
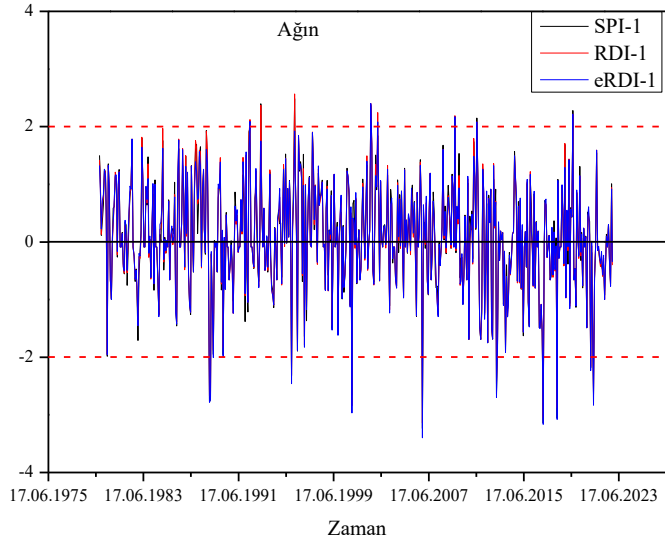
**Tablo 2** Elazığ İl ve İlçeleri için Sen Eğimi ve Pettitt Testi Sonuçları

İstasyon adı	Yağış (mm)					Ortalama sıcaklık (°C)				
	Maks.	Ort.	Std. sapma	Sen Eğimi	Pettitt	Maks.	Ort.	Std. sapma	Sen Eğimi	Pettitt
Ağın	174,3	39,382	37,732	-0,014	0,072	31,106	14,421	9,652	0,004	0,713
Baskil	208,1	33,983	31,747	-0,008	0,492	28,232	11,948	9,492	0,003	0,871
Elazığ Merkez	160,5	33,440	31,591	-0,0002	0,015	29,600	13,407	9,763	0,005	0,410
Karakoçan	284,5	51,073	48,098	-0,015	0,091	27,713	11,246	9,915	0,003	0,942
Keban	174,4	28,927	27,861	-0,005	0,412	31,716	15,129	9,665	0,004	0,821
Maden	474,6	67,491	73,948	-0,009	0,787	31,519	14,531	9,801	0,004	0,932
Palu	223,9	41,631	41,320	-0,009	0,115	29,855	13,994	9,811	0,004	0,96
Sivrice	287,0	48,195	48,259	-0,004	0,735	27,874	12,305	9,380	0,004	0,889

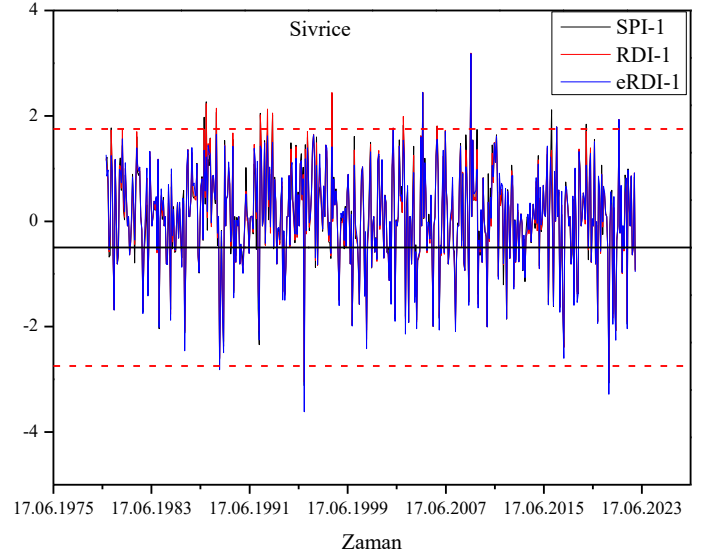
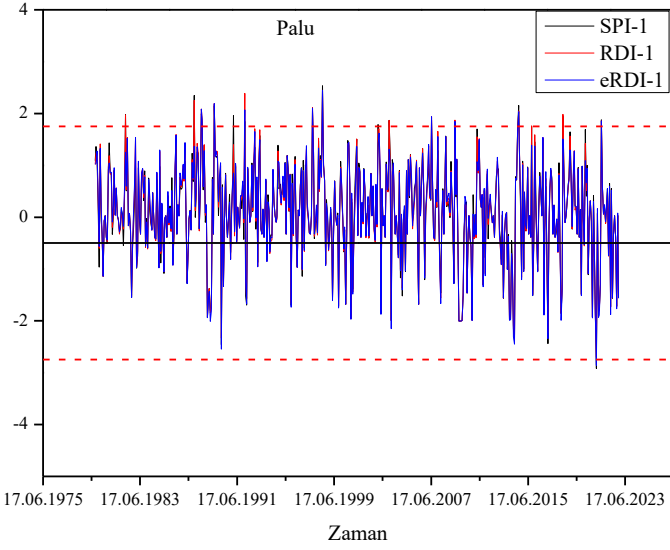
Burada; Pettitt testi için elde edilen p değeri eğer 0.05 önem seviyesinden büyükse verilerin homojen olduğunu göstermektedir. Tablodan anlaşılacağı üzere elde edilen Elazığ merkez istasyon hariç bütün istasyonlar için elde edilen p değerleri 0.05'ten büyük olduğundan veriler homojen olarak dağılmıştır.

Elazığ il ve ilçeleri için aylık ve yıllık zaman ölçekleri kullanılarak meteorolojik kuraklık (RDI ve SPI) ve tarımsal kuraklık (eRDI) için indislerin değerleri hesaplanarak mevcut çalışma değerlendirilmiştir. Şekil 2'de 1979-2022 yılları arasında elde edilen aylık zaman ölçeği kullanılan elde edilen meteorolojik kuraklığın (RDI-1 ve SPI-1) tarımsal kuraklığın (eRDI-1) değişimi verilmiştir. Bu tarih aralığında eRDI-1, RDI-1 ve SPI-1 için kurak ve yağışlı dönemler elde edilmiştir. Elde edilen bulgular, özellikle Ağın ve Baskil ilçesinde gözle görülür tarımsal ve meteorolojik kuraklığın oluştuğunu vurgulamaktadır. Şekil 2'de görüldüğü gibi, eRDI-1, RDI-1 ve SPI-1 için kuraklık çok şiddetli, şiddetli ve ılıman kuraklık ve yağışlı periyotlar gözlenmiştir. Elazığ il ve ilçelerinde meydana gelen kuraklığı daha iyi anlamak için tarımsal ve meteorolojik kuraklıklar aylık ölçekte çizilerek ekstrem (en yağışlı ve en kurak) dönemler saptanmıştır. Şekil 2'e göre, en yüksek ve en düşük eRDI-1, RDI-1 ve SPI-1 değerleri Maden ve Elazığ Merkez'de elde edilmiştir. En fazla kuraklık is Ağın ve Baskil'de oluşmuştur. Sonuç olarak, tüm istasyonlarda hem çok şiddetli kurak ve hem de yağışlı dönemler meydana gelmiştir. 1979-2022 yılları arasında tüm istasyonlarda her çeşit kurak ve yağışlı dönemler gözlenmiştir.

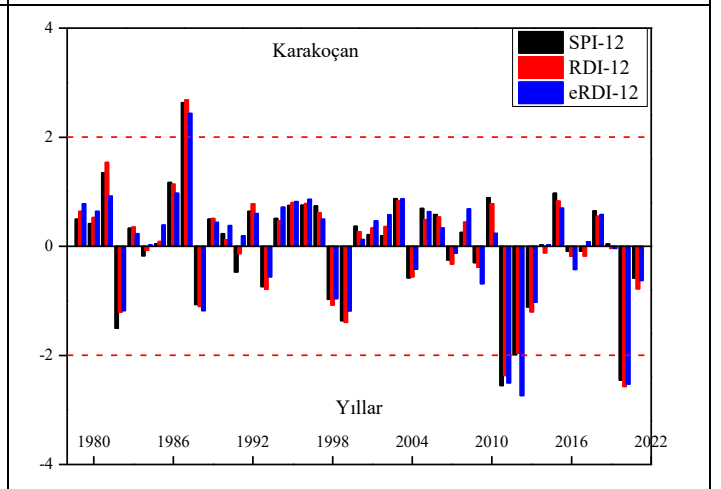
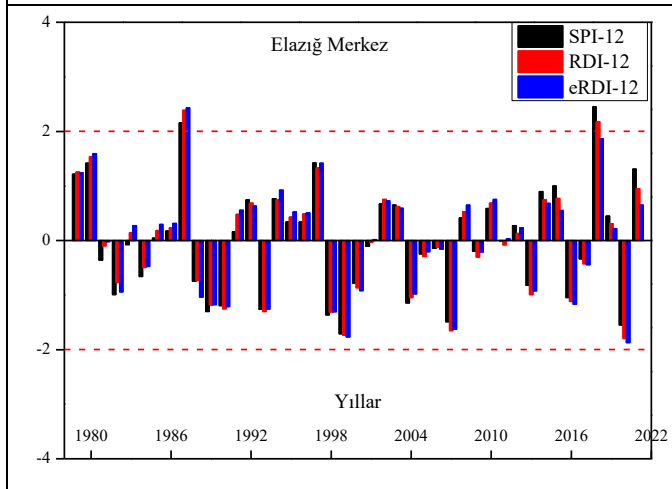
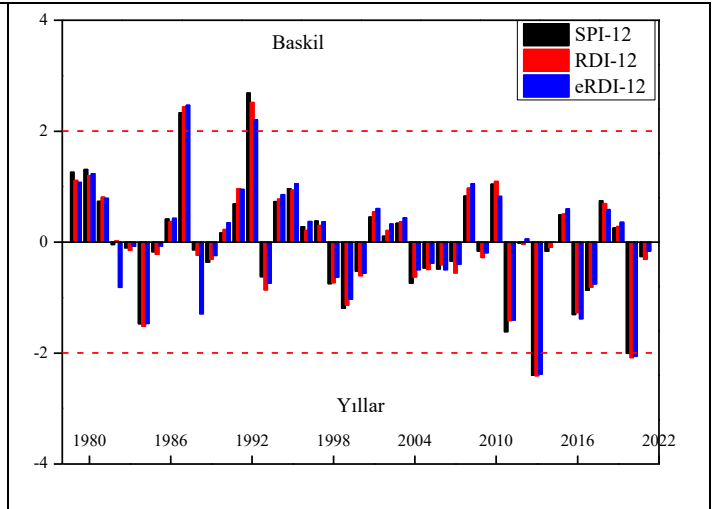
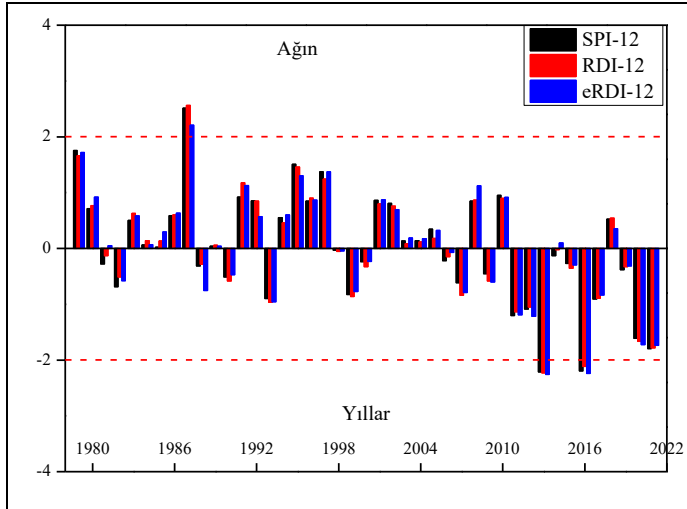
Şekil 3'te Elazığ il ve ilçeleri meteorolojik kuraklık (SPI-12 ve RDI-12) ve tarımsal kuraklık (eRDI-12) için elde edilen sonuçların için yıllık zaman ölçeğinde değişimi verilmiştir. Yıllık veriler kullanılarak yapılan karşılaştırmada (Şekil 3), meteorolojik kuraklık (RDI ve SPI) ve tarımsal kuraklık (eRDI) indekslerinin sonuçları genel olarak birbirleriyle uyumludur. Bununla birlikte Ağın, Palu ve Baskil ilçelerinde 2009-2014 ve 2019-2022 yılları arasında gözle görülür meteorolojik ve tarımsal kuraklıklar meydana gelmiştir. Şekilde görüldüğü gibi, Elazığ Merkez ve Sivrice hariç diğer tüm istasyonlarda eRDI-12, RDI-12 ve SPI-12 çok şiddetli kuraklık meydana gelmiş ancak tüm istasyonlarda ılıman ve şiddetli kurak dönemler gözlenmiştir. Genel olarak meteorolojik ve tarımsal kuraklık indislerinin yıllık değerlerinin birbirine benzer olduğu görülmektedir.

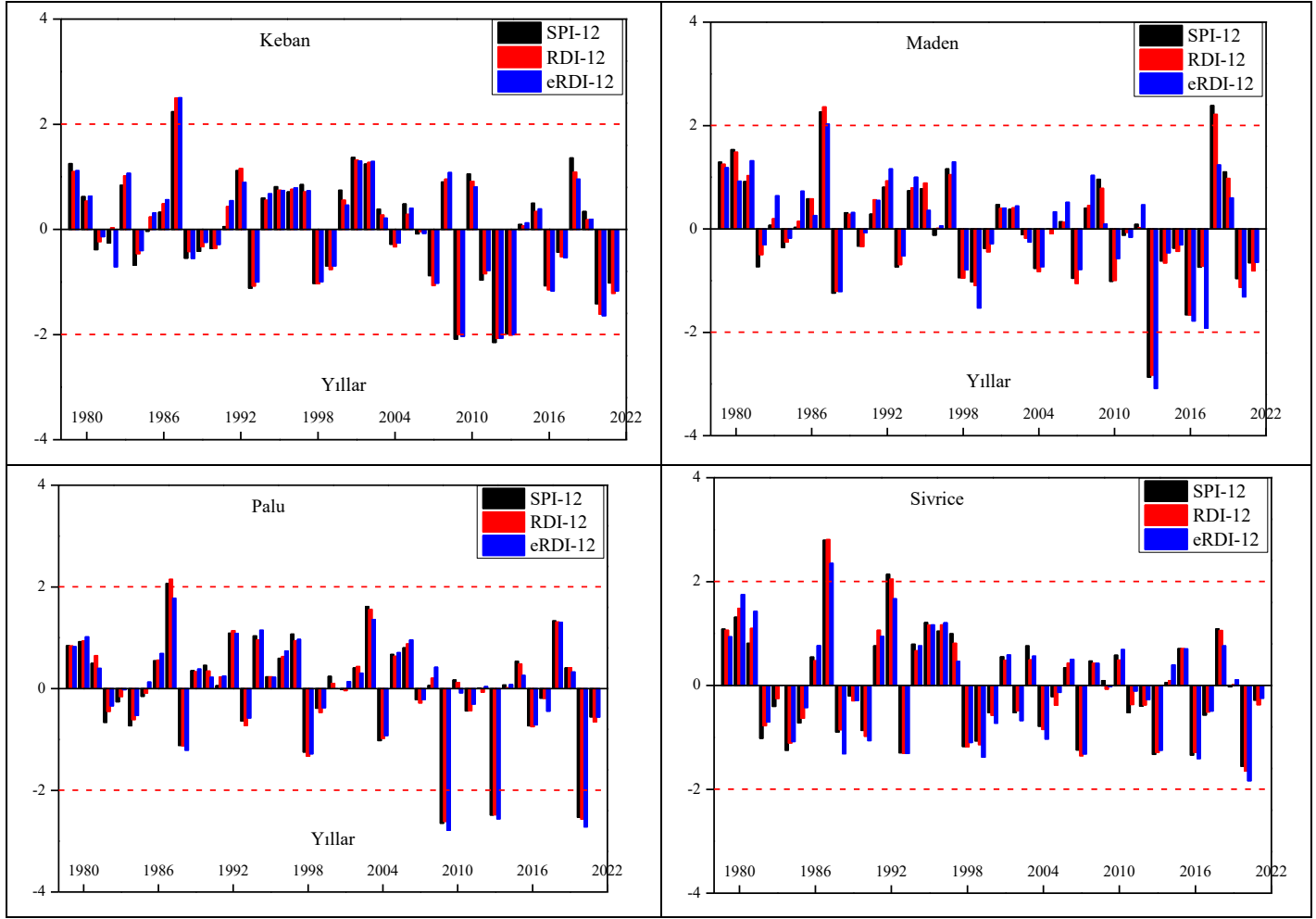






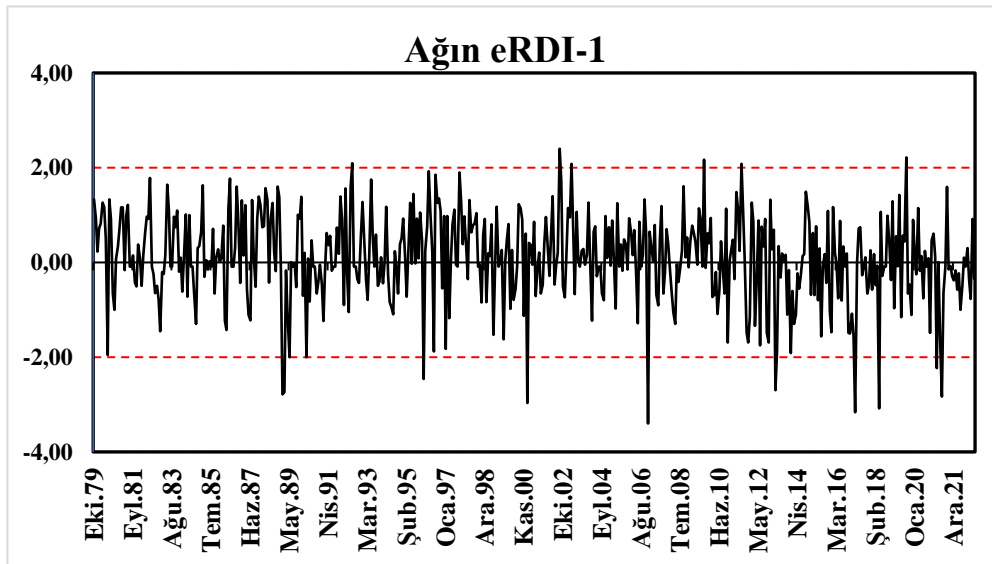
Şekil 2. Meteorolojik (SPI-1 ve RDI-1) ve Tarımsal Kuraklık (eRDI-1) Değerlerinin Aylık Zaman Ölçeğinde Değişimi



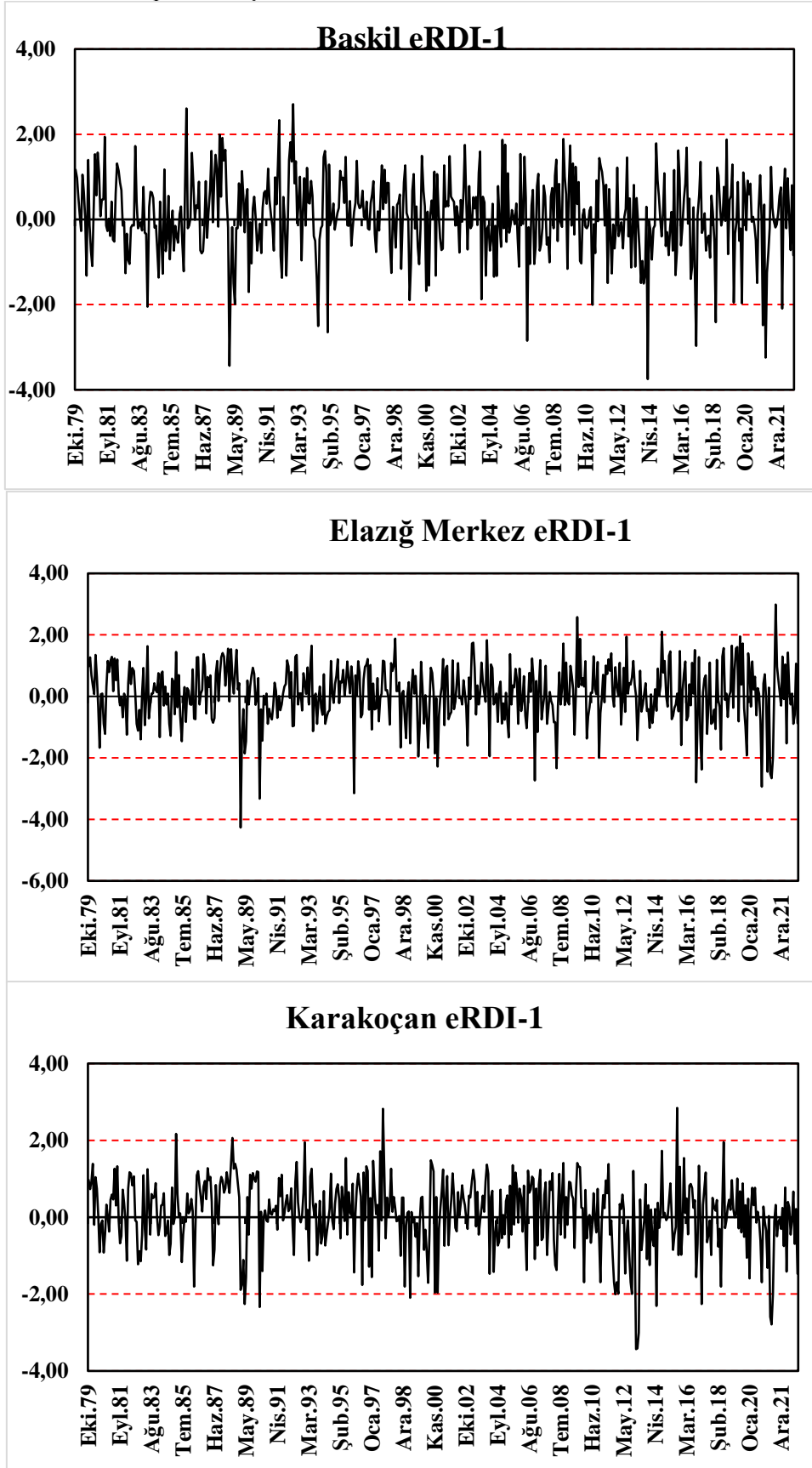


Şekil 3. Meteorolojik (SPI-12 ve RDI-12) ve Tarımsal Kuraklık (eRDI-12) Değerlerinin Yıllık Zaman Ölçeğinde Değişimi

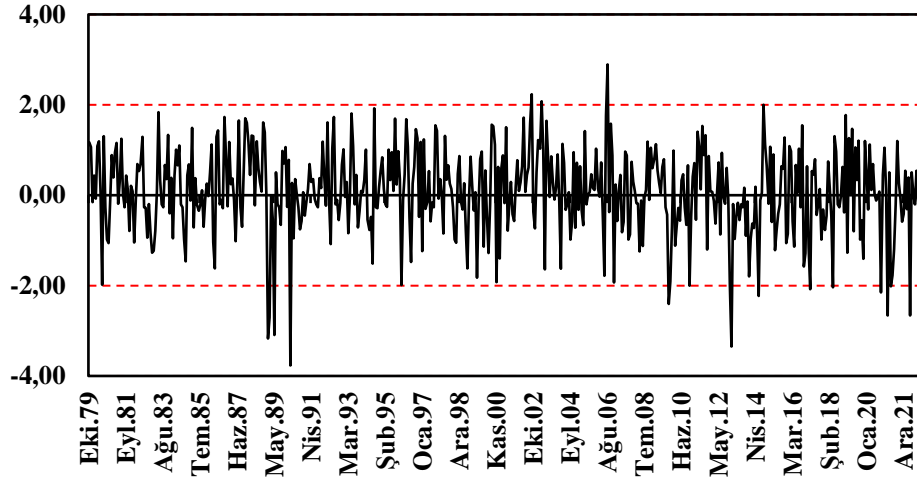
Şekil 4'te tarımsal kuraklığın belirlenmesinde kullanılan Etkili Keşif Kuraklık İndeksi (eRDI) ile elde edilen kuraklığın aylık zaman ölçeklerinde eRDI-1'nin değişimi verilmiştir. Baskil ve Ağın ilçelerinde çok şiddetli tarımsal kuraklıkların olduğu grafiklerden anlaşılmaktadır. Şekil 4'te görüldüğü gibi tarımsal kuraklık özellikle Ağın ve Baskil ilçelerinde görülmektedir. Özellikle Türkiye'nin kayısı üretiminde önemli bir yeri olan Elazığ için sorun olmaktadır. Elazığ'da özellikle Baskil ilçesinde kayısı üretimi fazla olduğunda tarımsal kuraklık kayısı için sıkıntı yaratacaktır. Bu nedenle tarımsal kuraklığın dikkate alınarak gerekli tedbirlerin alınması elzemdir. Sonuç olarak,



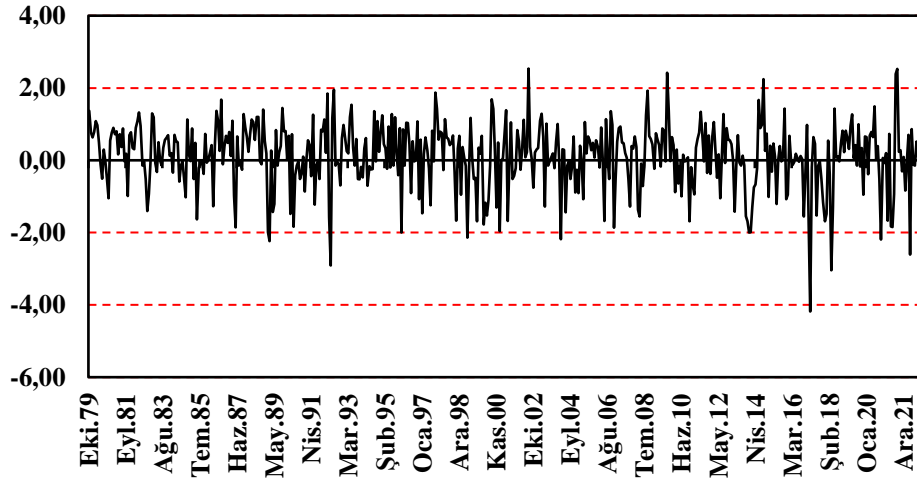
eRDI ile elde edilen sonuçlara göre son yıllarda hem aylık hem de yıllık ölçekte neredeyse tüm istasyonlarda gözle görülür bir tarımsal kuraklık tespit edilmiştir.



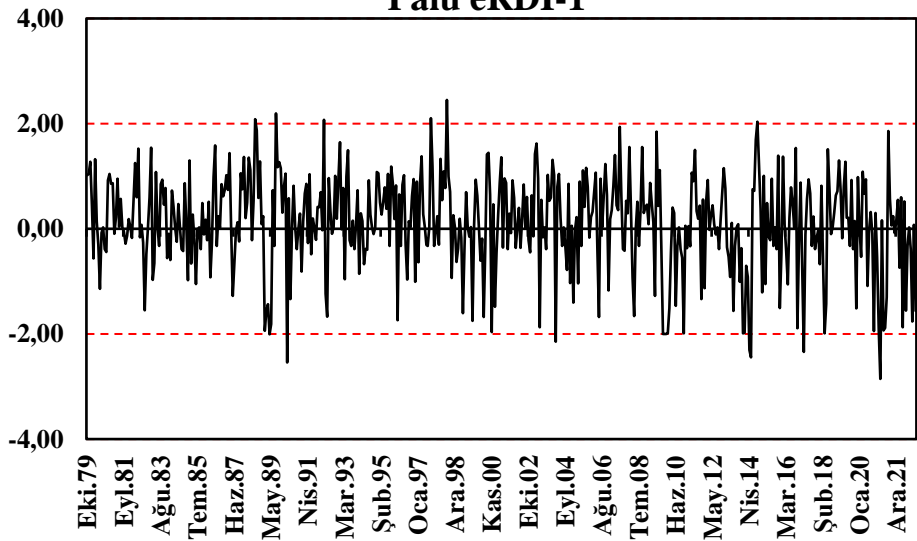
### Keban eRDI-1

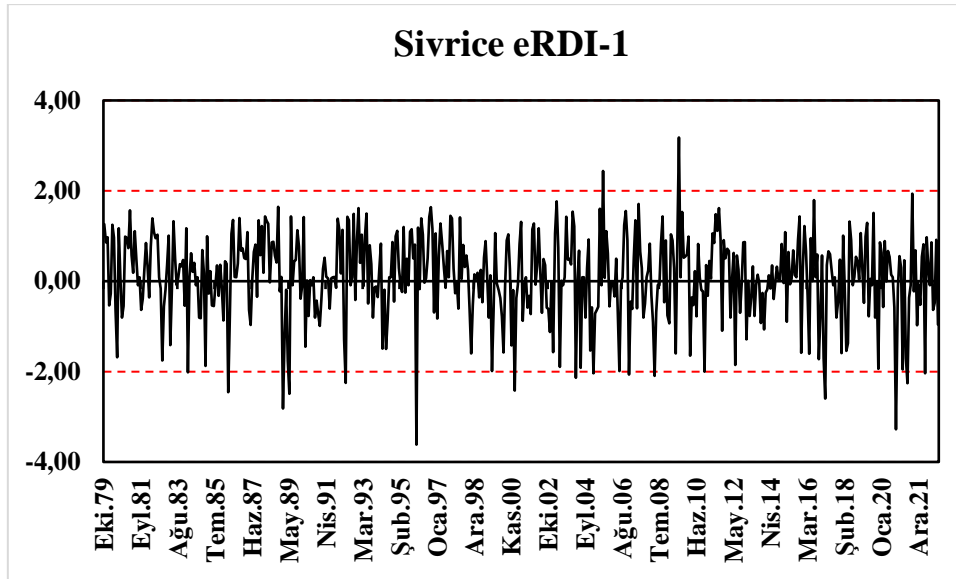


### Maden eRDI-1



### Palu eRDI-1

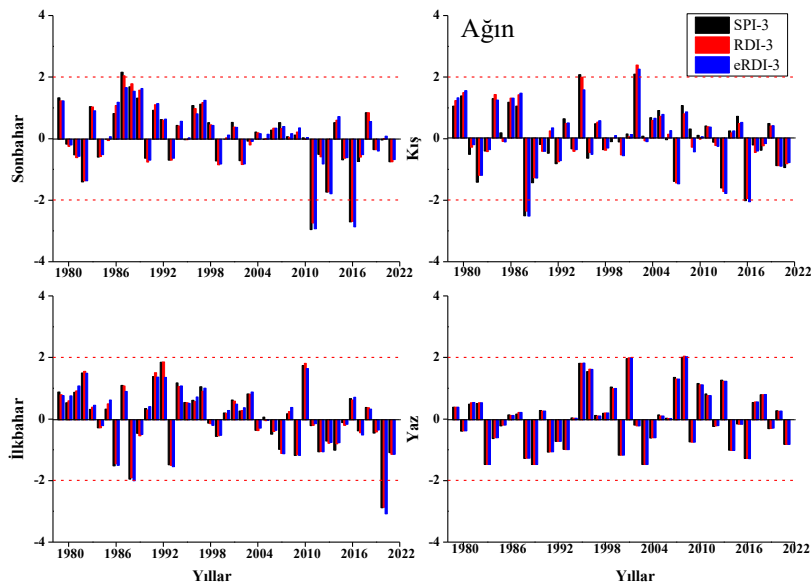


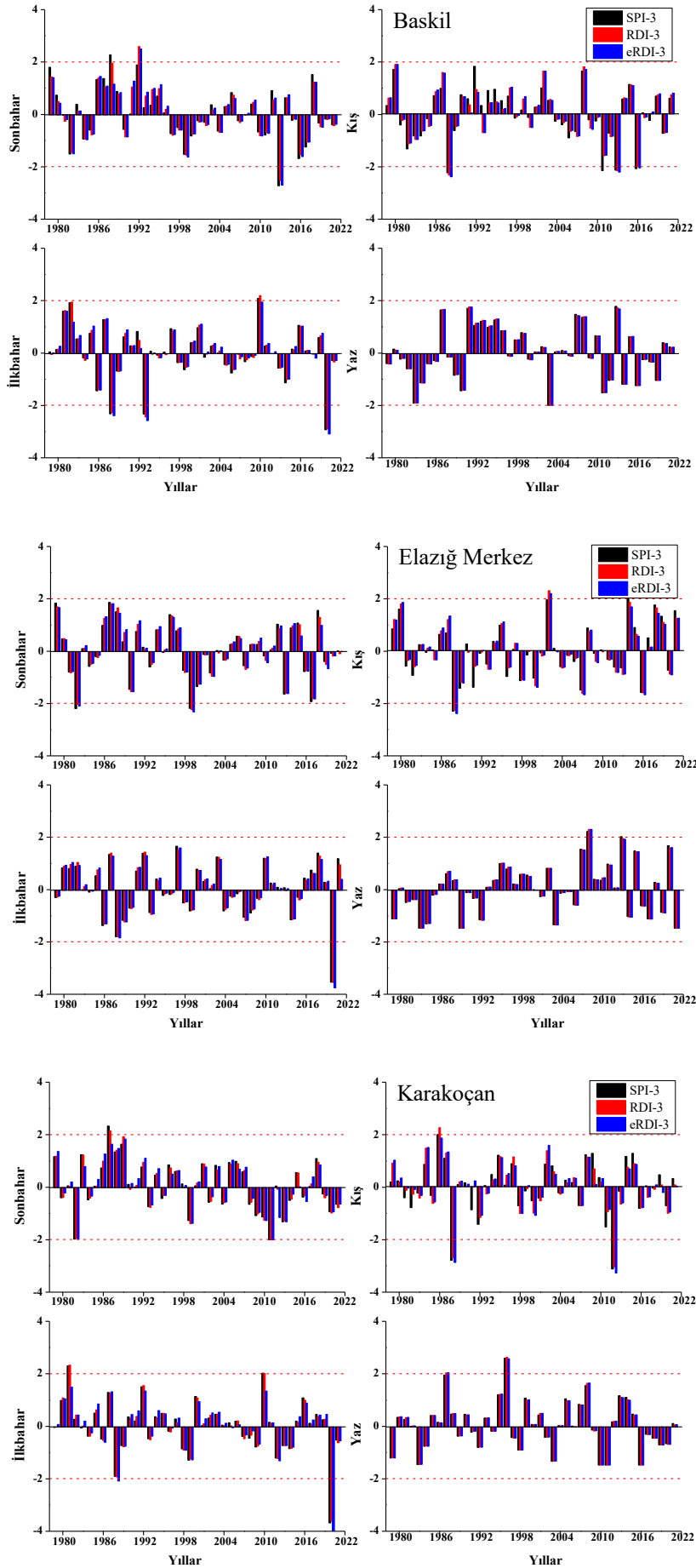


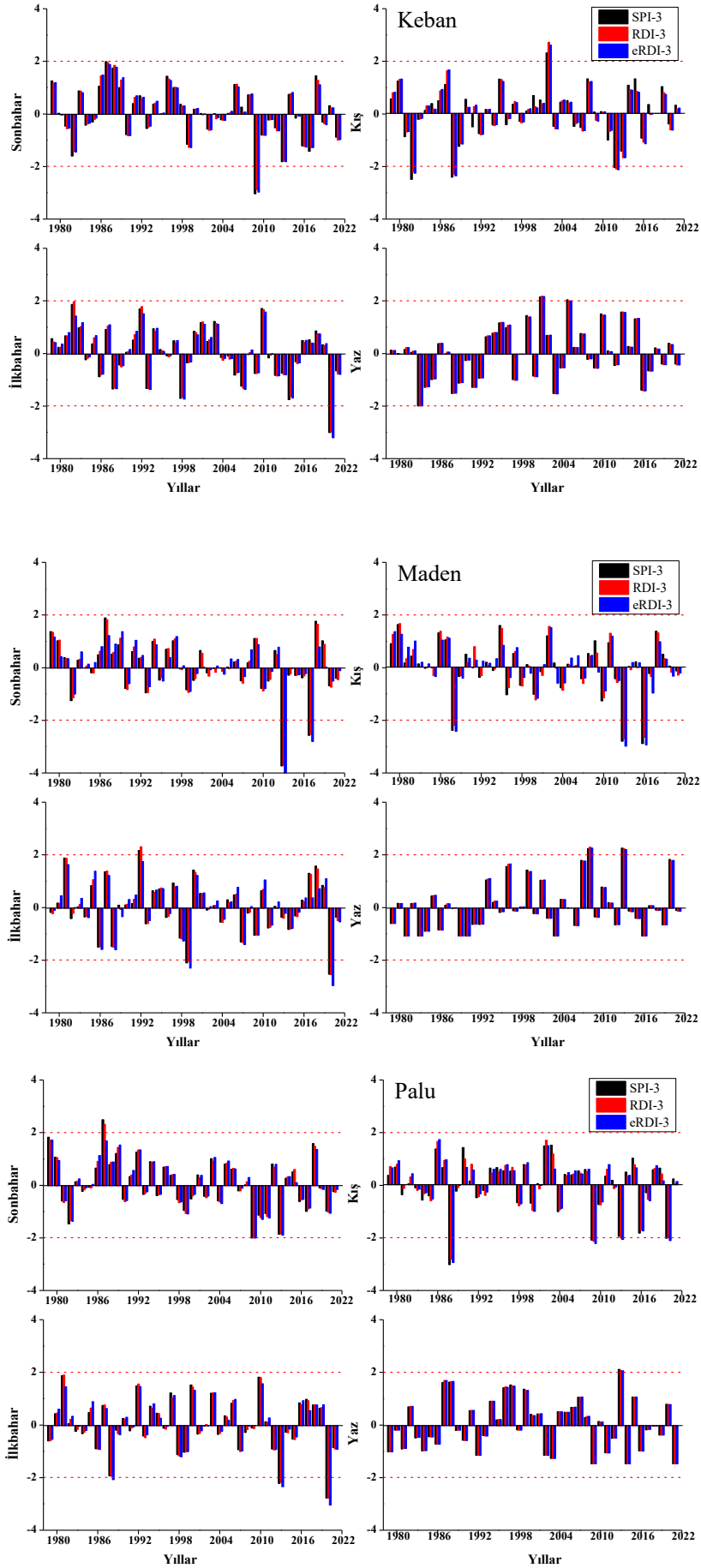
Şekil 4. Elazığ İl ve İlçeleri için Tarımsal Kuraklık (eRDI-1) Değerlerinin Değişimi

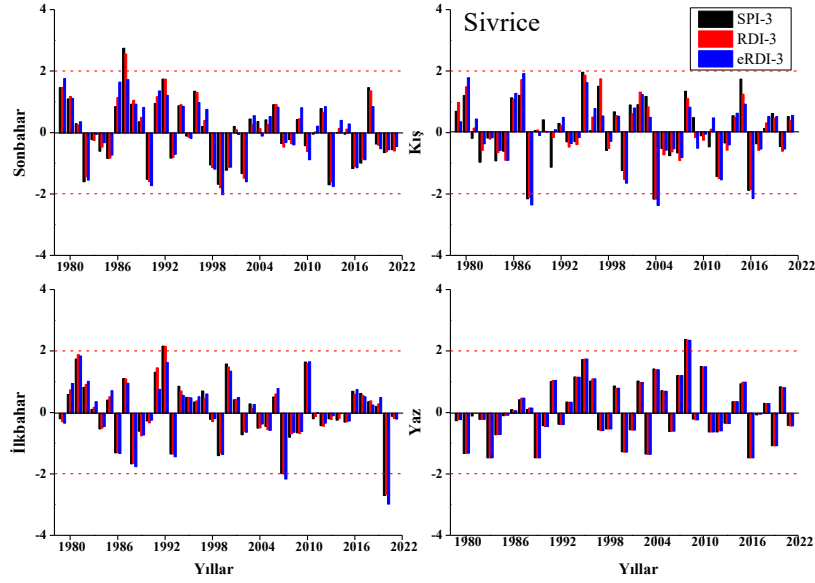
Keşif Kuraklık İndeksi (RDI) de tıpkı meteorolojik kuraklık için kullanılan Standartlaştırılmış Yağış İndeksi (SPI) gibi aynı kuraklık sınıflandırmasına sahiptir (Tablo 1). Meteorolojik kuraklıkta SPI yönteminde yağış verileri kullanılırken, RDI indeksinde ise yağışla birlikte buharlaşma miktarı da hesaplamada kullanılmaktadır. Elazığ il ve ilçelerinde kuraklık analizi yapmak için MGM'den 8 farklı istasyona ait yağış, sıcaklık ve buharlaşma verileri temin edilerek meteorolojik kuraklık (SPI ve RDI) ve tarımsal kuraklık (eRDI) incelenmiştir. RDI, eRDI ve SPI değeri sıfırın üzerinde olan indis değerleri "kuraklık yok" olarak tanımlanmıştır, sıfırın altında olan değerler ise ılıman, şiddetli ve çok şiddetli kuraklık olmak üzere farklı kuraklık sınıflarına göre ayrılmıştır (Tablo 1).

Şekil 5'te Elazığ il ve ilçeleri için meteorolojik (SPI-3 ve RDI-3) ve tarımsal kuraklık (eRDI-3) değerlerinin mevsimler olarak değişimi verilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere hem kurak hem de yağışlı dönemler meydana gelmiştir. Genel olarak özellikle yaz mevsimi hariç sonbahar ve ilkbahar mevsimlerinde çok şiddetli meteorolojik ve tarımsal kuraklığın oluştuğu söylenebilir. Ancak Baskil ilçesinde neredeyse tüm mevsimlerde çok şiddetli kuraklıkların oluştuğu görülmektedir. Aynı durumun Ağın ilçesi özelinde de meydana geldiği görülmektedir. Sonuç olarak Elazığ il ve ilçelerinde ılıman ve şiddetli kuraklıkları neredeyse bütün mevsimlerde meydana geldiği ancak çok şiddetli kuraklıkların ise genel olarak sonbahar mevsiminde meydana gelmiştir.



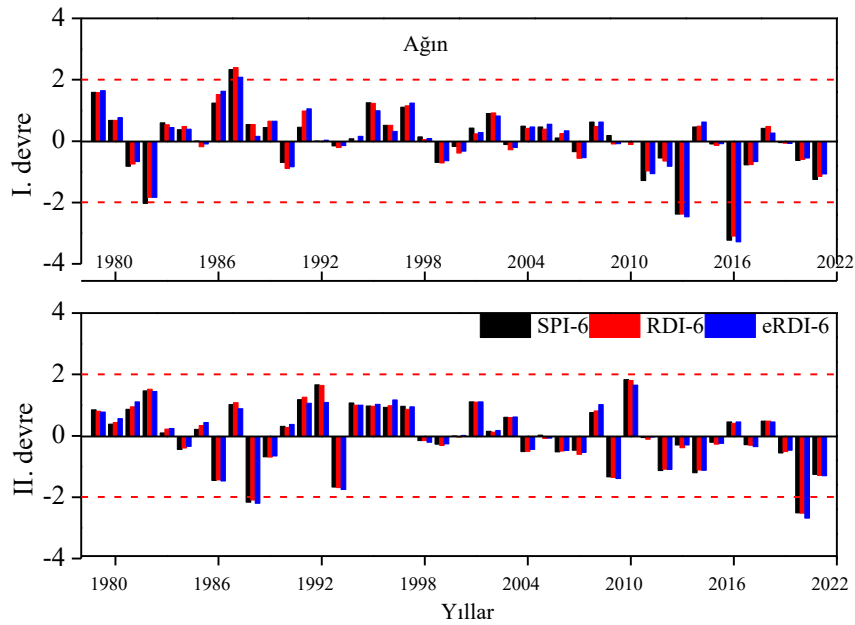




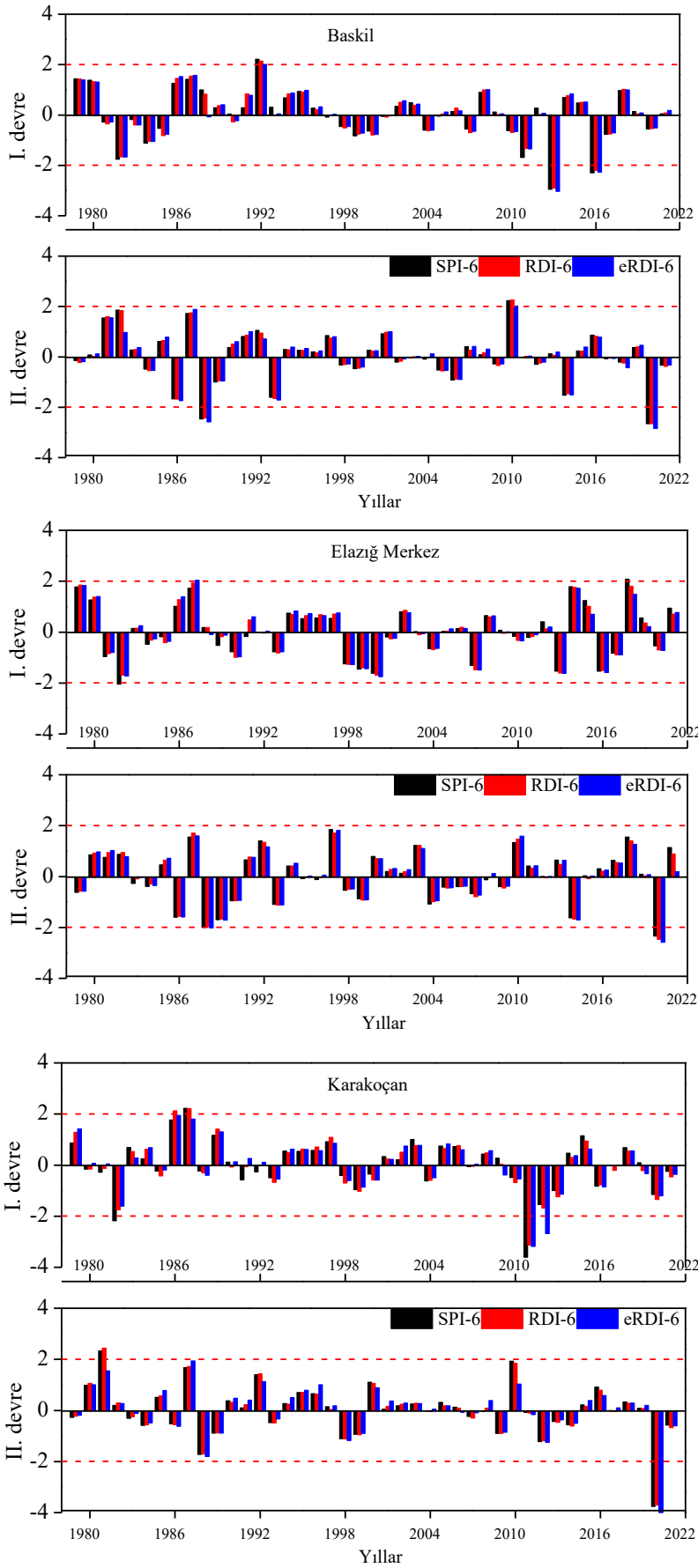


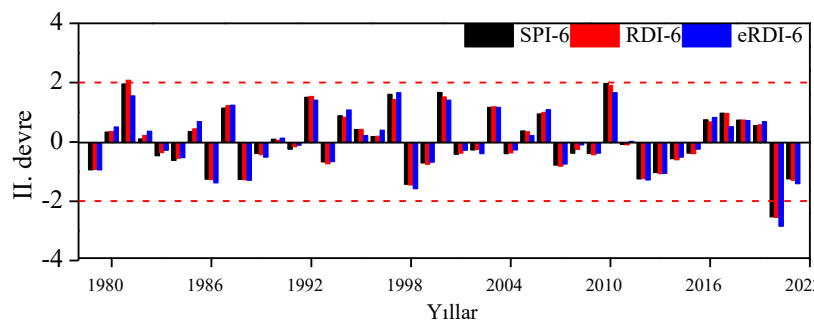
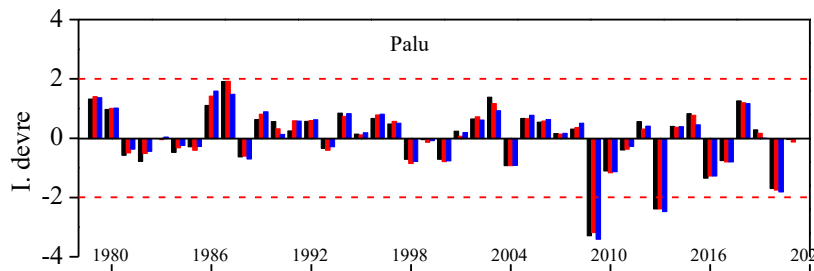
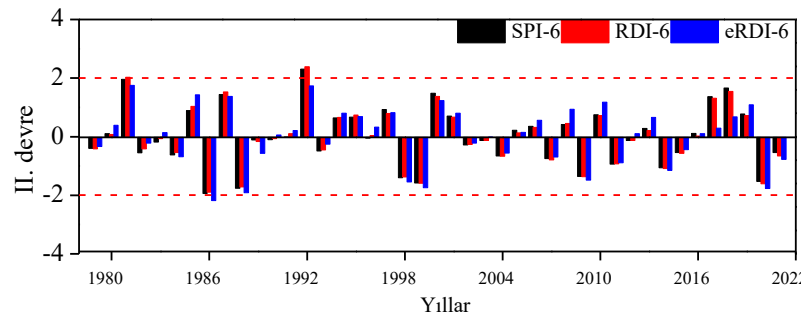
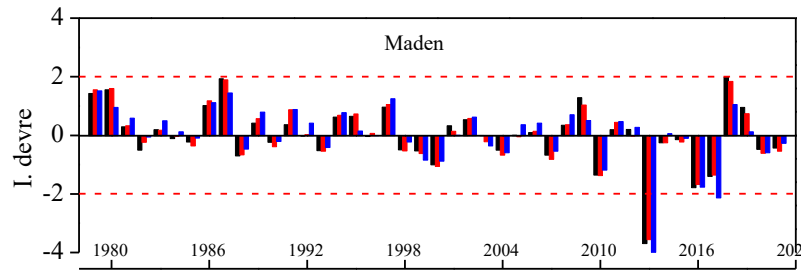
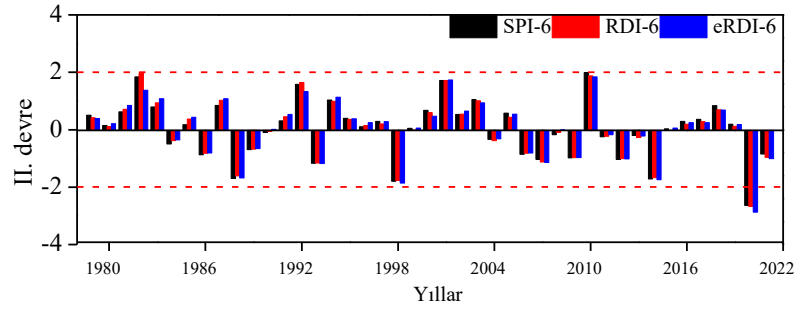
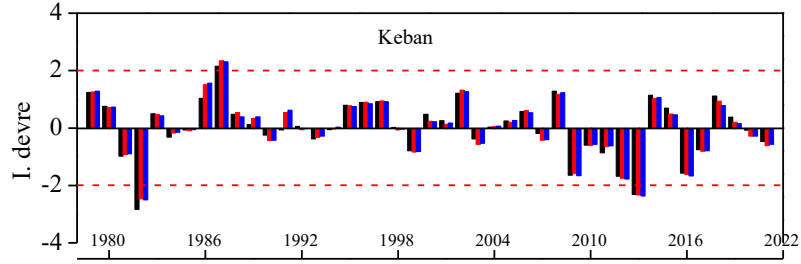
Şekil 5. Elazığ İl ve İlçeleri için Tarımsal (eRDI-3) ve Meteorolojik (SPI-3 ve RDI-3) Kuraklık Değerlerinin Değişimi

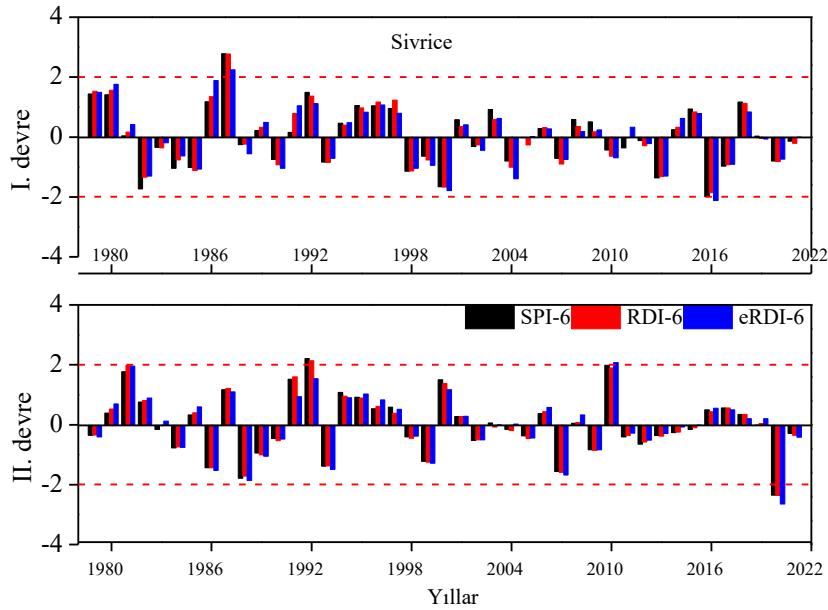
Şekil 6’te Elazığ il ve ilçeleri için meteorolojik (SPI-6 ve RDI-6) ve tarımsal kuraklık (eRDI-6) değerlerinin dönemsel olarak değişimi verilmiştir. Su yılı ekim ayında başladığından dolayı I. Devreyi temsilen Ekim, Kasım, Aralık, Ocak, Şubat ve mart ayları, diğer aylar ise II: devreyi temsil etmektedir. Şekilde görüldüğü üzere hem kurak hem de yağışlı dönemler I. ve II. devrelerde meydana gelmiştir. Genel olarak özellikle son yıllarda (2018-2020) çok şiddetli meteorolojik ve tarımsal kuraklıkların II. Devre aylarında oluştuğu görülmektedir. 2010’lu yıllarda da I. Devre aylarında çok şiddetli kuraklıklar meydana gelmiştir. Sonuç olarak Elazığ il ve ilçelerinde ılıman ve şiddetli kuraklıkları neredeyse bütün dönemlerde meydana geldiği görülmektedir.







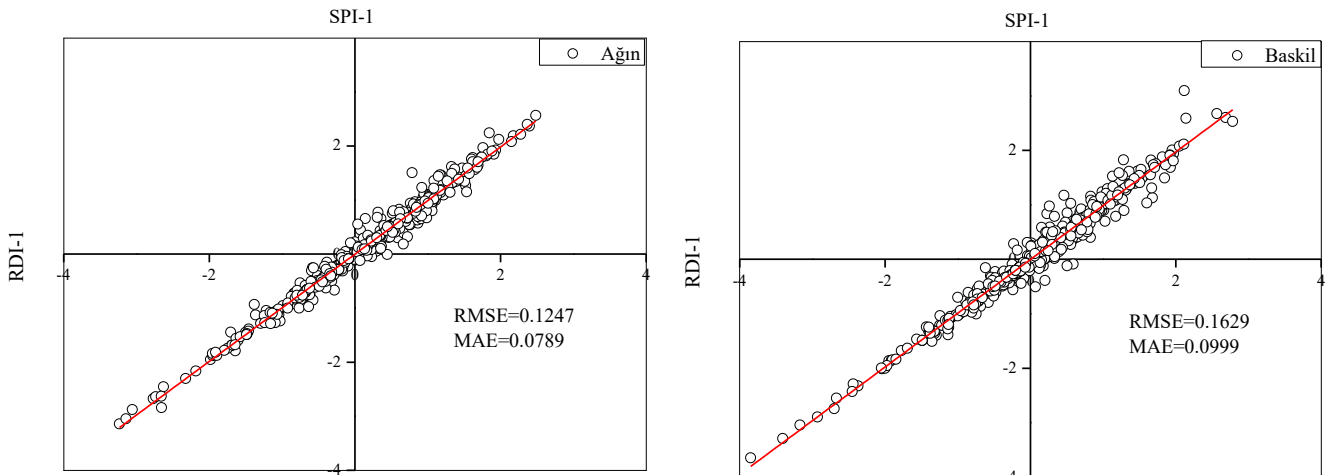


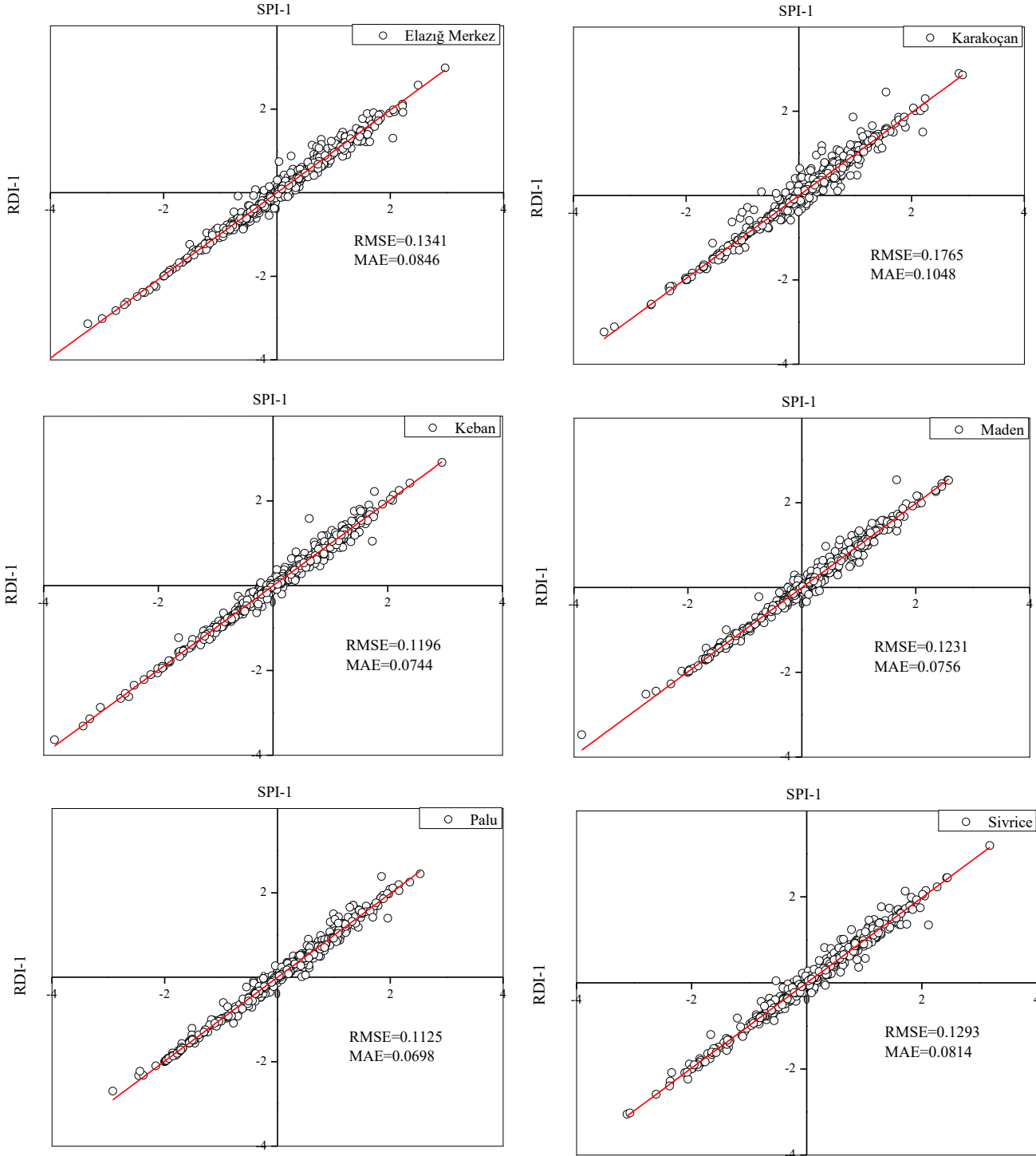


**Şekil 6.** Elazığ İl ve İlçeleri için Tarımsal (eRDI-6) ve Meteorolojik (SPI-6 ve RDI-6) Kuraklık Değerlerinin Değişimi

SPI ve RDI için yapılan lineer korelasyonda güçlü bir ilişki ortaya çıkmıştır. Şekil 7’de bütün istasyonlarda meteorolojik kuraklık için kullanılan RDI ve SPI arasındaki ilişki gösterilmiştir. SPI ve RDI arasındaki ilişkiyi irdelemek için ortalama mutlak hata ( $MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^n |(p_i - o_i)|$ ) ve kök ortalama karesel hata ( $RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (o_i - p_i)^2}$ ) değerleri kullanılmıştır. Burada,  $p$  tahmin edilen değer ve  $o$  gözlenen değerdir,  $o_i$  ve  $p_i$  gözlenen ve tahmin edilen  $i^{\text{th}}$  değeridir. Hata değerlerinin 0'a yakın olması mümkün olan en doğru tahmin sonuçlarına sahip oldukları anlamına gelir (Katipoğlu ve Sarıgöl, 2023).

Şekilde görüldüğü gibi SPI ve RDI arasındaki RMSE değeri 1 aylık zaman serisinde en düşük  $RMSE=0.1125$  ve  $MAE=0.0698$  Palu ilçesinde saptanırken, en yüksek değerler 1 aylık zaman serisinde  $RMSE=0.1765$  ve  $MAE=0.1048$  değerleri Karakoçan ilçesinde elde edilmiştir. Şekildeki karşılaştırmalarda görüldüğü gibi RDI ve SPI değerleri arasında il genelinde birbirleriyle tutarlı sonuçlar elde edilmiştir.

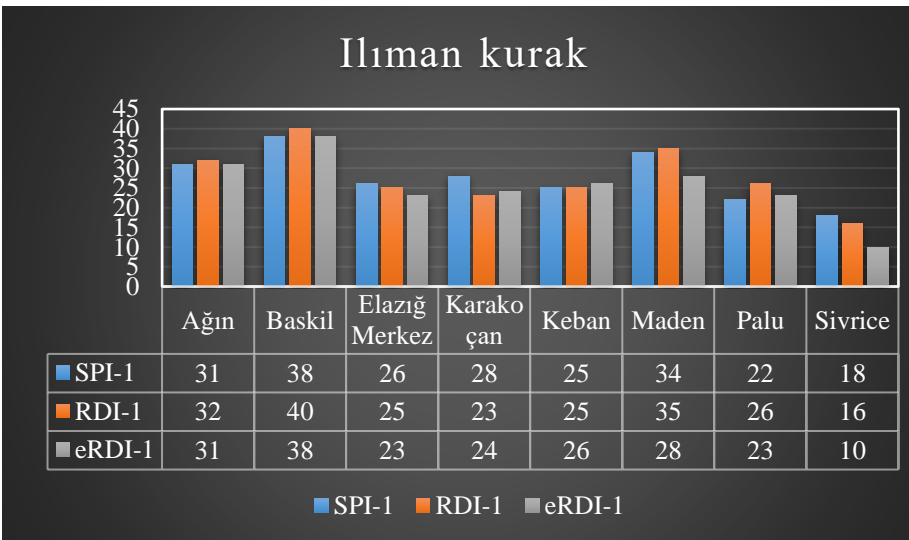
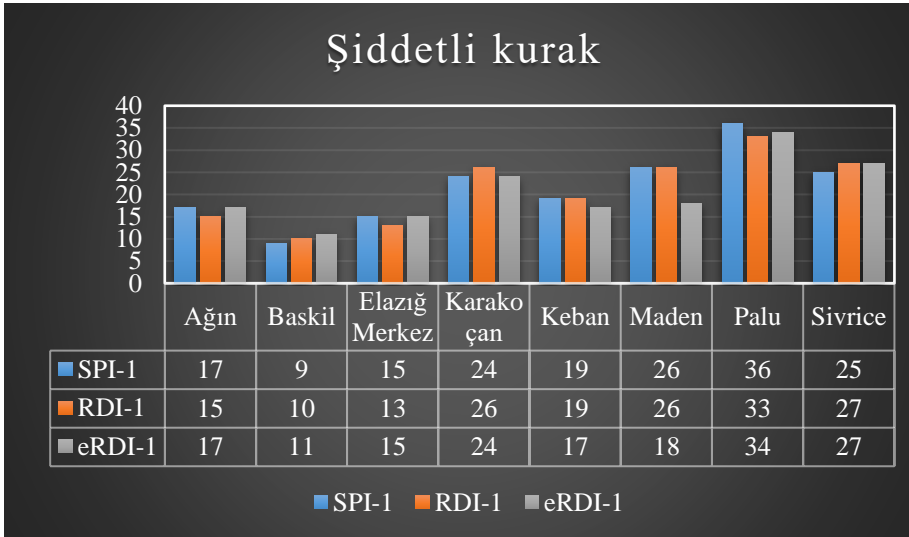
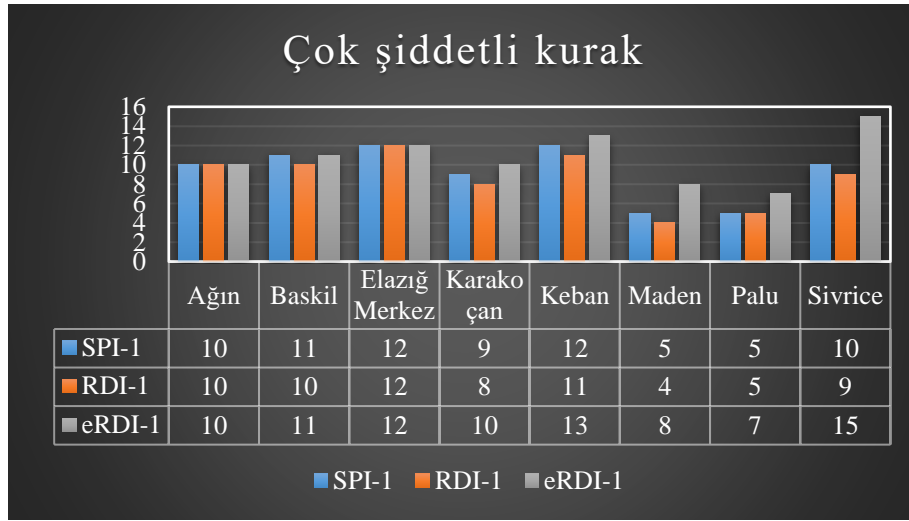




Şekil 7. RDI-1 ve SPI-1 Değerlerinin Karşılaştırılması

Elazığ il ve ilçelerinde aylık zaman ölçeğinde meydana gelen tarımsal (eRDI-1) ve meteorolojik kuraklık (SPI-1 ve RDI-1) sayıları Şekil 8’de verilmiştir. Elazığ il ve ilçeleri için 1979-2022 yılları arasında gerçekleşen kurak ayların sayıları Şekil 8’de verilmiştir. 1 aylık zaman serileri dikkate alındığında hem tarımsal hem de meteorolojik kuraklıktan çok şiddetli kuraklık en fazla Elazığ ve Keban ilçesinde meydana gelmiştir. Şiddetli kuraklıkta ise en fazla Palu ilçesinde meydana gelirken ılıman kuraklıkta en fazla Baskil ilçesinde oluşmuştur. Şekil 8’de görüldüğü üzere Elazığ il ve ilçeleri için yapılan kuraklık analizinde 1979-2022 yılları arasında en çok ılıman kuraklık görülürken, ikinci sırada ise şiddetli kuraklık meydana gelmiştir. Genel olarak eRDI, RDI ve SPI sonuçları birbirine yakın olmakla birlikte en kurak ay -4.27 değeri ile Elazığ Merkez’de ve eRDI ile Ocak 1989’da tespit edilmiştir. Elazığ Merkez için SPI değeri -4.25 ve RDI değeri ise -4.18’dir. Mevcut çalışmada elde edilen bulgulara göre çok şiddetli kuraklığın en büyük olduğu ay ve yıl bütün indisler için aynı ay ve yılda meydana geldiği görülmüştür. Ağın

için Aralık 2006, Baskil için Mart 2014, Karakoçan için Şubat 2013, Keban için Mart 1990, Maden için Şubat 2017, Palu için Şubat 2021 ve Sivrice için ise Aralık 1995'te tespit edilmiştir.



**Şekil 8.** Mevcut Çalışmada Elde Edilen Meteorolojik ve Tarımsal Kuraklıkta Gerçekleşen Ilıman, Şiddetli ve Çok Şiddetli Kurak Ayların Sayısı

Aydın ve Yaltay (2019) Elazığ ili için Şen'in YTA yöntemine göre Elazığ ili yağış verilerinin aylık, mevsimsel ve yıllık zaman dilimleri trend analizini gerçekleştirmişlerdir. Aydın ve Yaltay (2019), Elazığ ili için kış mevsimi ve yıllık zaman ölçeklerinde yağış trendinde anlamsız sonuçlar tespit edilmiştir.

Kartal (2023) yaptığı çalışmada, Elazığ'ın meteorolojik kuraklığını inceleyerek Elazığ için aylık ve yıllık zaman ölçeklerinde özellikle 2000 yılı ve sonrasında kurak dönemlerin arttığı tespit edilmiştir. Ayrıca, yağış verilerinde azalma eğilimi tespit edilirken, sıcaklık ve buharlaşma verilerinde ise artış eğilimi tespit edilmiştir. Kartal (2023) çalışmasında SPI-1 indisine göre 1980-2022 yılları arasında Ağın ilçesi için 31 defa ılıman kurak, 17 defa şiddetli kuraklık ve 10 kez de çok şiddetli kuraklık meydana geldiğini saptamıştır. Mevcut çalışmada ise sırasıyla ılıman, şiddetli ve çok şiddetli kuraklık için 31, 17 ve 10 kez meydana gelmiştir. Kartal (2023) çalışmasında ise Elazığ merkez için SPI-1 için 26, 15 ve 12 kez sırasıyla ılıman, şiddetli ve çok şiddetli kuraklık meydana gelmiştir. Aynı şekilde Elazığ merkez için 26, 25 ve 12 kez sırasıyla ılıman, şiddetli ve çok şiddetli kuraklık meydana gelmiştir. Mevcut çalışmada meteorolojik kuraklık için kullanılan SPI ile Kartal (2023)'ün çalışmasında elde ettiği SPI indeksi sonuçlarından farklı olduğu saptanmıştır. Bu çalışmada 1979-2021 su yılları dikkate alınırken Kartal (2023) ise 1980-2022 yılları arasındaki zaman dilimini dikkate almıştır. Yukarıda ifade edildiği gibi su yılı Ekim ayında başlamaktadır. Bu nedenle gerek zaman aralığının farklı olması gerek de mevcut çalışmada su yılı dikkate alınarak SPI hesabı yapılması meydana gelen kuraklık sayısının farklı olmasına neden olabildiği düşünülmektedir.

Benzer şekilde, Aydın (2023) Elazığ ili için yapılan yağış trend analizi çalışmasında, Keban istasyonunda ilkbahar mevsimi yağış değerlerinde, Palu istasyonunda ise kış mevsimi yağış değerlerinde Mann-Kendall, Şen'in Yenilikçi Trend Analizi ve Spearman-Rho testlerine göre azalan yönde bir trend olduğu saptanmıştır.

## SONUÇ

Yapılan bu çalışmada Standartlaştırılmış Yağış İndeksi (SPI), Keşif Kuraklık İndeksi (RDI) ve Etkili Keşif Kuraklık İndeksi (eRDI) için Elazığ'da bulunan 8 istasyonun 1979-2022 yılları arasındaki MGM tarafından ölçülen yağış, sıcaklık ve buharlaşma verileri kullanılmıştır. Bu çalışma, meteorolojik ve tarımsal kuraklığı incelemek için farklı indekslerin kullanılmasıyla Elazığ il ve ilçelerinde yaşanan kuraklık değişiminin çeşitli zaman adımlarını içermektedir. Bu çalışmada hem tarımsal hem de meteorolojik kuraklık indisleri kullanılarak aylık mevsimlik dönemlik ve yıllık zaman ölçeklerinde Elazığ il ve ilçelerinde detaylı bir şekilde kuraklık değerlendirilmiştir. RDI ve SPI meteorolojik kuraklık için değerlendirilirken eRDI ise tarımsal kuraklık değerlendirmesinde yapılmıştır. Bu veriler doğrultusunda aylık, mevsimlik, dönemlik ve yıllık RDI, SPI ve eRDI değerleri analiz edilip en yüksek ve en düşük değerleri tespit edilmiştir. Tüm istasyonlarda kuraklık sınıflarına göre kuraklığın aylara ve yıllara göre değişimlerinin grafikleri oluşturulmuştur. Çalışma sonucunda elde edilen bulgular genel olarak birbirleriyle paralellik göstermiştir. Ayrıca her üç indiste de aynı zaman dilimlerinde çok şiddetli kurak dönemler meydana gelmiştir. RDI ve SPI değerleri arasında korelasyon yapıp aralarındaki ilişki de incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar üç indeksin birbirine yakın sonuçlar verdiğini göstermiştir. Yağış verilerinin Sen eğimi yöntemi ile trend analizi yapıp diyagramları oluşturulduktan sonra istatistiki açıdan yağışın ne yönde eğilim gösterdiği tespit edilmiştir. Bu çalışma, Elazığ il ve ilçeleri için tarihsel kuraklık özelliklerinin kapsamlı bir şekilde anlaşılmasına yönelik bir adımı teşkil etmektedir. Bu nedenle, gelecekte yapılacak çalışmalar için aşağıdaki tavsiyelerde bulunulmaktadır. Daha kısa zaman süreleri dikkate alınarak (saatlik, günlük, vb.) iklim değişikliğinin daha ayrıntılı analizi çalışılabilir. İklim değişikliği koşullarının etkilerini vurgulamak için meteorolojik kuraklığın hidrolojik ve tarımsal kuraklık ile kombinasyonunun araştırılabilir.

## TEŞEKKÜR

Bu çalışmada kullanılan veri tabanını sağlayan Meteoroloji Genel Müdürlüğü'ne (MGM) teşekkür ederim. Yazar, ayrıca veri teminine aracılık eden Fırat Üniversitesi'ne teşekkür etmektedir.

## BEYANLAR

**Finansman:** Herhangi bir fon bulunmamaktadır.

**Çıkar Çatışmaları:** Yazarlar herhangi bir çıkar çatışması beyan etmemektedir.

**Veri Mevcudiyeti:** Bu çalışmada kullanılan ve/veya analiz edilen veri setleri, makul bir talep üzerine ilgili yazardan temin edilebilir.

## KAYNAKLAR

- Adnan, S., Ullah, K., Shuanglin, L., & Gao, S. (2018). Comparison of various drought indices to monitor drought status in Pakistan. *Climate Dynamics*, 51(5), 1885–1899. <https://doi.org/10.1007/s00382-017-3987-0>
- Aktürk, Gaye, Zeybekoğlu, Utku, Yıldız, O. (2022). SPI ve SPEI Yöntemleri ile Kuraklık Araştırması : Kırıkkale Örneği. *Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi*, 14(2), 762–776.
- Aydın, M. (2023). Elazığ İli Yağış Verilerinin Trend Analizi. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 35(1), 159–173.
- Aydın, M., & Yaltay, N. (2019). Evaluation of Elazığ Province Precipitation Data by Innovative Trend Analysis. *Academic Perspective Procedia*, 2(2), 162–171.
- Bakanoğulları, F. (2020). Kırsal Havzalarda Kuraklığın İki Yöntem ( SPEI ve SPI ) Kullanılarak Belirlenmesi : Kumdere Havzası Örneği. *Türk Tarım Ve Doğa Bilimleri Dergisi*, 7(1), 146–156.
- Barua, S., Ng, A. W. M., & Perera, B. J. C. (2011). Comparative Evaluation of Drought Indexes: Case Study on the Yarra River Catchment in Australia. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 137(2), 215–226. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)wr.1943-5452.0000105](https://doi.org/10.1061/(asce)wr.1943-5452.0000105)
- Batan, M. (2021). Çeşitli Kuraklık İndisleri ile Batman İlinin Kuraklık Analizi ve Kontur Haritalarının Çıkarılması. *Artvin Çoruh Üniversitesi Doğal Afetler Uygulama ve Araştırma Merkezi Doğal Afetler ve Çevre Dergisi*, 7(2), 252–265. <https://doi.org/10.21324/dacd.817903>
- Çelik, M. A. (2019). Akdeniz Kıyılarında Ekstrem Nemli Ve Kurak Mevsimlerin Dağılımı (1967-2016). *Academic Platform Journal of Engineering and Science*, 7(1), 1–1. <https://doi.org/10.21541/apjes.394152>
- Chen, S. T., Kuo, C. C., & Yu, P. S. (2009). Historical trends and variability of meteorological droughts in Taiwan. *Hydrological Sciences Journal*, 54(3), 430–441. <https://doi.org/10.1623/hysj.54.3.430>
- Dabanlı, İ., Mishra, A. K., & Şen, Z. (2017). Long-term spatio-temporal drought variability in Turkey. *Journal of Hydrology*, 552, 779–792. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.07.038>
- Deniz Öztürk, Y., & Ünlü, R. (2022). Türkiye’de Yapılan Kuraklık Analiz Çalışmaları Üzerine Bir Derleme. *Afet ve Risk Dergisi*, 5(2), 669–680. <https://doi.org/10.35341/afet.1124880>
- Dikici, M. (2018). Ası Havzası’nda (Türkiye) Kuraklık Analizi. *Doğal Afetler ve Çevre Dergisi*, 90(242), 22–40. <https://doi.org/10.21324/dacd.426784>
- Dikici, M., & Aksel, M. (2021). Comparison of Drought Indices in the Case of the Ceyhan Basin. *International Journal of Environment and Geoinformatics*, 8(2), 113–125.
- Elazığ Valiliği Çevre Şehircilik ve İklim Değişikliği İl Müdürlüğü. (2022). *İlimiz Hakkında*. <https://elazig.csb.gov.tr/ilimiz-hakkinda-i-681#:~:text=İlde karasal iklim egemen olup,yolların bir kavşak noktası konumundadır.>
- Karaer, M., & Gültaş, H. T. (2018). Kuraklık Oluşumunun Bilecik İli ’nde Standartlaştırılmış Yağış İndeksi Yöntemi Kullanılarak Değerlendirilmesi. *Süleyman Demirel Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 303–308.
- Kartal, V. (2023). Assessment of drought using different tests and drought indices in Elazig, Turkey. *Water Science & Technology*, 88(7), 1767–1794.
- Katipoğlu, O. M., & Acar, R. (2021). Standartlaştırılmış yağış indeksi hesabında kullanılan dağılım fonksiyonu etkisinin ve kuraklık karakteristiklerinin araştırılması. *Gümüşhane Fen Bilimleri Dergisi*, 11(3), 828–844. <https://doi.org/10.17714/gumusfenbil.900408>
- Katipoğlu, O. M., Acar, R., & Şengül, S. (2020). Comparison of meteorological indices for drought monitoring and evaluating: A case study from euphrates basin, Turkey. *Journal of Water and Climate Change*, 11(1S), 29–43. <https://doi.org/10.2166/wcc.2020.171>
- Katipoğlu, O. M., & Sarıgöl, M. (2023). Coupling machine learning with signal process techniques and particle swarm optimization for forecasting flood routing calculations in the Eastern Black Sea Basin, Türkiye. *Environmental Science and Pollution Research*, 46074–46091. <https://doi.org/10.1007/s11356-023-25496-6>
- McKee, T.B., Doesken, N.J.; Kleist, J. (1993). The relationship of drought frequency and duration to time scales.

*Eighth Conference on Applied Climatology*. <https://doi.org/10.1002/jso.23002>

Mersin, D., Gulmez, A., Safari, M. J. S., Vaheddoost, B., & Tayfur, G. (2022). Drought Assessment in the Aegean Region of Turkey. *Pure and Applied Geophysics*, 179(8), 3035–3053. <https://doi.org/10.1007/s00024-022-03089-7>

Mersin, D., Tayfur, G., Vaheddoost, B., & Safari, M. J. S. (2022). Historical Trends Associated with Annual Temperature and Precipitation in Aegean Turkey, Where Are We Heading? *Sustainability (Switzerland)*, 14(20). <https://doi.org/10.3390/su142013380>

Pashiardis, S., & Michaelides, S. (2008). Implementation of the Standardized Precipitation Index (SPI) and the Reconnaissance Drought Index (RDI) for Regional Drought Assessment: A case study for Cyprus. *European Water*, 23(1993), 57–65.

Rahman, M. M., Islam, M. O., & Hasanuzzaman, M. (2008). Study of effective rainfall for irrigated agriculture in south-eastern part of Bangladesh. *World Journal of Agricultural Sciences*, 4(4), 453–457.

Rassoul, A., Mohammad, Z., Moghimi, M., & Bahrami, M. (2019). Comparison of reconnaissance drought index ( RDI ) and effective reconnaissance drought index ( eRDI ) to evaluate drought severity. *Sustainable Water Resources Management*, 5(3), 1345–1356. <https://doi.org/10.1007/s40899-019-00310-9>

Sarış, F., & Gedik, F. (2021). Konya Kapalı Havzası'nda Meteorolojik Kuraklık Analizi. *Journal of Geography*, 0(42), 295–308. <https://doi.org/10.26650/jgeog2021-885519>

Sen, P. K. (1968). Journal of the American Statistical Estimates of the Regression Coefficient Based on Kendall's Tau. *Journal of the American Statistical Association*, 63(324), 1379–1389.

Şener, E., & Davraz, A. (2021). Yağış Tabanlı Farklı İndisler Kullanılarak Meteorolojik Kuraklık Analizi : Isparta Örneği. *Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 12(1), 404–418.

Sokollu, S. (2014). *Turkey battles water shortage*. Deutsche Welle (DW).

Soylu Pekpostalci, D., Tur, R., & Danandeh Mehr, A. (2023). Spatiotemporal Variations in Meteorological Drought Across the Mediterranean Region of Turkey. *Pure and Applied Geophysics*, 180(8), 3089–3104. <https://doi.org/10.1007/s00024-023-03312-z>

Stamm, G. G. (1967). Problems and Procedures in Determining Water Supply Requirements for Irrigation Projects. *Irrigation of Agricultural Lands*, 11, 769–785.

Tigkas, D. (2008). Drought Characterisation And Monitoring in Regions Of Greece. *European Water*, 23(24), 29–39.

Tigkas, D., Vangelis, H., & Tsakiris, G. (2013). The drought indices calculator (DrinC). *Proceedings of the 8th International Conference of EWRA Conference, Porto, June*, 1333–1342.

Tigkas, D., Vangelis, H., & Tsakiris, G. (2016). Introducing a modified reconnaissance drought index (RDIE) incorporating effective precipitation. *Procedia Engineering*, 162, 332–339.

Tigkas, D., Vangelis, H., & Tsakiris, G. (2017). *An Enhanced Effective Reconnaissance Drought Index for the Characterisation of Agricultural Drought*. 4, 137–148. <https://doi.org/10.1007/s40710-017-0219-x>

Tigkas, D., Vangelis, H., & Tsakiris, G. (2019). Drought characterisation based on an agriculture-oriented standardised precipitation index. *Theoretical and Applied Climatology*, 135(3–4), 1435–1447. <https://doi.org/10.1007/s00704-018-2451-3>

Topçu, E., & Seçkin, N. (2022). Drought assessment using the reconnaissance drought index (RDI): A case study of Eastern Mediterranean, Seyhan, Ceyhan, and Asi basins of Turkey. *Journal of Engineering Research (Kuwait)*, 10(2 B), 124–141. <https://doi.org/10.36909/jer.12113>

Tsakiris, G., Pangalou, D. Ve Vangelis, H. (2007). Regional Drought Assessment Based on the Reconnaissance Drought Index (RDI). *Water Resources Management*, 21, 821–833.

Tsakiris, G., Nalbantis, I., Pangalou, D., Tigkas, D., & Vangelis, H. (2008). Drought meteorological monitoring network design for the reconnaissance drought index (RDI). *Proceedings of the 1st International Conference "Drought Management: Scientific and Technological Innovations". Zaragoza, Spain: Option Méditerranéennes, Series A*, 80, 57–62.



- Tsakiris, G., Pangalou, D., & Vangelis, H. (2007). Regional drought assessment based on the Reconnaissance Drought Index (RDI). *Water Resources Management*, 21(5), 821–833. <https://doi.org/10.1007/s11269-006-9105-4>
- Tsakiris, G., & Vangelis, H. (2005). Establishing a drought index incorporating evapotranspiration. *European Water*, 9(10), 3–11.
- Varol, T., Atesoglu, A., Ozel, H. B., & Cetin, M. (2023). Copula-based multivariate standardized drought index (MSDI) and length, severity, and frequency of hydrological drought in the Upper Sakarya Basin, Turkey. *Natural Hazards*, 116(3), 3669–3683. <https://doi.org/10.1007/s11069-023-05830-4>
- WMO. (2023). Guidelines on the Definition and Characterization of Extreme Weather and Climate Events. In *Wmo* (Issue 1310).
- Yacoub, E., & Tayfur, G. (2017). Evaluation and Assessment of Meteorological Drought by Different Methods in Trarza Region, Mauritania. *Water Resources Management*, 31(3), 825–845. <https://doi.org/10.1007/s11269-016-1510-8>
- Yu, Y., Zou, S., & Whittemore, D. W. (1993). Non-parametric trend analysis of water quality data of rivers in Kansas. *Journal of Hydrology*, 150, 61–80.
- Yüce, M. İ., Aksoy, H., Aytekin, A., Eşit, M., Uğur, F., Yaşar, İ., Şimşek, A., & Değer, İ. H. (2022). Samsun Province Drought Analysis with SPI and SPEI. *Kahramanmaraş Sutcu Imam University Journal of Engineering Sciences*, 25(3), 285–295.
- Yürekli, Kadri;Ünlükara, Ali; Yıldırım, M. (2010). Farklı Yaklaşımlarla Karaman İlinin Kuraklık Analizi. *Tarım Bilimleri Araştırma Dergisi*, 3(1), 19–23.



# Kahramanmaraş Sütçü İmam University

## Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 27.02.2024  
Kabul Tarihi : 25.04.2024

Received Date : 27.02.2024  
Accepted Date : 25.04.2024

### AKDAĞMADENİ (YOZGAT) CİVARINDAKİ PLÜTONİK KAYAÇLARIN PETROLOJİK ÖZELLİKLERİ

### PETROLOGICAL PROPERTIES OF PLUTONIC ROCKS IN THE VICINITY OF AKDAĞMADENİ (YOZGAT)

Nazmi OTLU (ORCID: 0000-0002-8046-8484)

<sup>1</sup> Sivas Cumhuriyet Üniversitesi, Jeoloji Mühendisliği Bölümü, Sivas, Türkiye

\*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Nazmi OTLU, notlu@cumhuriyet.edu.tr

#### ÖZET

Akdağmadeni (Yozgat) civarında yer alan plütonik birimler, Orta Anadolu Kristalin Karmaşığı (OAKK) içinde değerlendirilmektedir. Ortaköy Granitoidi olarak adlanan plütonik birimler, Yıldızeli Metasedimanter Grubu'na ait litodemleri keserek bölgeye yerleşmiştir. Ortaköy Granitoidi, tek bir magmadan itibaren katılaşmış olup, tanesal dokulu granitoidler ve K-feldspat megakristalli granitoidler olarak incelenmiştir. Tanesal dokulu granitoidler, K-feldspat megakristalli granitoidlerden nispeten daha önce kristallenmiştir. Tanesal dokulu granitoidler; ağırlıklı olarak siyenit ve daha az oranda da kuvars siyenit, kuvars monzonit, siyenogranit, monzogranit ve granodiyorit bileşimlidir. K-feldspat megakristalli granitoidler ise; monzogranit bileşimli olup, bazı örnekler, granodiyorit, siyenogranit ve kuvars siyenit bileşimlidir. K-feldspat megakristalli granitoidler içinde, magma odasının dış zonunda, hızlı soğuma ürünü olan, farklı boyutlarda, tanesal dokulu felsik magmatik anklavlar (felsic magmatic enclaves: FME) gözlenmiştir. Ortaköy Granitoidi subalkalin, alkali-kalsik karakterli olup, kalkalkalin dağılım göstermektedir. Birim, peralümino karakterli olup, Fraksiyonlanmamış M-I-S Tipi Granitoidler (OTG)" ve I-S tipi granitoidler kökenini göstermektedir. Ortaköy Granitoidi' nin levha tektoniği ile ilişkili olarak yerleşme sürecinin, "geç orojenez" dönemi olduğu görülmektedir. Birim "Levha içi Granitoidler (WPG)" olarak konumlanmıştır.

**Anahtar Kelimeler:** Akdağmadeni (Yozgat), Orta Anadolu Kristalin Karmaşığı, mineraloji-petrografi, jeokimya, petrojenez

#### ABSTRACT

The plutonic units in the region around Akdağmadeni (Yozgat) are evaluated within the Central Anatolian Crystalline Complex (CACC). The plutonic units named Ortaköy Granitoid cut the lithodems belonging to Yıldızeli Metasedimentary Group. The Ortaköy Granitoid was solidified from a single magma and was analyzed as granitoids with granular texture and granitoids with K-feldspar megacrysts. Granitoids with granular texture crystallized relatively earlier than granitoids with K-feldspar megacrysts. Granitoids with granular texture are mainly composed of syenite and to a lesser extent quartz syenite, quartz monzonite, syenogranite, monzogranite, and granodiorite. K-feldspar megacrystalline granitoids are monzogranite in composition and some samples are granodiorite, syenogranite, and quartz syenite in composition. Within the K-feldspar megacrystalline granitoids, felsic magmatic enclaves (FME) with different sizes and granular textures, which are the product of rapid cooling, were observed in the outer zone of the magma chamber. Ortaköy Granitoid has subalkaline, alkaline-calcic character and shows calcalkaline distribution. The unit is peraluminous and shows the origin of unfractionated M-I-S type granitoids (OTG)" and I-S type granitoids. About the plate tectonics of the Ortaköy Granitoid, it is seen that the settling period is the "late orogenesis" period. The unit is located as "Within Plate Granitoids (WPG)".

**Key Words:** Akdağmadeni (Yozgat), Central Anatolian Crystalline Complex, mineralogy-petrography, geochemistry, petrogenesis

#### GİRİŞ

ToCite: OTLU, N., (2024). AKDAĞMADENİ (YOZGAT) CİVARINDAKİ PLÜTONİK KAYAÇLARIN PETROLOJİK ÖZELLİKLERİ. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 27(3), 963-984.

Akdağmadeni (Yozgat) ve çevresinde yürütülen bu çalışma, 1/25.000 ölçekli Yozgat İ35-c1, Yozgat İ35-c2 ve Sivas İ-36 d1 paftaları içindeki Akdağmadeni (Yozgat) ile Karapir, Atalan, Ortaköy, Yukarı Çulhacı, Aşağı Çulhalı ve Evci Köyü yerleşim alanlarını kapsamaktadır (Şekil 1). Bu çalışmanın ana konusunu oluşturan plütonik kayaların mineralojik-petrografik, jeokimyasal ve petrojenetik özellikleri ayrıntılı olarak incelenmiştir. Bununla birlikte, plütonik kayalarla ilişkili olarak bölgede yüzlek veren diğer kayaç toplulukları da genel özellikleri itibari ile incelenmiş, plütonik kayalarla olan ilişkileri ortaya konmuştur.

Plütonik kayaların bileşimsel özelliklerinin yanı sıra, magma dinamiği ve diğer kayaç toplulukları ile olan etkileşimi de araştırılmış, bölgede gelişen tektonik unsurlar birlikte değerlendirilerek elde edilen bulgular çerçevesinde, çalışma alanının jeotektonik evrimi, Orta Anadolu Kristalin Karmaşığı (OAKK) içinde yorumlanmıştır.

## YÖNTEM

Tanımlanan çalışma alanının 1/25.000 ölçekli jeolojik haritalaması yapılmış (Şekil 2) olup; birimlerin dokanakları ayrıntılı olarak incelenerek, stratigrafik/tektonik ilişkileri belirlenmiştir.

Çalışma alanında yüzlek veren kayaç türlerinden, mineralojik - petrografik incelemeye yönelik olarak 58 adet, tüm kayaç jeokimyasal analizine yönelik olarak da 25 adet numune alınmıştır. Mineralojik - petrografik incelemeye yönelik olarak alınan 58 adet kayaç numunesinin tamamından, ince kesitler hazırlanmıştır. Hazırlanan ince kesitler, "Altın Aydınlatmalı Polarizan Mikroskop" da, optik mineralojik yöntemlerle incelenerek mineralojik-petrografik incelemeleri (nokta sayma yöntemi ile modal mineralojik bileşim saptanarak) gerçekleştirilmiştir. Elde edilen bulgular, Streckeisen (1976) sınıflaması kullanılarak tanımlanmış/adlanmıştır.

Tüm kayaç jeokimyasal analizine yönelik olarak alınan, 25 adet kayaç numunesinden 23 adet numune, ana, eser ve nadir toprak element (rare earth element, REE) tüm kayaç jeokimyasını belirlemek amacıyla analize hazırlanmıştır (numuneler, aşamalı olarak kırma işlemine tabi tutulmuş ve devamında halkalı değirmende 25 dakika öğütülerek, 30-40 gr kadar 200 mesh elek altına geçebilecek tane boyu elde edilmiştir).

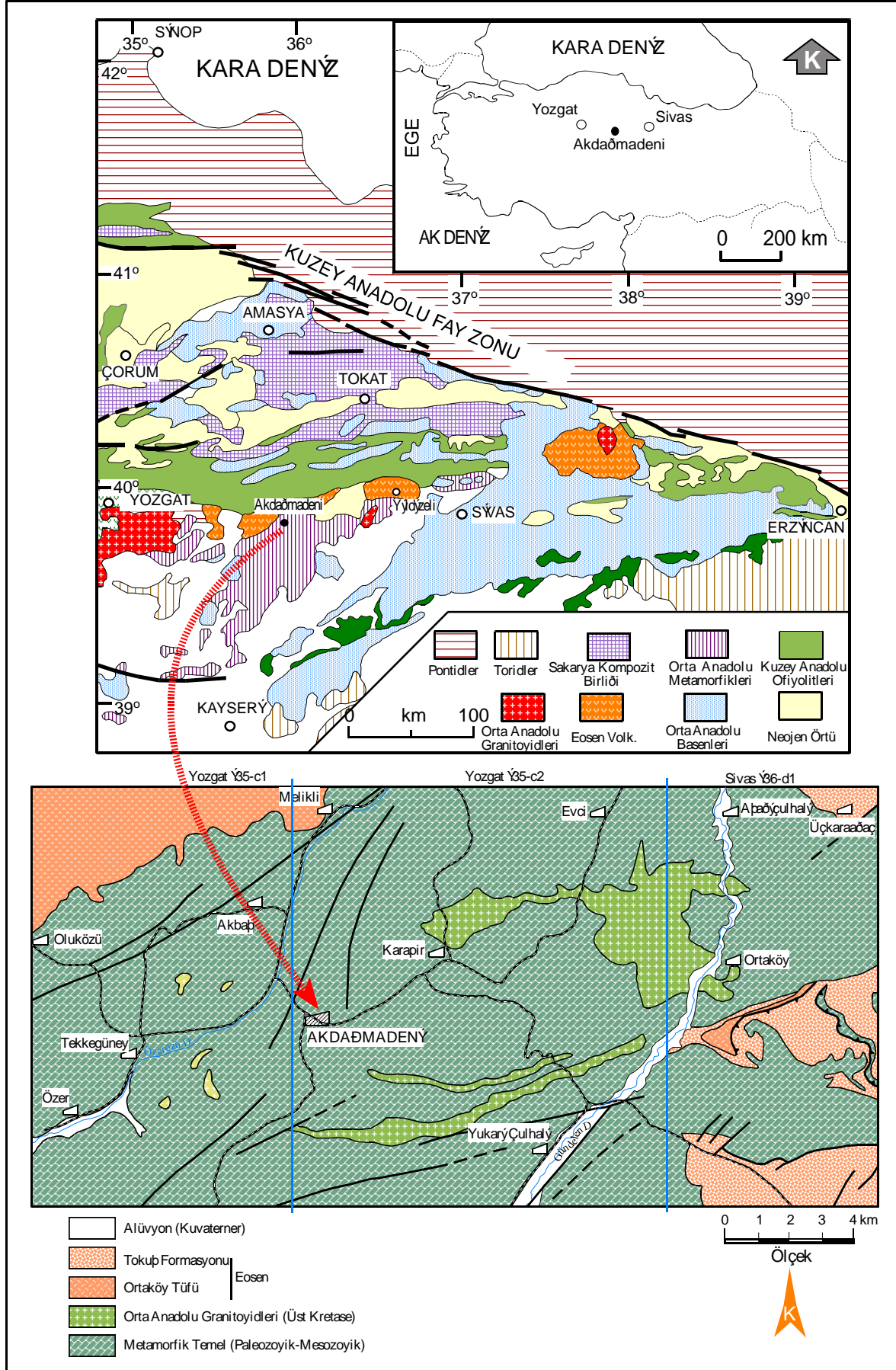
Bu örneklerin tüm kayaç jeokimyası analizleri, (Ankara Üniversitesi, YEBİM Laboratuvarlarında) XRF (X-ışını floresans spektrometresi) ve ICP-MS (İndüktif çift Plazma- Kütle spektrometresi) sistemleri kullanılarak yapılmıştır. Böylelikle, tüm kayacın, ana, eser element jeokimyası ile nadir toprak element (REE) jeokimyası değerleri alınmıştır. Elde edilen değerler, ilgili bazı jeokimyasal grafikler kullanılarak değerlendirilmiştir.

Bu analiz verileri ile de normatif mineralojik bileşim saptanmış ve kayaç numuneleri, Cox vd. (1979), De La Roche vd. (1980), Debon ve Le Ford (1983), Middlemost (1994), diyagramları kullanılarak adlanmıştır. Ayrıca, elde edilen veriler kullanılarak, bölgede yüzlek veren kayaların jeokimyasal karakterleri, çeşitli araştırmacılar tarafından geliştirilmiş grafiklerden yararlanılarak ve bu çalışmada oluşturulan grafikler kullanılarak ortaya konmuştur. Bununla birlikte yine bu veriler kullanılarak ilgili birimlerin petrojenetik yorumları Wilson (1989), Clark (1992), Pitcher (1993), Rollinson (1993), Hibbard (1991) ve Brown vd. (1984) tarafından ileri sürülen temel bilgilere göre yorumlanarak, magmatizma süreçleri açıklanmaya çalışılmıştır.

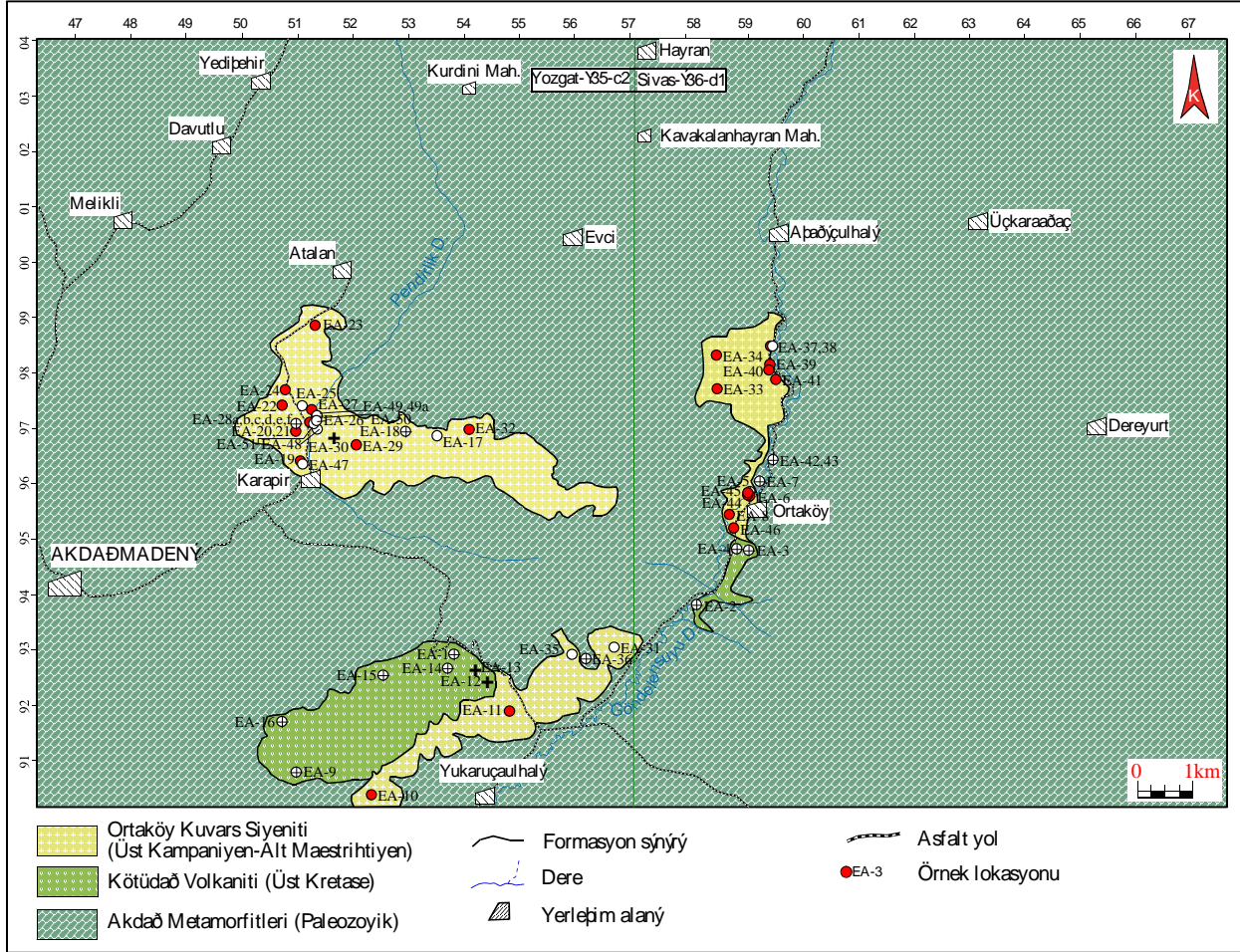
## BÖLGESEL JEOLJİ

Çalışma alanı, Akdağmadeni (Yozgat) ilçesinin doğu kesimlerinde yer almakta olup; Orta Anadolu Kristalin Karmaşığı (OAKK) olarak tanımlanan (Göncüoğlu vd., 1991) birliğin doğu kesimlerinde yer almaktadır. Çalışma alanının da içinde bulunduğu birlik farklı araştırmacılar tarafından, Kırşehir Masifi (Seymen, 1981a, 1981b, 1982), Kırşehir Bloğu (Poisson, 1986), Tolluoğlu, 1986, 1987, 1990) ve Yıldızeli Metasedimanter Grubu (Alpaslan, 1993) gibi isimlerle de tanımlanmıştır.

Çalışma alanının da içinde bulunduğu büyük ölçekli bu tektonik birliklerin şekillenmesinde en önemli jeolojik süreçlerden birisi, Üst Kretase dönemindeki Anatolid-Pontid çarpışması olarak ifade edilir (Şengör ve Yılmaz, 1981). Bu sürece bağlı olarak, çarpışma ve çarpışma sonrası gerilme - tektonik rejimi etkisiyle Anadolu Mikrokıtası yükselmiştir.



Şekil 1. Çalışma Alanının Yer Bulduzu Haritası



Şekil 2. Çalışma Alanının 1:25.000 Ölçekli Olarak Hazırlanmış Jeolojik Haritası

Kırşehir Bloğu, güneyinde yer alan Torid Kuşağı, kuzeyde Pontid Kuşağı arasında sıkışan Anatolid Platformu' na ait kabuksal bir üye olarak ifade edilir (Poisson, 1986).

Neotetis' in kuzey koluna ait kesimin kapanması (Geç Kretase) ile aynı zamanda başlayan Anatolid- Pontid çarpışması, Tersiyer yaşlı geniş sedimanter havzaların oluşumunu sağladığı ve magmatik faaliyetlerin de bu oluşuma eşlik ettiği ileri sürülmüştür (Yılmaz vd., 1995).

Ayrıca; çok sayıda araştırmacıya göre; Orta Anadolu kesimlerinde, çarpışma sonrası şekillenen havzaların oluştuğu ve bölge içerisinde çarpışma ile ilişkili birçok magmatik serinin varlığı ileri sürülmüştür Akıman vd. (1993), Boztuğ (1995, 2000), Ekici (1997), Erler vd. (1991), Erler ve Göncüoğlu (1996), Geven (1992), Göncüoğlu (1986), Göncüoğlu vd. (1991), Göncüoğlu vd. (1993), Göncüoğlu ve Türeli (1993), Türeli vd. (1993), Güleç (1994), Kadioğlu (1996), Otlu (1998), Otlu ve Boztuğ (1998), Özkan ve Erkan (1994), Tatar (1997), Tatar ve Boztuğ (1998), Tolluoğlu (1993), Türeli vd. (1993).

## STRATİGRAFİ

Orta Anadolu Kristalin Karmaşığı (OAKK, Göncüoğlu vd., 1991) içinde tanımlanan çalışma alanı, Kırşehir Masifi ve İzmir - Ankara- Erzincan zonu' na ait birimleri kapsamaktadır. Bölgenin temel jeolojik özelliklerine kısaca bakılacak olursa:

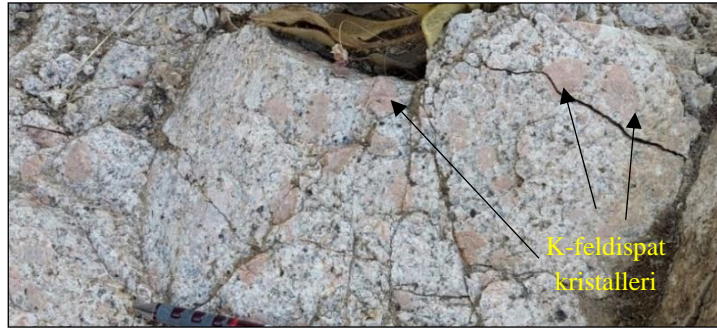
Bölgede yüzeyleyen en yaşlı birimler; Kırşehir Bloğu (Poisson, 1986), Kırşehir Masifi (Seymen, 1982), Akdağmadeni Litodemi (Yılmaz vd., 1995), Yıldızeli Metasedimanter Grubu (Alpaslan (1993) olarak adlandırılan Paleozoyik yaşlı metamorfik birimlerdir (Şekil 2). Bunlar, alttan üste doğru Kalkanlıdağ Formasyonu, Tamadağ Formasyonu ve Bozçaldağ Formasyonu (Seymen, 1981a) olarak sıralanabilir. Bu birimler, Kırşehir Masifi' nin doğu kesimlerinde (çalışma alanı ve civarı) ise Alpaslan (1993) tarafından,

Yıldızeli Metasedimanter Grubu olarak adlanmış olup; tabandan en üste doğru, Aşılık Metamorfiti, Fındıcak Metamorfiti, Pelitlikaya Kuvarsiti ve Kadıköy Metakarbonatı şeklinde sıralanmıştır.

Yıldızeli Metasedimanter Grubu üzerinde, riyolit – riyodasit bileşimli lav ve piroklastiklerden oluşan Kötüdağ Volkaniti yer almaktadır (Seymen, 1981b). Kötüdağ Volkaniti' nin göreceli yaşı; Geç Kretase – Erken Paleosen (Seymen, 1981a), Erken Senoniyen (Kara, 1997) ve Geç Kretase (Atabey, 1989) olarak ifade edilmektedir.

Metamorfik temeli ve Kötüdağ Volkaniti' ni sıcak dokanakla kesen plütonik birimler “Orta Anadolu Granitoidleri” olarak tanımlanmakta (Dönmez vd., 2005) olup, bölgedeki temsilcileri, bu çalışmada Ortaköy Granitoidi olarak adlanmıştır. Çalışma alanında Ortaköy Granitoidi, Ortaköy- Aşağı Çulhalı Köyü arasında, Karapir Köyü - Atalan Köyü arasında ve Yukarı Çulhalı köyü civarında yaygın yüzleklerini vermektedir (Şekil 2). Ortaköy Granitoidi, genel olarak iri K-feldispat megakristalli (Şekil 3), yer yer de ince - orta taneli olup; bazı lokasyonlarda eklemlili yapı sunmaktadır. Birim, farklı kalınlıklarda geç magmatik evre çözeltilerinden oluşan siyenitik ve granitik dayklar tarafından kesilmektedir.

Özellikle K-feldispat megakristalli monzogranitler içinde değişik boyutlarda anklavlar gözlenmiştir (Şekil 4). Bu anklavlar; plütonik birimlerin kestiği, daha yaşlı metamorfik temele ait metamorfik kayaç parçaları ve Kötüdağ Volkaniti' ne ait kayaç parçalarıdır. Birim bileşim olarak, çalışma alanının daha doğusunda bulunan Yücebaca Graniti (Alpaslan, 1993) ile denestirilebilir.



Şekil 3. Ortaköy Granitoidi' ne Ait K-feldispat Megakristalli Granitlerin Yakın Plan Görünümü (EA-33 Nolu Örnek Lokasyonu)



Şekil 4. Ortaköy Granitoidi' ne Ait K-feldispat Megakristalli Granitlerin İçinde Bulunan Anklavların Görünümü (EA-19, 20, 21 Nolu Örnek Lokasyonu).

## MİNERALOJİ VE PETROGRAFI

Çalışma alanında gözlenen kayaç topluluklarından, çalışmanın esas konusunu oluşturan plütonik kayaçların yanı sıra damar ve volkanik kayaçların da mineralojik petrografik incelemeleri yapılmıştır.

Ortaköy Granitoyidi' ne ait plütonik ve damar kayacı örneklerinden yapılan ince kesitler üzerinde nokta sayma yöntemi kullanılarak (Tablo 1), 13 adet örneğin (EA-5, 26, 31, 12, 13, 30, 35, 37, 38, 39, 40, 41, 51) modal mineralojik bileşiminin saptanması ve kayaç adlaması Streckeisen (1976) sınıflaması esas alınarak yapılmıştır (Şekil 5).

Volkanik kayaçlarda ise, fenokristal ve nispeten iri kristal-tamınabilecek boyuttaki bileşime göre adlama yapılmıştır.

Ayrıca, Ortaköy Granitoyidi' ne ait kayaçlardan alınan 23 adet kayaç örneğinden hazırlanan (EA-6, 8, 10, 11, 17, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 27, 29, 33, 34, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50) tüm kayaç jeokimyası ana element analizi (Tablo 2) verileri kullanılarak, LeMaitre vd. (1989), Debon Le Fort (1983), Cox vd. (1979), De La Roche vd. (1980) ve Middlemost (1994) gibi farklı araştırmacılar tarafından hazırlanan normatif mineralojik bileşime göre adlaması yapılmış ve bu adlamalar sonucunda birimin; monzogranit/adamellit bileşimli olup, yer yer granodiyorit, siyenit, kuvars monzonit ve kuvars siyenit kayaç türlerinden oluştuğu belirlenmiştir. (Şekil 6 a,b,c,d,e)

### ***Kötüdağ Volkaniti***

Çalışma alanında, Yukarı Çulhalı Köyü kuzey - kuzeybatısında ve Ortaköy' ün güneyinde yüzlek veren bej - krem renkli birim riyolit bileşimlidir.

### ***Ortaköy Granitoyidi***

Çalışma alanının orta kesimlerinde yüzlek veren Ortaköy Granitoyidi (Şekil 2), 1:25.000 ölçekli jeolojik haritalamada ayırtlanamamakla birlikte, aynı magma ürünü olup, kendi içinde *ince-orta taneli tanesel dokulu granitoidler* ve *K-feldispat mega kristalli granitoidler* olarak ikiye ayrılarak incelenebilir. ince-orta taneli tanesel dokulu granitoidler, K-feldispat mega kristalli granitoidlerden nispeten daha önce kristallenmiştir.

### ***İnce-Orta Taneli Tanesel Dokulu Granitoidler***

İnce-orta taneli tanesel dokulu granitoidler (EA-11, 17, 25, 26, 31, 35, 38, 47, 48, 49, 51), çalışma alanı içinde Karapir Köyü civarında (Şekil 2) yüzlek vermektedir. Ortaköy Granitoyidi' nin erken evre kristalleşme ürünleri olduğu düşünülen bu faz; tipik tanesel dokusu ile ayırt edilir. Birim; siyenit (Şekil 7a), kuvars siyenit (Şekil 7b), kuvars monzonit, siyenogranit (Şekil 7c), monzogranit (Şekil 7d) ve granodiyorit (Şekil 7e) bileşimlidir.

Tanesel dokulu granitoidlerin mineralojik-petrografik incelemesi, örnek lokasyonu, ana dokusal karakteri, gelişen mikro dokuları, mineral parajenezi, alterasyon türleri de verilerek ayrıntılı olarak tanımlanmıştır.

### ***K-Feldispat Mega Kristalli Granitoidler***

K-feldispat mega kristalli granitoidler (EA-5, 6, 8, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 27, 29, 33, 34, 37, 39, 40, 41, 44, 45, 46, 50), çalışma alanı içinde Ortaköy – Aşağı Çulhalı, Karapir – Atalan ve Yukarı Çulhalı Köyü civarında (Şekil 2) yüzlek vermektedir. Ortaköy Granitoyidi' nin nispeten geç evre kristalleşme ürünleri olduğu düşünülmekte olup; tipik olarak iri K-feldispat mega kristalli porfirik dokusu ile ayırt edilir. Birim; genel olarak monzogranit (Şekil 8a) bileşimli olup bazı örnekler, granodiyorit (Şekil 8b), siyenogranit (Şekil 8c) ve kuvars siyenit bileşimlidir.

### ***Anklavlar***

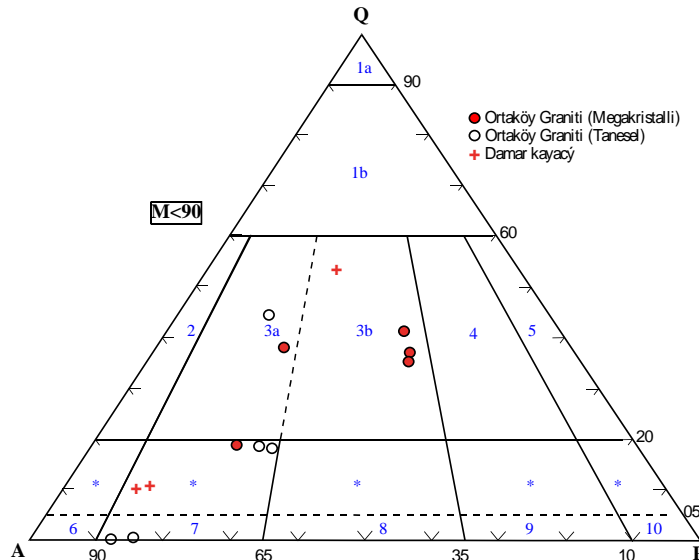
Ortaköy Granitoyidi içindeki 2-3 cm' den 40-50 cm' ye kadar değişen boyutlardaki, küresel, oval şekilli bu anklavlar; Ortaköy Granitoyidi' ni oluşturan magmanın erken evre katılaşma ürünü olan bileşenlerdir (EA-28a, 28b, 28c, 28d, 28e, 28f). Bu anklavların oluşum modeli dikkate alındığında, "felsik magmatik anklav (felsic magmatic enclava: FME) olduğu söylenebilir. FME oluşumu; magmanın daha hızlı soğuyan dış zonlarında oluşan, açık renkli, ince taneli nispeten katı olan fazın, ileri aşamalarda, bölgenin tektonik

hareketliliği ile birlikte sıvı fazdaki magma bileşimine anklav olarak katılmasıdır. FME, ince - orta taneli, siyenit, kuvars siyenit, kuvars monzonit ve granit bileşimlidir (Şekil 9).

**Tablo 1.** Ortaköy Granitoidi' ne Ait Birimlerden Modal Mineralojik Bileşim Belirlemeye Yönelik Olarak, İnce Kesitler Üzerinde Yapılan Nokta Sayma Analizi Sonuçları

Örnek No	EA-5	EA-12	EA-13	EA-26	EA-30	EA-31	EA-35	EA-37	EA-38	EA-39	EA-40	EA-41	EA-51	
Felsik mineral nokta sayısı	Qz	620	222	130	700	586	0	-	718	181	518	182	718	222
	Pl	301	299	104	320	185	140	134	748	298	548	202	618	299
	Or	704	658	886	585	296	900	906	534	550	334	558	384	658
Mafik ve tali mineral nokta sayısı	Bt/Ms	22	21	52	22	3	-	-	66	20	62	22	66	21
	Hbl - Rbk/ Arf	-	48- 53	-	-	-	52	50	-	-	80-25	45-55	-	48-53
	Ttn/X tm	21	52	-	20	-	-	-	21	-	20	48	21	52
	Ap	-	6	-	-	-	10	12	-	1	4	2	-	6
	Cal	-	-	-	-	-	45	41	-	-	-	-	-	-
	Opm	10	10	20	11	9	18	22	25	20	22	10	15	10
	Felsik Mineral oranı (TARB içindeki %)	Qz	37,9	18,8	11,64	43,61	54,92	0	0	35,90	17,58	37,00	19,32	41,7
Afs	43,1	55,8	79,11	36,45	27,75	87,12	87,1	26,70	53,44	23,86	59,24	22,3	55,81	
Pl	18,9	25,4	9,28	19,94	17,33	12,88	12,9	37,40	28,98	39,14	21,44	35,9	25,36	
"M" indisi	1,90	5,29	13,88	3,20	1,11	10,89	10,9	5,25	3,83	13,04	16,04	5,29	13,88	
Kayaç Adı	Monzo-granit	Monzo-granit	Kuvars siyenit	Monzo-granit	Granitik dayk	Siyenit	Siyenit	Monzo-granit	Kuvars siyenit	Monzo-granit	Kuvars siyenit	Monzo-granit	Kuvars siyenit	

Mineral kısaltmaları, Whitney ve Evans (2010)' a göre yapılmıştır; Qz: kuvars, Pl: plajiyoklaz, Or: ortoklaz, Bt/Ms: biyotit/muskovit, Hbl: hornblend, Rbk/Arf: riebeckit/arfvedsonit, Ap: apatit, Cal: kalsit, Opm: opak min., Afs: alkali feldispat, Pl: plajiyoklaz, "M" tüm bileşenler içindeki mafik mineral yüzdesi.



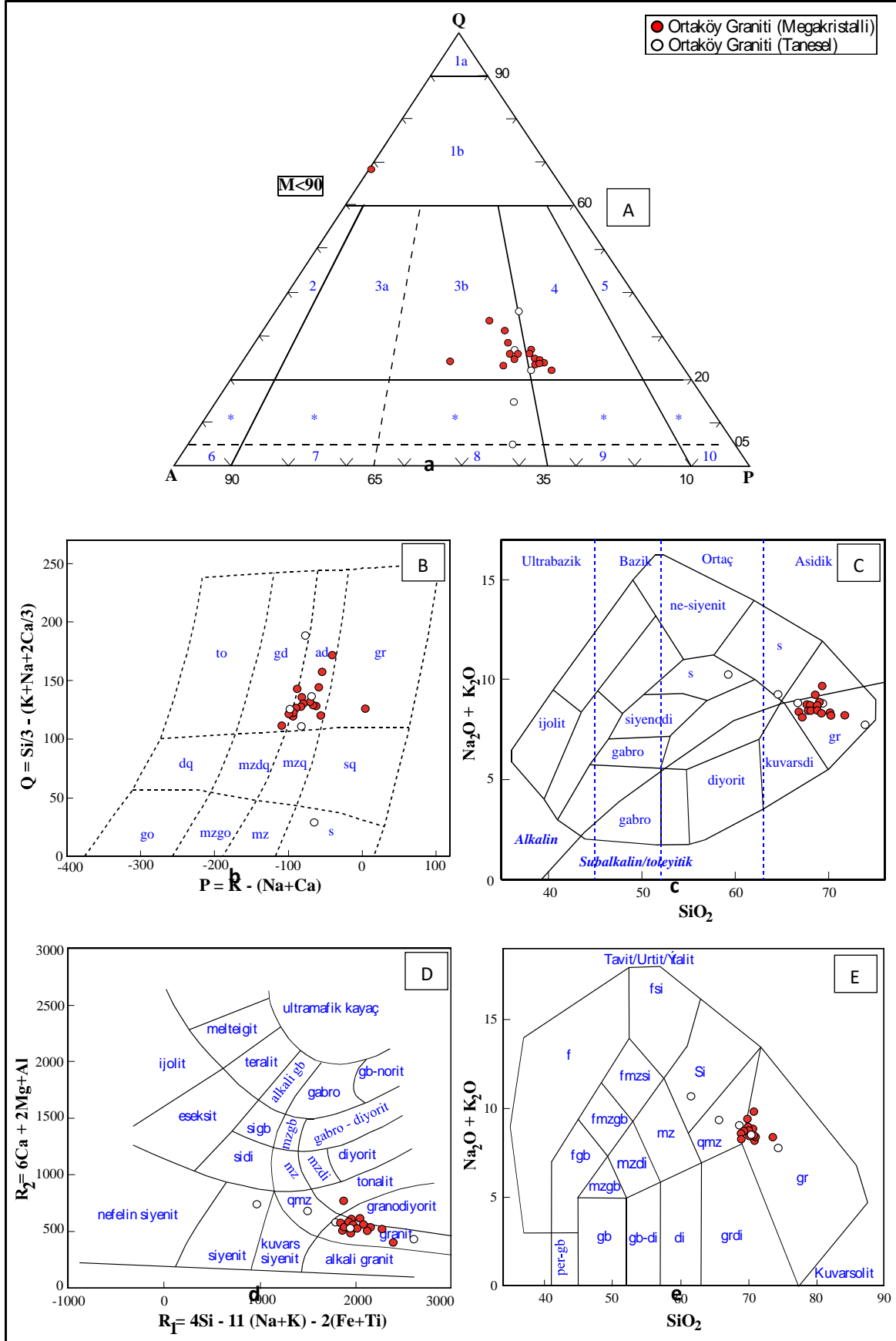
**Şekil 5.** Ortaköy Granitoidi' ne Ait Kayaç Örneklerinin, Streckeisen (1976) Modal Mineralojik Bileşime Göre Yapılan Adlama Diyagramındaki Konumu



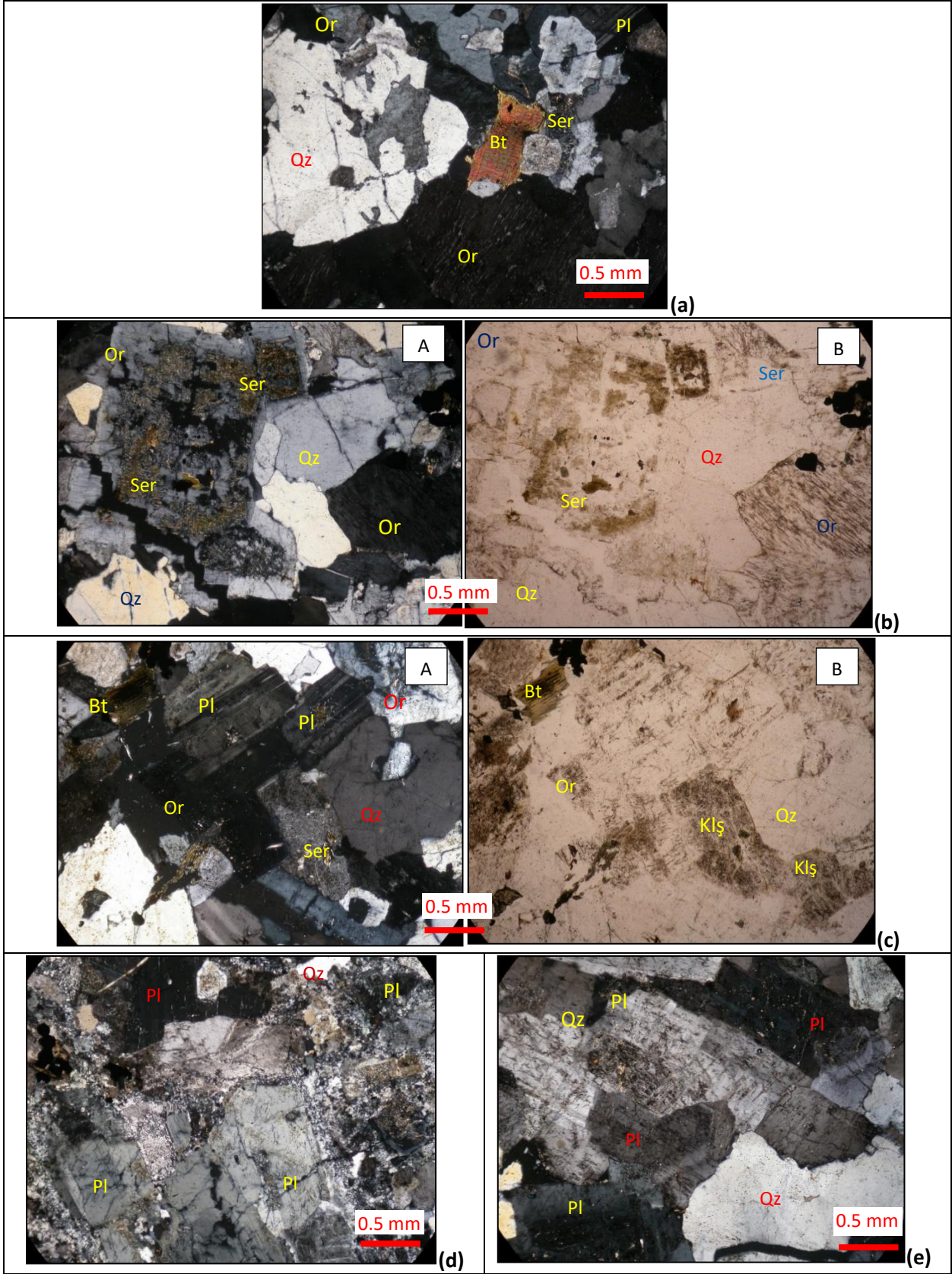
**Tablo 2.** Ortaköy Granitoyidi' ne Ait Kayaç Numunelerinin Tüm Kayaç Jeokimyası Ana Element Oksit Analiz Sonuçları

Element	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	tFeO	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	AK
EA-6	70,046	0,188	14,692	2,627	0,039	0,625	1,773	4,362	4,001	0,077	1,430
EA-8	70,260	0,191	15,731	2,277	0,033	0,747	1,641	3,684	4,452	0,084	0,750
EA-10	67,912	0,197	16,654	2,048	0,037	0,925	2,168	4,424	4,052	0,107	1,370
EA-11	59,266	0,322	20,004	2,639	0,041	0,599	3,060	4,256	6,014	0,077	2,670
EA-17	68,359	0,209	16,457	2,166	0,029	0,626	1,603	4,078	4,407	0,097	1,780
EA-19	67,666	0,182	16,089	2,138	0,036	0,923	2,057	4,819	3,957	0,115	1,860
EA-20	68,716	0,195	15,500	2,426	0,029	1,194	2,065	4,602	4,085	0,099	0,890
EA-21	69,300	0,160	15,860	0,962	0,030	0,360	1,523	3,219	6,452	0,093	1,890
EA-22	66,832	0,201	16,447	2,175	0,022	0,745	1,867	3,853	4,546	0,104	2,870
EA-23	69,060	0,182	15,634	1,929	0,016	0,800	1,762	3,777	4,544	0,090	1,980
EA-24	69,098	0,157	15,719	1,894	0,027	0,809	1,818	4,152	4,736	0,065	1,360
EA-25	66,661	0,179	16,110	2,185	0,034	0,916	2,057	4,347	4,484	0,112	2,650
EA-27	67,685	0,205	15,607	2,595	0,033	0,864	1,955	4,202	4,214	0,120	2,370
EA-29	67,119	0,219	15,683	2,173	0,035	1,317	2,320	3,910	4,197	0,108	2,560
EA-33	68,503	0,162	15,765	1,991	0,028	0,649	1,636	4,134	5,071	0,078	1,880
EA-34	68,827	0,207	15,382	2,343	0,033	0,933	1,965	4,202	4,170	0,092	1,670
EA-44	71,696	0,137	13,975	1,606	0,022	0,443	1,019	3,633	4,552	0,041	2,670
EA-45	67,906	0,178	15,164	2,294	0,037	0,715	1,879	4,553	4,161	0,087	2,870
EA-46	69,153	0,159	15,246	1,992	0,039	0,863	1,759	4,166	4,543	0,079	1,840
EA-47	73,863	0,077	15,211	0,929	0,013	0,200	1,114	4,085	3,625	0,003	0,840
EA-48	64,453	0,240	16,329	3,162	0,060	1,388	2,948	4,381	4,838	0,226	1,790
EA-49	69,315	0,183	15,744	2,187	0,035	0,649	1,768	4,723	4,076	0,072	1,190
EA-50	68,853	0,185	15,426	2,258	0,036	0,805	1,987	4,464	4,194	0,100	1,540

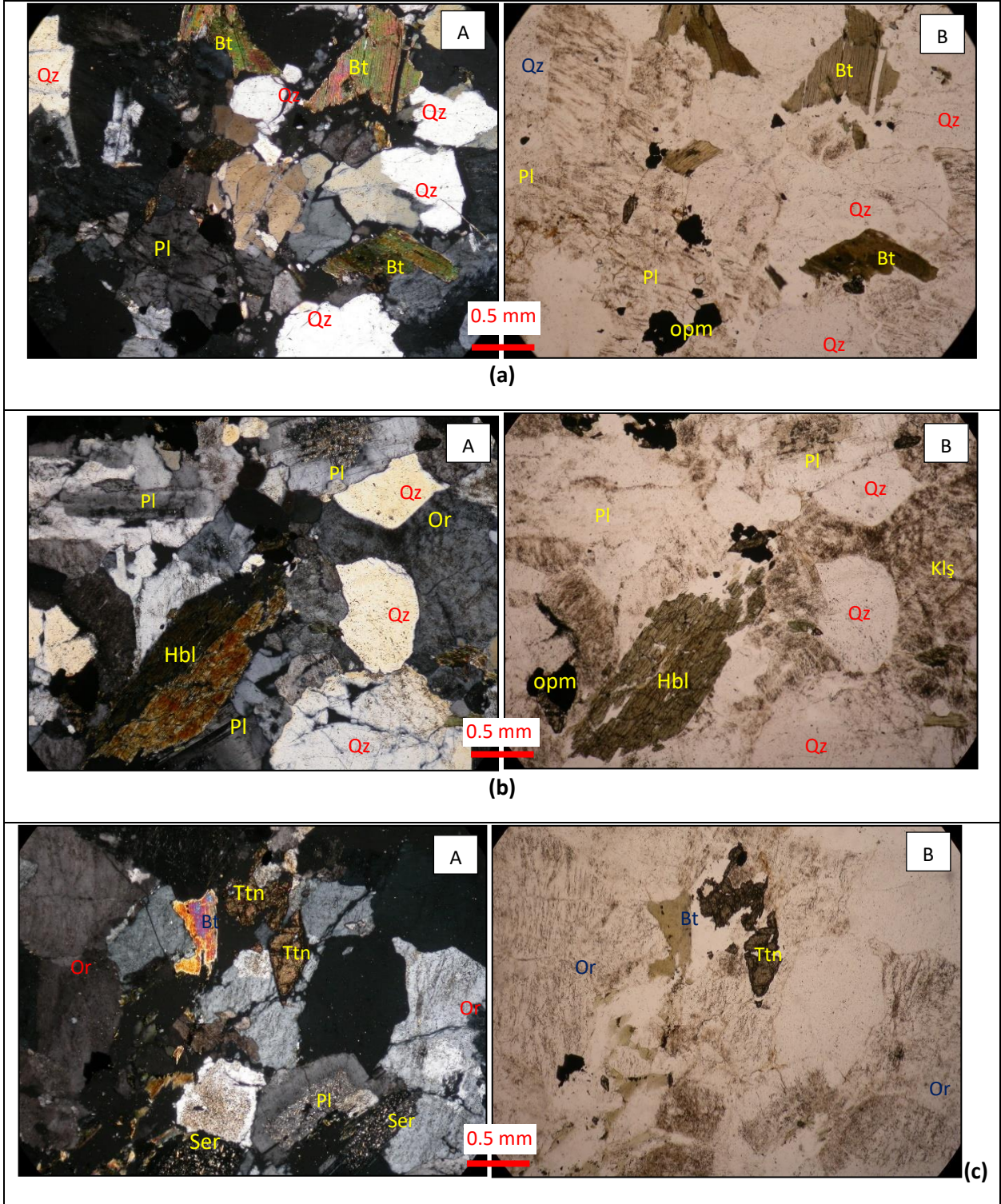
Ana Element Oksitler % Ağırlık Cinsinden Verilmiştir (tFeO: toplam demir oksit, AK: ateşte kayıp)



Şekil 6. Ortaköy Granitoidi' ne Ait Kayaç Örneklerinin, Normatif Mineralojik Bileşime Göre Yapılan Adlama Diyagramlarındaki Konumu (A: LeMaitre vd. (1989), B: Debon Le Fort (1983), C: Cox vd. (1979), D: De La Roche vd. (1980), E: Middlemost (1994))



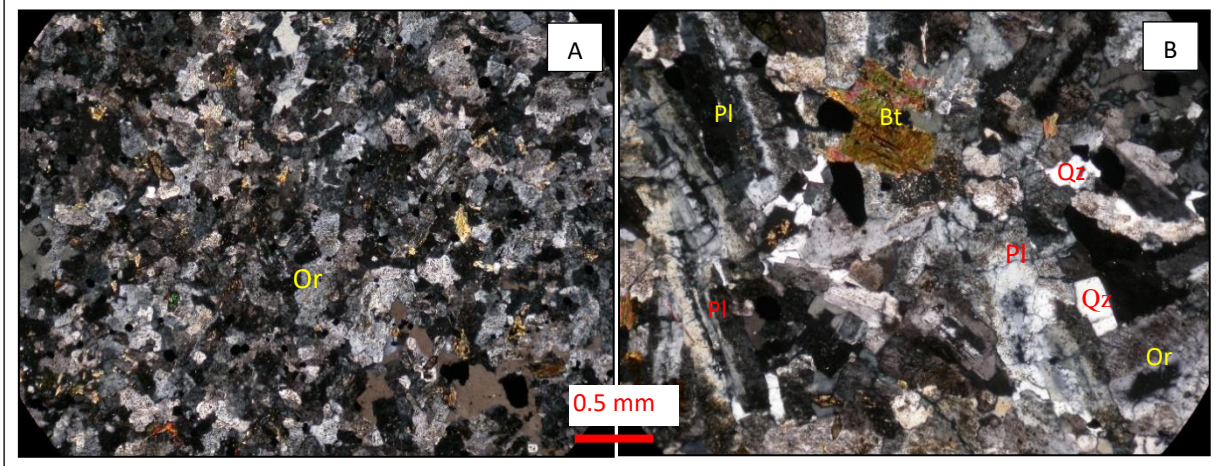
**Şekil 7.** Ortaköy Granitoyidi' ne Ait Tanesel Dokulu **a:** Siyenitlerin (çift nikol), **b:** Kuvars Siyenitlerin (A: çift nikol, B: tek nikol), **c:** Siyenogranitlerin (A: çift nikol, B: tek nikol), **d:** Monzogranitlerin (çift nikol) ve **e:** Granodiyoritlerin (çift nikol) Genel Görünüşü ve Mineral Parajenezi (mineral kısaltmaları, Whitney ve Evans (2010)' a göre yapılmıştır; Qz: kuvars, Or: ortoklaz, Pl: plajiyoklaz, Bt: biyotit, Ser: serizit, Klş: killeşme)



**Şekil 8.** Ortaköy Granitoyidi İçinde Tanımlanan K-feldspat Mega Kristalli Granitoyid Fazına Ait **a:** Monzogranitlerin, **b:** Granodiyoritlerin, **c:** Siyenogranitlerin (A: çift nikol, B: tek nikol) Genel Görünüşü ve Mineral Parajenez (Qz: kuvars, Or: ortoklaz, Pl: plajiyoklaz, Hbl: hornblend, Bt: biyotit, Ttn: titanit, Ser: serizit, Klş: killeşme)

### **Damar Kayaçları**

Ortaköy Granitoyidi' ni keser durumda bulunan, 2-3 cm' den birkaç metreye kadar değişen kalınlığa sahip, ince - orta taneli, damar kayaçları da örneklenmiş ve mineralojik – petrografik incelemesi yapılmıştır (EA-12, 13, 30). Çalışma alanının değişik lokasyonlarında gözlenen damar kayaçları; siyenit ve granit bileşimlidir.



**Şekil 9.** Ortaköy Granitoyidi İçindeki, **a:** Siyenit, **b:** Kuvars Monzonit Bileşimli FME' lerin Çift Nikol Görünüşü ve Mineral Parajenezi (Qz: kuvars, Or: ortoklaz, Pl: plajiyoklaz, Bt: biyotit)

## JEOKİMYA

Tüm kayaç jeokimyası analizleri yapılmak üzere, bölgede yüzlek veren plütonik kayaçlardan en az altere olmuş ve farklı litodemleri temsil eden 23 adet kayaç örneği alınmıştır. Bu örneklerin tüm kayaç jeokimyası analizleri, XRF (X-ışını floresan spektrometresi) ve ICP-MS (İndüktif çift Plazma- Kütle spektrometresi) sistemleri kullanılarak yapılmıştır. Böylelikle, tüm kayaçtan elde edilen ana, eser element jeokimyası ve nadir toprak element (REE) jeokimyası değerleri elde edilmiştir (Tablo 2,3). Bu veriler, ilgili jeokimyasal diyagramlara işlenerek değerlendirilmiştir.

Plütonik kayaç örneklerinden elde edilen “tüm kayaç jeokimyası analizi” verilerine göre, Ortaköy Granitoyidi’ ni oluşturan magma bileşimini belirlemek için oluşturulan, toplam alkaliler - silika diyagramında (Irvine ve Baragar (1971), Mac Donald ve Katsura (1964), Kuno (1968), Hyndman (1972) ve Ricwood (1989) birimlerin genel olarak subalkalin (Şekil 10a), alkali-kalsik (Frost vd. (2001), Şekil 10b) alanına düştüğü görülmekte olup, subalkalin ayırım grafiğinde (Irvine ve Baragar, 1971) ise kalkalkalin dağılım göstermektedir (Şekil 10c).

Birim, peralümino karakterli olup, aynı grafikte S-tipi köken sunmaktadır (Şekil 11 a: Clarke, 1992, b: Frost vd., 2001).

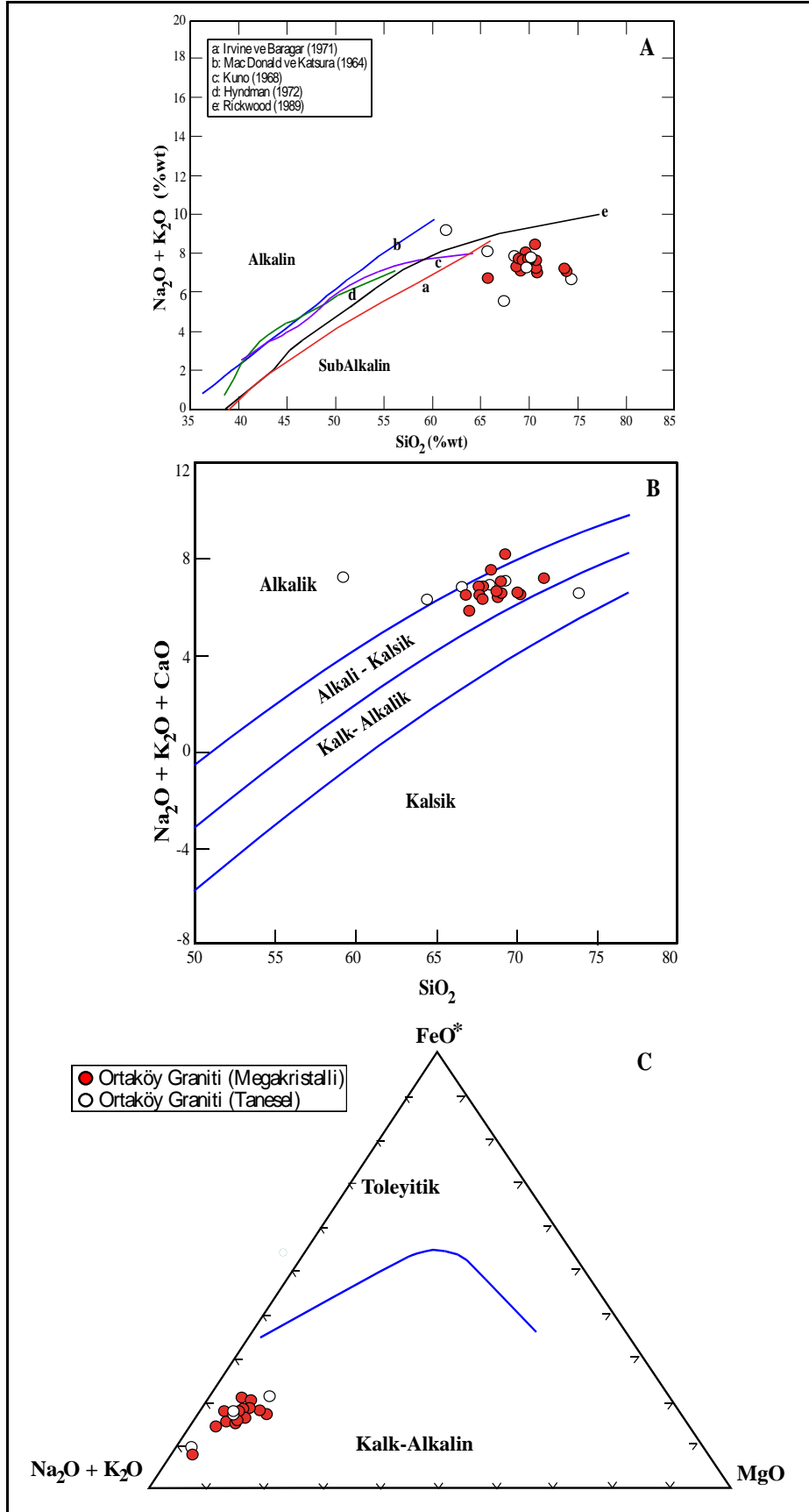
Yine birimi oluşturan magmanın kökenini incelemek için oluşturulan grafiklerde (Whalen vd., 1987); “Fraksiyonlanmamış M-I-S Tipi Granitoyidler (OTG)” (Şekil 12a,b), I-S Tipi Granitoyidler (Şekil 12c,d) alanına düştüğü görülmektedir.

Ortaköy Granitoyidi’ nin levha tektoniği ile ilişkili olarak yerleşme sürecine bakıldığında, oluşturulan R1-R2 grafiğinde (Şekil 13, Batchelor ve Bowden, 1985); birimin genel olarak “geç orojenez” oluşumu görülmektedir. Birimi oluşturan magmanın yerleştiği jeotektonik ortamın ise “Levha içi Granitoyidler (WPG)” olduğu (üçlü kesişim alanı bölgesi olduğundan) görülmektedir (Şekil 14, Pearce vd., 1984).

Ana element değişim diyagramlarında (Şekil 15) ve eser element değişim diyagramında (Şekil 16) Ortaköy Granitoyidi’ ni oluşturan magmadan itibaren, ilk aşamada tanesal dokulu granitoyid fazının kristallendiği; takip eden evrede ise, K-feldispat mega kristalli granitoyidlerin oluştuğu ileri sürülebilir.

**Tablo 3.** Ortaköy Granitoyidi' ne Ait Kayaç Numunelerinin Tüm Kayaç Jeokimyası, Eser ve Nadir Toprak Elementler (REE) Kimyasal Analiz Sonuçları (analiz sonuçları ppm cinsinden verilmiştir)

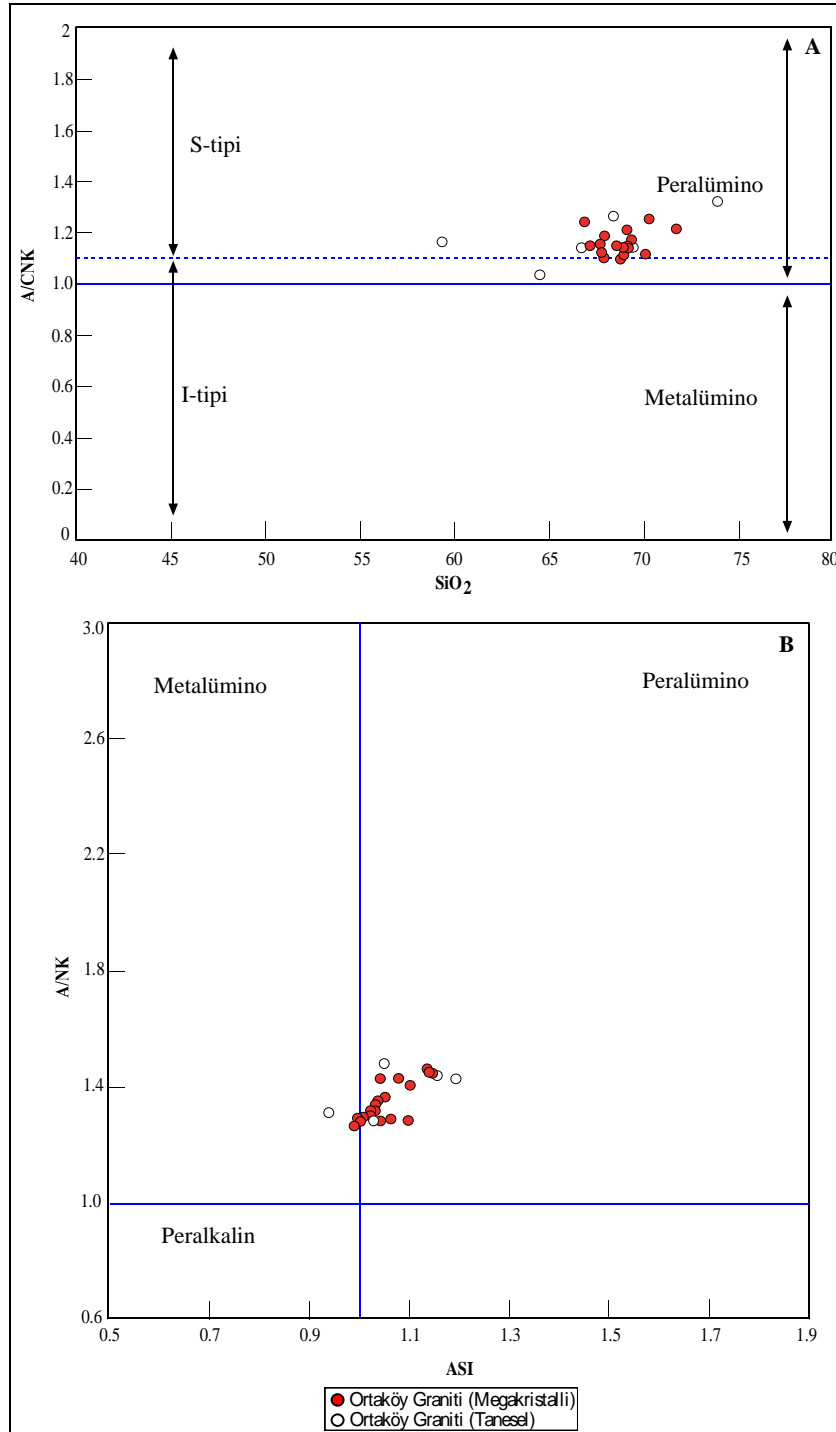
Element	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Sb
EA-6	18,3	7,4	9,6	17,5	17,8	1,1	0,6	0,3	0,2	228,2	370	12,0	178,1	20,7	0,8
EA-8	18,2	5,9	8,4	41,7	18,7	1,1	0,7	0,3	0,2	227,5	340	11,5	136,3	12,3	0,8
EA-10	15,2	6,2	3,8	44,6	19,9	1,1	0,6	0,3	0,2	218,9	461	14,7	148,5	14,6	0,9
EA-11	11,8	2,7	2,3	42,6	21,3	0,7	0,7	0,3	0,7	294,9	159	14,3	294,3	20,5	0,8
EA-17	16,9	4,7	2,7	25,2	17,9	2,0	0,6	0,3	0,2	209,0	424	12,9	201,4	19,3	0,9
EA-19	36,0	2,1	2,9	16,3	20,1	0,8	1,2	0,5	0,4	166,2	477	11,0	168,5	15,4	0,4
EA-20	23,3	6,2	2,7	12,7	17,9	0,9	0,6	0,3	0,3	215,8	445	10,3	169,4	19,9	0,8
EA-21	15,0	5,7	23,8	27,1	16,6	1,9	0,6	0,3	0,2	341,4	444	10,7	134,1	18,0	0,8
EA-22	8,5	4,6	2,7	14,2	17,5	0,8	0,5	0,3	0,7	200,7	409	9,4	141,6	14,8	0,8
EA-23	22,6	4,4	3,0	16,1	17,6	0,8	0,6	0,3	0,2	173,9	412	9,8	143,5	14,7	0,8
EA-24	24,6	3,5	1,8	12,4	17,9	1,1	0,6	0,3	0,2	205,2	467	11,0	171,4	20,6	1,0
EA-25	15,8	4,2	3,0	15,7	18,2	0,7	0,6	0,4	0,7	214,2	479	11,2	155,9	19,3	0,9
EA-27	18,4	4,8	5,1	19,3	18,5	0,8	0,6	0,3	0,7	170,0	487	11,2	181,3	14,6	1,2
EA-29	7,5	3,3	1,0	14,7	19,9	0,8	0,5	0,3	0,2	186,1	477	10,5	155,6	14,5	0,8
EA-33	11,8	4,6	4,6	13,0	18,5	1,4	1,0	0,3	0,2	223,3	430	10,0	150,7	15,3	0,8
EA-34	26,4	5,8	4,6	15,3	18,5	0,4	0,6	0,3	0,2	205,7	406	10,4	181,4	18,4	0,8
EA-44	14,8	4,5	4,8	23,0	16,9	0,8	0,6	0,3	0,2	282,0	183	6,8	104,3	10,9	0,8
EA-45	11,5	5,5	4,3	15,0	19,9	1,1	0,5	0,3	0,2	228,5	385	10,9	159,9	18,2	0,8
EA-46	20,7	2,3	3,3	16,2	19,7	1,9	1,0	0,3	0,2	254,7	342	10,8	158,0	16,8	0,8
EA-47	5,3	4,5	5,3	9,0	17,0	0,5	0,5	0,2	0,2	152,4	186	3,8	38,1	2,8	0,8
EA-48	21,3	6,3	31,0	28,3	21,6	0,9	0,6	0,3	0,2	210,1	767	16,3	239,7	24,9	0,8
EA-49	24,3	5,2	2,3	16,4	18,5	1,3	0,6	0,3	0,2	188,6	390	10,8	152,8	19,8	0,8
EA-50	8,3	4,3	2,9	13,9	19,3	0,9	0,5	0,2	0,6	199,0	489	11,0	168,1	14,2	0,8
Element	Sn	Mo	Cs	Ba	La	Ce	Hf	Ta	W	Tl	Pb	Bi	Th	U	
EA-6	2,5	10,4	3,5	438	68,5	100	5,8	1,5	1,6	1,2	15,4	0,5	50,3	11,7	
EA-8	1,9	3,2	3,5	559,3	40,4	67	4,9	1,9	1,7	1,4	18,3	0,5	37,9	13,6	
EA-10	0,9	3,4	3,7	805,2	57,7	75	3,7	1,8	4,6	1,3	20,8	0,5	31,9	19,4	
EA-11	1,7	6,2	3,5	1598	55,3	94	7,1	1,4	3,7	2,0	26,9	0,6	52,4	10,3	
EA-17	2,0	3,4	3,6	630,9	43,6	77	5,8	4,3	3,9	1,7	22,1	0,5	45,7	20,3	
EA-19	0,9	8,6	3,6	555,8	44,5	78	4,5	3,6	3,5	1,7	18,0	1,0	42,6	6,9	
EA-20	0,5	3,3	3,5	461,1	53,6	82	3,4	1,9	1,6	1,4	16,8	0,7	40,7	25,0	
EA-21	2,9	3,1	3,6	629,2	31,8	60	2,4	4,0	73,4	2,5	18,9	0,5	49,1	8,5	
EA-22	1,1	6,4	3,6	574,7	54,6	79	6,1	1,7	1,3	1,6	16,5	0,5	41,7	6,4	
EA-23	0,9	3,1	3,6	598,9	45,6	65	4,8	1,2	1,2	1,2	15,2	0,5	41,8	17,3	
EA-24	1,1	5,5	3,8	741,5	42,3	66	5,0	2,2	1,1	1,6	19,4	0,5	38,4	19,8	
EA-25	0,9	10,4	3,8	710,1	49,2	79	5,7	1,8	2,4	1,7	17,0	0,5	42,7	7,1	
EA-27	0,9	9,6	3,7	695,7	47,9	78	3,7	3,4	1,8	0,4	21,2	0,5	43,5	14,7	
EA-29	0,9	2,5	3,7	733,9	44,9	71	4,5	1,6	1,9	0,8	15,6	0,6	33,1	14,9	
EA-33	1,9	9,8	3,7	939,7	33,7	45	4,5	1,9	1,7	1,0	18,2	0,5	31,0	7,4	
EA-34	0,9	7,2	3,5	519,2	50,7	74	4,5	2,9	1,6	1,2	18,8	0,5	40,9	7,1	
EA-44	1,2	3,1	3,6	191,3	52,1	60	2,8	1,8	1,7	1,2	17,9	0,5	42,7	6,6	
EA-45	0,9	6,5	3,5	527,9	52,9	74	3,8	4,3	1,6	0,6	16,0	0,5	45,0	15,2	
EA-46	2,0	3,2	3,9	451,6	53,1	62	4,0	1,7	1,6	1,4	16,0	0,5	45,5	23,8	
EA-47	1,3	8,8	4,5	151,5	25,0	25	4,6	1,8	1,4	0,6	14,4	0,4	23,1	12,4	
EA-48	2,3	5,3	3,8	1097,0	69,8	107	5,1	3,1	2,1	1,6	21,9	1,2	46,9	13,6	
EA-49	0,9	3,2	3,5	488,9	50,4	68	5,3	4,0	1,7	1,2	17,4	0,5	41,6	30,6	
EA-50	1,8	3,2	3,5	661,0	39,4	64	4,7	1,8	1,7	0,9	16,4	0,5	43,0	15,8	



**Şekil 10.** Plütonik Kayaçların Toplam Alaklilerin, Silise Göre Değişimi (TAS) Diyagramındaki Konumu. **A:** Beş Farklı Araştırmacıya Göre Hazırlanan Alkali - Subalkali Diyagramı. **B:** Alkalin - Kalsik Diyagramı Frost vd. (2001) ve **C:** Toleyitik – Kalkalkalin diyagramı (Irvine ve Baragar, 1971)

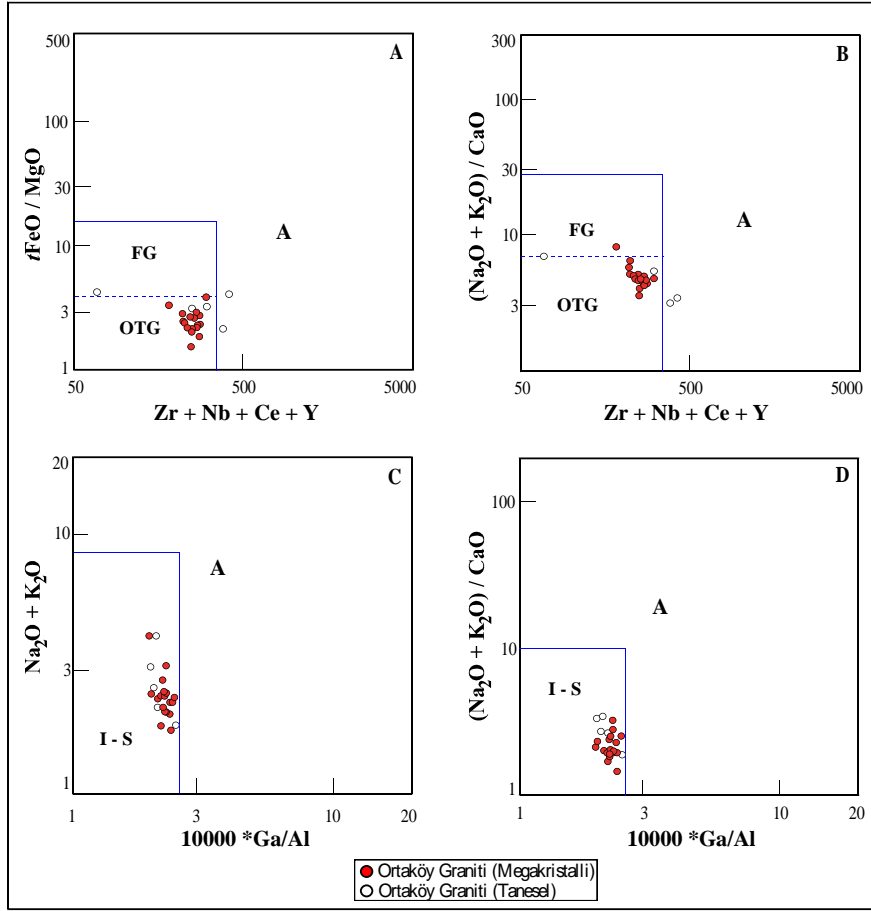
Ortaköy Granitoyidi' ne ait K-feldispat mega kristalli granitoidlerin içinde, mikrogranüler dokulu mafik magmatik anklav (microgranular textured mafic magmatic anclave MME) gözlenmemiştir. Bu durum, K-feldispat mega kristalli granitoidlerin oluşumuna sebep olan, bir biriyle karışmamakla birlikte ısı transferi sağlayan daha yüksek sıcaklığa sahip farklı bir magma kaynağının varlığı ile açıklanabilir.

Çalışma alanından derlenen kayaç numunelerinden elde edilen eser element ve nadir toprak element değerleri ile Okyanus ortası sırt bazaltları (MORB), (Şekil 17a) ve ilksel manto (PRIM) (Şekil 17b) değerlerinin normalize edilmesi ile oluşturulan grafikler Nb, Zr, T ve Y elementleri açısından negatif anomali göstermektedir. Bu jeokimyasal davranış, Ortaköy Granitoyidi' ni oluşturan magmanın kısmen tüketilmiş - artık magma ürünü olduğunu ifade eder.

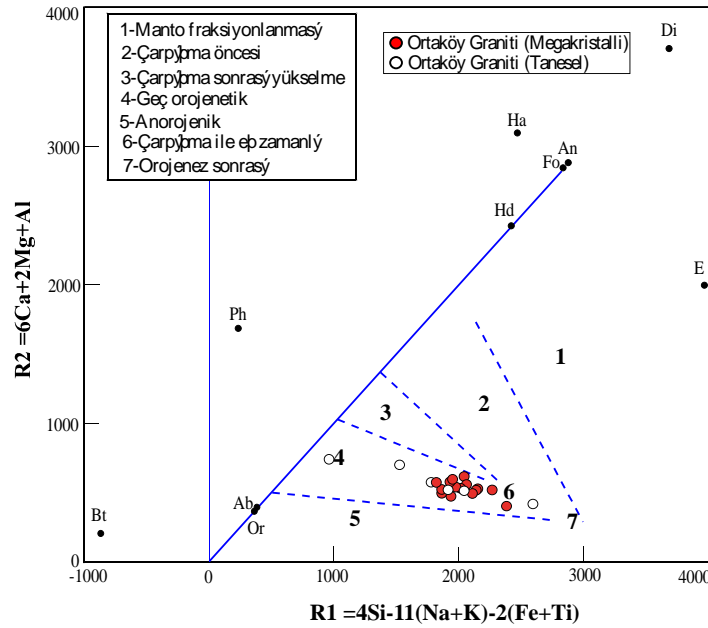


Şekil 11. Plütonik Kayaç Örneklerinin Magma Kökenine ve Bileşimine Yönelik oluşturulan Diyagramlardaki Dağılımı (A: Clarke (1992), B: Frost vd. (2001))

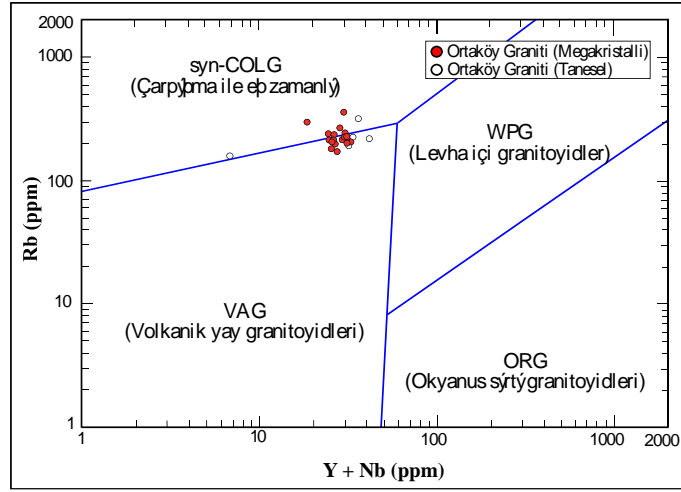




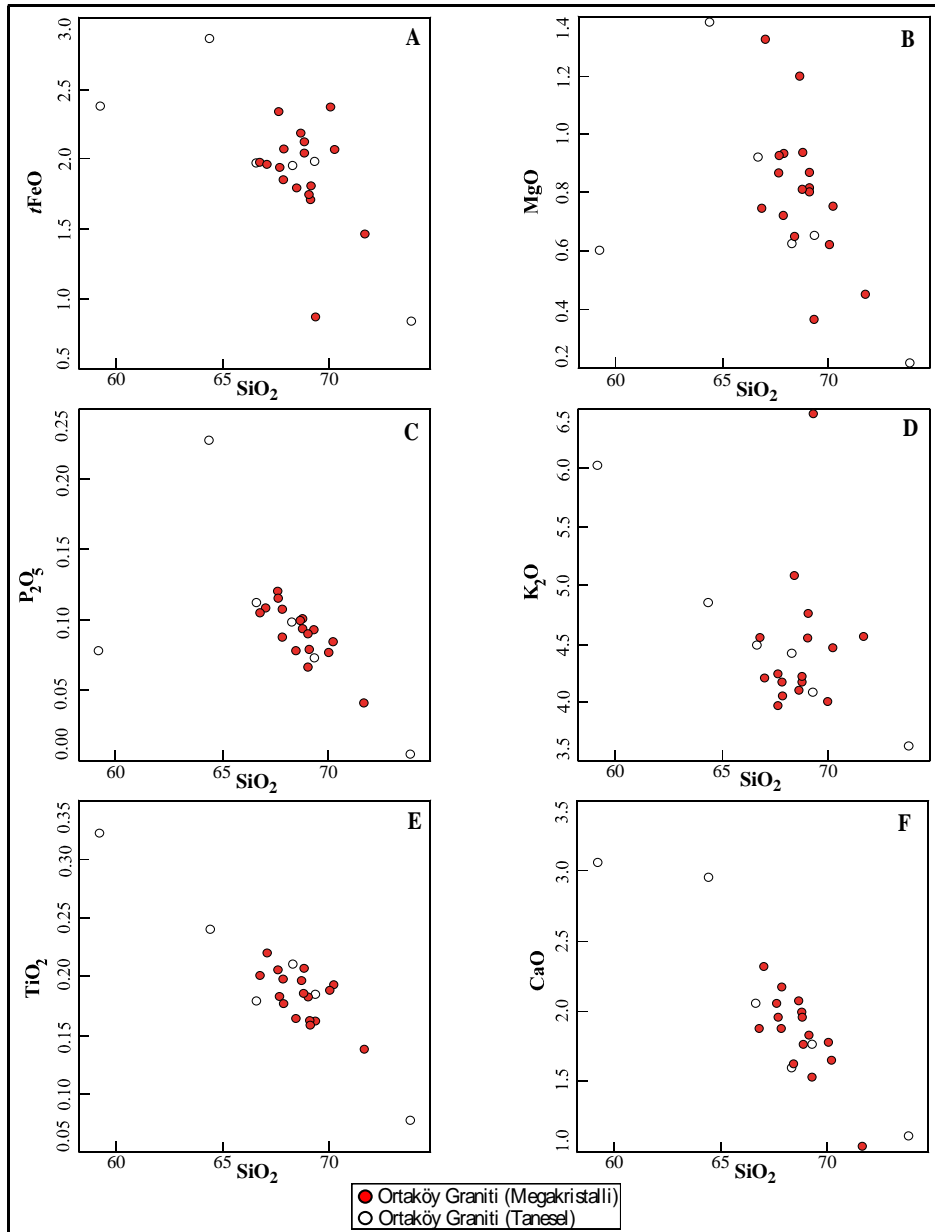
Şekil 12. Plütonik Kayaç Örneklerinin Magma Kökenini Belirlemek Amacıyla Oluşturulan Diyagramlardaki Dağılımı (Whalen vd., 1987)



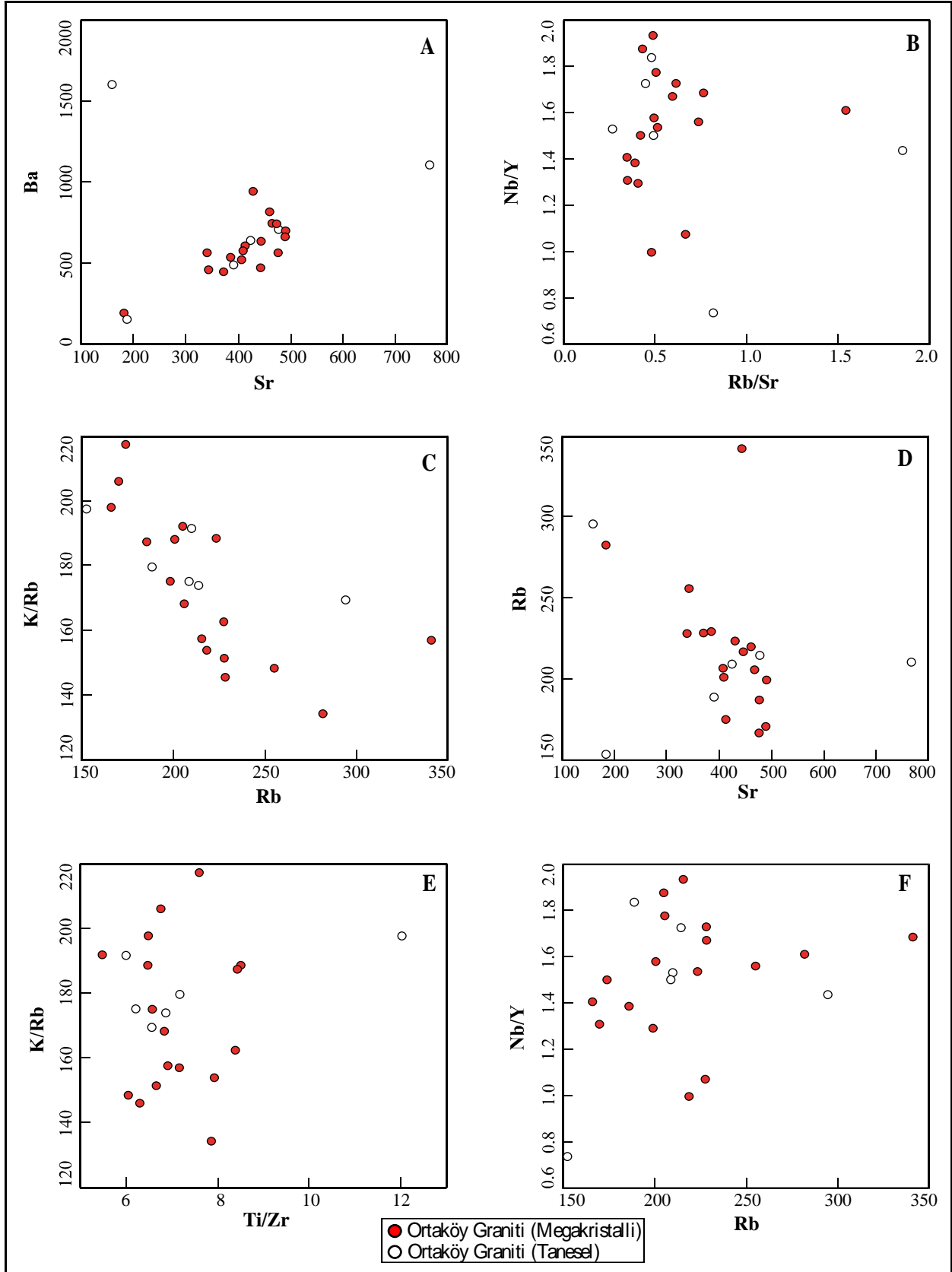
Şekil 13. Plütonik Kayaç Örneklerini Oluşturulan R1-R2 Diyagramındaki Dağılımı (Batchelor ve Bowden, 1985).  
Or: ortoklaz, Ab: Albit, An: anortit, Bt: biyotit, Di: diyopsit, E: enstatit, Ph: filogopit, Hd: hedenberjit, Ha: hiyalofon, Fo: forsterit



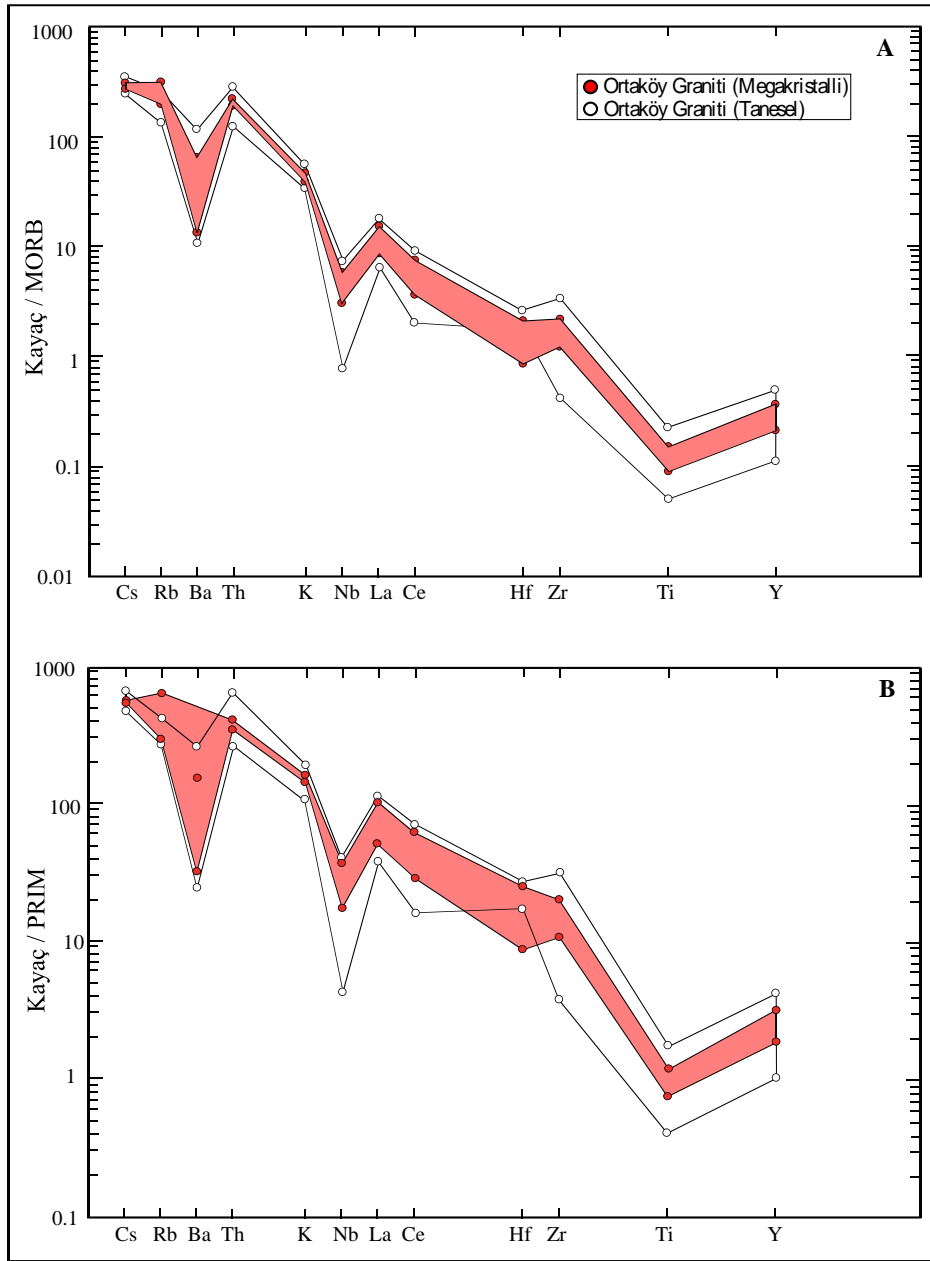
Şekil 14. Plütonik Birimlere Ait Kayaç Örneklerinin Rb – (Y+Nb) Elementleri ile Oluşturulan Jeotektonik Ortam Diyagramındaki Dağılımı (Pearce vd., 1984)



Şekil 15. Plütonik Birimlere Ait Kayaç Örneklerinin Ana Element Değişim Diyagramlarındaki Konumu



Şekil 16. Plütonik Kayaç Örneklerine Ait Eser, Ana Element Değişim Diyagramlarındaki Dağılımı



**Şekil 17.** Çalışma Alanındaki Plütonik Birimlere Ait Kayaç Örneklerinin **A:** Okyanus Ortası Sırt Bazaltlarına (MORB) ve **B:** İlksel Mantoya (Primitive Mantle PRIM)' e Göre Normalize Edilmiş Element Değişim Diyagramındaki Durumu

## SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bölgede yüzlek veren plütonik kayaçların mineralojik - petrografik ve jeokimyasal özelliklerinin ayrıntılı incelemesi ile petrojenetik süreçler değerlendirilmiş ve bölgenin jeodinamik evrimi anlaşılmaya çalışılmıştır.

Bu çalışmada, Ortaköy Granitoidi olarak adlanan/tanımlanan plütonik birimler, Yıldızeli Metasedimanter Grubu' na ait litodemeleleri keserek bölgeye yerleşmiştir.

Ortaköy Granitoidi, taneseli dokulu granitoidler ve K-feldispat megakristalli granitoidler olarak iki farklı litodemele ayrılmıştır. Taneseli dokulu granitoidler, siyenit, kuvars siyenit, kuvars monzonit, siyenogranit, monzogranit ve granodiyorit bileşimlidir. K-feldispat megakristalli granitoidler ise, monzogranit, bileşimli olup bazı örnekler, granodiyorit, siyenogranit ve kuvars siyenit bileşimlidir. K-feldispat megakristalli granitoidler içinde, taneseli dokulu granitoidlere ait felsik magmatik anklavlar (FME) gözlenmiştir.

Ortaköy Granitoyidi subbalkin, alkali-kalsik karakterli olup, kalkalkalin özellik göstermektedir. Birim, peralümino karakterli olup, fraksiyonlanmamış M-I-S tipi granitoidler (OTG) ve I-S tipi granitoidler kökenini göstermektedir.

Ortaköy Granitoyidi' nin levha tektoniği ile ilişkili olarak yerleşme sürecinin, "geç orojenez" dönemi olduğu görülmektedir. Birim "Levha içi Granitoidler (WPG)" olarak konumlanmıştır.

Ortaköy Granitoyidi' ni oluşturan magmadan itibaren, ilk aşamada tanesal dokulu granitoid fazının kristallendiği; takip eden evrede ise, K-feldispat mega kristalli granitoidlerin oluştuğu ileri sürülebilir. Bu durum, katılaşmakta olan magma sistemine ilerleyen aşamada farklı bir magma kaynağının (mikrogranüler dokulu mafik magmatik anklav (MME) gözlenemediğinden, magma karışımı söz konusu değildir; ancak kontakt hale gelen ikinci bir magma kütlesi ısı aktarımı yapmıştır) ısı aktarımı etkisi ile açıklanabilir.

## TEŞEKKÜR

Bu çalışma, "Sivas Cumhuriyet Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi" tarafından "Hızlı Destek Projesi" olarak desteklenen M-2022-839 bu proje kapsamında yapılmıştır.

## KAYNAKLAR

- Akıman, O., Erler, A., Göncüoğlu, M.C., Güleç, N., Geven, A., Türel, T.K. & Kadioğlu, Y.K. (1993). Geochemical characteristics of granitoids along the western margin of the Central Anatolian crystalline Complex and their tectonic implications. *Geol. J.*, 28, 371-382.
- Alpaslan, M. (1993). Yıldızeli yöresi (Sivas batısı) metamorfiteilerinin petrolojik incelenmesi. C.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü (Doktora Tezi), 259s, Sivas.
- Atabey, E. (1989). 1/100.000 ölçekli, Açınsama Nitelikli Türkiye Jeoloji Haritaları Serisi, Aksaray-H19 paftası, No:34, MTA, Ankara.
- Batchelor, B. & Bowden, P. (1985). Petrogenetic interpretation of granitoid rock series using multicationic parameters. *Chem. Geol.*, 48, 43-55.
- Boztuğ, D. (1995). Kırşehir Bloğundaki Yozgat Batoliti doğu kesiminin (Sorgun güneyi)-petrografisi, ana element jeokimyası ve petrojenezi. *İstanbul Üniversitesi, Müh. Fak. Yerbilimleri Dergisi*, cilt:9, 1-2, 1-20.
- Boztuğ, D. (2000). S-I-A type intrusive associations: geodynamic significance of synchronism between metamorphism and magmatism in Central Anatolia Turkey In: *Tectonics and Magmatism in Turkey and the Surrounding Area*. Geological Society Special Publications, London, 173, 441-458.
- Brown, G.C., Thorpe, R.S. & Webb, P.C. (1984). The geochemical characteristics of granitoids in contrasting arcs and comments on magma sources. *J. Geol. Soc. Lond.*, 141, 411-426.
- Clarke, D.B. (1992). *Granitoid Rocks*. New York, NY, USA: Chapman and Hall.
- Cox, K.G., Bell, J.D. & Pankhurst, R.J. (1979). *The Interpretation of Igneous Rocks*. London, UK: George, Allen and Unwin.
- Debon F. & Le Fort, P. (1983). A chemical-mineralogical classification of common plutonic rocks and associations. *Transactions of the Royal society of Edinburg: Earth sciences*, 73, 135-149.
- De La Roche, H., Leterrier, J., Grandclaude, P., & Marchal, M. (1980). A classification of volcanic and plutonic rocks using R1R2 -diagram and major element analyses--Its relationships with current nomenclature: *Chemical Geology*, v. 29, p. 183-210.
- Dönmez, M., Bilgin, Z.R., Akçay, A.E., Kara, H., Yergök, A.F. & Esentürk, K. (2005). 1/100.000 ölçekli, Açınsama Nitelikli Türkiye Jeoloji Haritaları Serisi, Kırşehir-İ31 paftası, No:46, MTA, Ankara.
- Ekici, T. (1997). Yozgat Batoliti Yozgat Güneyi Kesiminin Petrolojisi. C.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü (Yüksek Lisans Tezi), (yayınlanmamış).
- Erler, A. Akıman, O., Unan, C., Dalkılıç, F., Dalkılıç, B., Geven, A. & Önen, P. (1991). Kaman (Kırşehir) ve Yozgat yörelerinde Kırşehir Masifi magmatik kayaların petrolojisi ve jeokimyası. *Doğa-Tr. J. of Engineering and Environmental Sci.*, 15, 76-100.

- Erlor, A. & Göncüoğlu, M.C. (1996). Geologic and tectonic setting of the Yozgat batholith, Northern Central Anatolian Crystalline Complex, Turkey, *International Geology Review*, 38, 8, 714-726.
- Frost, B.R., Barnes, C.G., Collins, W.J., Argulus, R.J., Ellis, D.J & Frost, C.D. (2001). A Geochemical Classification for Granitic Rocks. *Jour.of Petrogy*, 42, 11, 2033-2048.
- Geven, A. (1992). Mineralogy, Petrography and geochemistry of Cefalıkdağ Plütonic rocks (Kaman Region - Central Anatolia). ODTÜ Fen Bil. Enst. (Doktora Tezi), 165s. (Yayınlanmamış).
- Göncüoğlu, M.C. (1986). Orta Anadolu Masifi' nin güney ucundan jeokronolojik yaş bulgular. *MTA Derg.*, 105-106, 111-124.
- Göncüoğlu, M.C., Toprak, V., Kuşçu, İ., Erlor, A. & Olgun, E. (1991). Orta Anadolu Masifinin batı bölümünün jeolojisi. TPAO Rapor No: 2909 (yayınlanmamış), Ankara.
- Göncüoğlu, M.C. & Türeli, T.K. (1993). Petrology and geodynamic interpretation of plagiogranites from Central Anatolian Ophiolites (Aksaray-Turkey). *Doğa-Türk yer Bilimleri Dergisi*, 2, 195-203.
- Göncüoğlu, M.C., Erlor, A., Toprak V., Olgun, E., Yalınız, K., Kuşçu İ. Köksal S. & Dirik K. (1993). Orta Anadolu Masifinin orta bölümünün jeolojisi. *Türkiye Petr.A.Ş.*, Rapor no: 3313. 104s.
- Güleç, N. (1994). Rb-Sr isotope data from the Ağaçören Granitoid (East of Tuz Gölü): Geochronological and Genetical İmplications. *Turkish Jour. of Earh Sci.* 3, 39-43.
- Hibbard, M. J. (1991). Textural anatomy of twelve magma mixed granitoid systems: In Didier, J. and Barbarin, B (eds.), Enclaves and Granite Petrology, Development in Petrology, 13, Elsevier, 431-444.
- Hyndman, R.D. (1972). Plate Motions relative to the Deep Mantle and the Development of Subduction Zones. *Nature* 238, 263-265.
- Irvine, T.N. & Baragar, W.R.A. (1971). A guide to the chemical classification of common volcanic rocks. *Can. Jour. Earth Sci.*, 8, 523-548.
- Kadioğlu, Y.K. (1996). Genesis of Ağaçören Intrusive Suite and Its Enclaves (Central Anatolia): Constraints from geological, petrographic, geophysical and geochemical data. ODTÜ Fen Bil. Enst. (Doktora Tezi), 242s. (Yayınlanmamış).
- Kara, H. (1997). 1/100.000 ölçekli, Açınsama Nitelikli Türkiye Jeoloji Haritaları Serisi, Yozgat-G19 paftası, No:54, MTA, Ankara.
- Kuno, H. (1968). Differentiation of Basalt Magmas. In: Hess, H.H. and Poldervaart, A., Eds., Basalts: The Poldervaart Treatise on Rocks of Basaltic Composition, Interscience Publishers, New York, 623-688.
- Le Maitre, R.W., Bateman, P., Dudek, A., Keller, J., Lameyre Le Bas, M.J., Sabine, P.A., Schmid, R., Sorenson, H., Streickeisen, A., Wolley, A.R. & Zonettin, B., (1989). A Classification of igneous rocks and glossory of terms. Blackwell, Oxford.
- MacDonald, G.A. & Katsura, I. (1964). Chemical Composition of Hawaiian Lavas. *Journal of Petrology*, 5, 82-133.
- Middlemost, E.A.K. (1994). Naming materials in the magma/igneous rock system. *Earth-Sci Rev* 37: 215-224.
- Otlu, N. (1998). Kortundağ - Baranadağ Arası (D Kaman, KB Kırşehir) Plütonik Kayaçlarının Petrolojik İncelenmesi. C.Ü. Fen Bilimleri Enst. (Doktora Tezi), 187s. (yayınlanmamış).
- Otlu, N. & Boztuğ, D. (1998). The coexistence of the silica oversaturated (ALKOS) and undersaturated alkaline (ALKUS) rocks in the Kortundağ and Baranadağ plutons from the Central Anatolian alkaline plutonism, E Kaman/NW Kırşehir, Turkey. *Turkish Journal of Earth Sciences*, Special Issue on ALKALI MAGMATISM; 7, 3, 241-258.
- Özkan, H.M. & Erkan, Y. (1994). A Petrological study on a foid synte intrusion in Central Anatolia (Kayseri, Turkey). *Turkisch Jour. Of Earth Sci.*, 3, 45-55.
- Pearce, J., A., Haris, N.B.W. & Tindle, A.G. (1984). Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretatin of granitic Rocks. *Jour of Petro.* 25, Part 4, 956-983.
- Pitcher, W.S. (1993). The Nature and Origin of Granite. Chapman and Hall, 321 p.

- Poisson, A. (1986). Anatolian micro-continents in the Eastern Mediterranean context: The neo-Tethysian oceanic troughs. *Sci. de la terre, Mem.*, 47, 311-328.
- Rickwood, P.C. (1989). Boundary lines within petrologic diagrams which use oxides of major and minor elements. *Lithos*, 22, 247-263.
- Rollinson, H.R. (1993). Using Geochemical Data: Evaluation, Presentation, Interpretation. Longman.
- Seymen, İ. (1981a). Kaman (Kırşehir) dolayısında Kırşehir masifinin stratigrafisi ve metamorfizması : *T.J.K.Bült.*,24, 2,101-108.
- Seymen, İ. (1981b). Kaman (Kırşehir) dolayısında Kırşehir masifinin metamorfizması: T.J.K. 35.Bilimsel ve Teknik Kurultayı "İç Anadolunun Jeolojisi sempozyumu" 12-15.
- Seymen, İ. (1982). Kaman dolayısında Kırşehir masifinin jeolojisi : Doçentlik Tezi, İ.T.Ü.Maden Fak., İstanbul 164 s. (yayınlanmamış).
- Streckeisen, A. (1976). To each plutonic rock its proper name. *Earth. Sci. Rev.*, 12, 1-33.
- Şengör, A.M.C. & Yılmaz, Y., 1981. Tethyan evolution of Turkey: A plate tectonic approach.*Tectonophysics*, 75, 181-241.
- Tatar, S. (1997). Yozgat Batoliti Sefaattli Kuzey Kesiminin (Güney Yozgat) Petrolojik İncelenmesi, C.Ü., Fen Bilimleri Enst. (Yüksek Lisans Tezi), 94s, (yayınlanmamış).
- Tatar S. & Boztuğ, D. (1998). Kompozit Yozgat Batoliti' ndeki I/H<sub>LO</sub> tipi monzonitik birlikte fraksiyonel kristalleşme ve asimilasyon – fraksiyonel kristalleşme ile oluşmuş ters zonlanma. 51. TJK Kurultayı, 16-20 Şubat 1998, Ankara, Bild. Özleri, s. 35-37.
- Tolluoğlu, A.Ü. (1986). Orta Anadolu Masifinin güneybatısında (Kırşehir yöresinde) petrografik ve petrotektonik incelemeler. H.Ü. Fen Bilimleri Enst. (Doktora Tezi),(yayınlanmamış).
- Tolluoğlu, A.Ü. (1987). Orta Anadolu Masifi Kırşehir Metamorfitlerinin (Kırşehir kuzeybatısı) petrografik özellikleri. *Doğa Bilim Derg. Müh. Ve Çevre Derg.* 11/3, 344-361.
- Tolluoğlu, A.Ü. (1990). Orta Anadolu Masifi Kırşehir Metamorfitlerinin (Kırşehir kuzeybatısı) petrografik özellikleri. *C.Ü. Müh. Fak. Derg. Seri-A. Yerbilimleri.* C.6-7, sayı 1-2, 3-25.
- Tolluoğlu, A.Ü. (1993). Kırşehir masifini kesen felsik intrüziflerin (Kötüdağ ve Buzlukdağ) Petrografik ve Jeokimyasal Karakterleri. *H.Ü. Yerbilimleri Uygulama ve Araştırma Merkezi Bülteni*, 16, 19-41.
- Türel, T. K., Göncüoğlu, M. C., & Akıman, O. (1993). Ekecik granitoidinin petrolojisi ve kökeni (Orta Anadolu Kristalin Karmaşığı Batısı). *H.Ü. Yerbilimleri* 25. Yılı sempozyumu. Bildiri özleri.
- Whalen, J.B., Currie, K.L. & Chappell, B.W. (1987). A-type granites: geochemical characteristics, discrimination and petrogenesis. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 95: 407-419.
- Whitney, D.L. & Evans, B.W., (2010). Abbreviations for names of rock-forming minerals. *American Min.*, 95, 185-187.
- Wilson, M. (1989). Igneous Petrogenesis, London Unwin Hyman. 456 p.
- Yılmaz, A., Uysal Ş., Bedi, Y., Yusufoglu, H., Havzoğlu, T., Ağan, A., Göç, D. & Aydın, N. (1995). Akdağ Masifi ve Dolayının Jeolojisi. *MTA Derg.* s.117, sayfa 125-138.



# Kahramanmaraş Sütçü İmam University Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 28.02.2024  
Kabul Tarihi : 14.05.2024

Received Date : 28.02.2024  
Accepted Date : 14.05.2024

## BASINÇ VE EĞİLME ALTINDAKİ ELİPTİK KOLONLARIN TAŞIMA KAPASİTELERİNİN ESNEK HESAPLAMA YÖNTEMLERİ İLE TAHMİNİ

### ULTIMATE CAPACITY PREDICTION OF ELLIPTICAL SECTION COLUMNS IN COMPRESSION AND BENDING BY SOFT COMPUTING METHODS

*Mehmet KURT*<sup>1</sup> (ORCID: 0009-0001-3150-0564)  
*Esra Mete GÜNEYİSİ*<sup>1\*</sup> (ORCID: 0000-0002-4598-5582)  
*Kasım MERMERDAŞ*<sup>2</sup> (ORCID: 0000-0002-1274-6016)

<sup>1</sup> Gaziantep Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Gaziantep, Türkiye

<sup>2</sup> Harran Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Şanlıurfa, Türkiye

\*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Esra Mete GÜNEYİSİ, eguneyisi@gantep.edu.tr

#### ÖZET

Son yıllarda hem yüksek mukavemeti hem de sıcak veya soğuk haddelenmiş olarak bulunması sebebiyle, eliptik profillerin kullanımına yönelik ilgi artmaktadır. Eliptik kesitler içsel estetik özelliklerinin yanı sıra küçük ve büyük eksen özelliklerine sahip olmaları ile avantaj sağlamaktadırlar. Sunulan çalışmada esnek hesaplama yöntemlerinden gen ekspresyonu programlama ve yapay sinir ağları yöntemleri kullanılarak, basınç ve eğilme etkisindeki eliptik kesitli çelik boru profilden oluşturulmuş kolonlarının maksimum yük taşıma kapasitelerinin tahmini için sayısal modeller geliştirilmiştir. Bu amaçla, mevcut literatürdeki deneysel veriler kullanılarak modellerin eğitimi ve doğrulaması gerçekleştirilmiştir. Araştırmada kullanılan eliptik kolonlar, küçük ve büyük eksenleri dikkate alınarak dışmerkezli ve merkezi aksenal yük altında eğilme burkulması testine tabi tutulmuştur. Modellemede dokuz farklı değişken kullanılmıştır. Bunlar burkulma eksenini, y ve z yönlerindeki dışmerkezlik değeri, kesitin büyük ve küçük dış çapları, cidar kalınlığı, çeliğin akma dayanımı, çekme dayanımı ve eleman boyudur. Elde edilen bu modeller istatistik açıdan irdelenmiştir. Ayrıca, önerilen modellerin güvenilirliği ve tekrarlanabilirliği gerçek deneysel verilerle karşılaştırılmalı olarak analiz edilmiş; önerilen gen ekspresyonu programlama modeli ile deneysel veriler arasında korelasyonun test veri kümesi için 0,84 olduğu, diğer taraftan yapay sinir ağları modeli için ise bu değer 0,99 olduğu görülmüştür.

**Anahtar Kelimeler:** Çelik kolon, eliptik kesit, modelleme, tahmin, yük taşıma kapasitesi

#### ABSTRACT

In recent years, there has been a growing interest in the use of elliptical profiles as having high strength and being as hot-rolled or cold-formed. Elliptical sections provide superiority with their minor and major axis properties as well as their aesthetic features. In this study, by using soft computing methods such as gene expression programming and artificial neural network, numerical models were developed to estimate the load carrying capacity of elliptical columns under compression and bending. For this, training and testing of the models were conducted using experimental data from the existing literature. Nine different variables were utilized, namely, buckling axis, eccentricity in the y and z directions, large and small outer diameters of the section, wall thickness, yield and tensile strength of the steel and column length. The proposed models were statistically examined. Moreover, the robustness and repeatability of the proposed models were analyzed in comparison with actual experimental data; for the testing data set, it was observed that the correlation coefficient for the gene expression programming model was 0.84 while that for the artificial neural network model was 0.99.

**Keywords:** Steel column, elliptical section, modeling, prediction, load carrying capacity

ToCite: KURT, M., GÜNEYİSİ, E.M., & MERMERDAŞ, K., (2024). BASINÇ VE EĞİLME ALTINDAKİ ELİPTİK KOLONLARIN TAŞIMA KAPASİTELERİNİN ESNEK HESAPLAMA YÖNTEMLERİ İLE TAHMİNİ. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 27(3), 985-998.



## GİRİŞ

Çelik ve kompozit yapısal sistemlerde, boru profiller hem verimli kullanılabilmeleri hem de estetik görünüşleri sebebiyle çoğunlukla tercih edilmektedirler. Boru profil olarak sıklıkla kullanılan dairesel, dikdörtgen ve kare kesitlere ilaveten, son yıllarda eliptik kesitlerin üretimine ve kullanımına olan ilgi artmaktadır. Özellikle iki yönde farklı eğilme momentine maruz kalan ve/veya iki ana eksen için farklı burkulma boyları olmasına sebep olan diyagonal eleman bağlantıları ve farklı mesnet koşulları mevcut olduğunda, büyük ve küçük eksene sahip olmaları eliptik boru kesitlerin, dairesel kesitlere göre daha verimli kullanılabilmesini sağlamaktadır (Chan ve Gardner, 2009). Günümüzde eliptik boru kesitler bu avantajları sebebiyle önemli yapılarda kullanılmaktadır; örneğin Londra Heatrow ve Madrid Barajas havaalanlarında, Braemar Society köprüsünde uygulamaları görülmektedir (Corus 2006, Vinuela-Rueda ve Martinez-Salcedo, 2006).

Literatürde eliptik boru kesitler ile ilgili dikkat çeken çalışmalardan bazıları eliptik kesitlerin sınıflandırması (Gardner ve Chan, 2007); farklı yüklem koşulları örneğin iki ana eksen e eğilme momenti (Chan ve Gardner, 2008a), kesme ve eğilme (Gardner vd., 2008) için eliptik kesit tasarım önerileri üzerinedir. Bunlara ilaveten, basınç altında eliptik kesit tasarım dayanımının belirlenmesini (Chan ve Gardner, 2008b) ve birleşik yüklem altındaki eliptik kesitler için kesit sınıflandırılmasına bağlı olarak tamamen plastik veya elastik etkileşim formülasyonlarının oluşturulmasını (Nowzartash ve Mohareb, 2009) içeren çalışmalar da bulunmaktadır. Ayrıca, eliptik kolonların elastik burkulma davranışına (Law ve Gardner, 2013; Gardner vd., 2011; Theofanous vd., 2009; Chan ve Gardner, 2009; Ruiz-Teran ve Gardner, 2008; Zhu ve Wilkinson, 2006) ve beton dolgu eliptik kompozit kolonların davranışına (Zhao ve Packer, 2009; Yang vd., 2008; Zhao vd., 2007; İpek ve Güneyisi, 2022) odaklanan analitik ve deneysel çalışmalar da mevcuttur.

Bu çalışmada ise, aksenal yük ve/veya moment etkisindeki eliptik kesitli kolonlarının maksimum yük taşıma kapasitelerinin tespiti ile ilgili literatürdeki mevcut deneysel veriler kullanılarak; eliptik kesitli kolon kapasitelerinin gen ifade programlama (GEP) ve yapay sinir ağları (YSA) yöntemleriyle modellenmesi amaçlanmıştır. Geliştirilen tahmin modellerinin performansları deneysel veri sonuçları ile karşılaştırılarak istatistiki olarak değerlendirilmiştir.

## DENEYSEL VERİ TABANI

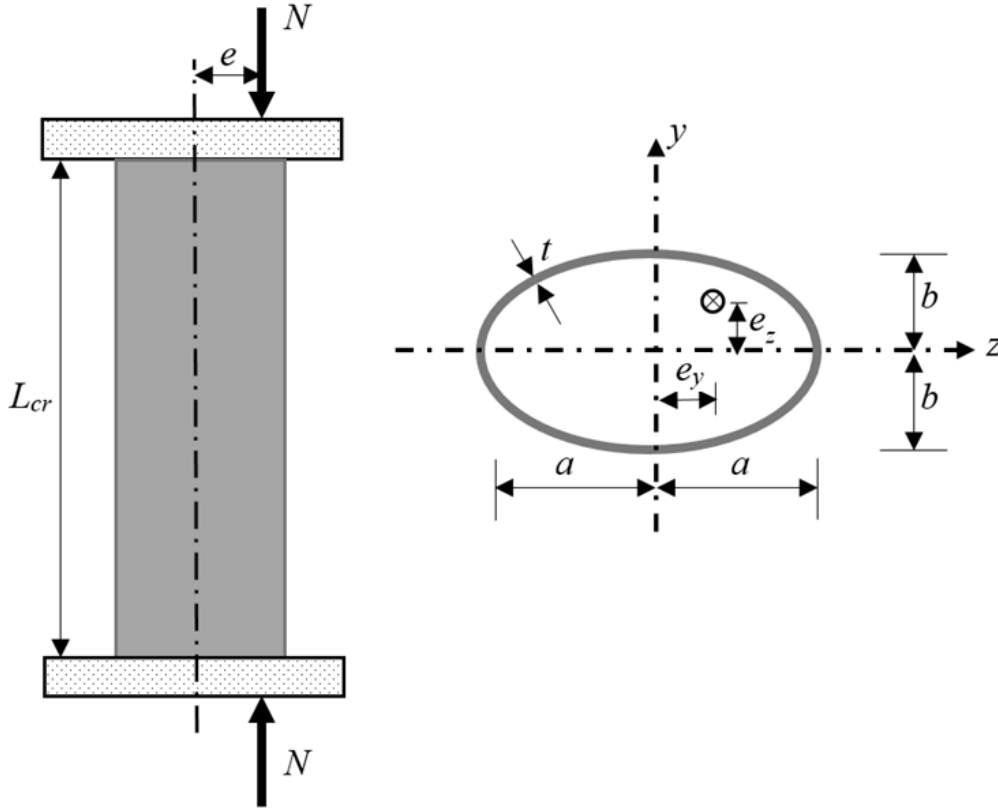
Eliptik kesitli kolonların basınç ve eğilme etkisi altındaki yük taşıma kapasitesine ilişkin bir tahmin modelinin üretilmesinde literatürde bulunan mevcut deneysel verilerden yararlanılmıştır (Law ve Gardner, 2013; Chan ve Gardner, 2009; Theofanous vd., 2009). Eliptik kesitli kolonlara ait toplam 54 deney sonucu kullanılmıştır. Kullanılan bu veri tabanının ayrıntıları Tablo 1'de sunulmaktadır. Tablodan da görüldüğü üzere test numunelerinin geometrik ve mekanik özellikleri farklılık göstermektedir. Numuneler küçük ve büyük eksenlerinde dışmerkezli ve merkezi aksenal yük altında eğilme burkulması açısından test edilmişlerdir. Modellemede dokuz farklı değişken kullanılmıştır. Bunlar eliptik kolonun burkulma eksen ( $BE$ ), y ve z yönlerindeki dışmerkezlik değeri ( $e_y$  ve  $e_z$ ), kesitin büyük ve küçük dış çapları ( $\phi_1=2a$  ve  $\phi_2=2b$ ), cidar kalınlığı ( $t$ ), çeliğin akma ve çekme dayanımları ( $f_y$  ve  $f_u$ ) ve eleman boyudur ( $L_{cr}$ ). Deneysel veriler incelendiğinde deney numunelerinin narin numuneler olduğu, eleman boylarının 700 ila 3190 mm arasında değiştiği, boy-büyük dış çap oranının 4,6 ile 36,0 ve boy-küçük çap oranının 9,2 ile 55,0 arasında değiştiği görülmektedir. Ayrıca Tablo 1'de test numunelerine ait maksimum yük taşıma kapasitelerindeki ( $N_u$ ) değişimler de görülmektedir. Deney düzeneğinin ve eliptik kesitin detayları Şekil 1'de sunulmaktadır.

Esnek hesaplama yaklaşımları izlenebilir, güvenilir ve düşük çözüm maliyetine sahip olabilmek için belirsizlik toleransından yararlanmayı hedefleyen bir yöntemler grubu olarak tanımlanmaktadır (Zadeh, 1994). Bulanık mantık, genetik algoritma, genetik programlama ve yapay sinir ağı esnek hesaplamanın ana teknikleri olarak düşünülebilir (D'Aniello vd., 2014). Sunulan bu çalışmada esnek hesaplama yöntemlerinden genetik programlama ve yapay sinir ağları, eliptik kesitli kolonların basınç ve eğilme etkisi altındaki maksimum yük taşıma kapasitesine ilişkin iki farklı tahmin modeli geliştirmek için kullanılmıştır.

Genetik programlama günümüzde ayrık, türevi olmayan, kombinator (düzenleme-modelleme-sonuç inceleme) analiz ve genel doğrusal olmayan mühendislik optimizasyon problemlerini çözmek için başarıyla uygulanabilmektedir (Goldberg, 1989). Genetik programlamanın temelinde genetik algoritmaların bilgisayar programları vasıtasıyla uygulanması yer almaktadır (Koza, 1992).

Tablo 1. Kullanılan Deneysel Veriler

Deneysel Veri	No	BE	Dışmerkezlik		Büyük	Küçük	Cidar kalınlığı	Çeliğin	Çeliğin	Eleman Boyu	Yük Kapasitesi
			$e_y$	$e_z$	Dış Çap	Dış Çap		Akma Dayanımı	Kopma Dayanımı		
			(mm)	(mm)	2a	2b		t	$f_y$		
				(mm)	(mm)	(mm)	(N/mm <sup>2</sup> )	(N/mm <sup>2</sup> )	(mm)	(kN)	
Chan ve Gardner (2009)	1	0	0	0	150,56	75,48	4,14	380	512	700	495
	2	0	0	0	150,08	76	5,13	374	506	700	614
	3	0	0	0	150,37	75,25	6,27	381	509	700	820
	4	1	0	0	150,54	75,4	4,24	373	514	700	573
	5	1	0	0	150,21	75,64	5,11	364	503	700	677
	6	1	0	0	150,28	75,53	6,35	400	515	700	866
	7	0	0	0	150,44	75,53	4,2	380	512	1500	507
	8	0	0	0	150,31	75,48	5,19	374	506	1500	647
	9	0	0	0	148,36	75,62	6,3	381	509	1500	789
	10	1	0	0	150,05	75,51	4,26	373	514	1500	538
	11	1	0	0	150,1	76,08	5,1	364	503	1500	680
	12	1	0	0	148,47	75,9	6,33	400	515	1500	836
	13	0	0	0	150,26	75,4	4,22	380	512	2300	365
	14	0	0	0	150,11	75,4	5,12	374	506	2300	393
	15	0	0	0	148,82	75,92	6,31	381	509	2300	452
	16	1	0	0	150,34	75,46	4,17	373	514	2300	489
	17	1	0	0	150,05	75,54	5,09	364	503	2300	611
	18	1	0	0	148,77	75,78	6,21	400	515	2300	814
	19	0	0	0	150,5	75,45	4,22	380	512	3100	234
	20	0	0	0	149,93	75,79	5,09	374	506	3100	242
	21	0	0	0	148,77	75,85	6,28	381	509	3100	292
	22	1	0	0	150,46	75,43	4,18	373	514	3100	429
	23	1	0	0	150,03	75,67	5,13	364	503	3100	509
	24	1	0	0	148,6	75,91	6,21	400	515	3100	648
Theofanous vd. (2009)	25	0	0	0	85,41	57,16	3,11	335	591,5	699,5	181,8
	26	1	0	0	85,48	56,84	3,09	335	591,5	700,6	196,9
	27	0	0	0	86,05	56,21	3,11	335	591,5	1499,6	116,1
	28	1	0	0	85,91	56,7	3,15	335	591,5	1500,5	150,8
	29	0	0	0	86,18	56,22	3,11	335	591,5	2299,3	72,3
	30	1	0	0	86,02	56,33	3,12	335	591,5	3100,3	40,6
Law ve Gardner (2013)	31	1	0	0	150,35	75,74	4,93	358	468	1330	645,4
	32	1	25	0	150,42	75,33	5,01	344	470	1310	390,8
	33	1	50	0	150,5	75,58	5,02	360	485	1310	323,4
	34	1	150	0	150,33	75,87	4,98	388	510	1310	142,4
	35	0	0	0	150,46	75,56	4,97	358	468	1330	636,7
	36	0	0	15	150,27	75,8	4,97	326	452	1310	350,5
	37	0	0	25	150,36	75,81	5,08	326	452	1310	271,5
	38	0	0	100	150,2	75,7	4,98	326	452	1310	112,3
	39	1	0	0	150,32	75,7	4,98	377	491	2330	594,9
	40	1	25	0	150	75,88	4,93	344	470	2310	339,8
	41	1	50	0	150,28	75,73	4,95	388	510	2310	245,7
	42	1	150	0	150,36	75,33	4,99	373	489	2310	123,5
	43	0	0	0	150,33	75,41	4,98	377	491	2330	430,3
	44	0	0	25	150,03	75,84	5,06	344	470	2310	211,7
	45	0	0	50	150	75,57	5,03	344	470	2310	146,2
	46	0	0	150	150,16	75,86	4,98	373	489	2310	73,3
	47	1	0	0	150,16	75,64	4,84	326	452	3190	475,4
	48	1	25	0	150,16	75,5	4,92	341	473	3170	281,8
	49	1	50	0	150,03	75,95	4,9	341	473	3170	212,5
	50	1	150	0	150,13	75,62	4,96	341	473	3170	113,5
51	0	0	0	150,18	75,68	4,82	388	510	3180	226	
52	0	0	50	150,17	75,4	4,93	326	452	3170	109,4	
53	0	0	100	150,3	75,52	4,95	358	468	3170	80,2	
54	0	0	200	149,95	75,54	4,96	358	468	3170	51,6	



Şekil 1. Deney Düzenegi ve Eliptik Kesitin Detayları

Genetik algoritmalar arasında çaprazlama, mutasyon, üreme, gen çoğaltma ve gen silme yer alır. Başka bir deyişle genetik algoritmalarda bir embriyoyu gelişmiş bir varlığa dönüştürmek için gerekli gelişimsel süreçlerin analogları kullanılmaktadır. Yani genetik programlama, kullanıcı tarafından tanımlanan bir görevi yerine getiren veya bir sorunu çözmek için genetik olarak bir dizi bilgisayar programı üreten, biyolojik evrim kurallarını kullanan bir yöntemdir (D'Aniello vd., 2015). Gen ifade programlaması (GEP) ise genetik algoritmaların ve genetik programlamanın doğal bir gelişimi olarak ortaya çıkmıştır (Ferreira, 2001). Bir GEP algoritmasının ilk adımı, başlangıç popülasyonu için her bireyin sabit uzunluktaki kromozomlarının rastgele üretilmesidir. Kromozomların belirlenmesi ve temsil ettiği çözümün yeterliliğine göre her bireyin uygunluğu değerlendirilir (D'Aniello vd., 2015). Bu çalışmada GEP tabanlı matematiksel model, GeneXproTools.4.0 yazılımı kullanılarak geliştirilmiştir.

Yapay sinir ağları (YSA), beyin gibi biyolojik sinir sisteminin mikro yapısını temel alan algoritmaları uygulayan bir sistemdir (Zhang ve Friedrich, 2003). Belirli sorunları çözmek için birlikte çalışan çok sayıda birbirine yüksek derecede bağlı işlem elemanlarından, başka bir deyişle nöronlardan oluşur. Özellikle biyolojik sistemlerde olduğu gibi öğrenme süreci, nöronlar arasındaki sinir ağları iletişimi bağlantılardaki ayarlamaları içerir (D'Aniello vd., 2015; Wasserman, 1989). Bu çalışmada, YSA tabanlı matematiksel modelin geliştirilmesi için Matlab V. R2012a programında hazır bulunan Nftool aracı kullanılmıştır. YSA uygulamasında, sayısal girdilerden oluşan bir veri tabanı ile sayısal çıktılar arasında eşleşme yapmak için bir sinir ağı kullanılır. Nftool aracı bir ağ oluşturur ve eğitirken, ortalama karesel hata ve regresyon analizini kullanarak eşleşme performansını değerlendirir. Sigmoid nöronlara ve doğrusal çıkış nöronlarına sahip iki katmanlı ileri beslemeli bir ağ, gizli katmanında tutarlı veriler ve yeterli sayıda nöron kullanıldığında, çok boyutlu eşleşme problemlerine etkin bir çözüm yöntemi olarak uygulanabilir. Ağ yapısı Levenberg-Marquardt geri besleme algoritması kullanılarak eğitilmiştir (Levenberg, 1944).

## ÖNERİLEN MODELLER

### GEP Modeli

Eliptik kesitli kolonların yük taşıma kapasitesinin ( $N_u$ ) belirlenmesi için gen ifade programlama (GEP) kullanılarak geliştirilen tahmin modeli Denklem 1'de sunulmaktadır. Ayrıca, matematiksel modellerin geliştirilmesinde kullanılan GEP parametreleri Tablo 2'de verilmektedir. Tablodan da görüldüğü üzere, tahmin kapasitesi yüksek bir

model oluşturulmak için 5 gen ve çeşitli matematiksel işlemler kullanılmıştır. Her gen aslında Şekil 2’de verilen bir formül ağacına karşılık gelmektedir. Formül ağaçlarının kullanılması matematiksel ve/veya mantıksal değişimlerin derlenebilmesi ve hızlı algılama açısından kolaylık sağlamaktadır. Genler dolayısıyla her bir formül ağacı, çarpım yoluyla ana modele bağlanır. Bu nedenle, öncelikle Denklem 1a-1e’de verilen fonksiyonlarda girdi parametreleri yerine konular ve her bir gen elde edilir. Denklem 1’de verildiği gibi çarpım yoluyla da tahmin değeri bulunur. Bu tahmin modeli kullanılırken girdi parametrelerinin normalizasyonuna veya başka bir dönüşüme ihtiyaç duyulmamaktadır. Ancak, genlerin oluşturulmasında kullanılan trigonometrik fonksiyonların radyan birimlerle ifade edildiğine dikkat edilmelidir.

$$N_U = N_1 \times N_2 \times N_3 \times N_4 \times N_5 \quad (1)$$

$$N_1 = e^{K_1} \quad K_1 = \left[ \log \left( \log \left( \log(d_5)^2 + \frac{d_6+d_7}{d_8-d_7} \right) \right) \right]^3 \quad (1.a)$$

$$N_2 = e^{K_2} \quad K_2 = \frac{d_5}{(d_1 + \sqrt[3]{d_8}) \times (0.376282)^2 + 3.166931} \quad (1.b)$$

$$N_3 = \sqrt[3]{e^{\sqrt[3]{d_3} - (d_1 + 9.720703) + d_0 \times \arctan(e^{d_5})}} \quad (1.c)$$

$$N_4 = \sqrt[3]{2d_4 + (d_5 + d_0) \times (d_0 - 7.112671) - 7.112671 - d_1 + d_3} \quad (1.d)$$

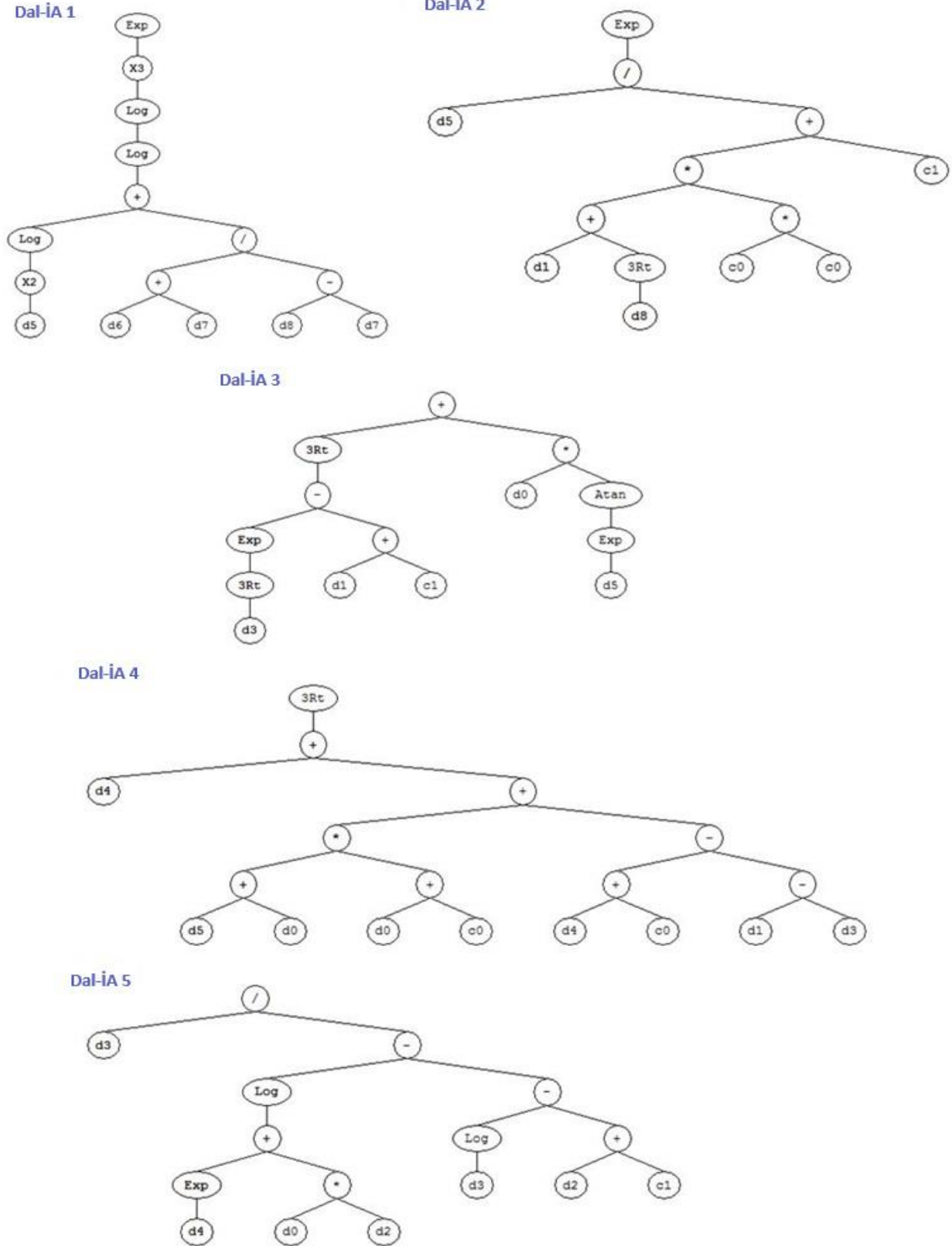
$$N_5 = \frac{d_3}{\log(e^{d_4+d_0 \times d_2}) - \log(d_3) + d_2 - 1.180572} \quad (1.e)$$

Yukarıdaki denklemlerde;  $d_0$ : burkulma eksen,  $BE$  (kukla değişkenler: küçük eksen için 0, büyük eksen için 1);  $d_1$ : y eksenindeki dışmerkezlik,  $e_y$  (mm);  $d_2$ : z eksenindeki dışmerkezlik,  $e_z$  (mm);  $d_3$ : büyük dış çap,  $\phi_1$  (mm);  $d_4$ : küçük dış çap,  $\phi_2$  (mm);  $d_5$ : kesit cidar kalınlığı,  $t$  (mm);  $d_6$ : çeliğin akma dayanımı,  $f_y$  (MPa);  $d_7$ : çeliğin çekme dayanımı,  $f_u$  (MPa); ve  $d_8$ : eleman boyu,  $L_{cr}$  (mm)’dir.

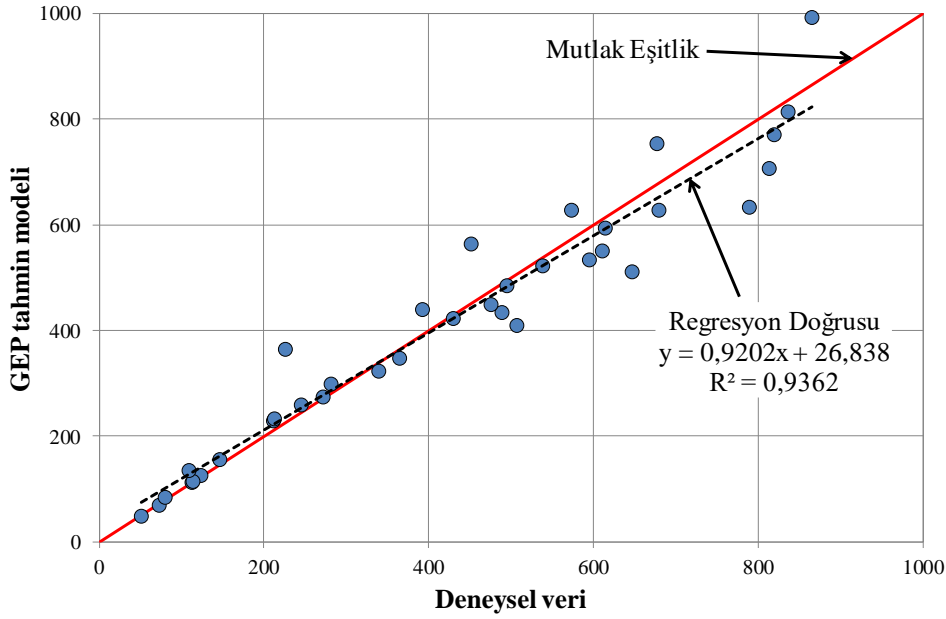
**Tablo 2.** GEP Modelinde Kullanılan Veriler

P1	Fonksiyonlar	+, -, *, /, $\sqrt$ , $\wedge$ , $\log$ , $\exp$
P2	Nesil Sayısı	74541
P3	Kromozomlar	30
P4	Baş ölçüsü	10
P5	Bağlantı fonksiyonu	Çarpma
P6	Gen adedi	5
P7	Mutasyon oranı	0,044
P8	Inversiyon oranı	0,1
P9	Tek noktalı rekombinasyon oranı	0,3
P10	İki noktalı rekombinasyon oranı	0,3
P11	Gen rekombinasyon oranı	0,1
P12	Gen aktarım oranı	0,1

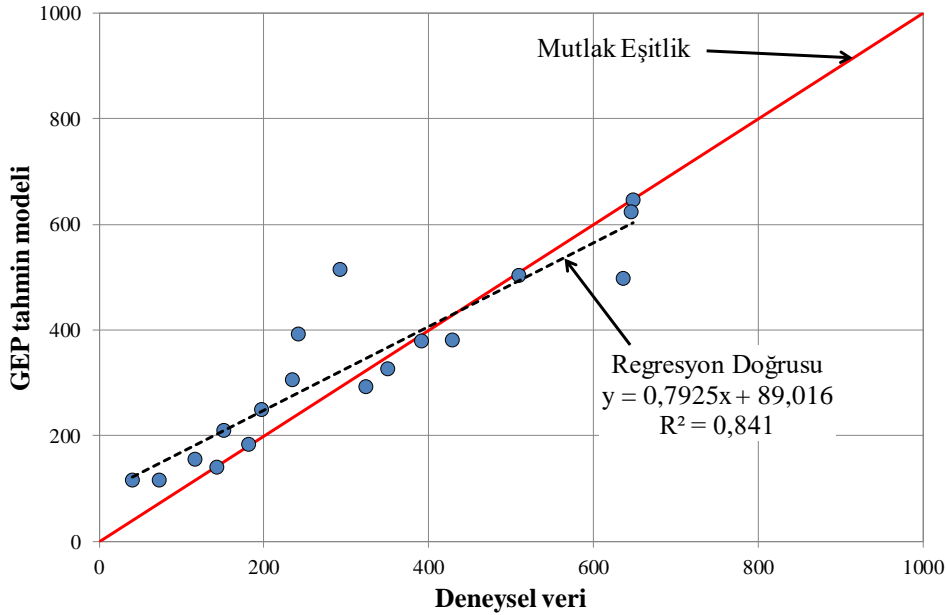
Geliştirilen GEP modelinin performansı, hem eğitim hem de test veri kümeleri için Şekil 3’de gösterilmektedir. Şekillerde, GEP ile elde edilen tahmin sonuçlarına karşılık gelen deneysel sonuçlar çizilmiştir. Şekilden de görüldüğü üzere hem eğitim hem de test veri kümeleri için, deneysel sonuçlar ile önerilen model arasında belirleyicilik katsayısı ( $R^2$ ) yüksek doğrusal ilişkiler bulunmuş ve sırasıyla  $R^2$  değerleri 0,936 ve 0,841 olarak elde edilmiştir. Bu durum geliştirilen modelin tutarlılığının ve kullanılabilirliğinin bir göstergesi olarak değerlendirilmiştir.



**Şekil 2.** GEP Modeli İfade Ağacı (İA) [ $d_0$ : burkulma eksen,  $BE$ ;  $d_1$ : y eksenindeki dışmerkezlik,  $e_y$ ;  $d_2$ : z eksenindeki dışmerkezlik,  $e_z$ ;  $d_3$ : büyük dış çap,  $\phi_1$ ;  $d_4$ : küçük dış çap,  $\phi_2$ ;  $d_5$ : kesit cidar kalınlığı,  $t$ ;  $d_6$ : çeliğin akma dayanımı,  $f_y$ ;  $d_7$ : çeliğin çekme dayanımı,  $f_u$ ; ve  $d_8$ : eleman boyu,  $L_{cr}$ ;  $c_0$  ve  $c_1$ : sabitler (Dal-İA 2 için  $c_0=0.376282$ ,  $c_1=3.166931$ , Dal-İA 3 için  $c_1=-1.759613$ , Dal-İA 4 için  $c_0=-7.112671$ , Dal-İA 5 için  $c_1=-1.180572$ ]



(a)



(b)

**Şekil 3.** GEP Tabanlı Modelden Elde Edilen Eksenel Yük Kapasitesi ile Deneysel Verilerin İlişkisi: **a.** Eğitim Veri Kümesi **b.** Test Veri Kümesi

### YSA Modeli

YSA modeli geliştirilirken Şekil 4'de gösterildiği gibi 9 girdi, 10 nöron ve 1 çıktıdan oluşan 9-10-1 yapısına sahip bir ağ modeli kullanılmıştır. Giriş katmanında kullanılan 9 nokta, girdi parametrelerine yani  $BE$ ,  $e_y$ ,  $e_z$ ,  $\phi_1$ ,  $\phi_2$ ,  $t$ ,  $f_y$ ,  $f_u$  ve  $L_{cr}$  'ye karşılık gelmektedir. Gizli katmanda 10 nöron bulunmakta ve çıkış katmanı ise eliptik kesitli kolonların basınç ve eğilme altında aksenal yük taşıma kapasitesi tahminine karşılık gelmektedir. Gizli katmandaki nöron sayısı, hem eğitim hem de test veri tabanı için minimum ortalama kare hatası ve en yüksek  $R^2$  veren deneme-yanılma çalışmasına dayanarak belirlenmiştir.

YSA modelinde veriler normalize edilerek kullanılır. Verilerin normalize edilebilmesi için Denklem 2 kullanılır. Bu denklemdeki a ve b normalizasyon katsayıları veri tabanındaki maksimum ve minimum değerler dikkate alınarak hesaplanır. Maksimum-minimum değerler ile normalizasyon katsayıları Tablo 3'de verilmiştir.

$$\beta_{normalize} = a\beta + b \quad (2)$$

$$a = \frac{2}{\beta_{max} - \beta_{min}} \quad (2.1)$$

$$b = -\frac{\beta_{max} + \beta_{min}}{\beta_{max} - \beta_{min}} \quad (2.2)$$

Burada  $\beta_{max}$  girdi veya çıktı verilerinin maksimum gerçek değerlerini gösterirken  $\beta_{min}$  ise girdi veya çıktı verilerinin minimum gerçek değerlerini göstermektedir.

YSA modeli ve karşılık gelen matematiksel işlemler Denklem 3-6'da verilmiştir. YSA modeline dahil edilmeden önce tüm sayısal girdi parametreleri [-1, 1] aralığında normalize edilmiştir. Bu nedenle YSA modeli kullanılırken verilen matematiksel işlemlerde normalize edilmiş girdi parametrelerinin girilmesi gerekir. Benzer şekilde, YSA modelinden tahmin edilen basınç ve eğilme altında aksenal yük taşıma kapasitesi sonucu da Denklem 2'ye göre normalize edilmiş formda bulunmaktadır.

$$N_{U, Normalized} = [-0.85563] + \begin{bmatrix} 1.1094 \\ -0.5611 \\ -0.7535 \\ -0.4084 \\ 0.3063 \\ -0.8912 \\ -1.0649 \\ 0.4799 \\ 0.6560 \\ -1.0305 \end{bmatrix}^T \times \begin{bmatrix} f(U_1) \\ f(U_2) \\ f(U_3) \\ f(U_4) \\ f(U_5) \\ f(U_6) \\ f(U_7) \\ f(U_8) \\ f(U_9) \\ f(U_{10}) \end{bmatrix} \quad (3)$$

Burada  $U$  değerleri Denklem 3'de hesaplanan düğümlerin sayısal değerleridir.  $f(x)$ , Denklem 4 ile ifade edilen aktivasyon fonksiyonudur.

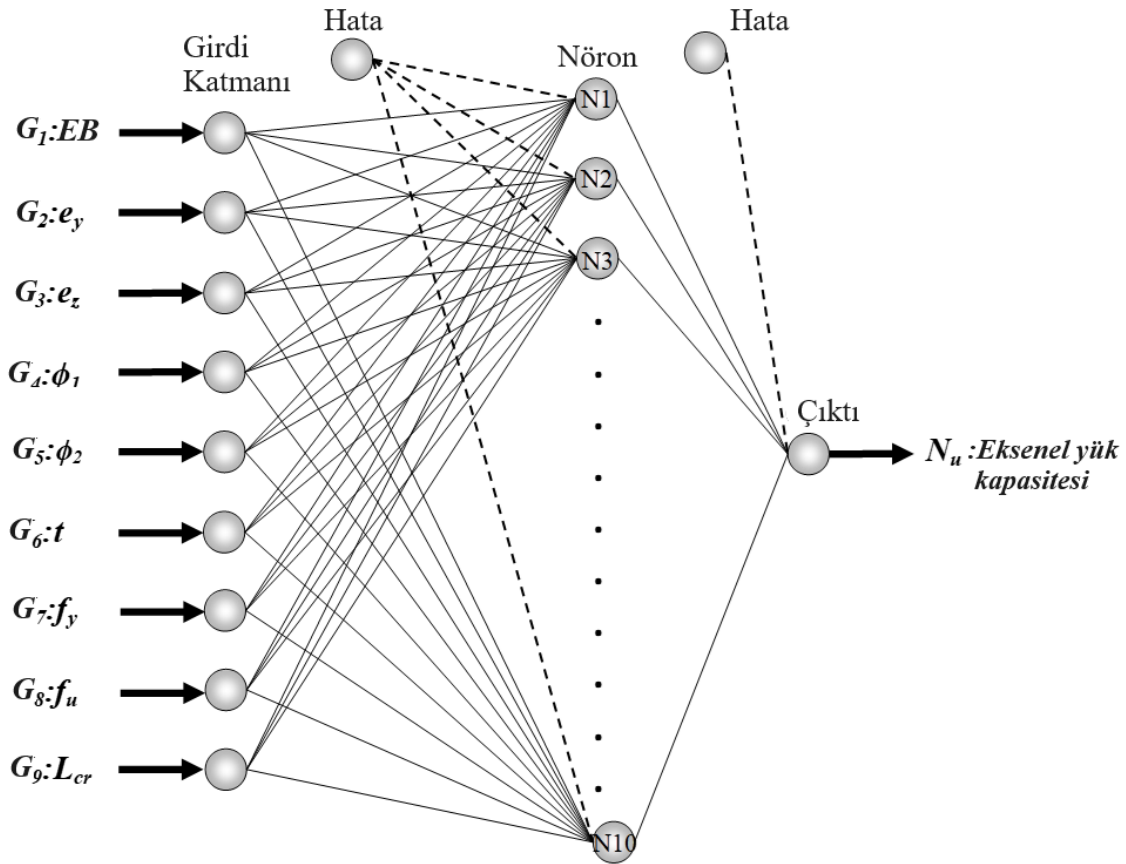
$$U = \begin{bmatrix} 0.3533 & -1.4871 & -1.818 & -1.2095 & 0.1977 & 0.1029 & 0.3386 & -0.7101 & -0.6207 \\ 0.0399 & -0.4668 & 0.8858 & -0.5144 & -1.1263 & 0.268 & -1.2816 & 0.1315 & 0.3882 \\ -0.3066 & -0.9782 & 1.0615 & 0.2953 & -1.0664 & -0.1362 & -0.068 & -1.2445 & -0.5342 \\ -0.0791 & 0.2975 & 0.6775 & -0.2269 & 0.125 & -0.7673 & 1.9201 & 0.793 & -0.5507 \\ -0.6908 & 0.7073 & 1.2581 & -0.5178 & 0.1585 & -0.1707 & 0.4447 & -0.7484 & 0.3106 \\ 1.2544 & -1.262 & 0.6247 & -0.383 & 0.1829 & -0.9236 & -0.5814 & -1.00201 & -1.6158 \\ -1.1735 & 1.3337 & -0.6248 & 0.8202 & -0.1267 & 0.5817 & 0.3688 & 0.8762 & 1.6906 \\ -0.9088 & -0.0409 & 0.047 & 0.3543 & -0.7393 & 0.2833 & 1.1415 & 0.3975 & -0.987 \\ -0.2954 & -2.1719 & -0.2803 & -0.7164 & -0.8888 & -0.7839 & -0.2705 & -0.9041 & 0.0919 \\ 0.0144 & -0.44 & 0.1033 & -1.3161 & -0.8 & -0.9774 & -0.511 & -0.0694 & -0.0612 \end{bmatrix}_{10 \times 9} \times \begin{bmatrix} BE \\ e_y \\ e_z \\ \varphi_1 \\ \varphi_2 \\ t \\ f_y \\ f_u \\ L_{cr} \end{bmatrix}_{9 \times 1} + \begin{bmatrix} -2.8334 \\ -1.7412 \\ 0.3633 \\ 0.2692 \\ 0.2125 \\ 0.2961 \\ -1.0923 \\ -0.5574 \\ -1.7980 \\ -1.8702 \end{bmatrix}_{10 \times 1} = \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \\ U_4 \\ U_5 \\ U_6 \\ U_7 \\ U_8 \\ U_9 \\ U_{10} \end{bmatrix}_{10 \times 1} \quad (4)$$

$$f(x) = \frac{2}{1 - e^{-2x}} - 1 \quad (5)$$

$$N_U = \frac{N_{U, Normalized} + 1,0983765447056}{0,00242306760358614} \quad (6)$$

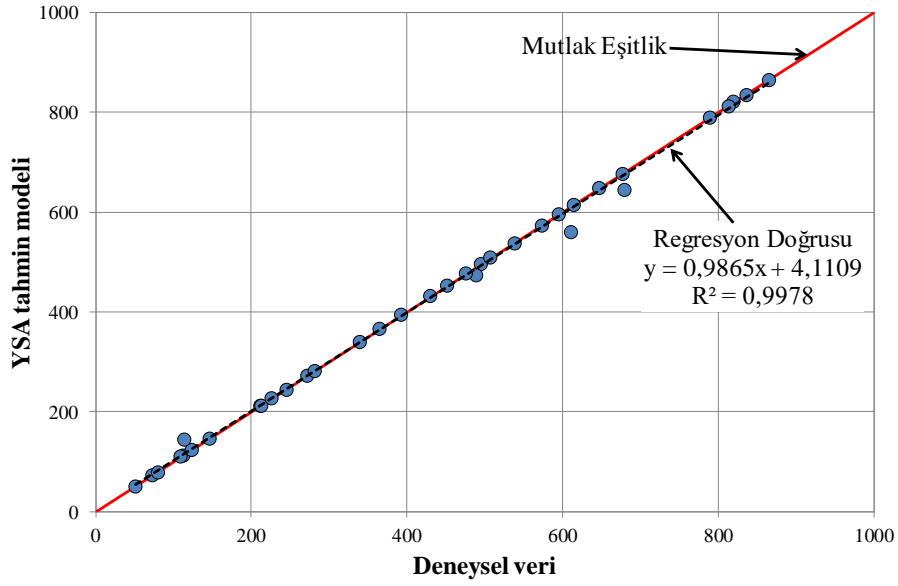
**Tablo 3.** Girdi ve Çıktı Verileri için Normalizasyon Katsayıları

Girdi Parametreleri	Normalizasyon Parametreleri			
	$\beta_{max}$	$\beta_{min}$	a	b
$BE$	1	0	2	-1
$e_y$ (mm)	15	0	0,133333333	-1
$e_z$ (mm)	200	0	0,01	-1
$\phi_1$ (mm)	150,56	85,41	0,030698388	-3,62195
$\phi_2$ (mm)	76,08	56,21	0,100654253	-6,65778
$t$ (mm)	6,35	3,09	0,613496933	-2,89571
$f_y$ (MPa)	400	326	0,027027027	-9,81081
$f_u$ (MPa)	591,5	452	0,014336918	-7,48029
$L_{cr}$ (mm)	3190	699,5	0,000803052	-1,56173
$N_u$ (kN)	866	40,6	0,002423068	-1,09838

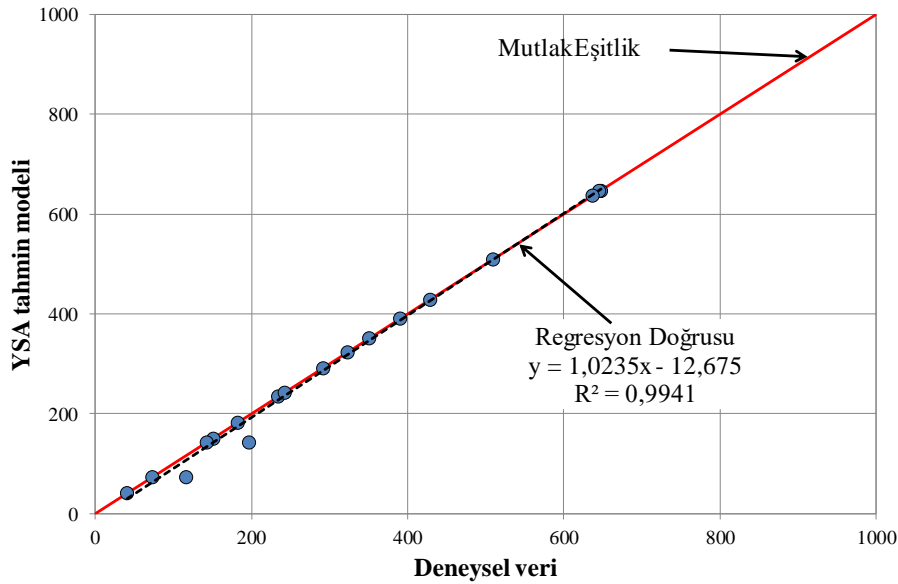
**Şekil 4.** Geliştirilen YSA Modelinin Yapısı

Şekil 5’de YSA modelinin performansı hem eğitim hem de test veri kümeleri için gösterilmiştir. Eğitim ve test veri grubunun eğiliminin birbirine benzer olduğu şekilden de görülmektedir. Önerilen model ile deneysel veriler arasında eğitim veri seti için  $R^2$  0,998 iken test veri seti için bu katsayı 0,994’tür. Önerilen model ile %100 uyum çizgisine çok yakın değerler elde edildiği görülmektedir. Ayrıca, önerilen YSA modelinin GEP modeline göre %100 uyum çizgisine daha yakın olması ve  $R^2$  değerlerinin daha yüksek olması bu modelin daha yüksek kesinliğe ve doğruluğa sahip olduğunu göstermektedir.





(a)



(b)

**Şekil 5.** YSA Tabanlı Modelden Elde Edilen Eksenel Yük Kapasitesi ile Deneysel Verilerin İlişkisi: **a.** Eğitim Veri Kümesi **b.** Test Veri Kümesi

### Önerilen Modellerin Performansı

Modellerin performansını karşılaştırmak için önerilen modeldeki değerlerin gerçek (deneysel) değere oranı ( $N_{u,YSA}/N_u$  ve  $N_{u,GEP}/N_u$ ) hesaplanarak Şekil 6'da gösterilmiştir. "Normalize değer" olarak adlandırılan bu göstergede mükemmel performans 1,0 iken bu değer altı "düşük tahmin" üstü ise "aşırı tahmin" olarak değerlendirilmiştir. Önerilen modellerin performansının normalize edilmiş değerleri ile karşılık gelen deneysel değerler açısından karşılaştırmasını gösteren Şekil 6 incelendiğinde YSA ile elde edilen normalize edilmiş değerlerin çoğunlukla 1,0 değerine yakın oldukları görülmektedir. Bu sonuçlardan anlaşıldığı üzere özellikle YSA modeli ile mükemmel yakın bir tahmin performansı sağlanmıştır. YSA modeli için normalize edilmiş verilerin 0,623 ile 1,274 arasında olduğu tespit edilmiştir. Diğer taraftan, GEP modeli için normalize edilmiş verilerin 0,79 ile 2,88 arasında değiştiği tespit edilmiştir. Veri setinde GEP modelinin tahmin performansının, deneysel verilerin 300 kN'dan fazla eksenel yük kapasitesine sahip veriler için daha iyi olduğu görülmüştür. İki modelin karşılaştırılması sonucunda YSA modelinin GEP modeline göre daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür. Tahmin modellerinin performansının daha ayrıntılı değerlendirilmesi amacıyla aşağıda Denklem 7-9'da verilen istatistiksel parametreler hesaplanmış ve Tablo 4'de önerilen modeller için verilmiştir.

**Tablo 4** Önerilen Modellere ait İstatistiksel Hata Oranları

Model	OMYH		OKH		KOKH		R <sup>2</sup>	
	Eğitim	Test	Eğitim	Test	Eğitim	Test	Eğitim	Test
GEP	10,034	32,092	3959,36	6490,86	62,923	80,566	0,9362	0,841
YSA	1,488	3,848	144,295	276,196	12,012	16,619	0,9978	0,9941

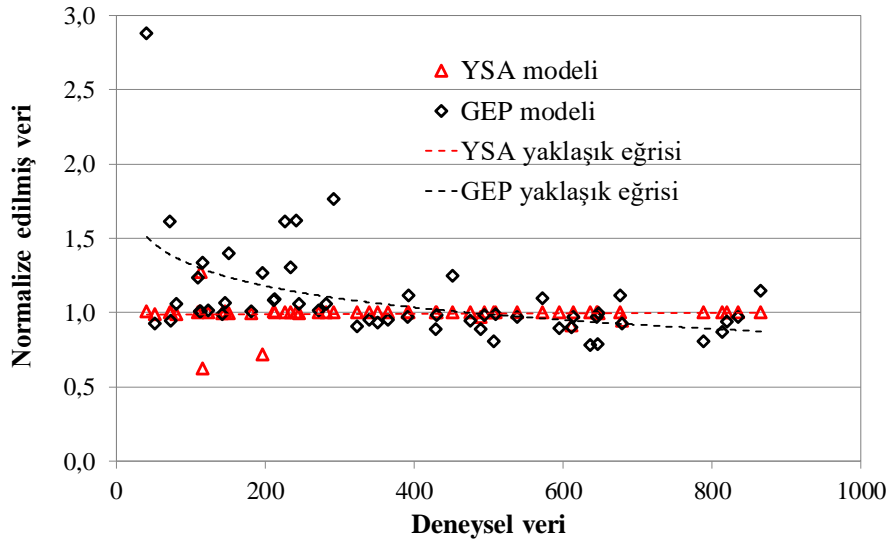
$$\text{Ortalama Mutlak Yüzde Hata; } OMYH = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{m_i - p_i}{m_i} \right| \times 100 \quad (7)$$

$$\text{Ortalama Kare Hata; } OKH = \frac{\sum_{i=1}^n (m_i - p_i)^2}{n} \quad (8)$$

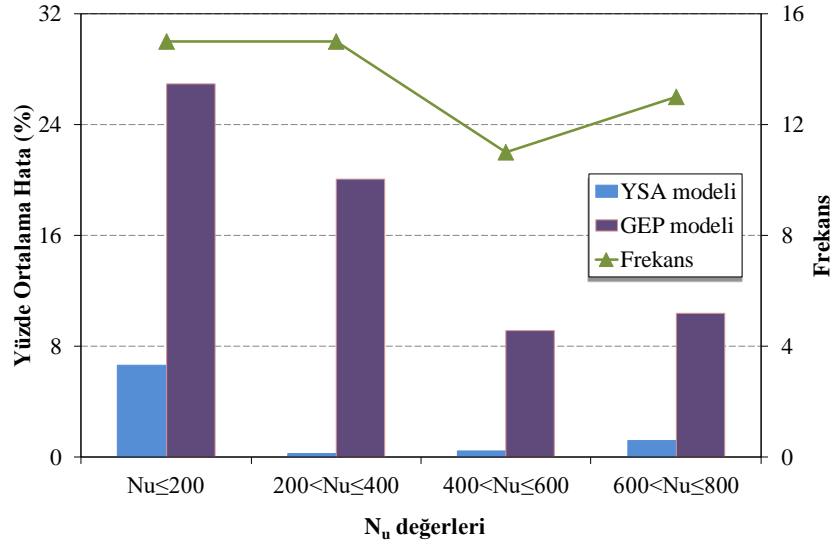
$$\text{Kök Ortalama Kare Hata } KOKH = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (m_i - p_i)^2}{n}} \quad (9)$$

burada  $m$  ve  $p$  sırasıyla ölçülen ( $m_i$ ) ve tahmin edilen ( $p_i$ ) değerleri ifade etmektedir.

Yukarıdaki denklemler kullanılarak her iki model için hata değerleri hesaplanmıştır. Tablo 4'den de görüldüğü gibi her iki model için hesaplanan hata değerleri birbirlerinden farklılık göstermiş, YSA modeli için çok daha az hata elde edilmiştir. Örneğin, YSA modeli için ortalama mutlak yüzde hata (OMYH) değerleri eğitim ve test veri setleri için sırasıyla yaklaşık 1,5 ve 3,8 olarak; GEP modeli için ise sırasıyla 10,0 ve 32,1 olarak belirlenmiştir. Sonuç olarak, YSA modeli ile GEP modeli tahmin gücü kıyaslandığında, YSA modelinin tahmin performansının GEP modelinin tahmin performansından daha iyi olduğu ortaya konmuştur.

**Şekil 6.** Önerilen Modellerin Tahmin Performanslarının Karşılaştırılması

Şekil 7, GEP modeli ve YSA modeli tahminleri için aksel yük kapasitesi ( $N_u$ ) değerlerinin belirli aralıkları için ortalama mutlak hatalarının karşılaştırılmasını göstermektedir. Önerilen YSA modelinin hata oranı GEP modelininkine göre oldukça düşük olduğu, ancak GEP modeli için hata oranının  $N_u$  değeri arttıkça azaldığı görülmüştür. Ayrıca, GEP modeli için en yüksek ortalama hata yaklaşık %26,93 ile  $N_u \leq 200$  aralığındaki veriler için olurken, YSA modeli için en yüksek ortalama hata yaklaşık %6,63 ile  $N_u \leq 200$  aralığındaki verilerde görülmüştür. YSA modeli için en küçük ortalama hata  $200 < N_u \leq 400$  aralığındaki veriler için yaklaşık %0,23 olarak elde edilmiştir. GEP modeli için en küçük ortalama hata ise  $400 < N_u \leq 600$  aralığında yaklaşık %9,10 olarak belirlenmiştir.



Şekil 7 Önerilen Modellerin Veri Dağılımına Bağlı Hata Analizi

Şekil 7 ve Tablo 4 OMYH değerleri açısından birlikte değerlendirildiklerinde, GEP modeli için elde edilen değerlerin YSA sonuçlarından elde edilenlere göre oldukça yüksek olduğu dikkat çekmektedir. Tüm veri seti için hesaplama yapıldığında OMYH değerleri GEP için %17, YSA modeli için ise %2,2 olarak bulunmaktadır. OMYH değerlerinin çok yüksek olması durumu, özellikle  $N_u$  değeri 200 kN altında olan örneklerden elde edilen değerlerde daha belirgindir. Burada OMYH değerleri GEP için %27 mertebelerinde iken YSA için en yüksek değer olan %6,6 elde edilmiştir. Bunun sebebi, girdi parametresi olarak kullanılan deney parametreleri ile çıktı verisi olarak kullanılan  $N_u$  değerleri arasında yeterli anlamlılık düzeyinde ilişki bulunmaması olabilir. İleri dönemde yapılacak çalışmalarda veri setinin detaylandırılması ve model parametrelerinin optimize edilmesiyle GEP için daha düşük hata oranları veren modellerin geliştirilebileceği öngörülmektedir. Fakat bu çalışmada  $N_u$  değerinin 200 kN değerinden yüksek olduğu durumlar için YSA'dan elde edilen tahmin değerlerinin oldukça düşük hata oranıyla ve neredeyse gerçeğe yakın değerlerle örtüşecek şekilde sonuç verdiği dikkate alınmalıdır.

## SONUÇLAR

Eliptik kesitli kolonlarının maksimum yük taşıma kapasitelerinin tahmini için numerik modeller esnek hesaplama yöntemlerinden gen ekspresyonu programlama ve yapay sinir ağları yöntemleri kullanılarak geliştirilmiştir. Tahmin modelleri birbirleri ile istatistik açıdan değerlendirilmiştir. Sonuçlar aşağıda verilmektedir.

- Önerilen modellerin, eliptik içi boş kesitli kolonların basınç ve eğilme altındaki maksimum kapasitelerinin tahmin etmede başarıyla kullanılabileceği görülmüştür. İki modelin karşılaştırılması sonucunda YSA modelinin GEP modelinden daha iyi sonuçlar verdiği görülmüştür.
- Hem eğitim veri seti hem de test veri seti için, deneysel sonuçlar ile önerilen YSA modeli arasında yüksek doğrusal ilişki bulunmuş ve sırasıyla korelasyon katsayısı ( $R^2$ ) değerleri 0,998 ve 0,994 olarak elde edilmiştir. Buna karşın, GEP modeli için bu değerler 0,936 ve 0,841 olarak belirlenmiştir.
- Tahmin verileri ile deneysel veriler karşılaştırıldığında, YSA modeli için normalize edilmiş verilerin ( $N_{u,YSA}/N_u$ ) 0,623 ile 1,274 arasında olduğu, GEP modeli için normalize edilmiş verilerin ( $N_{u,GEP}/N_u$ ) 0,79 ile 2,88 arasında değiştiği görülmüştür.
- Önerilen modellerin veri dağılımına bağlı hata analizi sonuçlarına göre, GEP modeli için ortalama hatanın %9,1 ile %26,9 arasında olduğu, YSA modeli için ise bu değerlerin %0,2 ile %6,6 arasında olduğu tespit edilmiştir. Önerilen YSA modelinin hata oranının GEP modelinkine göre eksenel yük değerindeki değişimlerden bağımsız olarak oldukça düşük olduğu görülmüştür. Diğer taraftan GEP modeli için hata oranının  $N_u$  değeri arttıkça azalma eğiliminde olduğu tespit edilmiştir.

## KAYNAKLAR

Chan, T.M., & Gardner, L. (2008a). Bending strength of hot-rolled elliptical hollow sections. *Journal of Constructional Steel Research*, 64(9), 971–86. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2007.11.001>

- Chan, T.M., & Gardner, L. (2008b). Compressive resistance of hot-rolled elliptical hollow sections. *Engineering Structures*; 30(2), 522–32. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2007.04.019>
- Chan, T.M., & Gardner, L. (2009). Flexural buckling of elliptical hollow section columns. *ASCE, Journal of Structural Engineering*, 135(5), 546-557. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0000005](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000005)
- Corus (2006). Celsius 355 Ovals, Corus Tubes—Structural & Conveyance Business, Corby, U.K.
- D’Aniello, M., Güneyisi, E.M., Landolfo, R. & Mermerdaş, K. (2014). Analytical prediction of available rotation capacity of cold-formed rectangular and square hollow section beams. *Thin-Walled Structures*, 77(April), 141-152. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2013.09.015>
- D’Aniello, M., Güneyisi, E.M., Landolfo, R. & Mermerdaş, K. (2015). Predictive models of the flexural overstrength factor for steel thin-walled circular hollow section beams, *Thin-Walled Structures*, 94(September), 67-78. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2015.03.020>
- Ferreira, C. (2001). Gene expression programming: a new adaptive algorithm for solving problems. *Complex Systems*, 13(2), 87-129. <https://doi.org/10.48550/arXiv.cs/0102027>
- Gardner, L., Chan, T.M. & Abela, J.M. (2011). Structural behaviour of elliptical hollow sections under combined compression and uniaxial bending. *Advanced Steel Construction*, 7(1), 86–113. <https://doi.org/10.18057/IJASC.2011.7.1.6>
- Gardner, L., & Chan, T.M. (2007). Cross-section classification of elliptical hollow sections. *Steel and Composite Structures*, 7(3), 185–200. <https://doi.org/10.12989/scs.2007.7.3.185>
- Gardner, L., Chan, T.M., & Wadee, M.A. (2008). Shear response of elliptical hollow sections. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers -Structures and Buildings*, 161(6), 301–309.
- Goldberg, D. (1989). *Genetic Algorithms in search, optimization and machine learning*. MA: Addison-Welsley.
- İpek, S., & Güneyisi, E.M. (2022) Application of Eurocode 4 design provisions and development of new predictive models for eccentrically loaded CFST elliptical columns, *Journal of Building Engineering*, 48, 103945. <https://doi.org/10.1016/j.job.2021.103945>
- Koza, J.R. (1992). *Genetic programming: On the programming of computers by means of natural selection*. MIT Press.
- Law, K.H., & Gardner, L. (2013). Buckling of elliptical hollow section members under combined compression and uniaxial bending. *Journal of Constructional Steel Research*, 86(July), 1-16. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2013.03.008>
- Levenberg, K. (1944). A method for the solution of certain non-linear problems in least squares. *Quarterly of Applied Mathematics*, 2, 164–168. <https://www.jstor.org/stable/43633451>.
- Nowzartash, F., & Mohareb, M. (2009). Plastic interaction relations for elliptical hollow sections. *Thin-Walled Structures*, 47(6–7), 681–691. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2008.11.010>
- Ruiz-Teran, A.M., & Gardner, L. (2008). Elastic buckling of elliptical tubes. *Thin-Walled Structures*, 46(11), 1304–1318. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2008.01.036>
- Theofanous, M., Chan, T.M., & Gardner, L. (2009). Flexural behaviour of stainless steel oval hollow sections. *Thin-Walled Structures*, 47(6–7), 776-787. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2009.01.001>
- Wasserman, P.D. (1989). *Neural Computing Theory and Practice*. Van Nostrand Reinhold Co., New York, USA.
- Vinuela-Rueda, L., & Martinez-Salcedo, J. (2006). Steel structure and prestressed façade of the new terminal building, *Hormigon Acero*, 239(1), 71–84.
- Yang, H., Lam, D., & Gardner, L. (2008). Testing and analysis of concrete-filled elliptical hollow sections. *Engineering Structures*; 30(12), 3771– 3781. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2008.07.004>
- Zadeh, L.A. (1994). Soft-computing and fuzzy logic. *IEEE Software*, 11(6), 48–56. <https://doi.org/10.1109/52.329401>
- Zhang, Z., & Friedrich, K. (2003). Artificial neural networks applied to polymer composites: a review. *Composites Science and Technology*, 63(14), 2029–2044. [https://doi.org/10.1016/S0266-3538\(03\)00106-4](https://doi.org/10.1016/S0266-3538(03)00106-4)

Zhao, X.L., & Packer, J.A. (2009). Tests and design of concrete-filled elliptical hollow section stub columns. *Thin-Walled Structures*, 47(6–7), 617–628. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2008.11.004>

Zhao, X.L., Lu, H., & Galteri, S. Tests of elliptical hollow sections filled with SCC self-compacting concrete. In 2007, 5th International Conference on Advances in Steel Structures, Singapore, Research Publishing Services, Singapore, 950–955.

Zhu, Y., & Wilkinson, T. Finite-element analysis of structural steel elliptical hollow sections in pure compression. In 2006 11th International Symposium on Tubular Structures, Québec City, Canada, Taylor & Francis, London, 179–186.



# Kahramanmaraş Sütçü İmam University

## Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 06.03.2024  
Kabul Tarihi : 14.06.2024

Received Date : 06.03.2024  
Accepted Date : 14.06.2024

### COMPUTER-AIDED DETECTION OF BRAIN TUMORS USING IMAGE PROCESSING TECHNIQUES

### GÖRÜNTÜ İŞLEME TEKNİKLERİ KULLANARAK BEYİN TÜMÖRLERİNİN BILGISAYAR DESTEKLİ TESPİTİ

*Hilal GÜVEN*<sup>1</sup> (ORCID: 0000-0002-7461-4510)  
*Ahmet SAYGILI*<sup>1\*</sup> (ORCID: 0000-0001-8625-4842)

<sup>1</sup> Tekirdağ Namık Kemal University, Faculty of Çorlu Engineering, Department of Computer Engineering, Tekirdağ, Türkiye

\*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Ahmet SAYGILI, [asaygili@nku.edu.tr](mailto:asaygili@nku.edu.tr)

#### ABSTRACT

Brain tumors are masses formed by the uncontrolled proliferation of cells in the brain. Brain tumors can be malignant or benign and can be fatal if not accurately identified at an early stage. Computer vision processing is used for early diagnosis, monitoring treatment response, and tumor classification. This study aims to detect brain tumors, a significant disease of our time, using image processing techniques. Preprocessing and data augmentation techniques were applied to a dataset of 253 images. Initially, CNNs were used for tumor detection, but transfer learning was employed for better results. Pre-trained VGG-16, DenseNet-121, ResNet-50, and MobileNet\_V2 architectures were used. The model, adapted with transfer learning, achieved better performance with less data by adding a customized output layer for brain tumor detection. Experiments showed the best results with VGG-16, achieving 84.61% accuracy before data augmentation and 92.31% after augmentation. Compared to other studies, the post-augmentation accuracy rate was observed to be better than many others. The study also compares results from other deep learning architectures. Summarizing the current technological advancements in various tumor categories may help researchers understand future trends.

**Keywords:** Brain tumor, computer-aided detection, VGG-16, DenseNet-121, ResNet-50, MobileNet\_V2

#### ÖZET

Beyin tümörleri, beyindeki hücrelerin kontrolsüz çoğalmasıyla oluşan kitlelerdir. Beyin tümörleri malign veya benign olabilirler ve erken aşamada doğru bir şekilde tanımlanmazsa ölümcül olabilirler. Bilgisayarlı görüntü işleme, erken teşhis, tedavi yanıtının izlenmesi ve tümör sınıflandırması için kullanılır. Çalışmada görüntü işleme teknikleri kullanılarak günümüzün önemli bir hastalık olan beyin tümörlerini tespit etmek amaçlanmaktadır. Bu doğrultuda, 253 görüntüden oluşan veri kümesi üzerinde ön işleme teknikleri ve veri artırma teknikleri uygulanmıştır. Beyin tümörlerinin tespiti için öncelikle CNN kullanılmıştır ancak daha iyi sonuçlar elde etmek için transfer öğrenme yöntemi kullanılmıştır. Beyin tümörlerinin tespiti için önceden eğitilmiş olan VGG-16, DenseNet-121, ResNet-50, MobileNet\_V2 mimarileri kullanılmıştır. Transfer öğrenme ile model, beyin tümörü tespiti için özelleştirilmiş bir çıkış katmanı ekleyerek daha az veri ile daha iyi performans elde edilmiştir. Deneyler sonucunda en iyi oranları VGG-16 mimarisi ile veri artırma öncesi %84.61, veri artırma sonrasında %92.31 doğruluk oranı elde edilmiştir. Diğer çalışmalarla karşılaştırıldığında, veri artırma sonrası elde edilen doğruluk oranının birçok çalışmadan daha iyi olduğu gözlemlenmiştir. Çalışmada ayrıca diğer derin öğrenme mimarilerinden elde edilen sonuçlar karşılaştırılarak çalışmada ayrıca sunulmuştur. Ayrıca, çeşitli tümör kategorilerindeki mevcut teknolojik ilerlemelerin özetlenmesi, araştırmacıların gelecekteki eğilimleri anlamalarına yardımcı olabilir.

**Anahtar Kelimeler:** Beyin tümörü, bilgisayar destekli teşhis, VGG-16, DenseNet-121, ResNet-50, MobileNet\_V2

ToCite: GÜVEN, H., SAYGILI, A., (2024). COMPUTER AIDED DETECTION of BRAIN TUMORS USING IMAGE PROCESSING TECHNIQUES. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 27(3), 999-1018.

## INTRODUCTION

In research and clinical practice of brain tumors, which is a fatal condition endangering human life, early detection of the disease is very important to understand the multifaceted clinical picture (Atallah et al., 2024). Since manual brain tumor detection is complex, time-consuming, and error-prone, high-sensitivity automated computer-assisted diagnoses are in high demand (Sadad et al., 2021). Radiologists, engineers, and clinicians leverage medical image processing to attain a comprehensive comprehension of the anatomy of individual patients or demographic cohorts (Khan et al., 2022). Brain tumors, which greatly affect human health, are divided into benign and malignant (Nikmanesh et al., 2023). Medical robotic imaging, which uses machine learning and deep learning algorithms to analyze abnormal tissues on Magnetic Resonance Images (MRI), has led to significant advances and research in the performance and analysis of a variety of complex tasks in clinical diagnosis (Madhuri et al., 2022). Classifying brain tumors through magnetic resonance imaging (MRI) poses numerous challenges. Primarily, brain tissue exhibits a complex and irregular structure, necessitating precise segmentation for valuable clinical insights during surgeries. However, medical images of brain tissue are prone to various factors, including noise, uneven grayscale, localized volumetric variations, and image artifacts. Secondly, due to the high-density structure of the brain, poor contrast and complex structure, especially at the image edges, pose difficulties in classifying brain images (Hu et al., 2021). Manual detection of brain tumors, shape in appearance, size, nucleus, etc. It is a challenging task due to differences, and by introducing an automatic system for the timely identification of brain tumors, detection can be made faster and easier (Asad et al., 2023). In the study conducted in 2021 within the US population, it is anticipated that 88,190 new cases of malignant and benign brain tumors and other central nervous system (CNS) tumors will be diagnosed. 25,690 of these cases are benign and 62,500 are malignant. On the other hand, 83,029 deaths due to malignant brain and other central nervous system tumors were recorded over the years 2014 through 2018. According to these data, there is an average mortality rate of 4.43 per 100,000 individuals annually, resulting in a total of 16,606 deaths per year (Ostrom et al., 2021).

When reviewing the literature related to brain tumor detection and classification within the study's framework, numerous relevant studies are present. When many studies in the literature for brain tumor diagnosis are examined, it is noticed that methods such as CNN, RNN, LSTM, Transfer Learning, and GAN are used and there has been a clear increase in the number of studies on the subject recently. In the study of Çakı and Aslan, carried out a study on the CNN-FL model for brain tumor diagnosis from the MRI images they proposed. The model was trained using different activation functions (ReLU, Leaky ReLU, GELU, Swish). GELU activation function achieved a maximum success rate of 98%. CNN-FL architecture shows effective results in training with little data and comparisons with different activation functions. This study demonstrates the potential of using artificial intelligence as a helpful tool in brain tumor diagnosis (Çakı & Aslan, 2023). Khan et al. developed a deep-learning model was developed using two different MRI image datasets. First, two datasets containing 3064 and 152 MRI images were used. In the first dataset, a 23-layer convolution neural network (CNN) was applied, but since the second dataset had limited data, an overfitting problem was encountered, so transfer learning was used to solve this problem, and the VGG-16 architecture was combined with the proposed 23-layer CNN architecture. Experiments show that the proposed models attain classification accuracy of up to 97.8% and 100% for the datasets used. The results obtained in the paper show that the proposed models have impressive performance and stand out compared to other studies in the relevant literature (Khan et al., 2022). Sultan et al. In the study in which a convolutional neural network (CNN)-based deep learning (DL) model was proposed to classify brain tumors, the classification using two different datasets was focused on distinguishing certain tumor types and glioma grades. The first dataset was used to classify three different tumor types: meningioma, glioma, and pituitary tumor. The other dataset is intended to differentiate between three different grades of glioma (Grade II, Grade III, and Grade IV). These two datasets contain 233 and 73 patient data, with a total of 3064 and 516 images. For these two studies using CNN, a very good performance was achieved with an accuracy of 96.13% and 98.7%, respectively (Sultan et al., 2019). Hossain et al. introduced a study proposing a method for brain tumor detection utilizing 2D Magnetic Resonance Brain Images (MRI). In this proposed approach, the Fuzzy C-Means clustering algorithm is employed, and it is combined with both traditional classifiers and convolutional neural networks. The research was conducted using a dataset encompassing diverse tumor sizes, locations, shapes, and image densities. Among the traditional classifiers, six different algorithms including support vector machine (SVM), k-nearest neighbor (KNN), Multilayer Perceptron (MLP), Logistic Regression, Naïve Bayes, and Random Forest were utilized in the study. In the model created for the convolutional neural network (CNN), the fact that the CNN achieved 97.87% accuracy is proof that it achieved a very good performance (Hossain et al., 2019). In a study conducted by Rai and Chatterjee, the LeU-Net model, known for its efficiency on medical image datasets due to its simpler structure, fewer layers, and faster processing time, was employed to detect brain tumors from MR images.

The dataset comprised 253 images of varying sizes and pixel qualities, which underwent preprocessing steps including cropping unwanted regions, resizing, data augmentation (DA), and data distribution. Four distinct experiments were carried out on both uncropped and cropped images using four different deep-learning models (LeNet, VGG-16, U-Net, and LeU-Net). The findings revealed that the proposed LeU-Net model achieved 98% accuracy on cropped images and 94% accuracy on uncropped images, with an impressively rapid processing time of 252.36 seconds (Rai & Chatterjee, 2021). In a study by Siar and Teshnehlab, convolutional neural networks (CNN) were employed for tumor detection. The initial image processing stage utilized CNN, resulting in a classification accuracy of 98.67%. Furthermore, the precision values were determined to be 97.34% with the Radial Basis Function (RBF) classifier and 94.24% with the Decision Tree (DT) classifier (Siar & Teshnehlab, 2019). In another study by Badža and Barjaktarović, the network's generalization ability was assessed using the 10-fold cross-validation method on an augmented image database. The best performance was achieved with record-based cross-validation on the augmented dataset, yielding an accuracy rate of 96.56%. The newly developed CNN architecture demonstrated promising potential as an effective decision-support tool in medical diagnoses for radiologists, showcasing both strong generalization ability and efficient execution speed (Badža & Barjaktarović, 2020). Kumar et al. The main goal of the study conducted is to create a convolutional neural network (CNN) that can detect and classify whether a patient is at risk for a certain disease. In the proposed method, the convolution 2D layer with the 'Leaky ReLU' activation function is used as Conv2D + Leaky ReLU. This activation function was combined and evaluated by comparing the model accuracy with Conv2D + ReLU, a traditional CNN model. The proposed model achieved a verification accuracy of 78.57%, which is higher than the traditional CNN model. However, the accuracy score of both models during training was recorded as 99.20% (Kumar et al., 2021). Govindaraj and Sandhiya present a deep transfer learning-based method for automatically classifying brain MRI images as healthy and unhealthy. Images are prepared by converting them to grayscale and applying the thresholding method. Convolutional neural networks (CNNs) were used to create the model. The study shows that the developed model achieved promising results, reaching an accuracy rate of 93-95% in the training set and 85% in the validation set (Govindaraj & Sandhiya).

In the study by Sudharson et al., methods such as SVM (support vector machine), KNN (k-nearest neighbors), and convolutional neural networks (CNN) are discussed among different techniques. In the data processing step, emphasis is placed on the efficiency of CNN for processing complex image data. The hybrid CNN approach stands out by showing significantly superior performance compared to SVM and KNN on both training and test datasets. As a result of the evaluations, it was determined that the Hybrid CNN methodology provides a significant performance advantage compared to other methods with an impressive accuracy rate of 93.22% (Sudharson et al., 2022). Chanu et al. achieved high accuracy in detecting and classifying brain tumors using YOLOv3 and CNN. The proposed methodology addresses a topic that requires expertise in fields such as image processing, object detection, and neural networks. The use of YOLOv3 provides fast and effective object detection, making it possible to quickly and accurately identify tumors. CNN is used to divide tumors into two classes: Low-Grade Glioma and High-Grade Glioma. Study results show that the proposed method achieves 97% overall accuracy. Moreover, ROC curve analysis and AUC value confirm that the classification performance of the model is high. Compared with other existing methods, the proposed method appears to be superior. In conclusion, this study demonstrated that an effective model for the detection and classification of brain tumors can be developed by using powerful techniques in the field of object detection and classification (Chanu et al., 2023). Alhalim et al. In their study, they compared different ML (machine learning) and DL (deep learning) algorithms such as VGG-16, CNNs, SVM, and KNN for brain tumor classification. These algorithms were used to classify four types of brain tumors: meningitis tumor, glioma tumor, pituitary tumor, and non-tumor state. While DL achieved 99% accuracy rates for CNN and 90% accuracy rates for VGG-16, ML did not provide suitable results and SVM achieved 91% accuracy rates. Alhalim et al. conducted empirical research on a real-time dataset featuring varying tumor sizes, locations, shapes, and image densities (Alhalim et al., 2024).

To perform the classification of brain tumor magnetic resonance images obtained from the open-source dataset, the study was carried out through transfer learning of VGG-16, which is a model that was first trained and learned general visual features. In the second part, the materials and methods section, details of the dataset used, data preprocessing, and classification model are expressed. In the third part under the experimental study title, the application used in brain tumor classification and the results obtained as a result of the application are explained. In the fourth part, the discussion section, the differences between the results of other studies obtained with different methods used in brain tumor detection and the study we developed and what can be changed to improve it further are mentioned. Finally, in the results and recommendations section in the fifth part, the brain tumor detection findings acquired as part of the study and the models used were analyzed and what new studies could be done in the future were mentioned. The



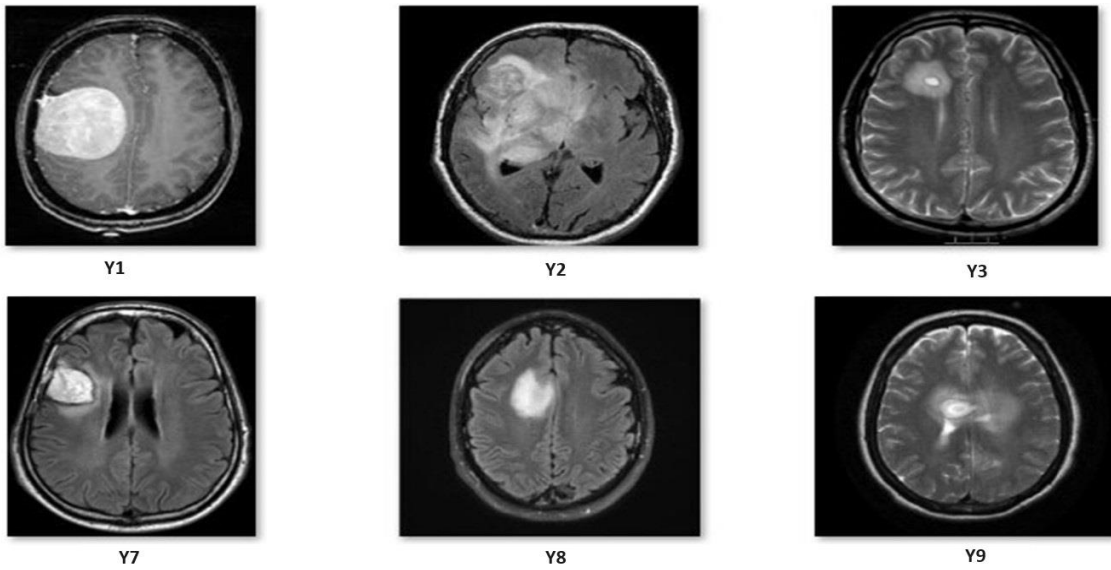
general aim of the study is to emphasize the importance of early diagnosis in the detection of brain tumors, current challenges, and potential future developments and was prepared to guide future studies. The study was analyzed and compared with other studies in the literature. The contributions of the study to the literature are as follows;

- This study aims to demonstrate that better performance can be achieved with less data by using a dataset enriched with data augmentation techniques. The importance of enriching the data set is emphasized by showing how much the rate obtained before data augmentation will increase with data augmentation.
- By comparing four different transfer learning architectures, it was aimed to determine the most effective and appropriate method for brain tumor detection and to objectively evaluate the performance of these methods.
- To propose a decision support system that can support medical professionals in their decisions.

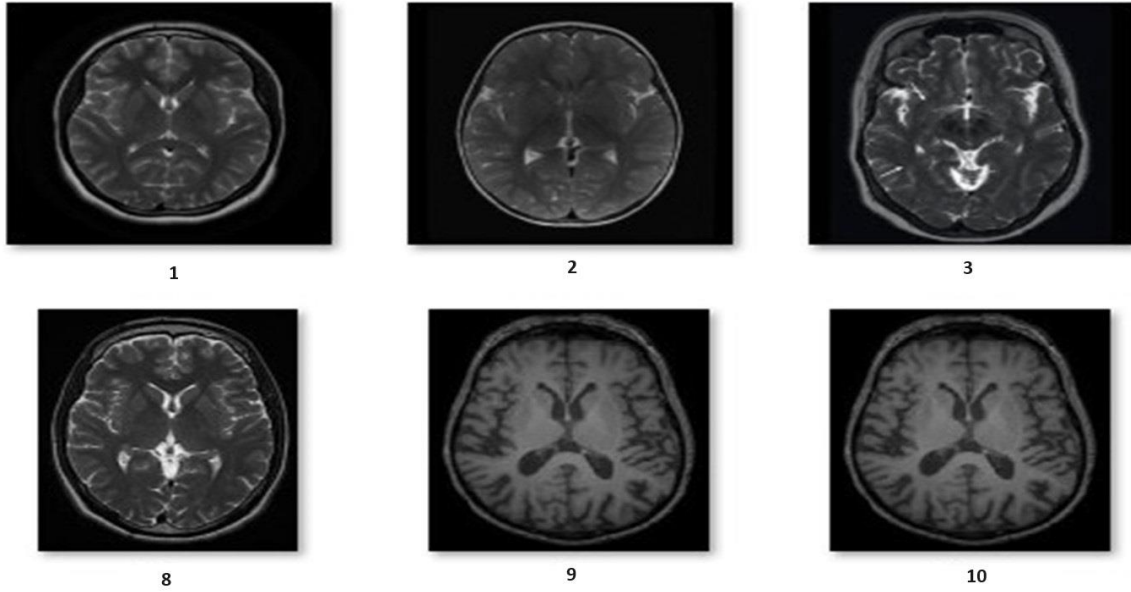
## MATERIAL AND METHOD

### *Dataset*

The dataset used in the study consists of open-source brain tumor images taken from the Kaggle site (<https://www.kaggle.com/datasets/navoneel/brain-mri-images-for-brain-tumor-detection/discussion>). The dataset consists of a total of 253 MRI images with two classes: 155 with tumor and 98 without tumor. The data set was obtained from volunteer patients by experts. Images in JPEG format have different resolutions. Figure 1 and Figure 2 show some original MRI images of tumor and non-tumor classes. A data augmentation method was employed to augment the dataset. Data augmentation helps reduce overlearning by increasing the generalization ability of the model. Keras' ImageDataGenerator class was used for data augmentation. Image Generator; It enables new data to be generated by making various changes to the data in the dataset. Data location, proximity, clarity, etc. is carried out by changing its properties.



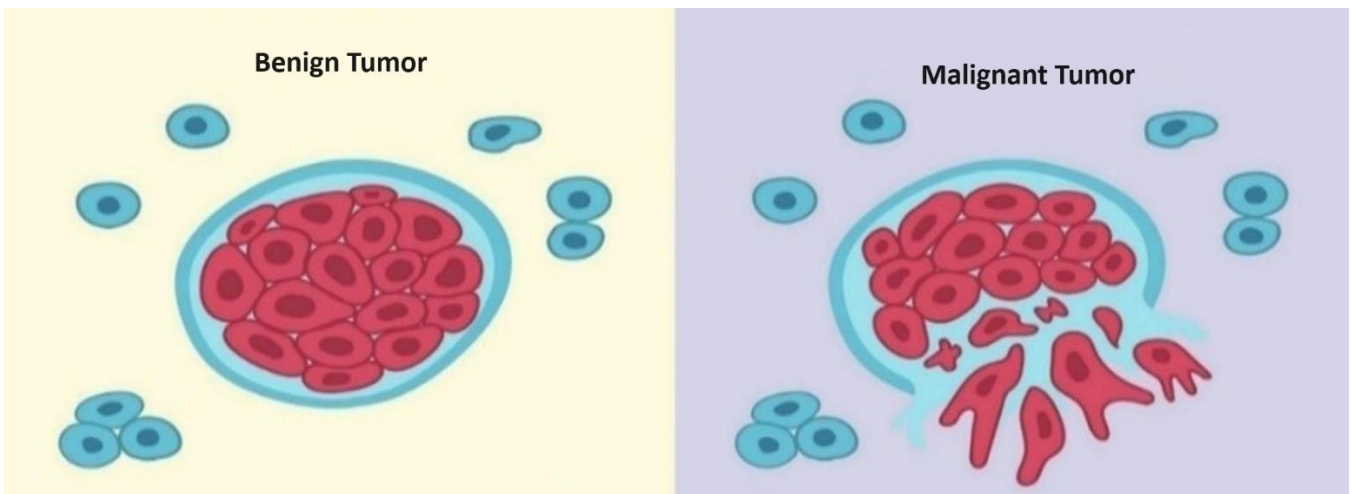
**Figure 1.** Example Images with Malignant Tumor



**Figure 2.** Example Images with Benign Tumor

### ***Classification of Tumor***

Two types of tumors shown in Figure 3 were used in the study: 1) Benign and 2) Malignant (cancer). Benign tumors are not always cancerous. Such tumors may not spread to nearby tissues or metastasize to other parts of the body. Usually, the symptoms of benign tumors are not very serious, but if it puts pressure on vital structures, for example, blood vessels or nerves, the condition can become serious (Chattopadhyay & Maitra, 2022). Benign tumors usually remain where they initially formed. While they continue to grow in these areas, they do not harm the cells around them. They do not pose a danger and are unlikely to return if such tumors are removed (Asad et al., 2023). Malignancy, derived from "mal-" meaning "bad" and "ignis" meaning "fire," refers to the region where malignant tumors, indicative of cancerous growth, are present. These tumors arise due to uncontrolled cell proliferation. If this growth persists unchecked and uninhibited, the condition may escalate into a hazardous state. Malignant tumors exhibit rapid growth and have the propensity to disseminate to other parts of the body through a process known as metastasis (Chattopadhyay & Maitra, 2022). Malignant tumors are not found in one place. They tend to constantly change their position as they grow. These cells are dangerous because they are cancerous. They invade and damage other cells nearby. Therefore, they need to be treated to be controlled (Asad et al., 2023).



**Figure 3.** Benign and Malignant Tumor Structure (Asad et al., 2023)

### Computer-Aided Detection System

Computer-aided diagnosis (CAD) systems aid in the diagnosis of tumors in medical images in radiological evaluations, for example, MRI images for brain tumors, tomography images for liver nodules, or mammography images for breast nodules (Chanu et al., 2023). Computer-aided diagnostics (CAD) is defined as the process of digitally creating 2D or 3D design simulations of real-world goods and products, complete with scale, precision, and physics, often in a collaborative effort, to optimize and perfect the design. Software that utilizes advanced pattern recognition and image processing techniques to assist radiologists in detecting anomalies in medical images is called Computer-Aided Diagnosis (CAD) software. It is a multidisciplinary field that blends aspects of artificial intelligence and computer vision with radiological and pathological image processing (Chan et al., 2020). Figure 4 shows the CAD working steps we used in the study.

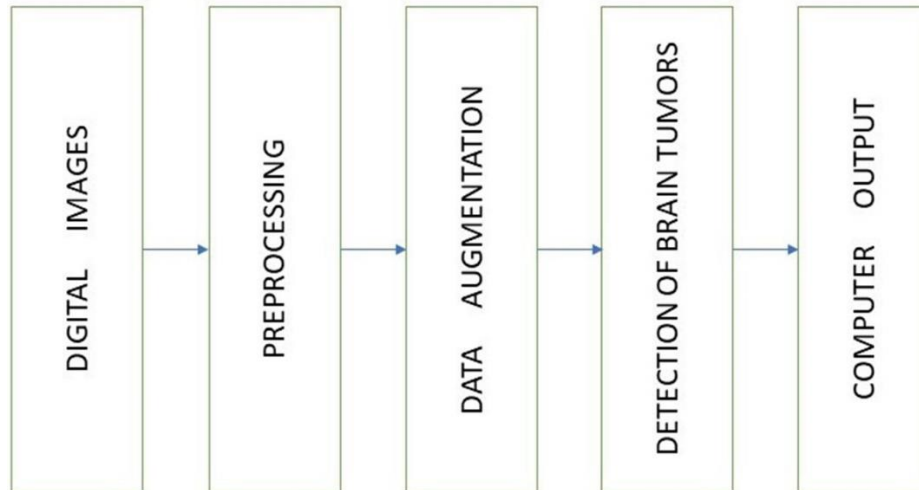


Figure 4. CAD Working Steps

### Deep Learning Libraries

The capabilities of deep learning are utilized to work on big data. In our study, tensorflow and keras libraries were used. TensorFlow is a machine learning system that operates in various environments. It represents computations using data flow graphs and synchronizes them across multiple devices(Chan et al., 2020).

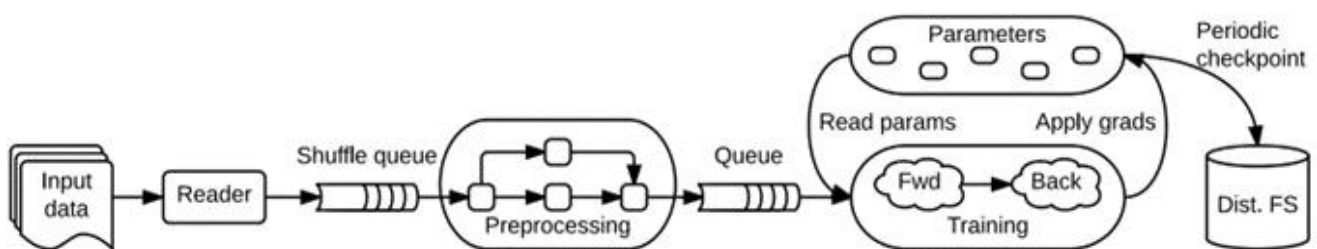


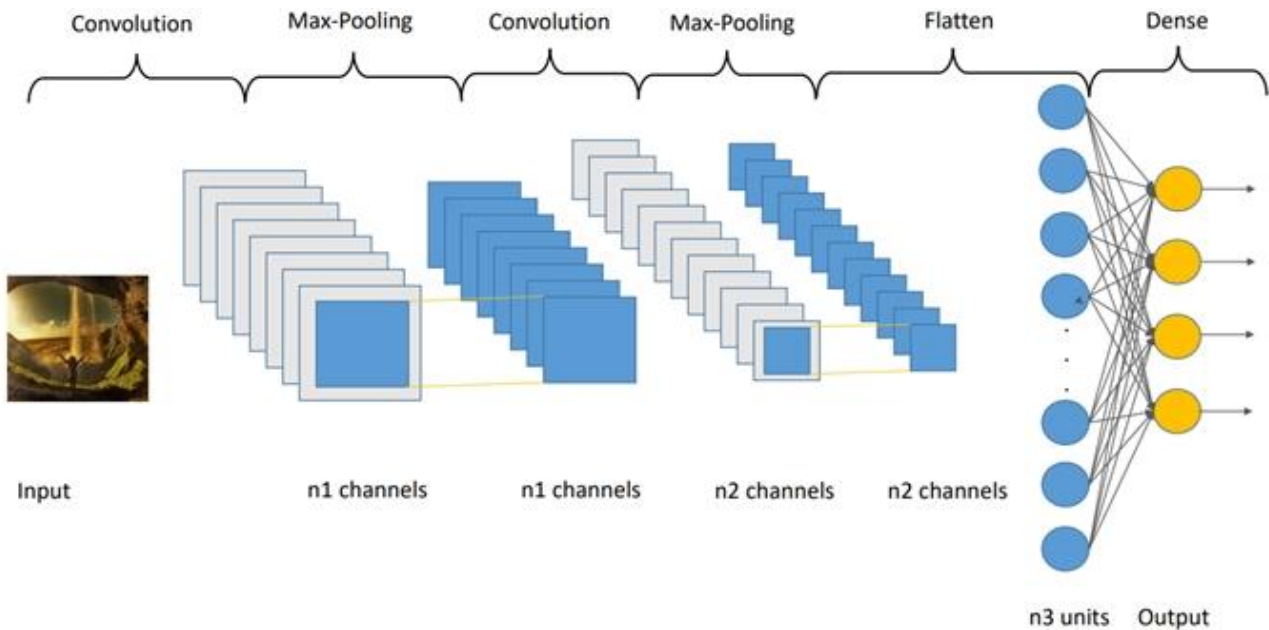
Figure 5. A Schematic Tensorflow Data Flow Chart for a Training Pipeline (Abadi et al., 2016)

Figure 5 depicts a typical training application, which operates with several subgraphs simultaneously and interacts through shared variables and queues. The basic training subgraph relies on model parameters and input batches from a queue. Several simultaneous stages of the training subgraph modify the model using varied input batches, facilitating data parallel training. Concurrent preprocessing steps are employed to fill the input queue, transforming individual input records, and a separate I/O subgraph reads records from a distributed file system. For fault tolerance, a checkpoint subgraph runs periodically. Much of TensorFlow's flexibility stems from partial and concurrent execution. The addition of mutable state and coordination via queues allows specifying a broad range of model architectures in "unprivileged" code, allowing advanced users to conduct experiments without altering the internal components of the TensorFlow runtime (Abadi et al., 2016).

Keras is a deep learning library developed in Python and handles the tasks of training and testing the deep learning model. Apart from being user-friendly, it offers high-level APIs on TensorFlow and Theano. With over 400,000 individual users as of early 2021, Keras has achieved wide acceptance in both industrial and research. The same code runs smoothly on both CPU and GPU. It allows users to rapid model prototyping and provides predefined tools for convolutional, recurrent networks, and combinations of the two (Aktürk & Serbest, 2022). Its modular structure makes it possible to easily create new models by combining neural layers, optimizers, and other components. It is supported by major companies such as Google, Microsoft, Amazon, Apple, Nvidia, and Uber. Keras offers two main models: sequential and functional API. The sequential model is simple, while the functional API allows the creation of more flexible and complex models. The functional API allows for determining the layers and then creating the model. In short, Keras is a deep learning tool that stands out with its easy-to-learn, simple model building, and wide industry support (Karabay, 2020).

### Convolutional Neural Networks (CNN)

CNN is a special type of multilayer neural network most commonly used for spatial pattern analysis. Modern Convolutional Neural Networks had their beginnings in Yann LeCun and Léon Bottou's article in 1998 (Doğan & Türkoğlu, 2019). In this paper, a neural architecture called LeNet 5 is proposed to recognize handwritten digits and words with 99.2% accuracy using the MNIST dataset (LeCun et al., 1998). LeNet 5 works generally like other neural networks trained using the backpropagation algorithm, but differs in its architecture. CNNs are focused on learning spatial features, specifically the features that best describe the target class or quantity, such as edges, corners, textures, and abstract shapes. To learn these features is based on passing the input data through multiple and sequential transformations at different spatial scales (e.g., through pooling operations) via convolutions. This allows for efficient identification and integration of fundamental characteristics and advanced concepts (Arslan & Uymaz, 2022).



**Figure 6.** A Simple Convolutional Neural Network (CNN) (García-Ordás et al., 2020)

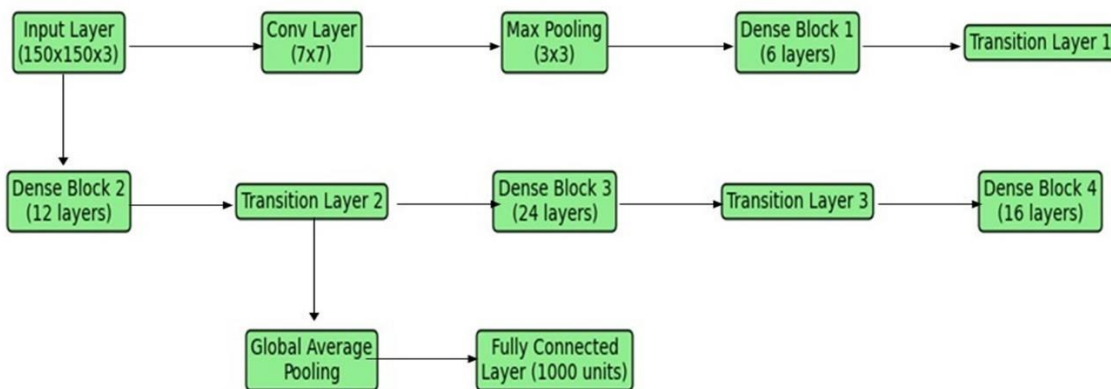
In the CNN architecture in Figure 6, various layers are shown as the Convolution Layer, ReLU Layer, Pooling Layer, Flatten, and Fully Connected Layer. The first layer, the convolutional layer, processes an image and is generally used to extract features. Images are matrices consisting of pixels with certain values. The convolution layer tries to capture certain features by traveling through a filter smaller than the original image dimensions. In this layer, the image given as input is passed through a filter. The feature map is created with the values obtained as a result of filtering. More than one filter is usually used in CNN networks, and the resulting feature maps are shaped according to the properties of the filters used. If the convolutional layer is not used, it is possible to add an input layer to the model for each pixel. However, providing the necessary links for each entry can be very difficult. Since this would require a large number of connections and processing power, it allows the operation to be performed with fewer connections by creating a feature map instead of doing this operation directly. In this way, a more effective representation can be achieved by highlighting important features (Mishra, 2020). The choice of the ReLU activation function can have an impact on the learning ability and performance of the model. Many activation functions can be used in this layer

(Doğan & Türkoğlu, 2018). The pooling layer is a layer that processes existing feature maps by dimension reduction. In this way, while processing power is decreased, extraneous features are disregarded, and attention is directed towards more significant features. Of the two different pooling techniques frequently used in CNN models, average pooling takes the average of the values in each feature map, while maximum pooling uses the maximum value in each feature map. Pooling layers are often used to minimize the size of the input before a fully connected layer. This not only uses less processing power but also helps the model focus on deeper features (Zafar et al., 2022). The flattened layer of the CNN converts the output of the convolution and pooling layers into a one-dimensional component vector for use by the dense layer of the network. This layer combines the outputs from previous layers and flattens them to create a single long component vector that will be used for final classification. This process is important to convey the features learned by the convolution and pooling layers to a dense classification layer (Dertat, 2017). The fully connected layer looks like a normal neural network connecting all neurons and usually makes up the last few layers in the network. The output from the flattened layer is fed into this fully connected layer. The output of this layer is used to classify images between different categories after training. The feature vector from the fully connected layer contains the representation that the network has learned. All inputs from this layer are connected to each activation unit of the next layer. Because the fully connected layer has a large number of parameters, it may be prone to overfitting. One of the techniques used to reduce this problem is dropout, which prevents the network from being overloaded (Vaibhav, 2018).

The architecture of the study includes layers, output sizes, and parameters for each layer. The input layer of the model, "input\_1," receives images with a size of 150x150 pixels and 3 channels (RGB). This is followed by a series of convolutional (Conv2D) and maximum pooling (MaxPooling2D) layers. There is a pooling layer after each convolutional layer. Then, a global average pooling (GlobalAveragePooling2D) layer follows, with the output shape of this layer being 512. Finally, two dense (Dense) layers are added. The first dense layer consists of 256 units, while the second dense layer consists of only one unit because binary classification is performed in this model. In this research, four neural network models have been trained based on the concept of CNN architecture: ResNet50, DenseNet-121, MobileNet\_V2, and VGG-16.

**Resnet-50 Network Structure**

In this study, ResNet-50, a variant of the popular ResNet architecture developed by Microsoft Research in 2015, is utilized. This architecture consists of 50 layers. One of its core features is the utilization of residual connections, enabling the network to learn residual functions for the input. In traditional deep neural network models, training becomes increasingly difficult as the network grows deeper, resulting in more challenging and time-consuming training processes. Hence, ResNet architecture resolves this issue through skip connections. In this approach, the output of each layer is directly added to the final layer before it (Er, 2021). ResNet-50 architecture is provided in Figure 7.



**Figure 7.** Resnet-50 Architecture of the Study

**DenseNet-121 Network Structure**

In this study, DenseNet-121 (Densely Connected Convolutional Network) connects each layer directly to all subsequent layers, creating dense connections. DenseNet121 includes a sequence of 121 interconnected

convolutional layers, culminating in a fully connected layer consisting of 1000 units serving as the final output layer. In this architecture, each layer receives input from all preceding layers and passes its output to all subsequent layers. An important advantage of DenseNet architectures is their ability to facilitate feature propagation and reduce the number of parameters by enabling feature reuse. It includes 4 dense blocks containing multiple dense layers and 3 transition layers responsible for reducing the spatial dimensions of feature maps. The final classification head comprises a dense layer utilizing softmax activation for classification purposes followed by global average pooling (Dubey et al., 2022). DenseNet-121 architecture is provided in Figure 8.

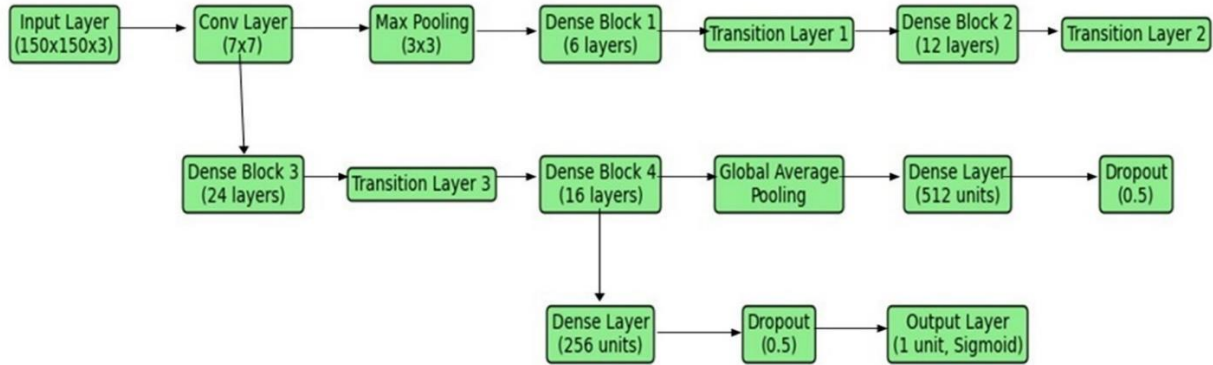


Figure 8. DenseNet-121 Architecture of the Study

**MobileNet\_V2 Network Structure**

In this study, the MobileNet\_V2 architecture is based on depthwise separable convolution. In this approach, input channels are separated into different filter channels and then combined, allowing the production of the same output as standard convolution but with fewer parameters. MobileNet\_V2 consists of 28 convolutional layers with an output size of 7x7x1280 pixels. Both models accept input images of size 150x150x3 pixels (Indraswari et al., 2022). The MobileNet\_V2 architecture is provided in Figure 9.

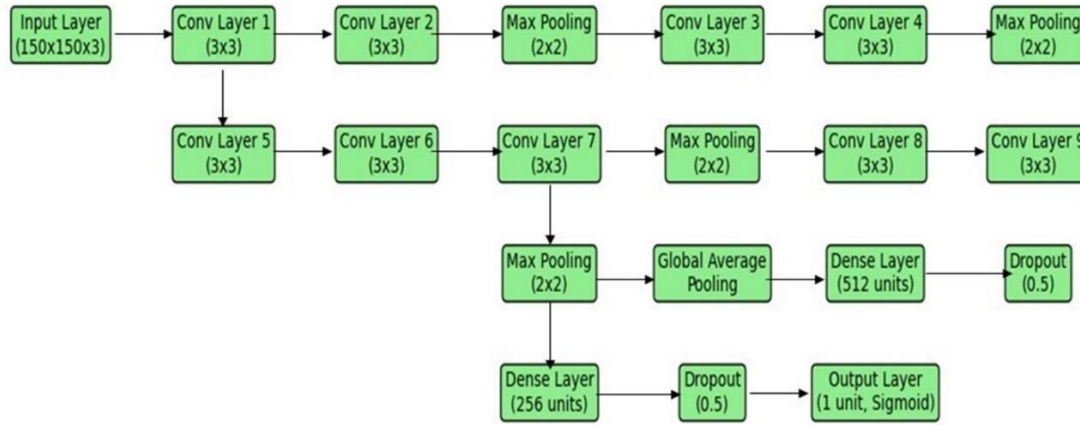


Figure 9. MobileNet\_V2 Architecture of the Study

**VGG-16 Network Structure**

In this study, the VGG-16 deep network architecture was employed for brain tumor detection. The input layer consists of a 3-channel image input with dimensions of 150x150 pixels. The VGG-16 network comprises 13 convolution layers, each with different filter numbers and sizes. The convolution layers have a step size of 1 and are all 3x3 in size. The input layer size is 150x150x3. Max pooling layers are applied every 5 blocks, with a step size of 2 and a size of 2x2 for each pooling layer. There are a total of 2 fully connected layers, with 256 neurons in the first layer and 1 neuron in the second layer. ReLU activation is used in the first layer, while the sigmoid activation function is

used in the second layer. The batch size for training the VGG-16 architecture is set to 32, and parameters are optimized using the Adam optimization method. In total, there are 19 layers, including 13 convolution layers, 5 pooling layers, 1 global average pooling layer, 2 fully connected layers, and 1 dropout layer. The VGG-16 architecture is provided in Figure 10. A transfer learning approach was utilized in this study, where convolutional weights are frozen during training to leverage pre-trained weights of the VGG-16 architecture. This allows for efficient training while solving the task of brain tumor detection.



**Figure 10.** VGG-16 Architecture of the Study

There are some differences between these four architectures we use. One of the most obvious differences between the MobilNetV2 architecture and the VGG-16 architecture is the presence of the "Global Average Pooling" layer. While this layer does not exist in the VGG-16 architecture, it does exist in the MobilNetV2 architecture (Indraswari et al., 2022). While the MobilNetV2 architecture includes the Global Average Pooling layer compared to the ResNet-50 architecture, ResNet-50 does not have this layer. This shows that MobilNetV2 is lighter and optimized for use on portable devices, while ResNet-50 has a deeper and more complex structure. Additionally, in ResNet-50, the basic blocks are Residual Blocks. The most obvious difference between the MobilNetV2 architecture and the DenseNet-121 architecture is the Convolution layers. When we look at the convolution layers, MobilNetV2 helps reduce the computational cost and reduce the model size since there is a standard convolution layer followed by Depthwise Separable Convolution layers. In DenseNet-121, convolution layers are located in densely connected blocks. These blocks are densely interconnected and combine the outputs from previous layers (Dubey et al., 2022).

## EXPERIMENTAL RESULTS

Preprocessing aims to improve the quality of MR images and convert them into a suitable form for further processing by the computer vision system. Moreover, pre-processing also helps to improve the visual aspect of MR images by enhancing the images, increasing the signal-to-noise ratio, cropping some unnecessary parts from the background, making the images smoother, and preserving edges (Sarkar et al., 2020). As a result of pre-processing in the dataset we used, a new image was obtained by cropping unnecessary parts from the background, as seen in Figure 11. Then, the data set was diversified by applying transformations such as rotating, shifting, zooming, and horizontally flipping the images through data augmentation processing.

Data augmentation was used to make the model more generalizing and to reduce the risk of overfitting. In this study, Keras' ImageDataGenerator class was used for data augmentation. The flow() method is used in the ImageDataGenerator class to read images from a large numeric array and folders containing the images. This method creates a predefined data flow for data augmentation. The ImageDataGenerator class creates new instances by performing various transformations and changes on existing images. While this method increases the size of the available dataset, it enables the model to learn more general features and perform better. In this study, the techniques used for data augmentation using the ImageDataGenerator class are as follows; The color channels of the original image were shifted by a maximum intensity of 20.0. Rotation is rotating the image by a certain angle. In the study, each image was rotated at an angle between -20 and +20 degrees by giving the value "20". Horizontal and vertical scrolling is shifting the image horizontally and vertically by a certain distance. During the data augmentation process, the images were randomly inverted horizontally. Horizontal and vertical mirroring is the process of flipping the image horizontally and vertically. Since the horizontal and vertical values were set to 0.1, each image was randomly offset

by 10% in width and height. Zooming is the process of zooming in or out of the image. Since it was set to 0.1, each image was randomly zoomed in or out by 10% of its original size. After these transformations, the fill mode parameter was used to fill the empty pixels in the original images. Shear\_range was set to 0.1, and a random shear angle up to 0.1 radians was applied to the image, making the model robust to such geometric distortions. The brightness\_range was set to [0.9, 1.1], and the image brightness was randomly adjusted between 0.9 and 1.1 to make the model robust to different lighting conditions. By setting vertical\_flip to false, the image is not randomly flipped along the vertical axis because vertical flipping is not logical for some datasets (for example, it does not make sense for images of people to be upside down). With the “Nearest” value, empty pixels are filled according to the nearest neighbor pixel value. These transformations were applied randomly to each image. The dataset is thus expanded by creating new samples. In this way, it is aimed for the model to learn more general features and perform better. These processes increase the generalization ability of the model by enabling it to better cope with images at different scales. The original Brain Tumor Mr image and the images with data augmentation techniques applied are provided in Figure 12.

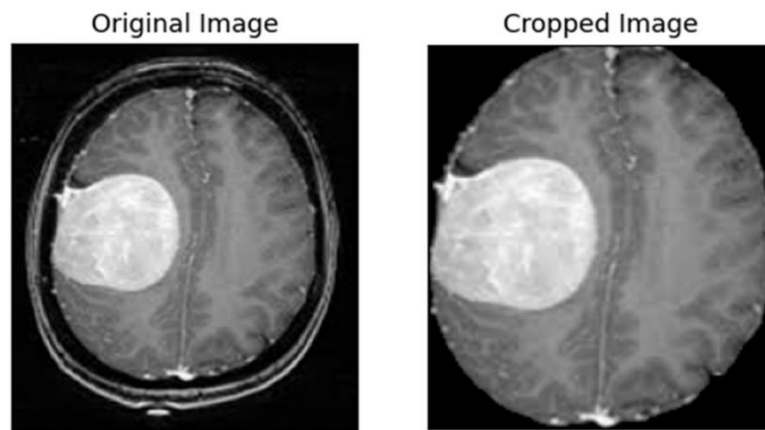


Figure 11. An Image from the Preprocessed Dataset

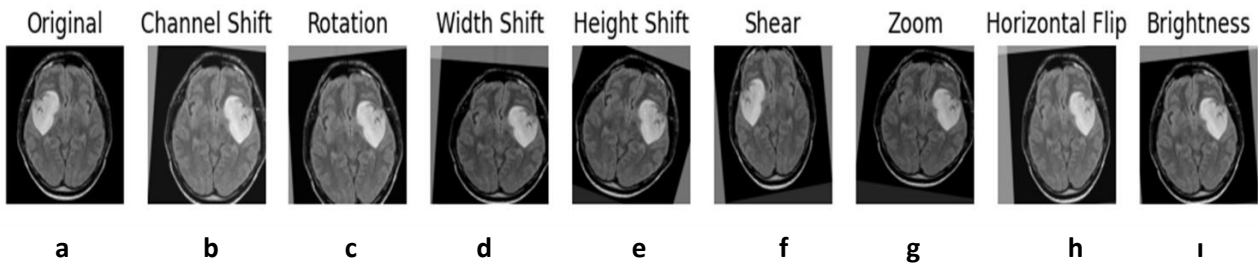


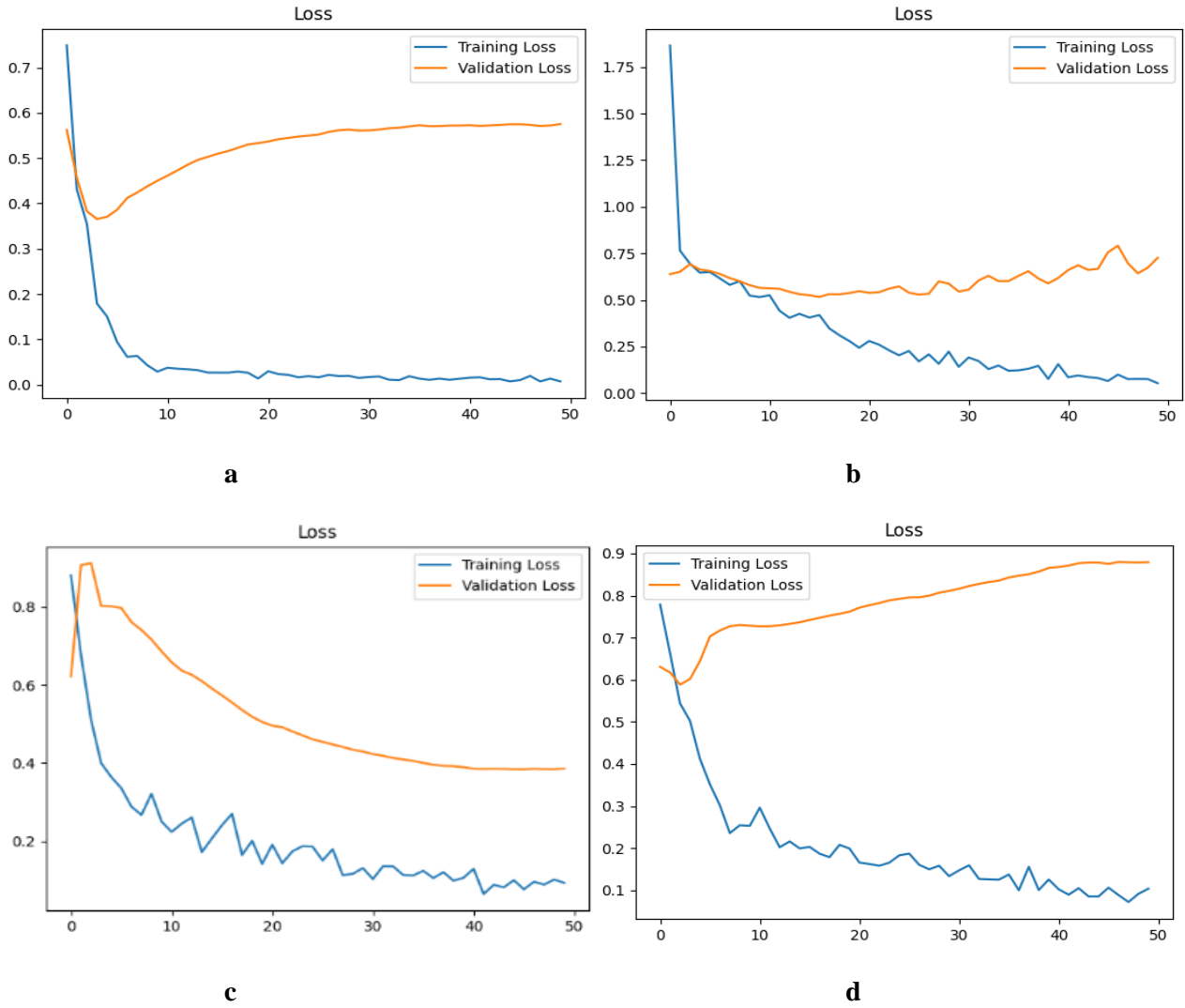
Figure 12. **a.** Original Brain Tumor Image **b.** Original Brain Tumor After Channel Shift **c.** Original Brain Tumor After Rotation **d.** Original Brain Tumor Image After Width Shift **e.** Original Brain Tumor Image After Height Shift **f.** Original Brain Tumor Image After Shear **g.** Original Brain Tumor Image After Zoom **h.** Original Brain Tumor Image After Horizontal Flip **i.** Original Brain Tumor Image After Brightness

Table 1 shows the partitioning of the dataset and the dimensions of each partition. There are 253 samples in total. This study requires separating the image data for the learning, validation, and testing phases. Data augmentation was applied only on the training data because using it on the test and validation datasets would cause overfitting. As a result of the data augmentation process, the number of training samples was increased from 177 to 9600. Each sample is represented as a 150x150 pixel image with 3 channels (i.e. RGB).

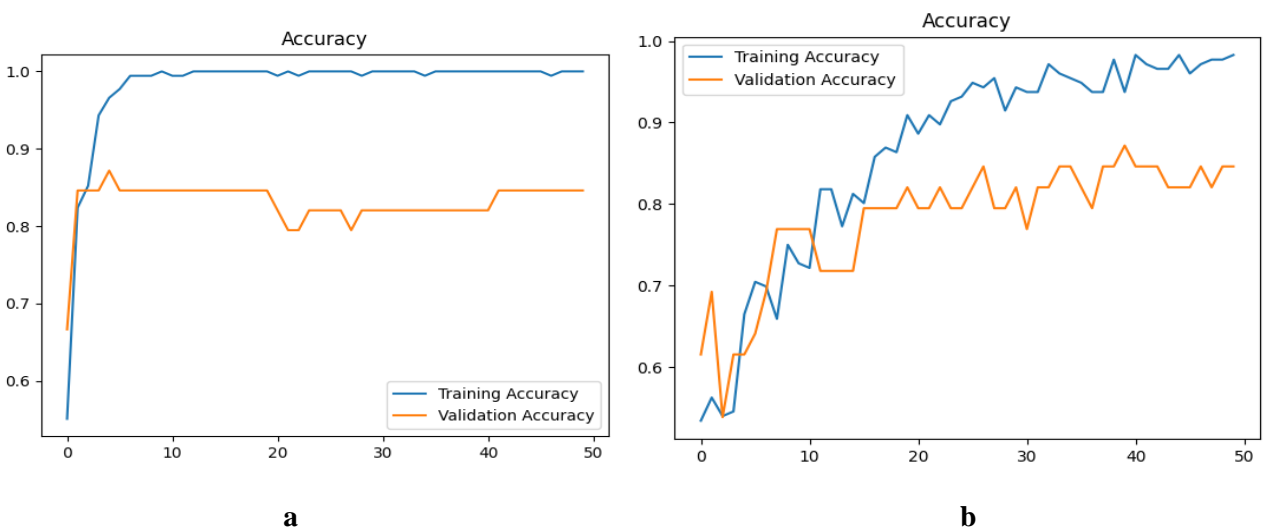
Table 1. Dataset Information After Data Augmentation

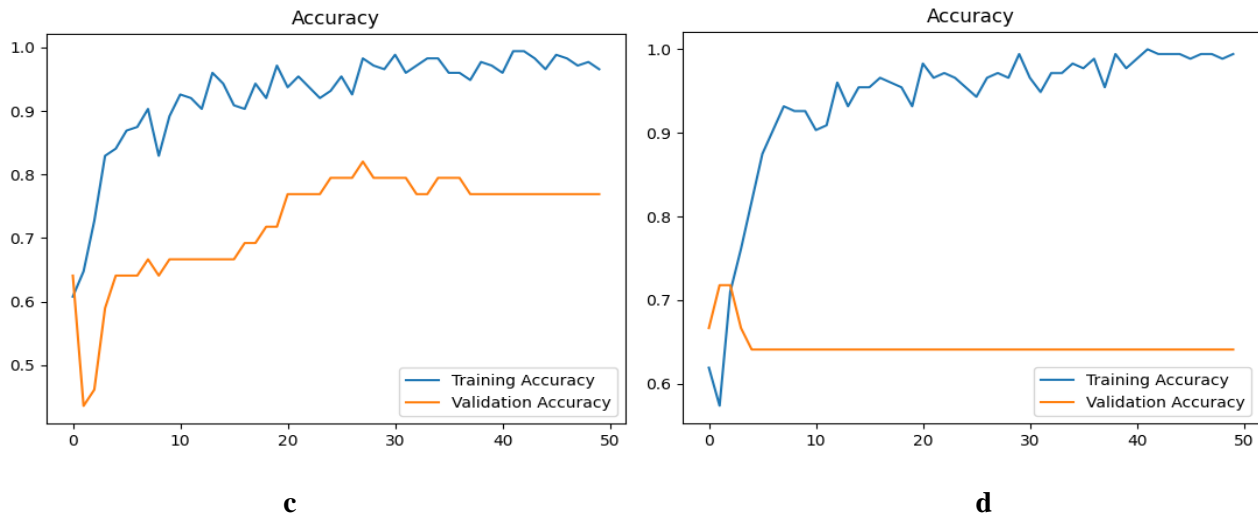
Dataset Partitioning	Number of Samples	Sample Dimensions	Label Dimensions
Total	253	-	-
Training	9600	150x150x3	9600x1
Validation	39	150x150x3	39x1
Test	38	150x150x3	38x1



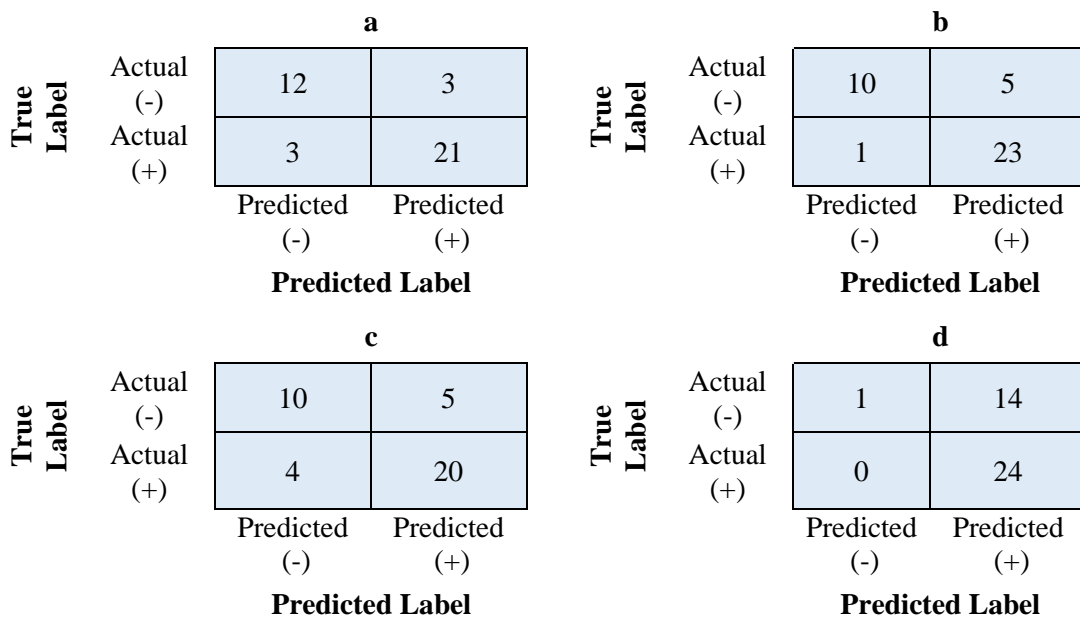


**Figure 13. a.** ResNet-50 Performance Loss Status Chart Representation Without Data Augmentation **b.** VGG-16 Performance Loss Status Chart Representation Without Data Augmentation **c.** DenseNet-121 Performance Loss Status Chart Representation Without Data Augmentation **d.** MobileNet\_V2 Performance Loss Status Chart Representation Without Data Augmentation



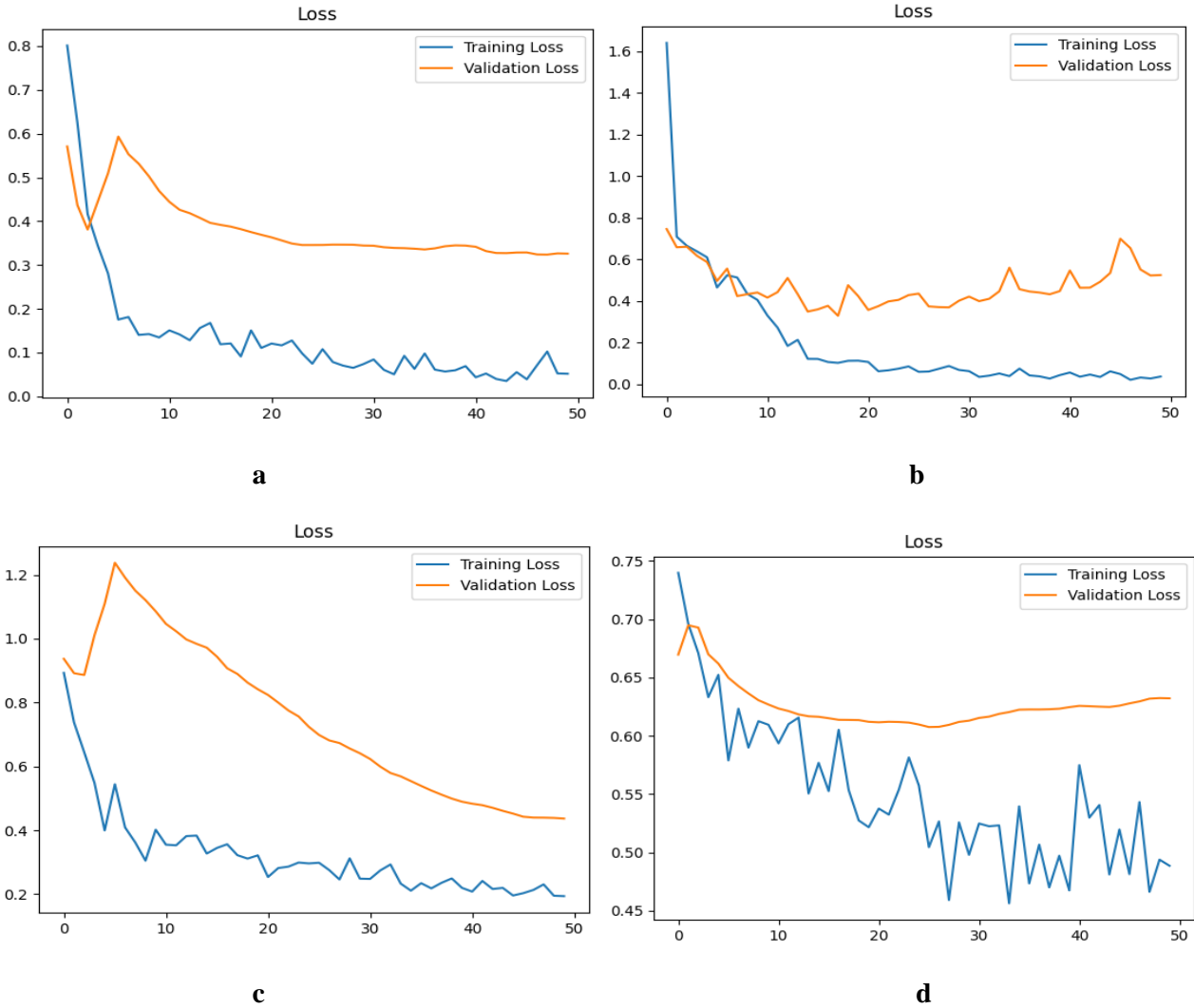


**Figure 14.** a. ResNet-50 Performance Success Status Chart Representation Without Data Augmentation b. VGG-16 Performance Success Status Chart Representation Without Data Augmentation c. DenseNet121 Performance Success Status Chart Representation Without Data Augmentation d. MobileNet\_V2 Performance Success Status Chart Representat

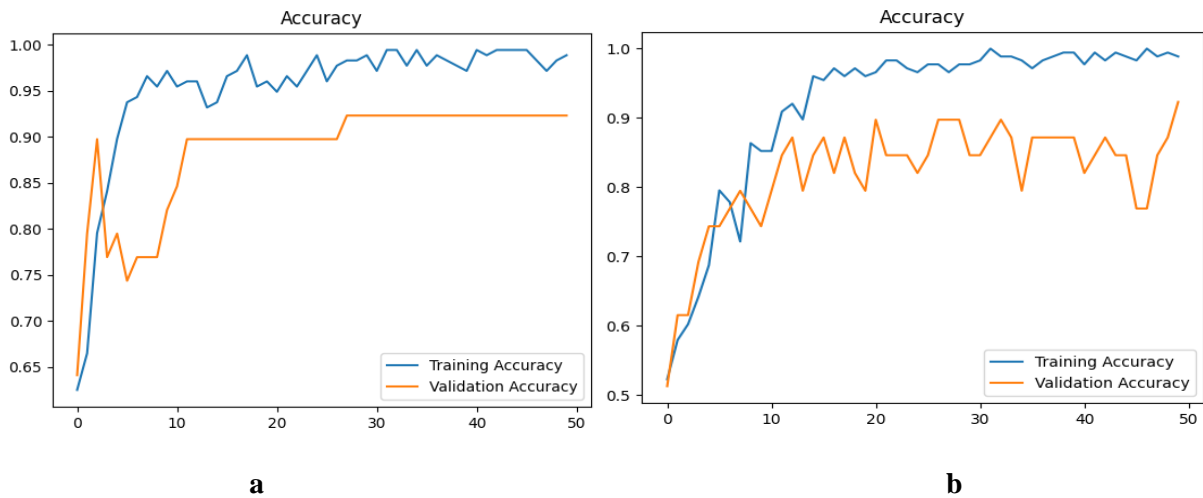


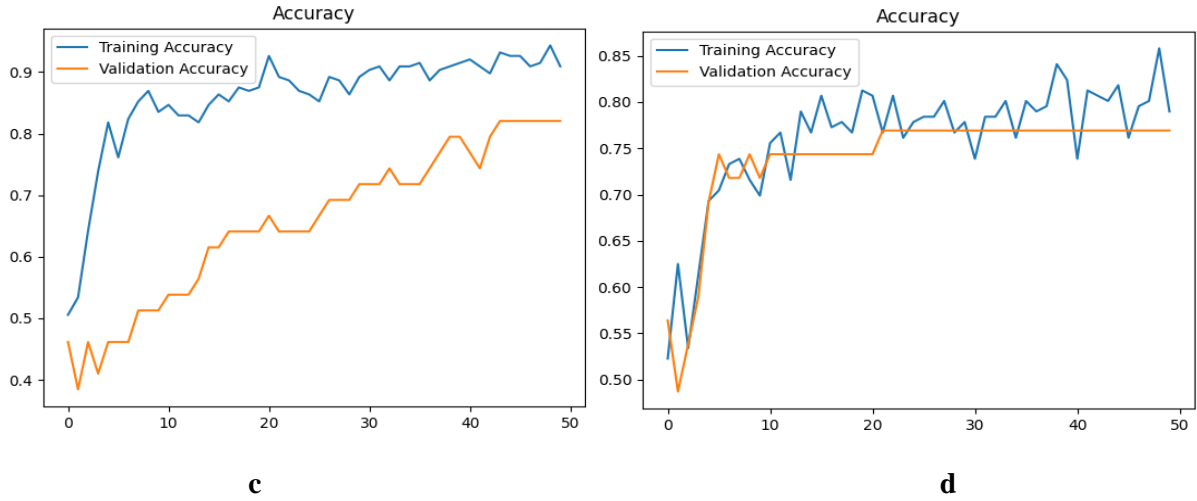
**Figure 15.** a. ResNet-50 Confusion Matrix Without Data Augmentation b. VGG-16 Confusion Matrix Without Data Augmentation c. DenseNet-121 Confusion Matrix Without Data Augmentation d. MobileNet\_V2 Confusion Matrix Without Data Augmentation

The Resnet-50, VGG-16, DenseNet-121, and MobileNet\_V2 architectures have been implemented for brain tumor detection using transfer learning with TensorFlow and Keras libraries. The dataset consists of a total of 253 MRI images, with 155 being tumor and 98 tumor-free, forming two classes. Results obtained before data augmentation are shown in Figures 13, 14, and 15. Figure 13 illustrates the corresponding loss value, Figure 14 shows training and validation accuracy over epochs, and Figure 15 displays the Confusion Matrix. In this study, MobileNet\_V2, DenseNet-121, Resnet-50 and VGG-16 achieved accuracy rates of 64.10%, 76.92%, 84.61%, and 84.61%, respectively.

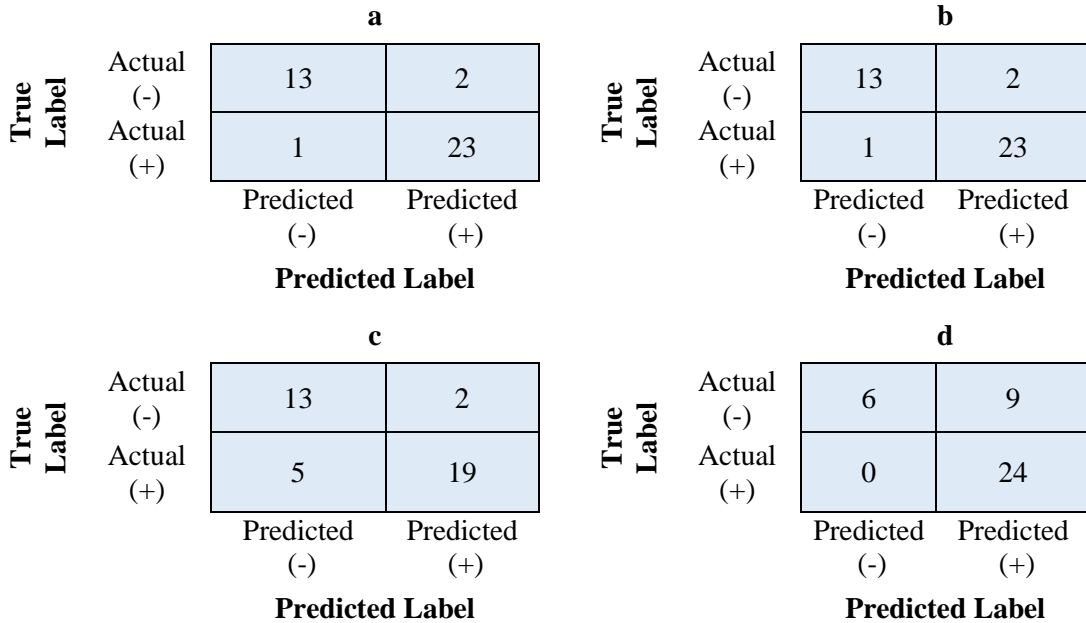


**Figure 16. a.** ResNet-50 Data Augmented Performance Loss Status Graph Representation **b.** VGG-16 Data Augmented Performance Loss Status Graph Representation **c.** DeseNet121 Data Augmented Performance Loss Status Graph Representation **d.** MobileNet\_V2 Data Augmented Performance Loss Status Graph Representation





**Figure 17. a.** ResNet-50 Data Augmented Performance Success Status Chart Representation **b.** VGG-16 Data Augmented Performance Success Status Chart Representation **c.** DenseNet121 Data Augmented Performance Success Status Chart Representation **d.** MobileNet\_V2 Data Augmented Performance Success Status Chart Representation



**Figure 18. a.** ResNet-50 Confusion Matrix with Data Augmentation **b.** VGG-16 Confusion Matrix with Data Augmentation **c.** DenseNet-121 Confusion Matrix with Data Augmentation **d.** MobileNet\_V2 Confusion Matrix with Data Augmentation

In the subsequent process, data augmentation was performed using ImageDataGenerator to augment the dataset, and the results obtained are shown in Figures 16, 17, and 18. Figure 16 illustrates the corresponding loss value, Figure 17 shows training and validation accuracy over epochs, and Figure 18 displays the Confusion Matrix. In this study, MobileNet\_V2, DenseNet-121, Resnet-50, and VGG-16 achieved accuracy rates of 76.92%, 82.02%, 92.30%, and 92.31% respectively.

Performance evaluation criteria classification models generally measure their performance based on the relationships between the classes predicted by the classifier and the actual classes to evaluate their success. Essentially, these evaluation criteria aim to measure the overall performance of the classification model by evaluating the model's accuracy, precision, sensitivity, and F1 score. Equations for performance evaluation criteria are given in 1-4.

$$\text{Accuracy: } \frac{TP+TN}{TP+TN+FP+FN} \times 100 \tag{1}$$

$$\text{Precision: } \frac{TP}{TP+FP} \times 100 \quad (2)$$

$$\text{Recall: } \frac{TP}{TP+FN} \times 100 \quad (3)$$

$$\text{F1-score: } 2 \times \frac{\text{Precision} \times \text{Recall}}{\text{Precision} + \text{Recall}} \quad (4)$$

Figure 15 depicts the confusion matrix of the dataset without data augmentation. Figure 18, on the other hand, displays the confusion matrix. The classification results obtained using the confusion matrix are presented in Table 2.

**Table 2.** Classification Results

Model	Precision	Recall	F1-score	Accuracy (%)
Resnet-50(No Data augmentation)	87.50	87.50	87.50	84.61
VGG-16 (No Data augmentation)	82.21	95.83	88.46	84.61
DenseNet-121(No Data augmentation)	80.00	83.33	81.63	76.92
MobilNetV2(No Data augmentation)	63.15	100.00	77.41	64.10
Resnet-50(With Data augmentation)	92.00	95.83	93.87	92.30
VGG-16 (With Data augmentation)	92.00	95.83	93.87	92.31
DenseNet-121(With Data augmentation)	90.47	79.16	84.44	82.05
MobilNetV2(With Data augmentation)	72.72	100.00	84.21	76.92

This study aimed to demonstrate the most effective architecture for brain tumor detection by using various architectures. When studies conducted using the same dataset as ours were examined, it was shown in Table 3 that very successful results have been achieved in recent years with various methods in brain tumor detection. When studies on brain tumors were examined, it was determined that various classifiers and different activation functions were used in addition to the CNN deep learning model. Accordingly, the success rates of the models in accurately predicting brain tumors are listed. When Table 3 is examined, it can be seen that successful deep-learning studies have been conducted for the detection of brain tumors. In experiments, it was observed that the accuracy rates obtained from different deep learning architectures and segmentation models varied between 55.00% and 95.00%. When comparing the proposed methods, among the architectures without data augmentation, Resnet-50 and VGG-16 achieved the highest performance with an accuracy rate of 84.61%. When examining the architectures with data augmentation, VGG-16 achieved the highest performance with an accuracy rate of 92.31%. It was observed that data augmentation resulted in better performance in all architectures. The VGG-16 model we used has achieved higher results compared to the studies we compared. In the study conducted by Saxena et al., the VGG-16 model achieved an accuracy rate of 90.00%, while in our study, we have reached the highest model rate in the VGG-16 model with an accuracy rate of 92.31%. Although the rate we obtained is good, better results can be achieved with some changes. Changes that can be made include expanding and diversifying the dataset to improve the model's generalization ability. Adding more tumor and tumor-free samples can help the model learn better. Additionally, working with images of different resolutions can help the model adapt to a wider range of data. Furthermore, more testing and validation studies are needed before such models can be used in clinical practice. Hyperparameter adjustments can be made to improve the model's performance. Setting parameters such as learning rate to optimal values can enable the model to learn better. Additionally, solving the class imbalance problem by using weighted loss functions can be considered. By conducting an error analysis study on misclassified examples in the model, the weak points in the model can be determined, understanding why the model makes these errors, and improvements can be made in this regard. Particularly, examining false positive and false negative situations will contribute more to us. Finally, different approaches used in similar studies in the literature should be tried to determine which one provides the better result.

**Table 3.** Performance Comparisons of Some Methods

Studies with the same dataset	Methods	Accuracy (%)
(Saxen et al., 2020) (With Data augmentation)	Inception-V3, VGG-16, Resnet-50	Sequentially 55.00, 90.00, 95.00
(Zailan et al., 2022) (No Data augmentation)	VGG-16, Inception V3, MobileNet_V2	Sequentially 78.95, 84.21, 85.53
(Macdonald & Engelhardt, 2010)	VGG-16, ResNet-50, Inception V3	Sequentially 90.00, 95.00, 55.00
This Study (No Data augmentation)	MobilNetV2, DenseNet-121, Resnet-50, VGG-16	Sequentially 64.10, 76.92, 84.61, 84.61
This Study (With Data augmentation)	MobilNetV2, DenseNet-121, Resnet-50, VGG-16	Sequentially 76.92, 82.05, 92.30, 92.31

## CONCLUSION

The dataset used in this study was obtained from the Kaggle website. The dataset consists of a total of 253 MRI images, divided into two classes: 155 with tumors and 98 without tumors. The dataset was obtained from voluntary patients by experts. The images in JPEG format have different resolutions. Since the number of training data in the dataset is low, data augmentation was applied. As a result of the data augmentation process, 9600 training data were obtained. To demonstrate the impact of data augmentation, the study was conducted on both the original dataset and the augmented dataset. Four different models were used: VGG-16, DenseNet-121, ResNet-50, and MobileNet\_V2. When examining the experimental results, among the architectures used without data augmentation, ResNet-50 and VGG-16 achieved the highest performance with an accuracy rate of 84.61%, while among the architectures used with data augmentation, VGG-16 achieved the highest performance with a classification accuracy rate of 92.31%. This indicates the extent to which the performance of the data augmentation process can be enhanced by increasing the diversity of the training dataset. When examining the test loss values, the best result for the VGG-16 architecture without data augmentation was 0.72, and with data augmentation, it was 0.36. This low loss value indicates that the model can effectively identify the patterns seen in the training data in the test data and generalize successfully. Class imbalance can be addressed by using weighted loss functions or by balancing the dataset to achieve better rates. To understand why the model makes these errors, a detailed error analysis should be conducted on the examples misclassified by the model, especially focusing on false positive and false negative cases. To improve the model's performance, hyperparameter adjustments (e.g., learning rate, dropout rates) can be made. This can help the model achieve better generalization ability. Parameter and optimization changes should be made, and results should be compared. In this way, the best result can be found. Additionally, collecting more data for the dataset can achieve better rates. The lack of data in the dataset used in this study can be considered a point for improvement. To achieve better results in the study, we might consider increasing the actual number of images in the dataset used. To make the study more useful, in future studies, other open-source brain tumor datasets in the literature can be used to develop more deep learning-based models to assist physicians in detecting brain tumors. However, in addition to classification problems, abnormal images (disease, positive, tumor) may need to be manually segmented by physicians. In this context, AI-supported automatic segmentation studies can be conducted. These methods can provide more support to physicians by improving the diagnostic process and playing a more effective role in treatment planning.

This study demonstrates that despite initially having limited data in our training dataset, various data augmentation techniques have been employed to enrich the dataset. This technically proves that even with a small dataset, good results can be achieved through the utilization of data augmentation techniques. Four different transfer learning architectures have been compared, and upon reviewing other conducted studies, it is noticed that researchers have reached varying results among the models. Overall, in our study and comparison, to others, the VGG-16 model has achieved results closely aligned with each other. Our study demonstrates the efficacy of image processing in providing promising results, thereby substantiating its potential as a supportive decision-making tool for medical professionals.

## REFERENCES

Abadi, M., Barham, P., Chen, J., Chen, Z., Davis, A., Dean, J., Devin, M., Ghemawat, S., Irving, G. & Isard, M. (2016). TensorFlow: a system for Large-Scale machine learning. In *12th USENIX symposium on operating systems design and implementation (OSDI 16)* (pp. 265-283).

- Aktürk, S. & Serbest, K. (2022). Nesne Tespiti İçin Derin Öğrenme Kütüphanelerinin İncelenmesi. *Journal of Smart Systems Research*, 3(2), 97-119
- Alhalim, A., Abd Alrahman, G., Hussain Hassan, N. M. & Nashat, A. A. (2024). Computer-Aided Diagnosis And Detection For Brain Cancer. *Fayoum University Journal of Engineering*, 7(1), 49-62. <https://doi.org/10.21608/FUJE.2023.221477.1052>
- Arslan, Ö. & Uymaz, S. A. (2022). Classification of Invoice Images By Using Convolutional Neural Networks. *Journal of Advanced Research in Natural and Applied Sciences*, 8(1), 8-25. <https://doi.org/10.28979/jarnas.953634>
- Asad, R., Rehman, S. U., Imran, A., Li, J., Almuhaimeed, A. & Alzahrani, A. (2023). Computer-Aided Early Melanoma Brain-Tumor Detection Using Deep-Learning Approach. *Biomedicines*, 11(1), 184. <https://doi.org/10.3390/biomedicines11010184>
- Atallah, O., Badary, A., Almealawy, Y. F., Sanker, V., Awuah, W. A., Abdul-Rahman, T., Alrubaye, S. N. & Chaurasia, B. (2024). Non-colloid-cyst primary brain tumors: A systematic review of unexpected fatality. *Journal of Clinical Neuroscience*, 119, 129-140. <https://doi.org/10.1016/j.jocn.2023.11.022>
- Badža, M. M. & Barjaktarović, M. Č. (2020). Classification of brain tumors from MRI images using a convolutional neural network. *Applied Sciences*, 10(6), 1999. <https://doi.org/10.3390/app10061999>
- Chan, H. P., Hadjiiski, L. M. & Samala, R. K. (2020). Computer-aided diagnosis in the era of deep learning. *Medical physics*, 47(5), e218-e227. <https://doi.org/10.1002/mp.13764>
- Chanu, M. M., Singh, N. H., Muppala, C., Prabu, R. T., Singh, N. P. & Thongam, K. (2023). Computer-aided detection and classification of brain tumor using YOLOv3 and deep learning. *Soft Computing*, 27(14), 9927-9940. <https://doi.org/10.1007/s00500-023-08343-1>
- Chattopadhyay, A. & Maitra, M. (2022). MRI-based brain tumour image detection using CNN based deep learning method. *Neuroscience informatics*, 2(4), 100060. <https://doi.org/10.1016/j.neuri.2022.100060>
- Aslan, T. & Çakı, E. E. (2023). Beyin tümörü teşhisinde CNN-FL modeli ağ performansının aktivasyon fonksiyonlarına göre karşılaştırılması. *Journal of Scientific Reports-B*, 008, 43-54.
- Dertat, A. (2017). Applied deep learning-part 4: Convolutional neural networks. Towards Data Science, 26. <https://towardsdatascience.com/applied-deep-learning-part-4-convolutional-neural-networks-584bc134c1e2> Accessed 14.02.2024.
- Doğan, F. & Türkoğlu, (2019). Derin öğrenme modelleri ve uygulama alanlarına ilişkin bir derleme. *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Mühendislik Dergisi*, 10(2), 409-445. <https://doi.org/10.24012/dumf.411130>
- Doğan, F. & Türkoğlu, İ. (2018). "Derin Öğrenme Algoritmalarının Yaprak Sınıflandırma Başarımlarının Karşılaştırılması." *Sakarya University Journal of Computer and Information Sciences*, 1(1), 10-21.
- Dubey, N., Bhagat, E., Rana, S., & Pathak, K. (2022). A novel approach to detect plant disease using DenseNet-121 neural network. In *Smart Trends in Computing and Communications: Proceedings of SmartCom 2022* (pp. 63-74). Singapore: Springer Nature Singapore. [https://doi.org/10.1007/978-981-16-9967-2\\_7](https://doi.org/10.1007/978-981-16-9967-2_7)
- Er, M. B. (2021). Önceden Eğitilmiş Derin Ağlar İle Göğüs Röntgeni Görüntüleri Kullanarak Pnömoni Sınıflandırılması. *Konya Journal of Engineering Sciences*, 9(1), 193-204. <https://doi.org/10.36306/konjes.794505>
- García-Ordás, M. T., Benítez-Andrades, J. A., García-Rodríguez, I., Benavides, C. and Alaiz-Moretón, H. (2020). Detecting respiratory pathologies using convolutional neural networks and variational autoencoders for unbalancing data. *Sensors*, 20(4), 1214. <https://doi.org/10.3390/s20041214>
- Govindaraj, S. and Sandhiya, G. *Brain Tumor Detection Using Convolutional Neural Network With Image Processing*. 2019 1st international conference on advances in science, engineering and robotics technology (ICASERT). IEEE. <https://www.doi.org/10.56726/irjmet38709>
- Hossain, T., Shishir, F. S., Ashraf, M., Al Nasim, M. A. and Shah, F. M. (2019). Brain tumor detection using convolutional neural network. 2019 1st international conference on advances in science, engineering and robotics technology (ICASERT), 1-6. IEEE.
- Hu, M., Zhong, Y., Xie, S., Lv, H. and Lv, Z. (2021). Fuzzy system based medical image processing for brain disease prediction. *Frontiers in Neuroscience*, 15, 714318. <https://doi.org/10.3389/fnins.2021.714318>

- Indraswari, R., Rokhana, R., & Herulambang, W. (2022). Melanoma image classification based on MobileNetV2 network. *Procedia computer science*, 197, 198-207. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2021.12.132>
- Karabay, A. Keras Nedir? [What is Keras?]. Retrieved from <https://www.karabayyazilim.com/blog/python/keras-nedir-2020-02-08-225241> Accessed 08.02.2024
- Khan, M. S. I., Rahman, A., Debnath, T., Karim, M. R., Nasir, M. K., Band, S. S., Mosavi, A. and Dehzangi, I. (2022). Accurate brain tumor detection using deep convolutional neural network. *Computational and Structural Biotechnology Journal*, 20, 4733-4745. <https://doi.org/10.1016/j.csbj.2022.08.039>
- Kumar, G., Kumar, P. and Kumar, D. (2021). Brain tumor detection using convolutional neural network. 2021 *IEEE International Conference on Mobile Networks and Wireless Communications (ICMNBC)* (pp. 1-6). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICMNBC52512.2021.9688460>
- LeCun, Y., Bottou, L., Bengio, Y. and Haffner, P. (1998). Gradient-based learning applied to document recognition. *Proceedings of the IEEE*, 86(11), 2278-2324. <https://doi.org/10.1109/5.726791>
- Macdonald, D., & Engelhardt, G. (2010). 2.39 predictive modeling of corrosion. *Shreir's Corros, Elsevier BV*, 2, 1630-1679.
- Madhuri, G. S., Mahesh, T. and Vivek, V. (2022). A novel approach for automatic brain tumor detection using machine learning algorithms. In *Big data management in Sensing* (pp. 87-101). River Publishers. <https://doi.org/10.1201/9781003337355-7>
- Mishra, M. (2020). Convolutional neural networks, explained. *Towards Data Science*, 26. <https://towardsdatascience.com/convolutional-neural-networks-explained-9cc5188c4939> Accessed 14.02.24.
- Nikmanesh, Y., Mohammadi, M. J., Yousefi, H., Mansourimoghadam, S., & Taherian, M. (2023). The effect of long-term exposure to toxic air pollutants on the increased risk of malignant brain tumors. *Reviews on Environmental Health*, 38(3), 519-530. <https://doi.org/10.1515/reveh-2022-0033>
- Ostrom, Q. T., Cioffi, G., Waite, K., Kruchko, C., & Barnholtz-Sloan, J. S. (2021). CBTRUS statistical report: primary brain and other central nervous system tumors diagnosed in the United States in 2014–2018. *Neuro-oncology*, 23(Supplement\_3), iii1-iii105. <https://doi.org/10.1093/neuonc/noab200>
- Rai, H. M., & Chatterjee, K. (2021). 2D MRI image analysis and brain tumor detection using deep learning CNN model LeU-Net. *Multimedia Tools and Applications*, 80, 36111-36141. <https://doi.org/10.1007/s11042-021-11504-9>
- Sadad, T., Rehman, A., Munir, A., Saba, T., Tariq, U., Ayesha, N., & Abbasi, R. (2021). Brain tumor detection and multi-classification using advanced deep learning techniques. *Microscopy Research and Technique*, 84(6), 1296-1308. <https://doi.org/10.1002/jemt.23688>
- Sarkar, S., Kumar, A., Chakraborty, S., Aich, S., Sim, J.-S., & Kim, H.-C. (2020). A CNN based approach for the detection of brain tumor using MRI scans. *Test Engineering and Management*, 83, 16580-16586.
- Saxena, P., Maheshwari, A., & Maheshwari, S. (2020). Predictive modeling of brain tumor: a deep learning approach. In *Innovations in Computational Intelligence and Computer Vision: Proceedings of ICICV 2020* (pp. 275-285). Singapore: Springer Singapore. [https://doi.org/10.1007/978-981-15-6067-5\\_30](https://doi.org/10.1007/978-981-15-6067-5_30)
- Siar, M., & Teshnehlal, M. (2019). Brain tumor detection using deep neural network and machine learning algorithm. In *2019 9th international conference on computer and knowledge engineering (ICCCKE)* (pp. 363-368). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICCCKE48569.2019.8964846>
- Sudharson, K., Sermakani, A., Parthipan, V., Dhinakaran, D., Petchiammal, G. E., & Usha, N. (2022). Hybrid Deep Learning Neural System for Brain Tumor Detection. In *2022 2nd International Conference on Intelligent Technologies (CONIT)* (pp. 1-6). IEEE. <https://doi.org/10.1109/CONIT55038.2022.9847708>
- Sultan, H. H., Salem, N. M., & Al-Atabany, W. (2019). Multi-classification of brain tumor images using deep neural network. *IEEE access*, 7, 69215-69225. [10.1109/ACCESS.2019.2919122](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2919122)
- Vaibhav, R. Fully Connected Layer. Medium. <https://medium.com/@vaibhav1403/fully-connected-layer-f13275337c7c> Accessed 10.02.24



Zafar, A., Aamir, M., Mohd Nawi, N., Arshad, A., Riaz, S., Alruban, A., Dutta, A. K., & Almotairi, S. (2022). A comparison of pooling methods for convolutional neural networks. *Applied Sciences*, 12(17), 8643. <https://doi.org/10.3390/app12178643>

Zailan, Z. N., Mostafa, S. A., Abdulmaged, A. I., Baharum, Z., Jaber, M. M., & Hidayat, R. (2022). Deep Learning Approach for Prediction of Brain Tumor from Small Number of MRI Images. *JOIV: International Journal on Informatics Visualization*, 6(2-2), 581-586.



# Kahramanmaraş Sutcu Imam University Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 17.03.2024  
Kabul Tarihi : 20.04.2024

Received Date : 17.03.2024  
Accepted Date : 20.04.2024

## COMPARISON OF RIGID PAVEMENT DESIGNS FOR AIRPORT RUNWAYS UNDER STRONG AND WEAK GROUND CONDITIONS AT LOW AND HIGH TRAFFIC AIRPORTS

### DÜŞÜK VE YÜKSEK TRAFİKLİ HAVAALANLARINDA GÜÇLÜ VE ZAYIF ZEMİN KOŞULLARI ALTINDA HAVAALANI PİSTLERİ İÇİN SERT KAPLAMA TASARIMLARININ KARŞILAŞTIRILMASI

Osman HANSU<sup>1</sup> (ORCID: 0000-0003-1638-4304)

Nildem TAYŞI<sup>2\*</sup> (ORCID: 0000-0003-0947-5662)

Dilan UZUNKODALAK<sup>3\*</sup> (ORCID: 0009-000-2548-6770)

<sup>1</sup> GİBTU, Civil Engineering, Gaziantep, Turkey

\*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Osman HANSU, osman.hansu@gibtu.edu.tr

#### ABSTRACT

In this study, the FAARFIELD program was used to evaluate the construction of rigid pavements for the airport under different soil conditions, aircraft types, and annual traffic loads (number of take-offs). This is because take-off movements are important parameters for runway strength in design. In addition, gross weight values for each aircraft type were entered into the system and obtained from the system with annual tariff growth rates. For pavement life, 20-year periods were considered. The study includes 2 different traffic loads: low and high traffic. The high traffic study is an example of 1 year of flight operations (1 year of total departures for each aircraft type) at a hub airport with +50 million passengers per year. Low traffic is Air Traffic Management (ATM) traffic for 1 year of total departures at a small local/regional airport. The CBR (California Bearing Ratio) value was taken as 5 for low strength soil and CBR=15 for good soil. CDF (Cumulative Damage Factor) and P/C values were examined in the results of the data obtained from the analysis of rigid pavement designs for airport runways under strong and weak soil conditions for low and high traffic airports with the FAARFIELD program.

**Keywords:** cumulative damage factor, runway pavement, airport

#### ÖZET

Bu çalışmada, FAARFIELD programı, uçak tipi ve yıllık trafik yükleri (kalkış sayısı) altında farklı zemin koşulları altında havaalanı için rijit kaplamaların yapımını değerlendirmek için kullanılmıştır. Bunun nedeni, kalkış hareketlerinin tasarımda pist mukavemeti için önemli parametreler olmasıdır. Ayrıca, her bir uçak tipi için brüt ağırlık değerleri sisteme girilmiş ve yıllık tarife büyüme oranları ile sistemden elde edilmiştir. Kaplama ömrü için 20 yıllık periyotlar dikkate alınmıştır. Çalışma düşük ve yüksek trafik olmak üzere 2 farklı trafik yükünü içermektedir. Yüksek trafik çalışması, yılda +50 milyon yolcuya sahip bir merkez havalimanındaki 1 yıllık uçuş operasyonlarına (her uçak tipi için 1 yıllık toplam kalkışlar) bir örnektir. Düşük trafik, küçük bir yerel/bölgesel havalimanındaki 1 yıllık toplam kalkışlar için Hava Trafik Yönetimi (ATM) trafiğidir. CBR (Kaliforniya Taşıma Oranı) değeri düşük mukavemetli zemin için 5 ve iyi zemin için CBR=15 olarak alınmıştır. FAARFIELD programı ile düşük ve yüksek trafikli havalimanları için güçlü ve zayıf zemin koşulları altında havalimanı pistleri için rijit kaplama tasarımlarının analizinden elde edilen veriler sonucunda CDF (Kümülatif Hasar Faktörü) ve P/C değerleri incelenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** kümülatif hasar faktörü, pist kaplaması, havaalanı

ToCite: HANSU, O., TAYŞI, N., & UZUNKODALAK, D., (2024). COMPARISON OF RIGID PAVEMENT DESIGNS FOR AIRPORT RUNWAYS UNDER STRONG AND WEAK GROUND CONDITIONS AT LOW AND HIGH TRAFFIC AIRPORTS. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 27(3), 1019-1032.

## INTRODUCTION

In addition to being the most important sector that facilitates human life, the transportation sector is also the most important parameter in increasing the level of livability. Technological developments in the transportation sector have contributed greatly to the development of countries at the level of modern civilizations. Transportation is one of the leading sectors that contribute to economic growth, national income increase, social order, industry, and trade development for every country. Aviation is one of the transportation systems where parameters such as speed, comfort, safety, and technology come to the fore with technological developments in transportation systems. Although it is only a century old, air transportation is the locomotive of the system in terms of socio-economic globalization. Today, thanks to aviation, it takes no more than 5-10 hours to cross oceans and continents. From a systemic approach, aviation is also composed of subsystems. Among these systems, airports are the most fundamental system. Airports, which were obtained by modifying football stadiums in the early 1900s, today employ tens of thousands of people and have the appearance of a techno-city, which is the economic development parameter of the region where they are located (Bingöl, 2000).

One of the sub-sectors of the systems used for transportation purposes is air transportation, which has gained importance in the last century, and airports, which are an important infrastructure element of this system. Airports, which have a very important place in air transportation, have an important place for every country as a gateway to the world. From the point of view of airports, it is possible to mention many important contributions, including the promotion of the country among the purposes of use. In addition to this important function of the airport, airports are also known to contribute to the economic, social, and cultural development of the region in which they are located (Doganis, 2005).

The concept of quality, which is one of the main objectives of civil engineering, is important in airports as in every structure. Maintenance costs, which are seen as one of the main elements in the construction and operation costs of airports, are directly related to the quality of the structures and the extent to which they can meet scientific needs. The quality and selection criteria of the pavements, which are considered the basic structure of airports and the most important element of the service they provide, are also one of the important factors that will affect this service. The selection of the type of pavement to be used on the airport superstructure should be based on scientific facts and the appropriate type of pavement should be selected.

Air transport plays a vital role in inter-regional transportation. The past century has seen tremendous growth in air traffic. The failure or loss of serviceability of a pavement at an airport and the closure of a runway, especially a major runway, can affect the operations of the entire airport system. Therefore, the reliability of pavements on runways is critical for air transportation. There is a growing need for reliable pavement design at airports. It has long been recognized that pavements are integral to the smooth operation of airports. However, this is the exception rather than the rule for airport pavements, which by their original design complete their service life without extensive maintenance. One of the most common problems in the design of airport pavements has been the underestimation of air traffic growth rates and the consequent under-design of pavement characteristics. Considering the design characteristics of pavements, it can be said that they are one of the most difficult design problems faced by civil engineers during design. Superstructures are constructed with the use of low-cost materials depending on highly variable usage and design characteristics as well as environmental and loading conditions. Due to the modernization and globalization of the world, the increase in air traffic often exceeds expectations. Traffic loads are difficult to predict because of new aircraft entering airports as they are needed. It can be assessed on a probabilistic basis based on environmental conditions and historical trends; however, the specific environment at a given time can have a dramatic impact on the performance of the superstructure.

One of the most difficult aspects of pavement analysis is the determination of pavement damage. Excessive stresses in the pavement structure cause the material to crack. However, the development of cracking alone does not necessarily indicate a failure of the superstructure surface. Airplanes can fly over defective pavements. On the highway, field pavement failure is defined in terms of the functional properties of the pavement surface, primarily in relation to ride quality. There is no comparable definition of failure for airport pavements. On airport pavements, the cumulative effect of different types of distress is a major concern for the pavement engineer.

Due to the difficulty of the airport superstructure analysis process, design methods have been developed empirically. Although these methods have produced feasible designs, they have some shortcomings. Significant progress has been

made in the fields of engineering mechanics and materials evaluation that can provide the basis for the development of improved airfield pavement design procedures. The purpose of this report is to summarize the state of the art in airport pavement analysis models. There is no clear limit to this task. There are models for superstructure design that have been used for many years. Some models have been applied only by engineers at the forefront of technology in the design of superstructure structures. Other models have been proposed by researchers but have not been widely used for airport pavement analysis. Finally, there are models developed in other engineering fields that can be applied to the analysis of airport pavements. This report attempts to cover all these levels of development (Zaniewski et al., 1991). The amount of reinforcing steel required to control volume changes in concrete and reinforced concrete structures, especially on surfaces subject to friction and heating, depends primarily on the slab thickness, the tensile strength of the concrete, and the yield strength of the steel. Other factors affecting the amount of steel are shrinkage due to temperature drop, shrinkage due to drying, and the modulus of elasticity of concrete and steel (Zaniewski et al., 1991). It is considered important to evaluate the studies on this subject or the studies on waste recycling in the literature (Akgül, Doğan and Etlı, 2020; Akgül and Etlı, 2023; Cemalgil and Etlı, 2020; Cemalgil, Etlı and Onat, 2018; Cemalgil et al., 2021; Etlı, 2022a, 2022b, 2023a, 2023b; Etlı, Cemalgil and Onat, 2018, 2021; Etlı, Yılmaz and Hansu, 2024; Gesoglu et al., 2017; Hansu and Etlı, 2022) with concrete or mortar content in pavement design for future studies in terms of both engineering and sustainable production.

The lack of a detailed baseline study on pavement-subgrade quality and traffic loading in the literature poses a significant challenge for designers in their initial studies during design. Therefore, the existence of such a study can guide the relevant researchers and designers. The service life of the runways where the main activities are carried out at airports is of great importance. The evaluation and design of runway pavements under the service loads to which they are exposed according to the aircraft operating on them is of great importance for the operation of airports. For this purpose, it is of great importance not only to evaluate the pavement properties but also to evaluate the ground capacity under service loads. The evaluation of this situation can be evaluated with software with current technological developments. The FAARFIELD program was used within the scope of the study. Annual traffic loads (number of take-offs) are evaluated by considering the aircraft type and airport operating capacity and characteristics in the program and the evaluation of the construction of rigid pavements for the airport under different ground conditions in the construction of runway pavements are carried out with this program. The reflection of runway pavement life on the design as load distribution of take-off movements is considered an important parameter in terms of runway pavement and embankment strength and its effects are evaluated in detail within the scope of the study. In addition, gross weight values for each aircraft type were entered into the system and obtained from the system with annual tariff growth rates. Within the scope of the study, 20-year periods were considered for runway pavement service life. In addition, two different traffic loads, defined as low and high traffic, were evaluated. The high traffic load study is an example of 1-year flight operations (1-year total departures for each aircraft type) at a hub airport with +50 million passengers per year. Low traffic load is considered as Air Traffic Management (ATM) traffic for 1-year total departures at a small local/regional airport. Another parameter, the soil bearing capacity, is considered with CBR (California Bearing Ratio). CBR value is taken as 5 for low strength soil sample and CBR=15 for good soil. As a result, 4 different case studies were conducted and the change in runway pavement properties within the airport traffic load and soil properties were evaluated with the FAARFIELD program. The 4 different case studies can be summarized as follows: Case-I with low traffic load and low soil capacity, Case-II with high traffic load and low soil capacity, Case-III with low traffic load and high soil capacity, and finally Case-IV for airport runways with high traffic load and high soil capacity. As a result of the data obtained, CDF (Cumulative Damage Factor) and P/C values were analyzed. Cumulative damage factor (CDF) is defined as a factor of the amount of life consumed from the structural fatigue life of a pavement. It is expressed as the ratio of the applied load repetitions to the load repetitions allowed until the pavement is damaged by the end of its lifetime, which is relevant for air traffic. The P/C (pass-to-coverage) ratio is the ratio of how many passes it takes for the aircraft wheels to cover a unit area in one full pass. One full coverage is the maximum response of the ground.

## DETAIL OF CASES AND DESIGN METHODS

The design of rigid airport pavements under different soil conditions is the focus of this study. Such problems constitute an extremely complex engineering problem involving many interacting variables. The calculation of the design method for an airport pavement is very computationally intensive, Therefore, the FAA has designed a computer program called FAARFIELD (Federal Aviation Administration Rigid and Flexible Iterative Elastic Layered Design) to assist pavement engineers. The FAARFIELD is offered as a user-friendly and completely free software. As far as the design procedure is concerned, it provides a design method-based structural analysis based on layered elastic and three-dimensional finite element method developed for use in calculating design thicknesses for

airfield pavements. Layered elastic and three-dimensional finite element-based design theories are adopted within the software to address the impact of new complex gear and wheel arrangements. Although the value selected for low soil strength is CBR value 5, the k coefficient used in the FAARFIELD program was calculated for this CBR value with the help of the formula given as Equation 1 and entered the FAARFIELD program. For high soil strength, the CBR value is 15, the k coefficient used in the FAARFIELD program was calculated for this CBR value with the help of the formula given as Equation 1 and entered the FAARFIELD program.

$$k = 28.6926 \times [CBR]^{0.7788} \times 0.271447138 \left(\frac{MPa}{m}\right) \quad (1)$$

Four different case studies can be summarized as follows: Case-I with low traffic load and low soil capacity, Case-II with high traffic load and low soil capacity, Case-III with low traffic load and high soil capacity, and finally Case-IV for airport runways with high traffic load and high soil capacity as given in Table 1. As a result of the data obtained, CDF (Cumulative Damage Factor) and P/C values were analyzed.

**Table 1.** Definition of All Cases

Case No.	Traffic Load	Soil Capacity
I	low	low
II	high	low
III	low	high
IV	high	high

Aircraft weights and number of departures used in the coatings during the analysis are given in Table 2 and Table 3 for low and high traffic conditions, respectively. The tables also show the estimated annual growth rates of 10% for the annual departure values in Table 2 and Table 3.

**Table 2.** Airplane Information Used in Low Traffic Case

No.	Name	Gross Wt. (kg)	Annual Departures	(%) Annual Growth
1	A319-100 opt	68,400	56	10
2	A320-200 std	73,900	1,164	10
3	A321neo	97,400	783	10
4	A321neo	97,400	39	10
5	B737-400	68,266	5	10
6	B737-800	79,242	742	10
7	B737-700	70,307	1	10
8	B737 BBJ2	79,250	3,134	10
9	B737-900	79,242	593	10
10	B737-8/8-200/BBJ MAX 8	82,417	941	10
11	B737-9 MAX	88,541	42	10

For low soil capacity, modulus of elasticity values for PCC Surface, Lean Concrete, Crushed Aggregate, and Uncrushed Aggregate layers were defined as 27,579.04, 4,826.33, 300.18, and 101.50 MPa respectively. Poisson's ratio values of PCC Surface, Lean Concrete, Crushed Aggregate, and Uncrushed Aggregate layers were determined as 0.15, 0.2, 0.35, and 0.35 MPa respectively. Subgrade modulus of elasticity and Poisson's ratio values were defined as 61.94 and 0.4 respectively. On the other hand, for the high strength capacity of the soil, Crushed Aggregate and Uncrushed Aggregate layers were defined as 430.49 and 167.75 MPa respectively. Subgrade modulus of elasticity was defined as 155.17.

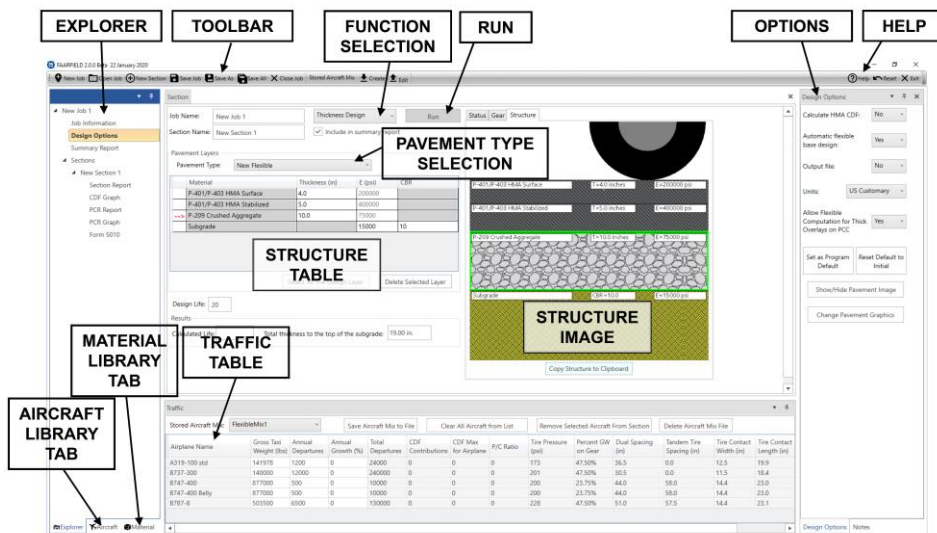
## SOFTWARE PROPERTIES

The design of rigid airport pavements under different soil conditions is the focus of this study. Such problems constitute an extremely complex engineering problem involving many interacting variables. The calculation of the design method for an airport pavement is very computationally intensive, so the FAA has designed a computer program called FAARFIELD (Federal Aviation Administration Rigid and Flexible Iterative Elastic Layered Design) to assist pavement engineers. The FAARFIELD is offered as a user-friendly and completely free software.

**Table 3.** Airplane Information Used in High Traffic Case

No.	Name	Gross Wt. (kg)	Annual Departures (%)	Annual Growth
1	A319-100 opt	68,400	10,684	10
2	A320-200 opt	78,400	35,967	10
3	A321-200 opt	93,900	31,365	10
4	A300-600 Std Bogie	172,600	1,702	10
5	A310-200	142,900	1,926	10
6	A318-100 opt	68,400	626	10
7	A330-200 WV057	236,900	2,850	10
8	A330-300 WV022	233,900	1,066	10
9	A330-300 std	230,900	3,109	10
10	A340-300 opt	277,400	2,328	10
11	A340-300 opt Belly	277,400	2,328	10
12	B737-800	79,242	38,894	10
13	B737-300	63,503	1,525	10
14	B737-400	68,266	3,849	10
15	B737-500	60,781	1,095	10
16	B737-700	70,307	4,621	10
17	B757-200	116,100	1,693	10
18	B767-300 ER	175,994	1,072	10
19	B777-200 LR	348,358	880	10
20	B777-300 ER	352,441	997	10
21	B777F	348,722	1,720	10
22	B777-300 ER	352,441	686	10
23	A380-800 WV006	575,000	5,000	10
24	A380-800 WV006 Belly	575,000	5,000	10
25	MD-83	73,016	13,954	10

As far as the design procedure is concerned, it provides a design method based on structural analysis based on layered elastic and three-dimensional finite element method developed for use in calculating design thicknesses for airfield pavements. Layered elastic and three-dimensional finite element-based design theories are adopted within the software to address the impact of new complex gear and wheel arrangements. The FAARFIELD program also requires information on the fleet of aircraft that the airport will acquire in Figure 1 (Bhalla, Vankar and Zala, 2013).



**Figure 1.** Example View of FAARFIELD Program (Bhalla et al., 2013)

The FAARFIELD program includes four functions (Figure 2) (Brill, 2021).

- Thickness Design: Compute required thickness per AC 150/5320-6 (Office of Airport Safety & Standards - Airport Engineering Division, 2021).
- Life: The structural life for a given structural system is calculated for the traffic it will be exposed to during its service life

- Compaction: Compute subgrade compaction requirements per AC 150/5320-6 (Office of Airport Safety & Standards - Airport Engineering Division, 2021). for a given structure and traffic mix. (Applies to completed designs.)
- PCR: Compute Pavement Classification Rating (PCR) for the structure and traffic mix.

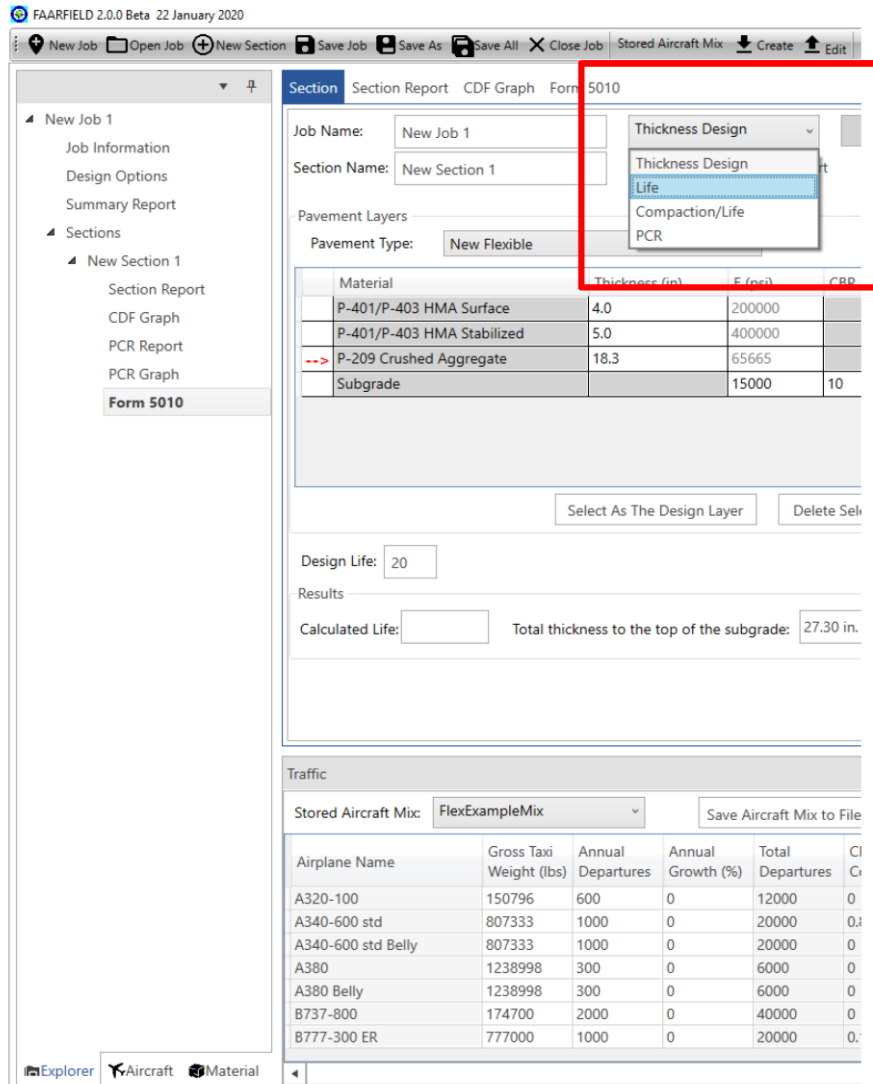
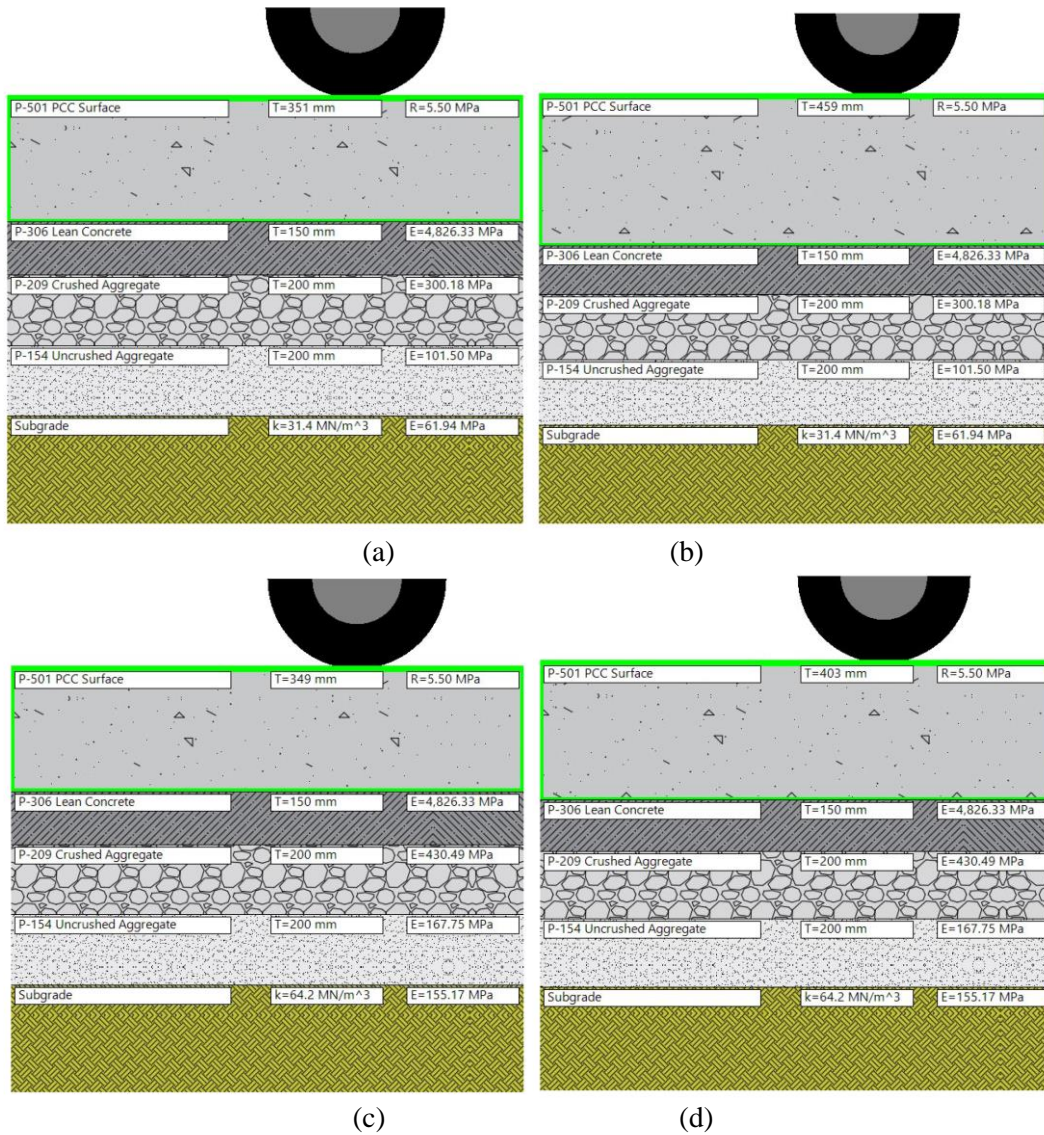


Figure 2. Example View of FAARFIELD Program Menu (Brill, 2021)

## PAVEMENT DESIGNS

In Case-I, the total thickness value up to the top of the subgrade is defined as 901 mm in total. The layers that make up this value are PCC (Portland cement concrete) Surface, Lean Concrete, Crushed Aggregate, Uncrushed Aggregate, and Subgrade. PCC Surface, Lean Concrete, Crushed Aggregate, and Uncrushed Aggregate layer thicknesses are 351, 150, 200, and 200 mm respectively as defined in Figure 3(a). In Case-II, the total thickness value up to the top of the subgrade is defined as 1009 mm in total. PCC Surface, Lean Concrete, Crushed Aggregate, and Uncrushed Aggregate layer thicknesses are 459, 150, 200, and 200 mm respectively as defined in Figure 3(b). In Case-III, the total thickness value up to the top of the subgrade is defined as 899 mm in total. PCC Surface, Lean Concrete, Crushed Aggregate, and Uncrushed Aggregate layer thicknesses are 349, 150, 200, and 200 mm respectively as defined in Figure 3(c). The total thickness value up to the top of the subgrade is defined as 953 mm in total. PCC Surface, Lean Concrete, Crushed Aggregate, and Uncrushed Aggregate layer thicknesses are 403, 150, 200, and 200 mm respectively as defined in Figure 3(d).



**Figure 3.** Pavement Structure Information by Layer View of FAARFIELD Program a) Case-I, b) Case-II, c) Case-III, and d) Case-IV

## RESULTS

### Case-I

P/C ratios for each aircraft type were obtained through analysis and calculated by the software. The A321neo with the highest weight of 97.4 t is considered in the analysis. The CDF contribution value for this aircraft was calculated as 0.86 and 0.04 for 783 and 39 annual departures, respectively (Table 2 and Table 4). On the other hand, the same values were obtained for CDF max for this aircraft. The P/C ratio values are 3.36 for both number of departures for this aircraft. A320-200std and B737-BBJ2 aircraft with the highest departure values were included in the calculations as 73.9 and 79.25 t, respectively. CDF contribution values are calculated as 0 and 0.04 for A320-200std and B737-BBJ2 aircraft, respectively. Moreover, CDF max contribution values are calculated as 0 and 0.07 for A320-200std and B737-BBJ2 aircraft, respectively. P/C ratio values are calculated as 3.7 and 3.53 for A320-200std and B737-BBJ2 aircraft, respectively (Table 2 and Table 4). Details of the subgrade compaction requirements for noncohesive soil are presented in Table 5. Table 5 shows the compaction values and depths of the superstructure and subgrade layers for noncohesive soil. For Case-I, the critical aircraft mobility was observed for the A321neo aircraft. For this aircraft, compaction depths of 0-358, 358-494, 494-1277, and 1277-2552 mm should be achieved for maximum dry density values of 100, 95, 90, and 85 percent from the pavement surface. For compaction depth from the top of the subgrade, maximum dry density values of 90 and 85 percent should be achieved at 0-375 and 375-1651 mm respectively (Table 5). For Case-I, critical aircraft mobility was observed for the A321neo aircraft for cohesive soil. For this aircraft, compaction depths of 0-349, 349-442, 442-616, and 616-1229 mm should be achieved for maximum



dry density values of 95, 90, 85, and 80 percent from the pavement surface. For compaction depth from the top of the subgrade, maximum dry density values of 80 percent should be achieved at 0-327 mm respectively (Table 6). The CDF plot for Case-I is presented in the study as in Figure 4. From this graph, the fatigue effects of the aircraft on the runway pavement can be easily evaluated. When this situation is evaluated for Case-I, the highest fatigue effect will be observed with the A321neo aircraft, while the lowest fatigue effect will occur with the landing and take-off effect of the B737-400 aircraft (Figure 4).

**Table 4.** Airplane Departure CDF and P/C Ratio Results in Case-I

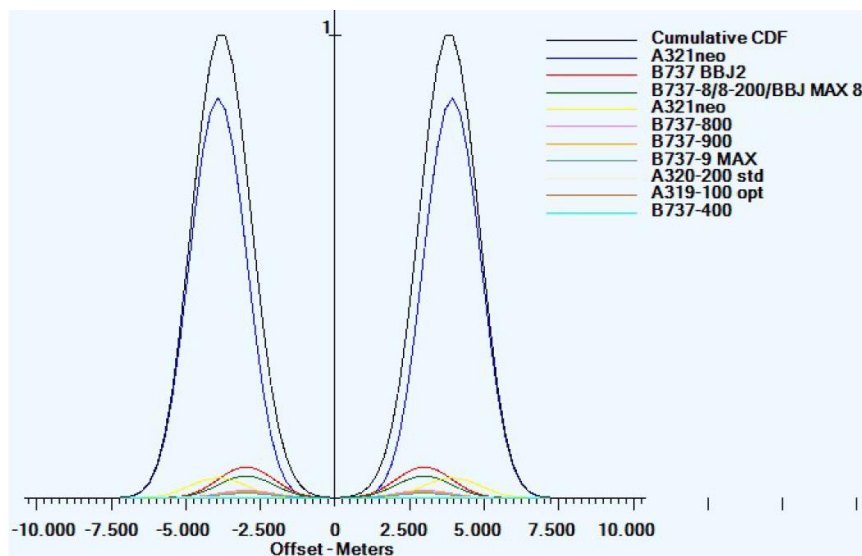
No.	Name	CDF Contribution	CDF Max for Airplane	P/C Ratio
1	A319-100 opt	0.00	0.00	3.66
2	A320-200 std	0.00	0.00	3.7
3	A321neo	0.86	0.86	3.36
4	A321neo	0.04	0.04	3.36
5	B737-400	0.00	0.00	3.52
6	B737-800	0.01	0.02	3.53
7	B737-700	0.00	0.00	3.68
8	B737 BBJ2	0.04	0.07	3.53
9	B737-900	0.01	0.01	3.53
10	B737-8/8-200/BBJ MAX 8	0.03	0.05	3.47
11	B737-9 MAX	0.01	0.01	3.39

**Table 0.** Subgrade Compaction Requirements for Noncohesive Soil Used in Case-I

Percent Maximum Dry Density(%)	Depth of compaction from pavement surface (mm)	Depth of compaction from top of subgrade (mm)	Critical Airplane for Compaction
100	0 - 358	--	A321neo
95	358 - 494	--	A321neo
90	494 - 1277	0 - 375	A321neo
85	1277 - 2552	375 - 1651	A321neo

**Table 6.** Subgrade Compaction Requirements for Cohesive Soil Used in Case-I

Percent Maximum Dry Density(%)	Depth of compaction from pavement surface (mm)	Depth of compaction from top of subgrade (mm)	Critical Airplane for Compaction
95	0 - 349	--	A321neo
90	349 - 442	--	A321neo
85	442 - 616	--	A321neo
80	616 - 1229	0 - 327	A321neo



**Figure 4.** CDF Values in Case-I

**Case-II**

P/C ratios for each aircraft type were obtained through analysis and calculated by the software. The A380-800 WV006 and A380-800 WV006 Belly are the highest weight of 575 t is considered in the analysis. The CDF contribution value for these aircraft was calculated as 0 for 5000 annual departures of both airplanes, respectively (Table 3). On the other hand, the CDF max values were obtained as 0 and 0.03 for CDF max for this aircraft. The P/C ratio values are 3.78 and 4.2 for both A380-800 WV006 and A380-800 WV006 Belly airplanes and a number of 5000 departures. A320-200opt and B737-800 aircraft with the highest departure with values 35967 and 38894 were included in the calculations as 78.4 and 79.242 t, respectively. CDF contribution values are calculated as 0 for A320-200opt and B737-800 aircraft, respectively. Moreover, CDF max contribution values are calculated as 0 for A320-200opt and B737-800 aircraft, respectively. P/C ratio values are calculated as 3.67 and 3.53 for A320-200opt and B737-800 aircraft, respectively (Table 7). Details of the subgrade compaction requirements for noncohesive soil defined in Case-II are presented in Table 8. Table 8 shows the compaction values and depths of the superstructure and subgrade layers for noncohesive soil. For Case-II, critical aircraft mobility was observed for the B777-300ER aircraft under the condition of noncohesive soil. For this aircraft, compaction depths of 0-417, 417-1109, 1109-3517, and 3517-5882 mm should be achieved for maximum dry density values of 100, 95, 90, and 85 percent from the pavement surface. For compaction depth from the top of the subgrade, maximum dry density values of 95, 90, and 85 percent should be achieved at 0-99, 99-2527 and 2527-4872 mm respectively (Table 8). Details of the subgrade compaction requirements for cohesive soil are presented in Table 9. Table 9 shows the compaction values and depths of the superstructure and subgrade layers for cohesive soil. For Case-II, the critical aircraft mobility was observed for the B777-300ER aircraft for cohesive soil. For this aircraft, compaction depths of 0-407, 407-577, 577-1943, and 1943-3447 mm should be achieved for maximum dry density values of 95, 90, 85, and 80 percent from the pavement surface. For compaction depth from the top of the subgrade, maximum dry density values of 85 and 80 percent should be achieved at 0-934 and 934-2348 mm respectively (Table 9).

**Table 1.** Airplane Departure CDF and P/C Ratio Results in Case-II

No.	Name	CDF Contribution	CDF Max for Airplane	P/C Ratio
1	A319-100 opt	0.00	0.00	3.66
2	A320-200 opt	0.00	0.00	3.67
3	A321-200 opt	0.00	0.00	3.42
4	A300-600 Std Bogie	0.00	0.00	3.38
5	A310-200	0.00	0.00	3.69
6	A318-100 opt	0.00	0.00	3.65
7	A330-200 WV057	0.00	0.00	1.86
8	A330-300 WV022	0.00	0.00	1.87
9	A330-300 std	0.00	0.00	1.88
10	A340-300 opt	0.00	0.00	1.81
11	A340-300 opt Belly	0.00	0.00	3.78
12	B737-800	0.00	0.00	3.53
13	B737-300	0.00	0.00	3.8
14	B737-400	0.00	0.00	3.52
15	B737-500	0.00	0.00	3.82
16	B737-700	0.00	0.00	3.68
17	B757-200	0.00	0.00	3.92
18	B767-300 ER	0.00	0.00	3.63
19	B777-200 LR	0.09	0.09	3.86
20	B777-300 ER	0.13	0.13	3.84
21	B777F	0.70	0.70	3.86
22	B777-300 ER	0.09	0.09	3.84
23	A380-800 WV006	0.00	0.00	3.78
24	A380-800 WV006 Belly	0.00	0.03	4.2
25	MD-83	0.00	0.00	3.42

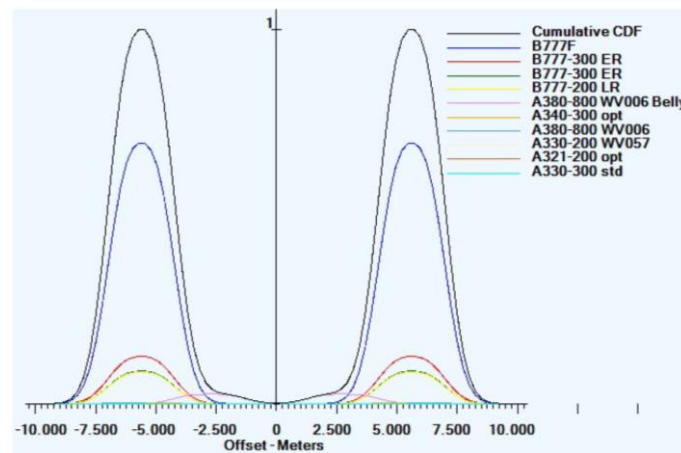
The CDF plot for Case-II is presented in the study as in Figure 5. From this graph, the fatigue effects of the aircraft on the runway pavement can be easily evaluated. When this situation is evaluated for Case-II, the highest fatigue effect will be observed with the B737F aircraft, while the lowest fatigue effect will occur with the landing and take-off effect of the A330-300std aircraft (Figure 5).

**Table 2.** Subgrade Compaction Requirements for Noncohesive Soil Used in Case-II

Percent Maximum Dry Density(%)	Depth of compaction from pavement surface (mm)	Depth of compaction from top of subgrade (mm)	Critical Airplane for Compaction
100	0 - 417	--	B777-300 ER
95	417 - 1109	0 - 99	B777-300 ER
90	1109 - 3537	99 - 2527	B777-300 ER
85	3537 - 5882	2527 - 4872	B777-300 ER

**Table 3.** Subgrade Compaction Requirements for Cohesive Soil Used in Case-II

Percent Maximum Dry Density(%)	Depth of compaction from pavement surface (mm)	Depth of compaction from top of subgrade (mm)	Critical Airplane for Compaction
95	0 - 407	--	B777-300 ER
90	407 - 577	--	B777-300 ER
85	577 - 1943	0 - 934	B777-300 ER
80	1943 - 3447	934 - 2438	B777-300 ER



**Figure 5.** CDF Values in Case-II

### Case-III

Aircraft weights, annual growth rates, and number of departures used in the coatings during the analysis are given in Table 2 as in Case-I. Furthermore, maximum contribution ratios and CDF values for each aircraft are presented (Table 10). On the other hand, P/C ratios for each aircraft type were obtained through analysis and calculated by the software. The A321neo with the highest weight of 97.4 t is considered in the analysis. The CDF contribution value for this aircraft was calculated as 0.91 and 0.05 for 783 and 39 annual departures, respectively (Table 10). On the other hand, the same values were obtained for CDF max for this aircraft. The P/C ratio values are 3.36 for both number of departures. A320-200std and B737-BBJ2 aircraft with the highest departure values were included in the calculations as 73.9 and 79.25 t, respectively. CDF contribution values are calculated as 0 and 0.02 for A320-200std and B737-BBJ2 aircraft, respectively. Moreover, CDF max contribution values are calculated as 0 and 0.02 for A320-200std and B737-BBJ2 aircraft, respectively. P/C ratio values are calculated as 3.7 and 3.53 for A320-200std and B737-BBJ2 aircraft, respectively (Table 10). Details of the subgrade compaction requirements for noncohesive soil are presented in Table 11. Table 11 shows the compaction values and depths of the superstructure and subgrade layers for noncohesive soil. For Case-III, the critical aircraft mobility was observed for the A321neo aircraft under the condition of noncohesive soil. For this aircraft, compaction depths of 0-406, 406-928, 928-2041, and 2041-3250 mm should be achieved for maximum dry density values of 100, 95, 90, and 85 percent from the pavement surface. For compaction depth from the top of the subgrade, maximum dry density values of 95, 90, and 85 percent should be achieved at 0-29, 29-1142, and 1142-2352 mm respectively (Table 11). Details of the subgrade compaction requirements for cohesive soil are presented in Table 12. Table 12 shows the compaction values and depths of the superstructure and subgrade layers for cohesive soil. For Case-III, the critical aircraft mobility was observed for the A321neo aircraft for cohesive soil. For this aircraft, compaction depths of 0-393, 393-577, 577-1273, and 1273-1996 mm should be achieved for maximum dry density values of 95, 90, 85, and 80 percent from the pavement surface. For compaction depth from the top of the subgrade, maximum dry density values of 85 and 80 percent should be achieved at 0-374 and 374-1097 mm respectively (Table 12). The CDF plot for Case-III is presented in the study as in Figure 6. From this graph, the fatigue effects of the aircraft on the runway pavement can be easily evaluated. When

this situation is evaluated for Case-III, the highest fatigue effect will be observed with the A321neo aircraft, while the lowest fatigue effect will occur with the landing and take-off effect of the B737-400 aircraft (Figure 6).

**Table 4.** Airplane Departure CDF and P/C Ratio Results in Case-III

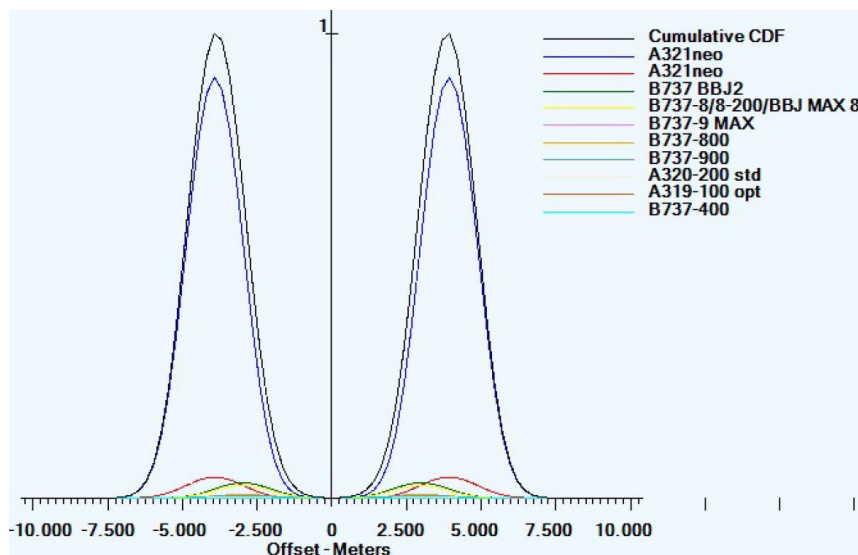
No.	Name	CDF Contribution	CDF Max for Airplane	P/C Ratio
1	A319-100 opt	0.00	0.00	3.66
2	A320-200 std	0.00	0.00	3.7
3	A321neo	0.91	0.91	3.36
4	A321neo	0.05	0.05	3.36
5	B737-400	0.00	0.00	3.52
6	B737-800	0.00	0.01	3.53
7	B737-700	0.00	0.00	3.68
8	B737 BBJ2	0.02	0.03	3.53
9	B737-900	0.00	0.01	3.53
10	B737-8/8-200/BBJ MAX 8	0.02	0.03	3.47
11	B737-9 MAX	0.00	0.01	3.39

**Table 5.** Subgrade Compaction Requirements for Noncohesive Soil Used in Case-III

Percent Maximum Dry Density(%)	Depth of compaction from pavement surface (mm)	Depth of compaction from top of subgrade (mm)	Critical Airplane for Compaction
100	0 - 406	--	A321neo
95	406 - 928	0 - 29	A321neo
90	928 - 2041	29 - 1142	A321neo
85	2041 - 3250	1142 - 2352	A321neo

**Table 6.** Subgrade Compaction Requirements for Cohesive Soil Used in Case-III

Percent Maximum Dry Density(%)	Depth of compaction from pavement surface (mm)	Depth of compaction from top of subgrade (mm)	Critical Airplane for Compaction
95	0 - 393	--	A321neo
90	393 - 577	--	A321neo
85	577 - 1273	0 - 374	A321neo
80	1273 - 1996	374 - 1097	A321neo



**Figure 6.** CDF Values in Case-III

**Case-IV**

Aircraft weights, annual growth rates, and number of departures used in the coatings during the analysis are given in Table 3 as in Case-II. Furthermore, maximum contribution ratios and CDF values for each aircraft are presented (Table 13). On the other hand, P/C ratios for each aircraft type were obtained through analysis and calculated by the software. The A380-800 WV006 and A380-800 WV006 Belly are the highest weight of 575 t is considered in the

analysis. The CDF contribution value for these aircraft was calculated as 0 for 5000 annual departures for both airplanes, respectively (Table 13). On the other hand, the same values were obtained for CDF max for this aircraft. The P/C ratio values are 3.36 for both number of departures. A320-200std and B737-800 aircraft with the highest departure values were included in the calculations as 78.4 and 79.242 t, respectively. CDF contribution values are calculated as 0 and 0.02 for A320-200std and B737-800 aircraft, respectively. Moreover, CDF max values are calculated as 0 for A320-200std and B737-800 aircraft, respectively. P/C ratio values are calculated as 3.67 and 3.53 for A320-200std and B737-800 aircraft, respectively (Table 13). Details of the subgrade compaction requirements for noncohesive soil are presented in Table 14. Table 14 shows the compaction values and depths of the superstructure and subgrade layers for noncohesive soil. For Case-IV, the critical aircraft mobility was observed for the B777-300ER aircraft under the condition of noncohesive soil. For this aircraft, compaction depths of 0-486, 486-2618, and 2618-4597 mm should be achieved for maximum dry density values of 100, 95, and 90 percent from the pavement surface. For compaction depth from the top of the subgrade, maximum dry density values of 95 and 90 percent should be achieved at 0-1664, and 1664-3644 mm respectively (Table 14). Details of the subgrade compaction requirements for cohesive soil are presented in Table 15. Table 15 shows the compaction values and depths of the superstructure and subgrade layers for cohesive soil. For Case-IV, critical aircraft mobility was observed for the B777-300ER aircraft for cohesive soil. For this aircraft, compaction depths of 0-467, 467-1795, 1795-3220, and 3220-4517 mm should be achieved for maximum dry density values of 95, 90, 85, and 80 percent from the pavement surface. For compaction depth from the top of the subgrade, maximum dry density values of 85 and 80 percent should be achieved at 0-842, 842-2267, and 2267-3653 mm respectively (Table 15).

**Table 13.** Airplane Departure CDF and P/C Ratio Results in Case-IV

No.	Name	CDF Contribution	CDF Max for Airplane	P/C Ratio
1	A319-100 opt	0.00	0.00	3.66
2	A320-200 opt	0.00	0.00	3.67
3	A321-200 opt	0.03	0.11	3.42
4	A300-600 Std Bogie	0.00	0.00	3.38
5	A310-200	0.00	0.00	3.69
6	A318-100 opt	0.00	0.00	3.65
7	A330-200 WV057	0.00	0.00	1.86
8	A330-300 WV022	0.00	0.00	1.87
9	A330-300 std	0.00	0.00	1.88
10	A340-300 opt	0.01	0.01	1.81
11	A340-300 opt Belly	0.00	0.00	3.78
12	B737-800	0.00	0.00	3.53
13	B737-300	0.00	0.00	3.8
14	B737-400	0.00	0.00	3.52
15	B737-500	0.00	0.00	3.82
16	B737-700	0.00	0.00	3.68
17	B757-200	0.00	0.00	3.92
18	B767-300 ER	0.00	0.00	3.63
19	B777-200 LR	0.11	0.11	3.86
20	B777-300 ER	0.17	0.17	3.84
21	B777F	0.55	0.55	3.86
22	B777-300 ER	0.12	0.12	3.84
23	A380-800 WV006	0.00	0.01	3.78
24	A380-800 WV006 Belly	0.00	0.02	4.2
25	MD-83	0.00	0.00	3.42

**Table 7** Subgrade Compaction Requirements for Noncohesive Soil Used in Case-IV

Percent Maximum Dry Density(%)	Depth of compaction from pavement surface (mm)	Depth of compaction from top of subgrade (mm)	Critical Airplane for Compaction
100	0 - 486	--	B777-300 ER
95	486 - 2618	0 - 1664	B777-300 ER
90	2618 - 4597	1664 - 3644	B777-300 ER

**Table 8** Subgrade Compaction Requirements for Cohesive Soil Used in Case-IV

Percent Maximum Dry Density(%)	Depth of compaction from pavement surface (mm)	Depth of compaction from top of subgrade (mm)	Critical Airplane for Compaction
--------------------------------	--	---	----------------------------------

95	0 - 467	--	B777-300 ER
90	467 - 1795	0 - 842	B777-300 ER
85	1795 - 3220	842 - 2267	B777-300 ER
80	3220 - 4517	2267 - 3563	B777-300 ER

The CDF plot for Case-IV is presented in Figure 7. From this graph, the fatigue effects of the aircraft on the runway pavement can be easily evaluated. When this situation is evaluated for Case-IV, the highest fatigue effect will be observed with the B777F. In contrast, the lowest fatigue effect will occur with the landing and take-off effect of the A330-300std aircraft (Figure 7).

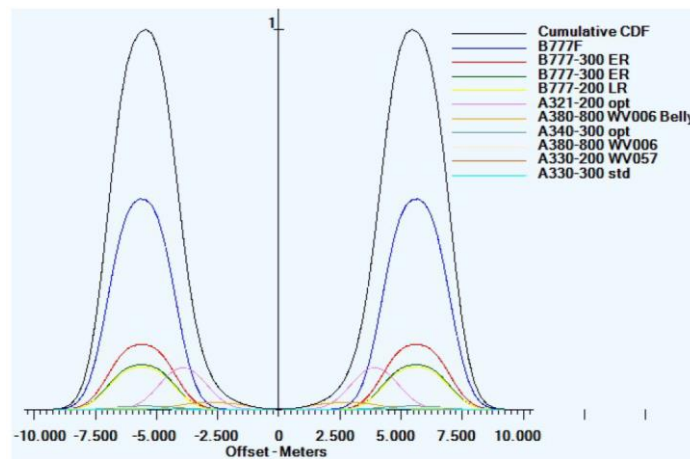


Figure 7. CDF Values in Case-IV

## CONCLUSIONS

A summary of the results of the data obtained from the analysis of rigid pavement designs for airport runways under strong and weak soil conditions for low and high traffic airports with the FAARFIELD program is given below.

- For the low and high air traffic runway operating conditions examined in the study, the rigid pavement thickness for low traffic-low ground capacity is 351 mm, while the pavement thicknesses for high traffic-low ground capacity, low traffic-high ground capacity, and high traffic-high ground capacity are 459, 349 and 403 mm, respectively.
- Under low air traffic runway operating conditions, the CDF values obtained for the highest number of departures were calculated as 0.07 for the low soil strength condition.
- Under high density air traffic runway operating conditions, the CDF values obtained for the highest number of take-offs were calculated as 0 for the low soil strength condition.
- Under low air traffic runway operating conditions, the CDF values obtained for the highest number of take-offs were calculated as 0.03 for the high ground strength condition.
- Under runway operating conditions characterized by high air traffic, the CDF values obtained for the highest number of take-offs were calculated as 0 for the high soil strength condition.
- For low soil strength, the highest CDF values were 0.86 and 0.70 for runways operated with low and high air traffic, respectively.
- For high soil strength, the highest CDF values were 0.91 and 0.55 for runways operated with low and high air traffic, respectively.

## REFERENCES

- Akgül, M., Doğan, O., & Etili, S. (2020). Investigation of Mechanical Properties of Granulated Waste Rubber Aggregates Substituted Self-Compacting Concrete Mortar Produced with Different Cement. *Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi*, 12(2), 787–798. <https://doi.org/10.29137/umagd.734614>
- Akgül, M., & Etili, S. (2023). Effect of Partial Inclusion of Tiles and Brick Waste as Binders in SCM Elements on Fresh State and Early Age Mechanical Properties. 3rd International Conference on Innovative Academic Studies, 699–706.
- Bhalla, A. S. B., Vankar, A. A., & Zala, L. B. (2013). Runway Pavement Design of a proposed Airport with the use of FAARFIELD Software. *Int. J. Sci. Mod. Eng*, 44–49.

- Bingöl, G. (2000). Havaalan üstyaplarının tasarım ve iyileştirilmesi yöntemleri. Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Brill, D. R. (2021). FAARFIELD 2.0 Update. Federal Aviation Administration.
- Cemalgil, S., & Etili, S. (2020). Effects of Specimen Size on The Compressive Strength of Rubber Modified Self-Compacting Concrete. *International Journal of Pure and Applied Sciences*, 6(2), 118–129. <https://doi.org/10.29132/ijpas.789480>
- Cemalgil, S., Etili, S., & Onat, O. (2018). Curing effect on mortar properties produced with styrene-butadiene rubber. *Computers and Concrete*, 21(6), 705–715. <https://doi.org/10.12989/cac.2018.21.6.705>
- Cemalgil, S., Onat, O., Tanaydın, M. K., & Etili, S. (2021). Effect of waste textile dye adsorbed almond shell on self compacting mortar. *Construction and Building Materials*, 300, 123978. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123978>
- Doganis, R. (2005). The airport business. Routledge.
- Etili, S. (2022a). Evaluation of curing time for micro concrete mixes containing silica fume, nano-silica and fly ash. *İstanbul Ticaret Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 21(42), 304–316. <https://doi.org/10.55071/ticaretifbd.1093891>
- Etili, S. (2022b). Investigation of the Effect of Glass Sand Used in SCC on the Behavior of the SCC Stress- Strain Relationship. *International Journal of Innovative Engineering Applications*, 6(2), 237–244. <https://doi.org/10.46460/ijiea.1108476>
- Etili, S. (2023a). Effect of glass sand used as aggregate on micro-concrete properties. *Journal of the Croatian Association of Civil Engineers*, 75(01), 39–51. <https://doi.org/10.14256/JCE.3538.2022>
- Etili, S. (2023b). Evaluation of the effect of silica fume on the fresh, mechanical and durability properties of self-compacting concrete produced by using waste rubber as fine aggregate. *Journal of Cleaner Production*, 384, 135590. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135590>
- Etili, S., Cemalgil, S., & Onat, O. (2018). Mid-Temperature Thermal Effects on Properties of Mortar Produced with Waste Rubber as Fine Aggregate. *International Journal of Pure and Applied Sciences*, 4(1), 10–22. <https://doi.org/10.29132/ijpas.341413>
- Etili, S., Cemalgil, S., & Onat, O. (2021). Effect of pumice powder and artificial lightweight fine aggregate on self-compacting mortar. *Computers and Concrete*, 27(3), 241–252. <https://doi.org/10.12989/cac.2021.27.3.241>
- Etili, S., Yılmaz, T., & Hansu, O. (2024). Effect of White-Portland cement containing micro and nano silica on the mechanical and freeze-thaw properties of self compacting mortars. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 50, 101614. <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2023.101614>
- Gesoglu, M., Güneyisi, E., Hansu, O., Etili, S., & Alhassan, M. (2017). Mechanical and fracture characteristics of self-compacting concretes containing different percentage of plastic waste powder. *Construction and Building Materials*, 140, 562–569. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.02.139>
- Hansu, O., & Etili, S. (2022). Beton ile Üretilen Suda Yüzebilen Kano Tasarımı Üzerine Bir Araştırma. *European Journal of Science and Technology*, (35), 330–334. <https://doi.org/10.31590/ejosat.1052105>
- Office of Airport Safety & Standards - Airport Engineering Division. (2021). Airport Pavement Design and Evaluation. In 150/5320-6G.
- Salgın, T. (2015). Havaalanı kaplamalarının ve yüzey özelliklerinin incelenmesi (Master Thesis). Erciyes University,.
- Zaniewski, J., & others. (1991). Unified methodology for airport pavement analysis and design. vol. 1, state of the art.



# Kahramanmaraş Sütçü İmam University

## Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 15.03.2024  
Kabul Tarihi : 02.04.2024

Received Date : 15.03.2024  
Accepted Date : 02.04.2024

### INVESTIGATION OF THE EFFECTIVENESS IN THE SOLID PHASE EXTRACTION STUDIES OF THE GRAPHENE HYBRIDS

### GRAFEN HİBRİTLERİNİN KATI FAZ EKSTRAKSİYON ÇALIŞMALARINDAKİ ETKİNLİĞİNİN ARAŞTIRILMASI

Zaman MOHAMMED<sup>1</sup> (ORCID:0000-0002-3457-3953)  
Derya Kılıçaslan<sup>2</sup> (ORCID: 0000-0001-7830-8214)  
Muharrem KARABÖRK<sup>1\*</sup> (ORCID: 0000-0002-5996-6243)

<sup>1</sup>Department of Chemistry, Kahramanmaraş Sütçü İmam University, Kahramanmaraş, 46050, Turkey

<sup>2</sup>Afsin Vocational School, Department of Chemistry and Chemical Processing Technologies, Kahramanmaraş Sütçü İmam University, Kahramanmaraş, Turkey

\*Corresponding Author: M. Karabörk, mkarabork@ksu.edu.tr.

#### ABSTRACT

The objective of this study is to evaluate the effectiveness of using a graphene-based hybrid material as a substance that can attract and separate other substances in a solid-phase extraction process. The goal is to reduce the potential adverse effects of Pb(II) and Hg(II) metal ions on human health and the environment. Graphene oxide was produced on graphite using the Hummers process during the early phase, which involved the use of potent oxidizers. Afterwards, graphene oxide (GO) was treated with 3-(trimethoxycylene)propylamine to silanize it. Then, the silanized GO was combined with 3,5-dichloro-salisylaldehyde to create the graphen-Schiff base material. The structure of the compounds was determined at each stage of synthesis using a range of analytical techniques, such as UV-Vis spectroscopy, Fourier transform infrared spectroscopy, X-ray diffraction, scanning electron microscopy, transmission electron microscopy, thermogravimetric analysis, and energy dispersive X-ray spectroscopy. The study investigated the influence of pH, temperature, contact time, and other material characteristics on adsorption. The study demonstrated that the graphene-based hybrid material is highly efficient at adsorbing heavy metal ions from both waste and drinking water. This demonstrates the potential of graphene in environmental applications, as it can effectively remove heavy metal contaminants.

**Keywords:** Graphene oxide, graphene-based hybrid material, adsorption, heavy metals

#### ÖZET

Bu çalışmanın amacı, grafen bazlı hibrit bir malzemenin katı faz ekstraksiyon işleminde diğer maddeleri çekebilen ve ayırabilen bir madde olarak kullanılmasının etkinliğini değerlendirmektir. Amaç, Pb(II) ve Hg(II) metal iyonlarının insan sağlığı ve çevre üzerindeki potansiyel olumsuz etkilerini azaltmaktır. Grafen oksit, güçlü oksitleyicilerin kullanımını içeren ilk aşamada Hummers prosesi kullanılarak grafit üzerinde üretilmiştir. Daha sonra, GO silanize etmek için 3-(trimetoksisilen)propilamin ile muamele edilmiştir. Daha sonra silanize edilmiş GO, grafen-oksit-Schiff baz malzemesini oluşturmak için 3,5-dikloro-salisilaldehit ile birleştirildi. Bileşiklerin yapısı sentezin her aşamasında UV-Vis spektroskopisi, Fourier dönüşümlü kızılötesi spektroskopisi, X-ışını kırınımı, taramalı elektron mikroskopisi, transmisyon elektron mikroskopisi, termogravimetrik analiz ve enerji dağılımlı X-ışını spektroskopisi gibi bir dizi analitik teknik kullanılarak belirlendi. Çalışmada pH, sıcaklık, temas süresi ve diğer malzeme özelliklerinin adsorpsiyon üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Çalışma, grafen bazlı hibrit malzemenin hem atık hem de içme suyundan ağır metal iyonlarını adsorbe etmede oldukça verimli olduğunu göstermiştir. Bu durum, ağır metal kirleticileri etkili bir şekilde uzaklaştırabildiği için grafenin çevresel uygulamalardaki potansiyelini göstermektedir.

**Anahtar Kelimeler:** Grafen oksit, ağır metaller, adsorpsiyon, grafen bazlı hibrit malzeme

ToCite: MOHAMMED, Z., & KILIÇASLAN, D., KARABÖRK, M., (2024). INVESTIGATION OF THE EFFECTIVENESS IN THE SOLID PHASE EXTRACTION STUDIES OF THE GRAPHENE HYBRIDS. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 27(3), 1033-1043.



## INTRODUCTION

Heavy metals are defined as naturally occurring elements with a higher density and a large atomic weight among metallic elements (Abd Elnabi et al., 2023). These metals are one of the most investigated pollutants that have been widely studied by researchers due to their toxicity (Ali et al., 2019; Masindi & Muedi, 2018). These naturally occurring elements in the environment, together with factors such as modern industrialization, urbanization, anthropogenic activities, and fertilizer use, have led to an increase in their environmental levels and therefore to high levels of exposure to living organisms (Ali et al., 2019; Balali-Mood et al., 2021).

Heavy metals include the most toxic metalloids, such as chromium, mercury, arsenic, cadmium, lead, nickel, copper, and zinc. However, the most common ones in the environment are chromium, manganese, nickel, lead, cadmium, copper, and zinc (Gabriel & Elena, 2022). Humans can come into contact with heavy metals as a result of industrial activities, and this contact can occur through various routes such as digestion, respiration, and dermal absorption (Ali et al., 2019). Heavy metals are categorized as essential or non-essential according to their function in biological systems. The presence of excessive amounts of these metals can cause physiological or morphological disorders and genetic mutations (Mitra et al., 2022).

The World Health Organization (WHO) classifies trace elements into three groups based on their importance and potential toxicity: essential elements (zinc, iodine, molybdenum, copper, selenium, and chromium), possibly essential elements (manganese, silicon, boron, vanadium, and nickel), and potentially toxic elements (lead, cadmium, fluorine, mercury, aluminum, arsenic, barium, lithium, and tin) (Bhattacharya et al., 2016; Aliasgharpour & Marjan, 2013).

Solid-phase extraction (SPE) and solid-phase microextraction (SPME) are sample preparation techniques used for the extraction of analytes from complex matrices. SPE is widely used in the extraction of heavy metals from environmental samples such as water, soil, and air because it offers an effective solution to the problems associated with phase separation and processing (Ingrassia et al., 2024; Zhou et al., 2023). On the other hand, SPME is a solvent-free extraction technique widely used for the determination of trace components in various samples, including beers (Lucena, 2023). SPME offers advantages such as cost-effectiveness, versatility, and automation, making it a popular choice for the analysis of aroma compounds, flavors, bad tastes, and exogenous contaminants in food and beverage samples (Pasupuleti & Huang, 2023). Both SPE and SPME techniques have been combined with atomic spectroscopy for the determination of heavy metals in environmental samples.

This study created a hybrid imine-graphene material to remove heavy metal ions like Pb(II) and Hg(II) from environmental water sources. Graphene oxide (GO) was first produced by oxidizing H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> and KMnO<sub>4</sub> using the Hummers method. Silanizing GO using 3-(trimethoxysilyl)propylamine followed. The GO-Schiff basic material was made from silanized GO and 3,5-dichloro-salicylaldehyde. Compound structures were determined using various techniques, including UV-Vis, FT-IR, TGA, XRD, TEM, EDX, and SEM. Next, batch experiments were performed to study Pb(II) and Hg(II) ion adsorption in water. ICP-AES was used for the experiments.

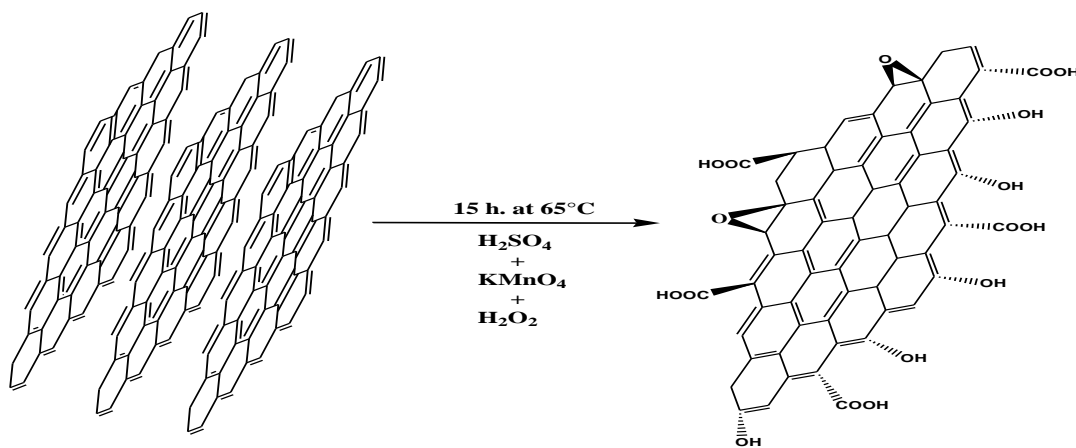
## MATERIAL AND METHOD

### *General Methods*

The functional groups of compounds were determined after each treatment using X-ray powder diffraction, namely the Perkin-Elmer spectrum FT-IR/FT-FIR Spectrometer. Scanning Electron Microscopy and Energy Dispersive X-ray spectroscopy, namely using the SEM (Scanning Electron Microscope) ZEISS EVOLS10 and the EDX (Energy Dispersive X-ray Spectroscopy) Brulas123eV dedeluctor, was employed to determine the morphology and elemental composition of the nanocomposite. The phase identifications of the functionalized nanocomposite were conducted using a Philips X'Pert Pro X-ray diffractometer (XRD) for X-ray powder diffractions. The Perkin Elmar 2100 D/V model of Inductive Coupled Plasma Atomic Emission Spectroscopy (ICP-AES) was employed to analyze heavy metal ions in solutions treated with manufactured nano-substances. Thermogravimetric Analysis, also known as Thermal Gravimetric Analysis (TGA: EXSTARTG/DTA 6300), was employed to illustrate the characteristics of the synthesized nanomaterials. The SHIMADZU UV-1800, an Ultraviolet-Visible Spectroscopy instrument, was utilized to quantitatively determine the Graphene Oxide (GO) through emission and adsorption stages. The Transmission Electron Microscope (HRTEM: JEOL JEM-2100F) was employed to facilitate the imaging of the produced nanostructure and its attributes. The pH values of Pb(II) and Hg(II) metal ion solutions were determined using a pH meter (HANNA HI1221).

### Graphene Oxide Synthesis

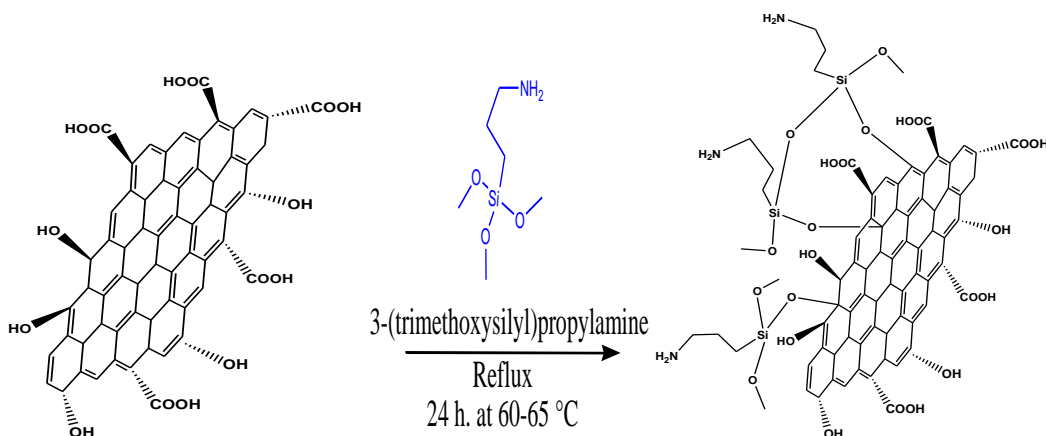
The synthesis of graphene oxide was achieved using the conventional Hummer's method as depicted in Figure 1 (Hummers et al., 1958). The procedure was separated into three distinct stages to enhance comprehension. The initial phase, referred to as cold treatment, involved dissolving 2 grams of graphite powder in 100 ml of  $H_2SO_4$  and stirring the mixture in an ice bath for thirty min. Subsequently, 8 grams of potassium permanganate ( $KMnO_4$ ) were gradually introduced into the solution to prevent any abrupt increase in temperature. Following the addition, the solution was allowed to incubate for a duration of 2 h in an ice bath. The color undergoes a transition from a dark gray shade to a green hue. Next, we proceeded to perform a heat treatment. The solution was agitated for a duration of 1 h at a temperature of  $35^\circ C$  in a water bath. Subsequently, after the passage of 1 h, a gradual addition of 100 ml of distilled water took place. The solution's temperature increased and varied between 40 and  $60^\circ C$ . Furthermore, the color of the object changes from a dark color of green to a dark color of brown. Following the addition, the solution was once again placed in a warm water bath at a temperature of  $35^\circ C$  and stirred using a magnetic stirrer for a duration of 1 h. Furthermore, the treatment was referred to as a hot application, wherein the solution was heated to a temperature of  $95^\circ C$  using bath water. Once it reached that temperature, it was let to sit for 15 min. Subsequently, 300 ml of distilled water at ambient temperature and a 30% concentration of  $H_2O_2$  were introduced. The solution's color transitioned from a reddish brown hue to a shade of yellowish brown. Ultimately, it came to a halt and remained still for a duration of 15 h. Upon observation the following morning, it was seen that the solution was undergoing gas release, and all the GOs were observed to be precipitating at the bottom of the beaker. The aqueous component of the solution was extracted, and GO was subjected to rinsing with a 5% HCl solution followed by pure water. Ultimately, it was necessary to allow it to desiccate at a location devoid of light (Hummers et al., 1958).



**Figure 1.** Graphene Oxide Synthesis Using Hummer's Method

### Silanization of Graphene Oxide

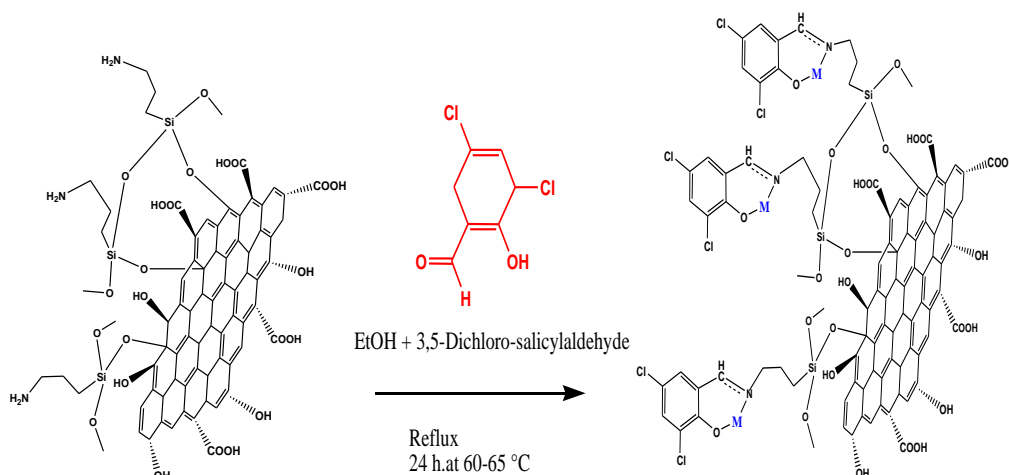
2 grams of GO were measured, and then combined with 100 ml of anhydrous ethanol by reflux for a duration of one day (Jamali et al., 2006). After being stirred with dry ethanol under reflux for 24 h, 5 ml of 3-(triethoxysilyl-propyl)amine was added using ejection. The mixture was then stirred under reflux for a further 24 h at a temperature of  $60-65^\circ C$ . Ultimately, it was treated with 100 ml of ethanol to eliminate the remaining unreacted sylan molecules, rinsed with water, and dried. By adhering to this procedure, GO-3-(triethoxysilyl-propyl)amine shown in Figure 2 was acquired.



**Figure 2.** Graphene Oxide is Functionalized Using 3-(Triethoxysilyl-Propylamine)

### Preparation of Graphene Oxide-Schiff Base Material

1 gram of GO-3-(triethoxysilyl-propylamine) was measured and combined with 1 gram of 3,5-dichloro-salicylaldehyde, which had been dispersed in 30 milliliters of ethanol in the flask. The mixture was then stirred for 30 h at a temperature of 60–65 °C under reflux conditions to produce GO-Si (3-propyl) 3,5-dichloro-salicylaldehyde, as depicted in Figure 3. Ultimately, the substance was allowed to reach the ambient temperature and cleansed with ethanol, subsequently subjected to a drying process at 40 °C in an oven (Hou et al., 2010).



**Figure 3.** Preparation of GO-Schiff Base Material

## RESULTS AND DISCUSSION

### Characterization of Compounds

The UV-VIS spectrum of the standard GO is displayed in the Supplementary File (Fig. S1). Two weavers are visible at wavelengths of 235 and 325 nm. The electron transition of  $\pi$ - $\pi^*$  aromatic rings is broad, whereas the other transition is lightly broad. These transitions indicate the presence of carbonyl groups, which are surrounded by the n- $\pi^*$  electron transition on the graphene layer.

Graphene oxide: The functional groups, predominantly consisting of oxygen, were seen using FT-IR measurement, as depicted in Figure 4. Several peaks were seen at specific wavenumbers, namely 3433.44, 1723.34, 1631.66, 1414.48, 1226.89, 1058.25, and 837.34  $\text{cm}^{-1}$ . These peaks indicate the presence of functional groups in GO. The prominent peak at 3433.44  $\text{cm}^{-1}$  indicates the stretching movement of the O-H bond in CO-H groups and water molecules. The peak at 1723.34  $\text{cm}^{-1}$  corresponds to the stretching of carboxyl groups (C=O). The peak at 1631.66  $\text{cm}^{-1}$  is most likely due to the stretching of C=C bonds, while the bending of C-O-H bonds is observed at 1414.48  $\text{cm}^{-1}$ . The peak at around 1226.89  $\text{cm}^{-1}$  is likely associated with the stretching of the C-O bonds in the acyl and phenyl groups. The presence of alkoxy C-O-C bonds was detected at a wavenumber of 1058.25  $\text{cm}^{-1}$  (Bal et al., 2024).

The silanized graphene oxide (Si-GO) was analyzed using FT-IR to identify the functional group patterns at specific wavenumbers: 3412.79, 2921.46, 2847.19, 1712.07, 1564.23, 1464.73, 1385.50, 1327.53, 1225.12, 1122.70, 1034.73, 919.80, 771.01, 691.78, and 614.49  $\text{cm}^{-1}$ , as depicted in Figure 4. The presence of a broad OH peak and a CO-H stretch was seen at a wavenumber of 3412.79  $\text{cm}^{-1}$ . The bands at 2921.46 and 2847.19  $\text{cm}^{-1}$  correspond to the symmetric and asymmetric stretching of C-H bonds, respectively. The intense carbonyl C=O peak was observed at a wavenumber of 1712.07  $\text{cm}^{-1}$ . The prominent peak at 1564.23  $\text{cm}^{-1}$  is indicative of a carbon-carbon double bond (C=C). The signal observed at 1464.73  $\text{cm}^{-1}$  is assigned to the CH<sub>2</sub> group, which does not contain any silicon (Si) atoms. The peaks observed at approximately 1385.50  $\text{cm}^{-1}$  likely correspond to the bending motion of the hydroxyl (OH) group. The peak at 1327.53  $\text{cm}^{-1}$  corresponds to the presence of C-O acyl groups in the band. The signal at 1225.12  $\text{cm}^{-1}$  corresponds to the characteristic C-N bonds of amine groups. The vibrational frequencies of Si-O-C and Si-O-Si were measured as 1122.70  $\text{cm}^{-1}$  and 1034.73  $\text{cm}^{-1}$ , respectively. In addition, the Si-C band becomes visible at a frequency of 919.80  $\text{cm}^{-1}$ . The Si-O-CH<sub>3</sub> peak was observed at a wavenumber of 771.01  $\text{cm}^{-1}$ . Ultimately, the N-H summit experienced a modest elevation to 691.78  $\text{cm}^{-1}$ .

The structure of the GO-Schiff base material was identified using FT-IR research. Figure 4 displays the patterns of all functional groups observed at specific wavenumbers: 3440.53, 2925.99, 1639.97, 1497.86, 1427.75, 1050.95, 713.38, and 662.22  $\text{cm}^{-1}$ . The broad peak at 3440.53  $\text{cm}^{-1}$  corresponds to the stretching vibration of the -OH, while the peak at 2925.99  $\text{cm}^{-1}$  is associated with the -CH<sub>2</sub> group. The peak detected at 1639.97  $\text{cm}^{-1}$  corresponds to the C=N pattern, which arises from the interactions between aldehyde and silanized GO. The peak around 1497.86  $\text{cm}^{-1}$  is often associated with the presence of a benzene ring. The peaks observed at 1427.75 and 1050.95  $\text{cm}^{-1}$  corresponded to the Si-O-C group and the conjugated Si-O-Si group, respectively. The presence of iodine on the C-Cl ring was detected at a wavenumber of 713.38  $\text{cm}^{-1}$ .

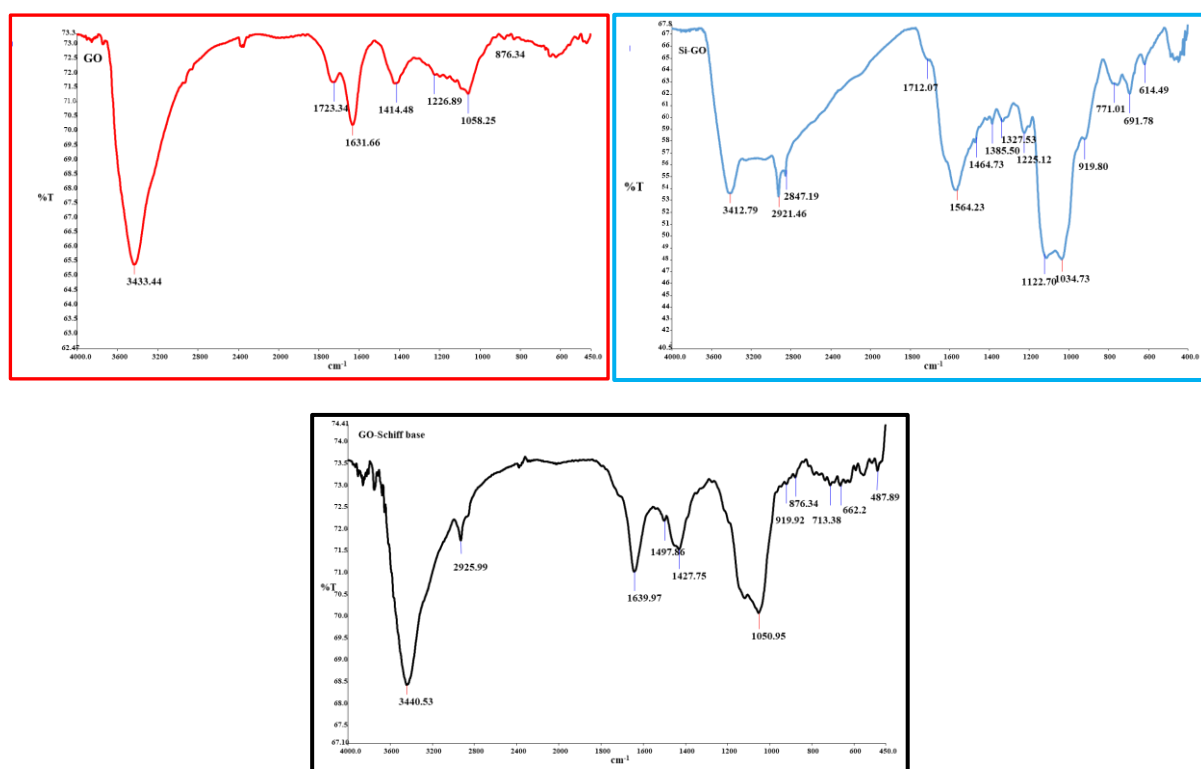


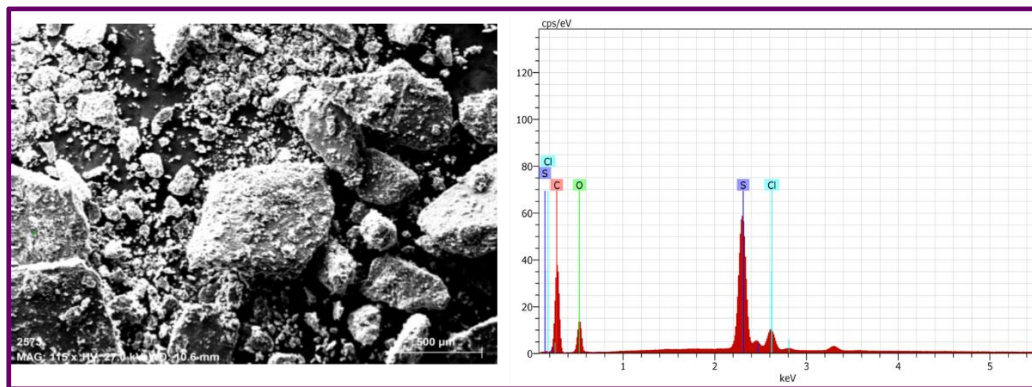
Figure 4. FT-IR Spectrums of GO, Si-GO and GO-Schiff Base

The crystal structures of the materials examined in this study were identified using the Philips X'Pert Pro X-ray diffractometer (XRD) equipped with Cu-K $\alpha$  radiation. The X-ray diffraction patterns of the synthesized graphene oxide, silanized GO, and hybrid material are seen. The XRD pattern of the graphene oxide may be found in the Supplementary File (Fig. S2). There is a clear and prominent peak observed at an angle of  $2\theta = 10.21$ , which corresponds to an interlayer spacing of 8.65 Å. The successful achievement of exfoliation is demonstrated. In addition, a clear and separate peak is observed in the Supplementary File (Fig. S3), which is characterized by its broad shape. In addition, a weak diffraction peak of the Silanized-GO material is observed at  $2\theta = 22.5$  (3.94Å) and  $2\theta = 43.6$  (2.07 Å), indicating the distance between the Si-GO layers in the plane. These pictures illustrate the

successful adhesion of silane groups to the surface of GO. The XRD spectrum of the G-hybrid material is presented in the Supplementary File (Fig. S4). Within this spectrum, the distinct peak of GO is no longer discernible, and instead, two additional diffraction peaks can be identified at  $2\theta = 43.80$  and  $2\theta = 51.40$ , which correspond to interplanar distances of 2.06 and 1.77 Å, respectively. These peaks are most likely caused by the hybrid material.

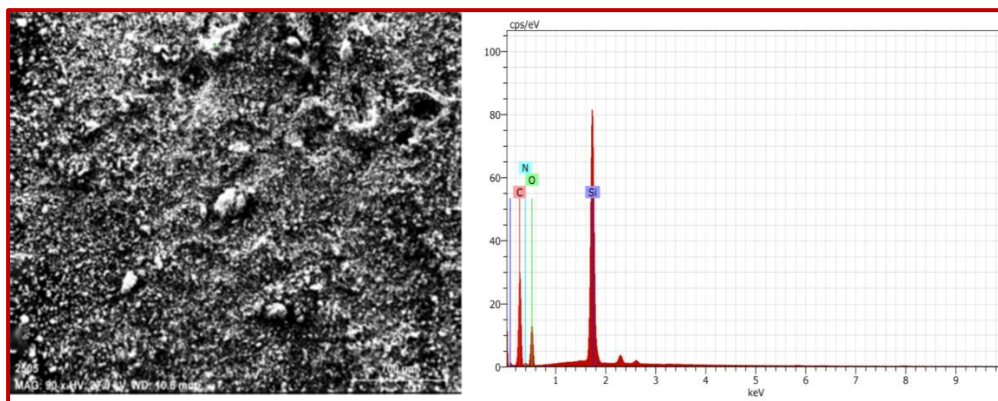
The structure analysis of GO and imine-G hybrid was performed utilizing high-resolution images acquired from transmission electron microscopy mode (HRTEM) with a Joel JEM2100F TEM. The transmission electron microscope (TEM) achieves a point resolution of 0.18 nm when operated at 200 kV and at room temperature. The data are contained within the Supplementary File (Fig. S5). The dimensions of the GO sheet, which are roughly 2 μm in diameter, are detected on a holey carbon film. The core area of the sheet has a pristine and even surface, whilst the borders demonstrate creasing and curling, exposing consistent circular patterns and the sheet's several layers. The detection of the GO is consistent with the observations reported for films composed of many layers of graphene. The HRTEM image in the Supplementary File (Fig. S5b) shows lattice fringes present at the edges of GO. The measured distance between adjacent fringes was around 5 nm, which surpasses the predicted interplanar distance of graphite, calculated to be 0.34 nm. The distance is determined by the existence of functional groups, such as oxygen. The GO-hybrid material was produced by combining Silanized-GO with 3,5-dichloro-salicylaldehyde in a solution of ethanol. The resultant product was analyzed at a wavelength of 200 nm. Upon analyzing the structure of the materials, it is clear that around 50% of the surface is a result of the interaction between 3-(trimethoxysilyl) propylamin and aldehyde. This interaction leads to the creation of a C=N bond, which signifies the production of a hybrid substance.

The morphology of GO was analyzed using SEM, as depicted in Figure 5(a). The oxygen-containing groups were observed on the surface of the GO nanocomposite. Furthermore, the presence of agglomerations serves as evidence for the high surface area of GO, as it indicates the existence of layers. The oxygen-containing groups are analyzed in further detail using energy dispersive X-rays, which provide information about the elemental composition of a compound, as depicted in Figure 5(b). The Supplementary File's Table S1 shows that 63.48 percent of GO was derived from carbon atoms, whereas about 22.88 percent was derived from oxygen. In Figure 2(b), there were traces of contaminants such as chlorine and sulfur. The lack of oxygen indicates that the oxidation process was successfully carried out using H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> and HCl baths for the required duration.



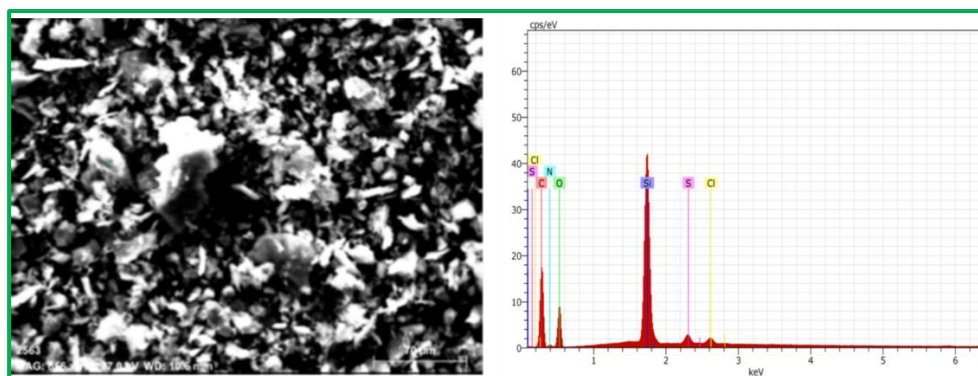
**Figure 5. a. SEM and b. EDX Analysis of Graphene Oxide Nanosheets**

The silanized graphene oxide was examined using a SEM. Following the silanization process, the surface of GO exhibits similar changes, including a wrinkled form and the presence of layered silane groups that are expected to anchor onto the surface. This is seen in Figure 6(a), which shows agglomerates of silanized GO. The remaining compounds were identified using EDX, which revealed a decrease in the presence of oxygen-included groups after undergoing a silanization process. The carbon and oxygen percentages were provided as 42.38 and 15.93, respectively, in the Supplementary File Table S2. Nevertheless, we successfully managed a sudden and significant increase, depicted as silane in Figure 6. Furthermore, it was demonstrated that the successful bonding between 3-(trimethoxysilyl)propylamine and GO took place. The elution of methanol during the silanization processes resulted in a reduction of the remaining contaminants.



**Figure 6.** Observations of Silanized-Graphene Oxide Using SEM EDX

The surface morphology of the produced GO-Schiff base material was examined using SEM, and the average surface roughness was measured to be 70 micrometers, as shown in Figure 7 (a). The effective interaction between silanized GO and 3,5-dichloro-salicylaldehy can be confirmed by the presence of agglomerid and cylindric forms. The functional content of the ultimate molecule was analyzed using EDX spectroscopy. The presence of aldehydes on the surface of the graphene was confirmed by the observation of strong, sharp peaks of silane and chlorine. The carbon and oxygen content of the aldehydes increased, with percentages of 47.80% and 23.09% respectively, as shown in the Supplementary File Table S3. Additionally, Figure 7(b) clearly demonstrates a decrease in impurities after each dilution step.



**Figure 7.** The Graphene Oxide-Schiff Base Material was Analyzed Using SEM and EDX

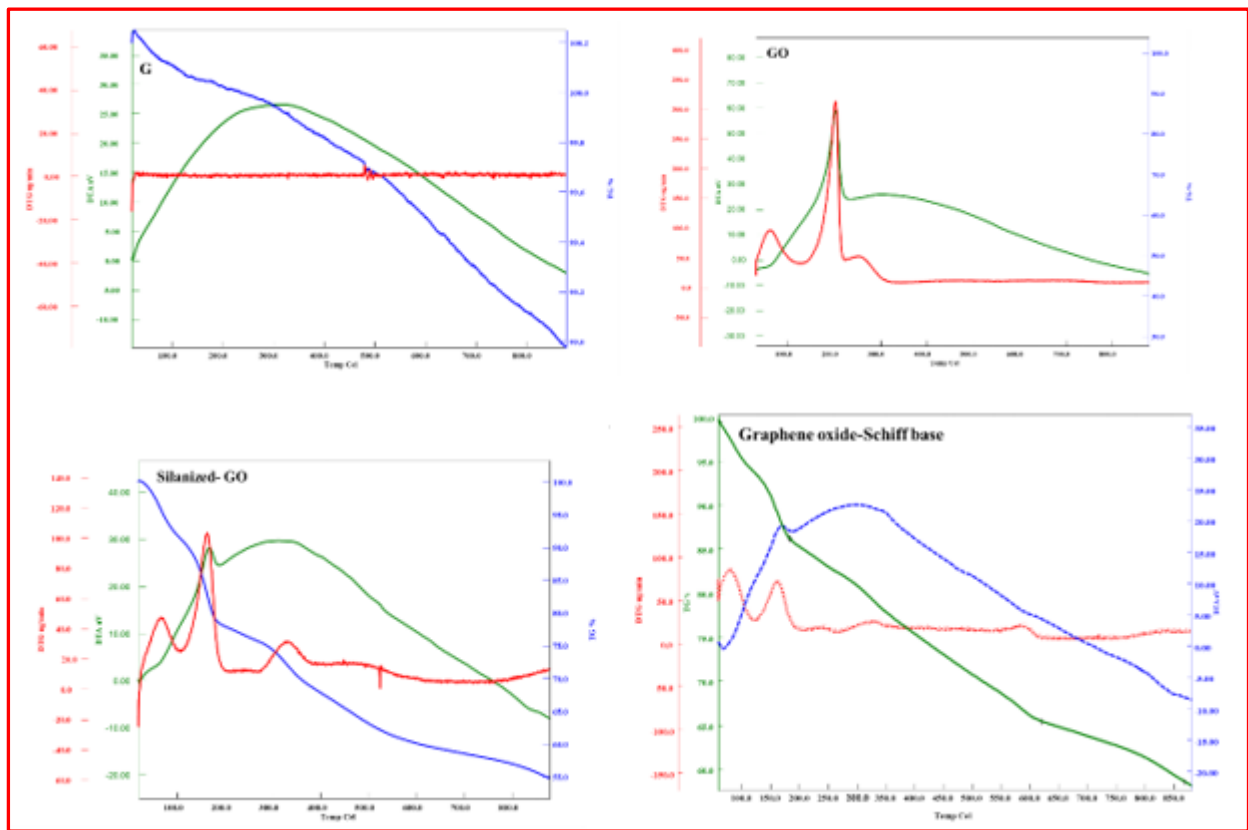
The TGA, DTA, and DTG curves of graphite G were conducted under an inert atmosphere using nitrogen within the temperature range of 20 to 900 degrees Celsius, as depicted in Figure 8. The thermal curves of the graphite indicate that water molecules adsorbed in its structure are released within the temperature range of 50–100 °C. Furthermore, during a temperature range of 100–200 °C, the water molecules responsible for crystallization are evaporated. Following this interval, the graphite continues to experience a decrease in mass until it reaches a temperature of 850 °C.

The thermal characteristics of GO have been analyzed using TGA. The object had been exposed to a controlled environment without any reactive substances present, within a temperature range of 20–900 °C. The TGA, DTA, and DTG curves are depicted in Figure 8. Upon examining the TG curve, it becomes evident that the mass of GO begins to diminish at very low temperatures, specifically around 40–50 °C. Subsequently, at a temperature of 200 °C, the process of breaking down GO commenced by eliminating acidic functional groups and residues. The majority of mass was lost between the temperature range of 100-200 °C. The TGA revealed a gradual decrease in mass of the graphene samples between 300 and 600°C, indicating an enhanced thermal stability following the removal of oxygen-containing functional groups during the reduction process.

The silanization process of GO was carried out in a controlled environment using nitrogen gas within the temperature range of 20–900 °C. Figure 8 shows the TGA, DTA, and DTG curves at 120 °C. The mass of the silanized GO

reduced significantly as a consequence. The silane groups undergo gradual decomposition starting at temperatures close to 400 °C and continue to disintegrate till reaching 900 °C.

The ultimate substance was designated as GO. The thermal properties of Schiff base hybrid compounds were assessed in a controlled environment of nitrogen gas, within a temperature range of 100–900 °C. The resulting TGA, DTA, and DTG curves are presented in Figure 8. The TGA curve, which illustrates the process of breakdown, is observed at four distinct levels. In the first and second tiers, the water molecules exhibiting a crystalline structure underwent evaporation. Decomposition of the organic component begins at the 3rd and 4th levels and persists until reaching a temperature of 900 °C.



**Figure 8.** Thermodynamic Analysis of G, GO, GO-Schiff Base and Silanized-GO Material

### *Studies on The Process of Adsorption and Desorption*

The adsorption of Pb(II) and Hg(II) ions was conducted utilizing a newly synthesized GO-Schiff base material in a batch setup, from an aqueous solution. Stock solutions of Pb(NO<sub>3</sub>)<sub>2</sub> and HgCl<sub>2</sub> salts were generated at a concentration of 1000 mg/L for each ion. The HgCl<sub>2</sub> salts were then diluted for use in subsequent experiments. The impact of pH, heavy metal ion concentration, contact time, and temperature on the adsorption of heavy metal ions from an aqueous environment using the GO-Schiff base material was assessed. An ICP apparatus was used to measure the amounts of Pb(II) and Hg(II) ions in aqueous samples. The equation (1) below was used to determine the maximum adsorption capacity Q<sub>max</sub> (mg/g), which is the amount of metal ions adsorbed per unit mass of the GO-Schiff base material.

$$Q = [(C_0 - C_e) \cdot V] / m \quad (1)$$

C<sub>0</sub> (mg/L) represents the concentration of the solution before the adsorption treatment, while C<sub>e</sub> (mg/L) represents the concentration of the solution after the adsorption process. V represents the volume of the solution in liters, and m is the mass of the GO-Schiff base hybrid material.

### *Effect of pH*

The adsorption capability is influenced by the pH level, so it is necessary to ascertain the optimal pH range for our product. An investigation was conducted to study the adsorption of Pb(II) and Hg(II) ions using a GO-Schiff base

material under varying pH conditions. The sorption experiment was carried out for both metals at a temperature of 25 °C and with 2 h of stirring. The metal solvents were at a concentration of 25 mg/L and were tested at various pH values ranging from 3 to 11. Additionally, 25 mg of GO-Schiff base material was used. Figure 9 shows that a pH value of 7 is the most optimal for achieving the highest adsorption capacity for Pb(II) and Hg(II) ions. Furthermore, it is evident from the data that the quantity of heavy metals adsorbed rises steadily and reaches its peak at a pH level of 7. Nevertheless, the precipitation of metal ions experiences a minor reduction as the pH level exceeds 9. The metal ions undergo ion exchange interactions with H<sup>+</sup> cations present in the medium at low pH, resulting in their adsorption on the surfaces of GO hybrid materials. This is the reason why the adsorption capacity is enhanced at low pH. The highest level of adsorption that can occur at a pH of 7 for Pb(II) is 24.69 mg/g, whereas for Hg(II) it is 24.483 mg/g.

#### ***Effect of Contact Time***

The duration of time plays a crucial role in the adsorption process of Pb(II) and Hg(II) metal ions. It is essential to establish the optimal time period for this process. The contact time tests involved the use of GO-Schiff base material to test its effectiveness in removing Pb(II) and Hg(II) metal ions. The experiments were conducted at various application durations, ranging from 5 min to 120 min. The experiments were performed under optimal conditions, with a pH of 7 and a temperature of 25 °C. The concentration of Pb(II) and Hg(II) solutions used was 25 mg/L. Figure 9 demonstrates that the adsorption of Pb(II) and Hg(II) ions progressively rises with time, reaching a notably high level within the initial 10 min. Due to the vacancies in the adsorption sites, Pb(II) and Hg(II) can readily bind to these sites. The equilibrium period for the adsorption of Pb(II) and Hg(II) was achieved after 50 min. The optimal duration for achieving maximum adsorption capacity is 50 min for Pb(II), resulting in a capacity of 24.968 mg/g. For Hg(II), the optimal duration is again 50 min, with a capacity of 23,703 mg/g.

#### ***Effect of Temperature***

The impact of temperature on the adsorption of metal ions was examined within the temperature range of 5-110 °C, at a pH of 7, for Pb(II) and Hg(II) during a duration of 50 min. Each of these metal ions was produced as a 25 mL solution containing 25 mg/L of Pb(II) and Hg(II). The data indicate that the adsorption quantities are greater at lower temperatures. The reaction between the adsorbent and metal ions is exothermic. Figure 9 demonstrates that there is a decrease in sorption for Pb(II) when the temperature rises over 50 °C. The maximum adsorption for Pb(II) is 24.703 mg/g. The sorption of Hg(II) ions exhibits an increase up to a temperature of 50°C. However, above this temperature, the adsorption capacity remains constant, and the highest amount of adsorption for Hg(II) at 50 °C is 24.25 mg/g.

#### ***Effects of Different Concentrations***

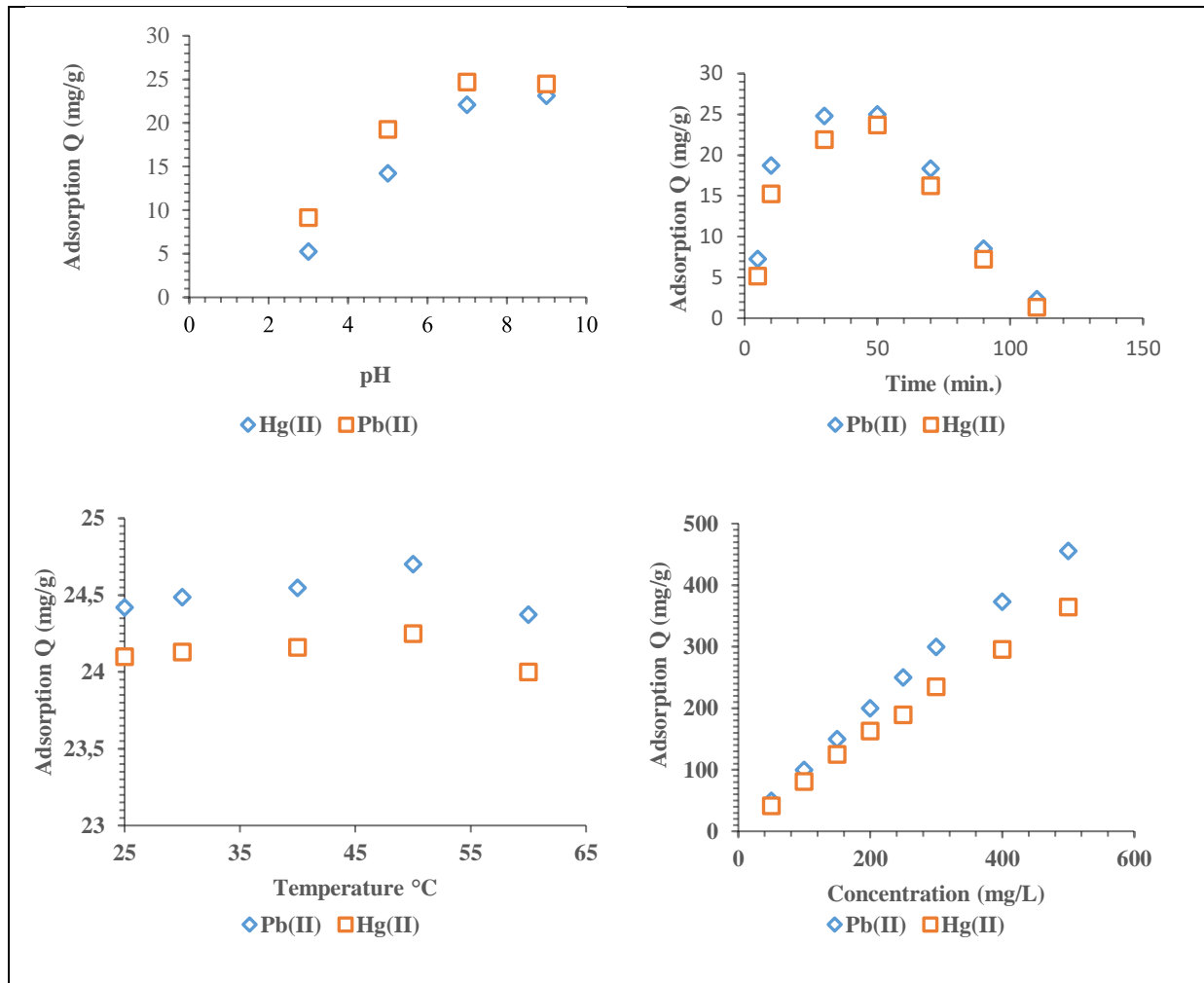
During this stage, our objective is to determine the highest adsorption capacity of the GO-Schiff base material, which possesses oxygen-containing groups on its surface and functional aldehyde groups. The unique shape, characterized by its porous structure and functional groups, renders this nanocomposite highly effective as an adsorbent for Pb(II) and Hg(II). An investigation was conducted to study the adsorption of Pb(II) and Hg(II) on a hybrid material consisting of GO. The experiment involved employing 25 mL of heavy metal ion solutions with concentrations ranging from 50 to 600 mg/L. The adsorption process was carried out at optimal conditions of temperature, time, and pH, which were set at 25 °C, 60 min, and pH = 7, respectively. The samples were stirred during the adsorption process. Nevertheless, the quantity of nanocomposite is 25 milligrams. According to Figure 9, the highest amount of Pb(II) that may be adsorbed is 455.44 mg/g, while for Hg(II) it is 364.50 mg/g.

## **RESULT AND DISCUSSION**

Heavy metals are vital for the survival of all living species, however, their long-term accumulation through consumption of food, inhalation of air, and ingestion of water can lead to the development of many ailments. While they occur naturally in the ground, they still contribute to environmental pollution. Hence, safeguarding human health necessitates the prevention of the deterioration and annihilation of these metals. Recently, several ways have been devised to minimize their ecological footprint by employing diverse techniques centered upon GO.

Adsorption is a very effective and efficient method for cleaning the environment, and graphene possesses exceptional adsorption capabilities owing to its inherent shape. Graphene is a highly promising material for effectively eliminating heavy metal ions from the air, water, and soil.





**Figure 9.** Effect of pH, Contact Time, Temperature, Equilibrium Concentration, on Pb(II) and Hg(II) Adsorption

This study involved the synthesis of a hybrid material based on graphene, and the investigation of its ability to remove Pb(II) and Hg(II) ions from prepared solutions. The investigations demonstrated the exceptional adsorption of Pb(II) and Hg(II) ions by graphene. The optimal working parameters were identified as a pH of 7, a temperature of 50 °C, and a duration of 50 min. The efficacy of graphene-based adsorbent material in removing heavy metal ions from aquatic environments is notable due to its cost-effectiveness, accessibility, and ability to be reused.

The findings suggest that GO and its derivatives have the potential to be used and reused as materials. The development of recyclable materials is a significant concern in various sectors of the contemporary and interconnected world, encompassing industries ranging from mobile phones to textiles. Graphene-based materials are regarded as highly promising contenders in this domain.

## REFERENCES

- Abd Elnabi, M. K., Elkaliny, N. E., Elyazied, M. M., Azab, S. H., Elkhalifa, S. A., Elmasry, S., ... & Mahmoud, Y. A. G. (2023). Toxicity of heavy metals and recent advances in their removal: A review. *Toxics*, 11(7), 580. <https://doi.org/10.3390/toxics11070580>
- Ali, H., Khan, E., & Ilahi, I. (2019). Environmental chemistry and ecotoxicology of hazardous heavy metals: Environmental persistence, toxicity and bioaccumulation. *Journal of Chemistry*, 2019. <https://doi.org/10.1155/2019/6730305>
- Aliasgharpour, M., & Marjan, R. F. (2013). Trace elements in human nutrition: A review. *The Journal of Medical Investigation*. 2(3), 115-128. [https://doi.org/10.4103/ijpvm.IJPVM\\_48\\_19](https://doi.org/10.4103/ijpvm.IJPVM_48_19)

- Bal, M., Tümer, M., & Köse, M. (2024). Synthesis of reduced graphene oxide-based hybrid materials containing imine bonds: Color properties and chemosensory properties against some anions. *Materials Science and Engineering: B*, 303, 117278. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2024.117278>
- Balali-Mood, M., Naseri, K., Tahergorabi, Z., Khazdair, M. R., & Sadeghi M. (2021) Toxic mechanisms of five heavy metals: Mercury, lead, chromium, cadmium and arsenic. *Frontiers in Pharmacology*, 12, 643972. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2024.117278>
- Bhattacharya, P. T., Misra, S. R., & Hussain, M. (2016). Nutritional aspects of essential trace elements in oral health and disease: *An extensive review. Scientifica*, 2016. <https://doi.org/10.1155/2016/5464373>
- Gabriel, M., & Elena, L. U. (2022). "Toxicity of Heavy Metals," Chapters, in: Hosam M. Saleh & Amal I. Hassan (ed.), *Environmental Impact and Remediation of Heavy Metals, IntechOpen*. <https://doi.org/10.5772/intechopen.102441>
- Hou, S., Su, S., Kasner, M. L., Shah, P., & Patel K., (2010). Formation of highly stable dispersions of silane-functionalized reduced graphene oxide *Chemical Physics*, 501(1-3), 68-74. <https://doi.org/10.1016/j.cplett.2010.10.051>
- Hummers, Jr., William, S., & Richard E. O. (1958). Preparation of graphitic oxide. *Journal of the American Chemical Society*, 80(6), 1339-1339. <https://doi.org/10.1021/ja01539a017>
- Ingrassia, E. B., Fiorentini, E. F., Wuilloud, R. G., Agostini, E., Oller, A. L. W., & Escudero, L. B. (2024). Bionanomaterial composed of Bradyrhizobium japonicum and graphene oxide for determination of mercury in water and fruit juice samples. *Journal of Food Composition and Analysis*, 127, 105967. <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2024.105967>
- Jamali, M. R., Assadi, Y., Shemirani, F., & Hosseini, M. R. M. (2006). Synthesis of salicylaldehyde-modified mesoporous silica and its application as a new sorbent for separation, preconcentration and determination of uranium by inductively coupled plasma atomic emission spectrometry. *Analytica chimica*, 579(1), 68-73. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2006.07.006>
- Lucena, R. (2023). Janusz Pawliszyn (Ed.): Evolution of solid phase microextraction technology. <https://doi.org/10.1007/s00216-023-04959-2>
- Masindi, V., & Muedi, K.L. (2018) Environmental contamination by heavy metals. In: Saleh HEDM, Aglan RF, editors. *Heavy Metals. Chichester: IntechOpen*. 115-133. <https://dx.doi.org/10.5772/intechopen.76082>
- Mitra, S., Chakraborty, A.J., Tareq, A.M., Emran, T.B., Nainu, F., Khusro, A., Idris, A.M., Khandaker, M.U., Osman, H., Alhumaydhi, F.A., & Jesus S.G. (2022). Impact of Heavy Metals on the Environment and Human Health: Novel Therapeutic Insights to Counter the Toxicity. *J. King Saud Univ.-Sci.* 34(3), 101865. <https://doi.org/10.1016/j.jksus.2022.101865>
- Pasupuleti, R. R., & Huang, Y. L. (2023). Recent applications of atomic spectroscopy coupled with magnetic solid-phase extraction techniques for heavy metal determination in environmental samples: A review. *Journal of the Chinese Chemical Society*, 70, 1326–1337. <https://doi.org/10.1002/jccs.202300029>
- Zhou, W., Wiczorek, M. N., Javanmardi, H., & Pawliszyn, J. (2023). Direct solid-phase microextraction-mass spectrometry facilitates rapid analysis and green analytical chemistry. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 166, 117167. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2023.117167>



# Kahramanmaraş Sütçü İmam University

## Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 23.03.2024  
Kabul Tarihi : 20.05.2024

Received Date : 23.03.2024  
Accepted Date : 20.05.2024

### DETERMINATION OF PI COEFFICIENTS IN SPEED CONTROL OF BRUSHLESS DC MOTOR WITH GRAY WOLF OPTIMIZATION AND FPGA APPLICATION

#### FİRÇASIZ DC MOTORUNUN HIZ KONTROLÜNDE PI KATSAYILARININ GRİ KURT OPTİMİZASYONU İLE BELİRLENMESİ VE FPGA UYGULAMASI

Yurdagül BENTEŞEN YAKUT<sup>1\*</sup> (ORCID: 0000-0003-3236-213X)

<sup>1</sup> Dicle University, Department of Electrical Engineering University, Diyarbakır, Türkiye

\*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Yurdagül BENTEŞEN YAKUT, [bentesen@dicle.edu.tr](mailto:bentesen@dicle.edu.tr)

#### ABSTRACT

DC motors are widely utilized in various industries due to their efficiency, longevity, and adjustable speed settings. Effective control of these motors is crucial, given their broad application range. As applications vary, so do the controlled motor parameters, necessitating control systems that are suitable for industrial use. However, standard controllers often face challenges due to the non-linear and uncertain nature of the mathematical models involved. This study aims to introduce a novel approach by employing Grey Wolf Optimization (GWO) to determine the PI coefficients for brushless DC motor speed control, which is then implemented on an FPGA. During the study, a control strategy model for the BLDC motor was developed using MATLAB/Simulink. The motor's speed was gradually increased from 300 to 600 and 900 rpm at specific intervals to calculate the controller coefficients. The GWO technique optimized the PI parameters,  $K_p$  and  $K_i$ , using the ITAE cost function. The results showed an improvement in speed control when comparing the conventional PI and GWO-PI controllers to the reference speed, with GWO-PI achieving closer adherence. As opposed to most studies that focus on simulations, this research tested the model using hardware, specifically the BASYS3 FPGA training card, demonstrating that the BLDC motor can operate at higher speeds in industrial settings with the optimized GWO-PI approach.

**Keywords:** Brushless DC motor, FPGA, GWO-PI, Speed Control

#### ÖZET

Doğru akım (DC) motorları, verimlilikleri, uzun ömürleri ve ayarlanabilir hız özellikleri nedeniyle birçok endüstride yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu motorların etkin bir şekilde kontrolü, geniş kullanım alanları göz önüne alındığında son derece önemli oldukları görülmektedir. Uygulama alanları değiştiğinde, kontrol edilen motor parametreleri de farklılık göstermekte ve bu nedenle sanayi kullanımına uygun kontrol sistemlerinin geliştirilmesi gerekmektedir. Bununla birlikte, standart kontrolörler, genellikle matematiksel modellerin doğrusal olmayan ve belirsiz yapısı nedeniyle zorluklarla karşılaşmaktadır. Bu çalışma, fırçasız DC motor hız kontrolünde PI katsayılarının belirlenmesi amacıyla Gri Kurt Optimizasyonu (GKO) yöntemini kullanarak yeni bir yaklaşım sunmayı hedeflemektedir ve bu yöntem, bir FPGA üzerinde uygulanmıştır. Çalışma sürecinde, BLDC motor için bir kontrol stratejisi modeli MATLAB/Simulink kullanılarak geliştirilmiştir. Motorun hızı, kontrolör katsayılarını hesaplamak amacıyla belirli aralıklarla 300 rpm'den 600 ve 900 rpm'ye kademeli olarak artırılmıştır. GKO tekniği, ITAE maliyet fonksiyonunu kullanarak PI parametreleri olan  $K_p$  ve  $K_i$ 'yi optimize etmiştir. Sonuçlar, geleneksel PI ve GKO-PI kontrolörlerinin referans hız ile karşılaştırılmasında, GKO-PI'nin daha yakın bir uyum sağladığını göstermiştir. Çoğu çalışmanın simülasyonlara odaklanmasının aksine, bu araştırma modeli donanım üzerinde test etmiştir ve özellikle BASYS3 FPGA eğitim kartı kullanılarak BLDC motorun sanayi ortamında daha yüksek hızlarda çalışabileceği optimize edilmiş GKO-PI yöntemi ile gösterilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Fırçasız DC motor, FPGA, GWO-PI, Hız Kontrolü

ToCite: BENTEŞEN YAKUT, Y., (2024). DETERMINATION OF PI COEFFICIENTS IN SPEED CONTROL OF BRUSHLESS DC MOTOR WITH GRAY WOLF OPTIMIZATION AND FPGA APPLICATION. Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 27(3), 1044-1056

## INTRODUCTION

Brushless DC (BLDC) motors are used in every market sector, including household appliances, industrial control, automation, aerospace, and others. BLDC motors have several key benefits, including high efficiency, extended longevity, lower noise levels, and high-speed range adjustment (Krishnan, 2017; Miller, 1989). The three main categories of BLDC motor operation control are positioning applications, variable loads, and fixed loads. The engine mileage directly affects the load in blower, fan, and pump applications. These are low-cost applications that need open-source controllers (Bharatkar et al., 2011). The engine's load varies according to the applications' fluctuating speed needs. Compressors, dryers, and washing machines are examples of tools that may need precise high-speed control and robust dynamic reactions. Positioning applications comprise the majority of industrial and automation applications. All applications in this category use some kind of power transmission, such as basic belt-driven systems, mechanical straps, time-adjustable straps, or trigger straps. As a result, several controller types can be created to satisfy various application requirements.

Rotor angular speed control is very crucial as the applications for BLDC are often delicate. This is the reason that several control strategies for BLDC speed control have been developed and published in the literature. Jin et al. proposed adaptive control having high performance for BLDC motor with real-time estimation of uncertainties (Jin et al., 2006). In response to the BLDC's system performance, (Gökbulut et al., 2006; Premkumar et al., 2014) proposed the hybrid neuro-fuzzy controller. The utilization of an RBF neural network to implement adaptive speed control for BLDC motors was suggested by (Wang et al., 2007). An adaptive speed controller with speed-sensorless was studied by (Wang et al., 2006) for a BLDC motor. Model reference adaptive control with low-resolution Hall-effect sensors was presented by (Liu et al., 2014). Masoudi et al. proposed a novel control strategy that combines direct power regulation with a weakening zone to minimize torque fluctuation in the non-sinusoidal BLDC motors utilized in the application (Masoudi et al., 2023). A performance comparison of commutation modes based on impact width modulation (DGM) employing sinusoidal DGM and 120°, 180°, and 150° modes was carried out in a different study (Yorat et al., 2023). Using a mathematical technique known as the chaos control and chaotic features of BLDC engines was introduced by Abro and his friends (Abro et al., 2022). In his work, Hooshmand and colleagues suggested a method that would include phase currents and line voltages in estimating speed and rotor position for position-free operation of BLDC motors based on an efficient state prediction algorithm (Hooshmand et al., 2023). Electrical engine technology has been controlled to enable wireless power transmission, allowing the engine to operate without physical touch and allowing the load engine to be employed in remote locations. With a 20 mm wireless power transmission range of 400 rpm to 4000 rpm, the study enhanced transmission efficiency to 80.2% (Wang et al., 2023).

For speed control of electro-mechanical systems, current loop and speed loop are generally considered separately, and in practice Proportional - Integral - Derivative (PID) control structures are used for these loops. PID control; It is still the most preferred and used control method in the industry due to reasons such as its stability, uncomplicated structure, applicability to a wide area, and ease of application on digital/analog platforms (Anwar et al., 2013). There are drawbacks to using these conventional controllers, particularly because of the non-linear mathematical model with uncertainties. Therefore, there are many studies in the literature on determining or improving the coefficients of the PID controller (Ramakrishnan et al., 2023). It also seems that efforts are being made to develop alternative methods. Some of the main studies from these studies are explained below.

Although the most commonly used method for determining controller parameters in PID controls is the Ziegler-Nichols method, artificial intelligence optimization algorithms have also been used widely in recent years. Particle swarm optimization (Ibrahim et al., 2014), artificial bee colony algorithm (Tarczewski & Grzesiak, 2018), genetic algorithm (Ansari et al., 2011), and whale optimization algorithm (Banerjee et al., 2022) methods were used to determine the PID controller coefficients used for speed control in BLDC motors and successful results were obtained.

The PID controller is used to regulate the BLDC motor that is fueled by a photovoltaic (PV) battery. The hybrid horse particle approach is used to determine the controller parameters. Traditional controllers containing PI controllers were not observed to meet expectations due to non-linear characteristics of the BLDC motor driver, and therefore it was suggested that efficiency could be improved with a hybrid gray wolf optimization (Younus et al., 2023). On the other hand, a study by Intidam and colleagues compared the performance of the control techniques applied to the high-performance brush-free DC (BLDC) engine (PI-ANFIS, PSO-PI- ANFIS) (Intidam et al., 2023).

The industrial sectors are experiencing a growing need for engine control systems that are accurate and effective. BLDC motors are widely used because of their extensive variety of applications, high efficiency, and dependability. The integration of the FPGA (Field Programmable Gate Array) control system, a versatile platform, with a BLDC motor, is clear to increase the efficiency of the system. However, the integration requires sensors to provide position feedback, a PID control algorithm written in hardware identification language (HDL) to regulate speed, and the necessary signals to power the engine. For instance, research (Muniraj et al., 2023) offered a workable and flexible FPGA-based solution for BLDC engine speed management. In their research, Udayakumar and associates transformed power from the solar panel during the day using a three-phase DC-AC converter, stored it in a battery, and then replicated the process using a three-phase FPGA converter (Udayakumar et al., 2023). In another study, the fuzzy rules of the Fuzzy logic membership function were optimized with the GWO and modeled with FPGA (Ahmed & Yahia, 2024). FPGA was used in a study by Antic and colleagues to create the parity ratio of DC motor failures (Antic et al., 2023).

When traditional controllers are used, disadvantages arise, especially due to the non-linear mathematical model with uncertainties. With this motivation, this study aims to develop an alternative solution to existing studies to solve the problem in question. That is, the purpose is to determine the PI coefficients for speed control of the BLDC motor using Gray Wolf Optimization (GWO) and then apply it using FPGA. In the order that the applications were put into place within the parameters of this goal; i) The traditional PI control is used to implement the control mechanism, ii) To improve the system, PI ratios are determined using the Grey Wolf Optimization method, iii) By using the Systems Generator, the BLDC motor's PI, sensor, and position data are gathered for simulation on the FPGA and then sent to the Matlab/Simulink platform, iv) The engine simulated with FPGA was experimentally tested with the BASYS3 training card.

## MATERIAL AND METHOD

The BLDC motor cannot operate at its best when combined with a non-linear system, despite the PI controller's straightforward design and cost-effectiveness as a result of its non-linear feature (Younus et al., 2023). High-performance BLDC motor dynamic speed tracking and load control sensitivity drivers are crucial for industrial applications. To improve the performance of the BLDC motor, this article is adjusted with the GWO-PI-based optimization method for the speed control of the BLDC motor.

### *Speed control in brushless DC motor*

BLDC motors have a permanent magnetic rotor and three stator brackets. The mathematical representation of these motors is similar in many ways to the conventional DC motors. (Shary et al., 2023). The addition of motor phases differs in mathematical representation from the DC motor. The resistant and inductive layout of the BLDC motor is affected by these phases (Nasri et al., 2007). The three-phase star-connected BLDC motor can be described using the following equations.

$$v_{ab} = R(i_a - i_b) + L \frac{d}{dt}(i_a - i_b) + e_a - e_b \quad (1)$$

$$v_{bc} = R(i_b - i_c) + L \frac{d}{dt}(i_b - i_c) + e_b - e_c \quad (2)$$

$$v_{ca} = R(i_c - i_a) + L \frac{d}{dt}(i_c - i_a) + e_c - e_a \quad (3)$$

$$T_e = k_f w_m + J \frac{dw_m}{dt} + T_L \quad (4)$$

$$w_r = \frac{d\theta_r}{dt} \quad (5)$$

Here  $v_{ab}$  represents the phase-phase voltages of  $v_{bc}$  and  $v_{ca}$ ,  $i_a$ ,  $i_b$  and  $i_c$  amper stator currents. L represents the motor's self-induction, the electromagnetic force  $e_a$ ,  $e_b$  and  $e_c$ , the magnetic moment of the motor  $T_e$ , the  $T_L$  load moment. J defines the attribute of the rotor, the friction constant is given by  $k_f$ , the motor's rotor speed is given in r (rad/s), and r (rad) gives the position of the rotor. The parameters for the BLDC engine used in the MATLAB/Simulink Simscape Block library used in this paper are given in Table 1.

Table 1. Motor Features Utilized in This Research

Brushless DC motor type	BLY171D_24_1400
Terminal voltage	24 V
Output power (P)	9800 W
Phase Number (Connection)	3 (Star)
No load Speed (w)	1400 rpm
Nominal current ( $I_n$ )	0.90 A
Number of poles (p)	8

The motor's momentum or current is regulated by the internal control circuit in BLDC motor. To achieve this, the reference current is continuously monitored by monitoring the current, which also monitors the motor phase currents. In the external control circuit, the motor speed is controlled. As feedback, actual engine speed information from position sensors is applied to the speed controller. In this study, an open circuit control was carried out to ensure that the BLDC motor works under nominal conditions without current refueling. So, in the system, the necessary electronic commutation operation has been performed to turn the motor, based on the rotor position information obtained from the sensors of the engine without the current being returned. A block scheme of the driver system is shown in Figure 1. The BLDC motor receives rotor rotation information and signaling to the position sensor. With the incoming signal, the keys receive the transmission information. At the same time, the speed information received from the rotor mill is passed through the speed control of the reference speed and the amount of error, and the inverter is applied  $V_{dc}$  voltage. Figure 1 (a) shows the inverter system of a typical BLDC motor, and Figure 1 (b) shows the speed control structure.

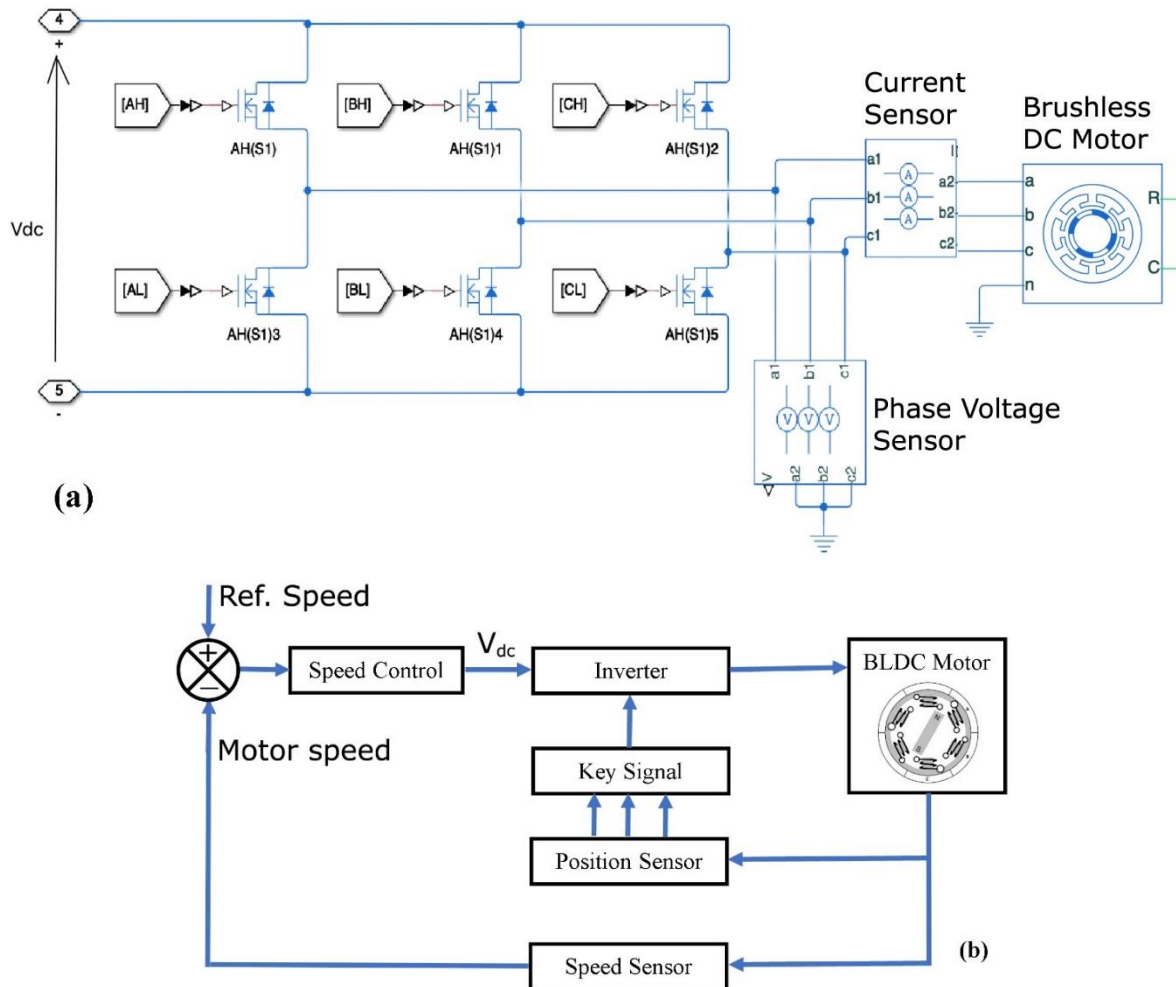


Figure 1. a) Typical Inverter System for a Brushless DC Motor, b) Speed Control System of Brushless DC Motor

### ***Determination of PI parameters in the speed control of a brushless DC motor***

This article controls the speed of BLDC motors using traditional PI and GWO-PI controllers. The speed information obtained through both controls was studied together with the reference speed. The details of the methods are briefly described in this section.

#### ***i) A Classical approach to determining PI parameters***

The system can be properly controlled by the PID (Proportional-Integral-Derivative) controller with the classical degree of integrity, with the correct determination of the parameters of the controller. The PI control method is used to reduce the permanent state error of the system, and the overall structure is shown in Figure 2. PI control is a method that produces a control signal in proportion to the width of the error signal between the input and output signals. (Padula & Visioli, 2011). The mathematical definition of PI coefficients is given in equation 6.

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt \quad (6)$$

Artificial intelligence approaches are commonly employed in parameter determination, in addition to the Ziegler-Nichols method, which was designed to obtain PID ratios experimentally (Zhou, 2022). This is a result of the non-linear characteristic of the variables that are asked to be examined. Due to these disadvantages, optimization methods are used to improve PI ratios. In this study, the  $K_p$  and  $K_i$  parameters of the PI controller were determined using the GWO Method.

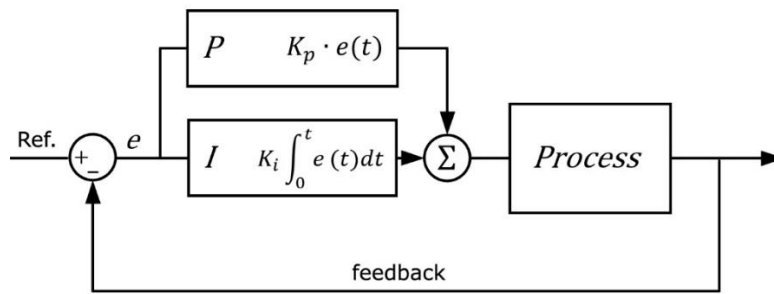


Figure 2. General Structure of the PI Controller

#### ***ii) Grey Wolf Optimization algorithm***

GWO is inspired by the hierarchy and hunting behavior of gray wolf populations. Wolves are alpha, beta, delta, and omega gray wolves. Exploration, encirclement, and attack are the three phases of the hunting process. All stages are performed simultaneously with the optimization process. Mirjalili introduced a brand-new, potent meta-intuitive optimization called GWO (Mirjalili & Lewis, 2014). It is comprehensible and useful to use because it is based on animals and the natural world. The primary advantage of GWO is its adaptability, simplicity, and clarity. In power system and machinery control applications, in HVDC (High voltage direct current) applications for optimum power flow, and in high voltage transmission lines, the GWO method is used in the account of transmission line parameters (Shaikh et al., 2021). In order to optimize engineering design challenges, a GWO method was proposed by the reference study (Mirjalili, 2015). Because it abides by the laws of the wolf pack, the alpha is a dominating species among the four groups of wolves. Beta class refers to the secondary wolves that help alpha decide. Omega represents the gray wolves in the lowest order. The wolf community is a delta if it does not belong to any of these three groups.

Mathematically, any optimization problem that considers alpha ( $\alpha$ ) as the optimal answer can be addressed while accounting for the wolf's social order. Beta ( $\beta$ ) and Delta ( $\delta$ ) represent the second and third best solutions, respectively. The GWO approach consists of three main steps: tracking, searching, hunting, and approaching potential catches.

Wrapping around the hunt; Gray wolves surround the hunt during hunting; equations (7-11) are used to mathematically model surrounding behavior (Mirjalili & Lewis, 2014; Shaikh et al., 2021; Mirjalili, 2015):

$$D = |CX_p(t) - X(t)| \quad (7)$$

$$X(t + 1) = X_p(t) - A \cdot |C \cdot X_p(t) - X(t)| \quad (8)$$

$$A = 2a \cdot r_1 - a \quad (9)$$

$$C = 2 \cdot r_2 \quad (10)$$

$$a = 2 - 2 \frac{t}{Max\_iter} \quad (11)$$

Where  $X$  represents the gray wolf's position vector,  $X_p$  represents hunting position vectors.  $t$  displays the existing repetition,  $A$  and  $C$  are vectors of the coefficient, representing the random number between  $r_1$  and  $r_2$ ,  $[0,1]$ , and  $a$  represents the linear decrease in the coefficient and  $Max\_iter$  maximum repetition as iteration progresses from 2 to 0.

**Hunting Strategy (Search):** Gray wolves have the ability to identify potential hunting locations, and the search process is mainly conducted under the guidance of  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\delta$  wolves. Every iteration maintains the top three wolves ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\delta$ ) in the existing population, after which the locations of the remaining search agents are adjusted based on the location data. The equations (12–14) are applied in this stage.

$$D_\alpha = |C_1 * X_\alpha - X(t)|$$

$$D_\beta = |C_2 * X_\beta - X(t)| \quad (12)$$

$$D_\delta = |C_3 * X_\delta - X(t)|$$

$$X_1 = |X_\alpha - a_1 D_\alpha|$$

$$X_2 = |X_\beta - a_2 D_\beta| \quad (13)$$

$$X_3 = |X_\delta - a_1 D_\delta|$$

$$X(t + 1) = \frac{X_1 + X_2 + X_3}{3} \quad (14)$$

where,  $X(t+1)$  represents the new location of the catch.

**Attacking Hunt:** By reducing the value of  $a$ , the range of change of  $A$  is reduced. The calling agent's next position will be in between the hunting and the catching locations when  $A$  reaches any value in the range  $[-1, 1]$ .

### iii) Performance Index

The GWO method is used to determine the optimal values and the performance index is used for the optimal solution under the GWO. In this study, the performance index is Integral Time Absolute Error (ITAE), as defined in equation 15.

$$ITAE = \int_0^\infty t|e(t)|dt \quad (15)$$

The frequency of the error occurring in each iteration is determined by ITAE and the minimum ITAE-error value is sought for optimal parameters.

### Determination of GWO parameters in the speed control of a brushless DC motor

In this study, the aim is to determine PI ratings for the speed control of a BLDC motor with GWO and to apply FPGA. The block diagram of the proposed design is shown in Figure 3(a). The optimization method minimizes errors, and instant error types that occur throughout time are achieved using these functions, as you can see. The ITAE cost function, which performs well in the literature, was utilized in this paper.

MATLAB/Simulink was used to model the BLDC motor's speed regulation based on the previously described study. The BLDC motor provided information about rotor speed, which was then sent to the position sensors. The error was



obtained by comparing the speed information received from the rotor shaft with the reference speed. The error is routed through traditional PI control, and the inverter receives a  $V_{dc}$  voltage. A PI control comparison is shown in Figure 3(b).

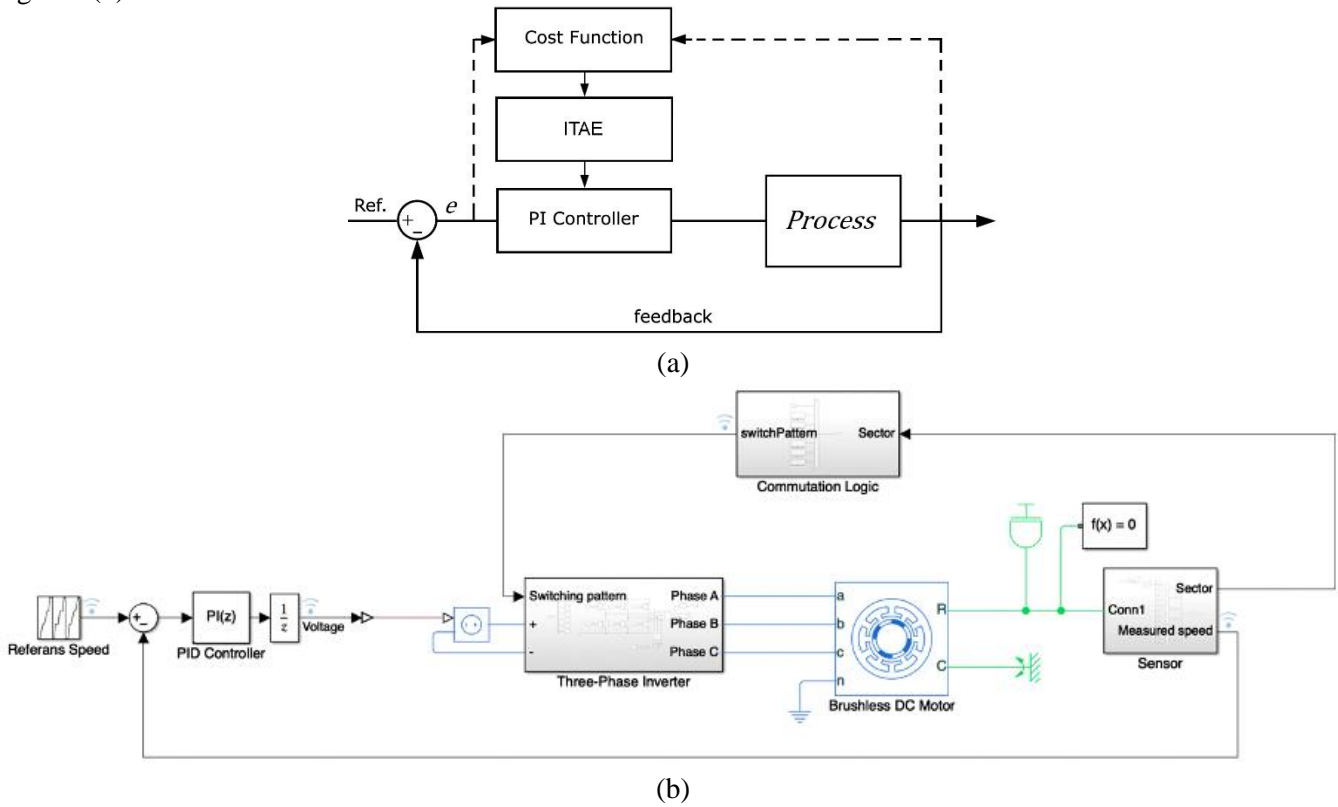


Figure 3. (a) General Structure of the PI Controller,  
 (b) Speed Control Simulation of BLDC Motor in MATLAB/Simulink

### FPGA Application

FPGA can be defined as a matrix of configurable logic ports combined with configurable paths (Arserim et al., 2019). The study's applicability can be tested on the flexible and potent FPGA integrated circuit, which has a distinctive approach to digital hardware design (Muniraj et al., 2023). The availability of numerous scientific works in industry is a topic of dispute when it comes to literature. In order to overcome this problem, field programmable gate sequences (FPGA) have been introduced. The FPGA-based PI speed control device is designed to effectively withstand changes in speed during dynamic motor conditions (Usman & Rajpurohit, 2020). Therefore, the recommended FPGA controller is used in the industry to maintain the constant speed response of a motor in operation in the event of any failure. To validate the findings of the MATLAB/Simulink comparison study, this paper looks at an experimental examination of a BLDC engine driver using an FPGA-based algorithm created on the Xilinx ISE tool.

The Basys3 FPGA card is a start-up card with an affordable clock speed of 100 MHz with an AMD-Xilinx Artix-7 FPGA (Figure 4). The Basys3 card has LEDs and other input-output cards to design without the need for any other hardware (digilent, 2022).



Figure 4. BASYS3 FPGA Training Card Utilized in this Research

## RESULTS

### *Defining PI Parameters with Classical and GWO*

The goal is to employ GWO to determine the PI coefficients for the BLDC motor's speed control and to implement it using FPGA. For this reason, an empirical method has been mostly used to determine the PI parameters. Then, GWO is used to optimize the PI values. In this optimization process, different numbers of agents have been tested and the best performance has been achieved with 30 gray wolf agents. 50 iterations were used in the optimization work. Thus, the PI parameters obtained with both classical and GWO are shown in Table 2.

Table 2. PI Coefficients and Associated Cost Value

	Kp	Ki	Cost
PI	0.001	2	---
GWO- PI	10	10	6.0710

The GWO and ITAE cost functions were used to improve the speed result of the simulation, and the Kp and Ki parameters for the new PI were determined. The performance change of the classic PI parameters with the new parameters obtained is shown in Figure 5. The BLDC motor began to turn at 300 rpm in 0.5 seconds, then 600 and 900 rpm in 1 second intervals. As seen in the figure, the speed change obtained with GWO-PI has the same change as the ref. speed. However, the classical PI speed exhibits a change close to the ref. speed.

Considering the purpose of this study and the suggested method, no study with the exact same scenario has been found. However, similar studies using different aims and methods can be seen in the literature. One of these researches was suggested by Gökçe et al. and in this study, a sinusoidal disturbance was employed as a load to brushed DC motor for speed control. PSO and classical methods were compared for various frequencies of disturbance and it was seen that PSO clearly has more performance than that of classical method especially in higher frequencies. In another research, Ibrahim et al. compared the PSO method with the Bacterial Foraging (BF) approach for determining the ideal PID controller settings for BLDC motor speed regulation. It is demonstrated by the suggested way that the PSO method performs better than BF, particularly in terms of the system's dynamic performance. In another study, it was aimed to determine PID parameters by hybrid method including PSO and GWO. The suggested method gives better results than the PSO and GWO algorithms.

It is seen that successful studies have been carried out in PID parameter determination related to BLDC, but most of these studies have been completed on simulations, not on hardware implementation. The difference in this study is that the simulation study was tested on hardware.

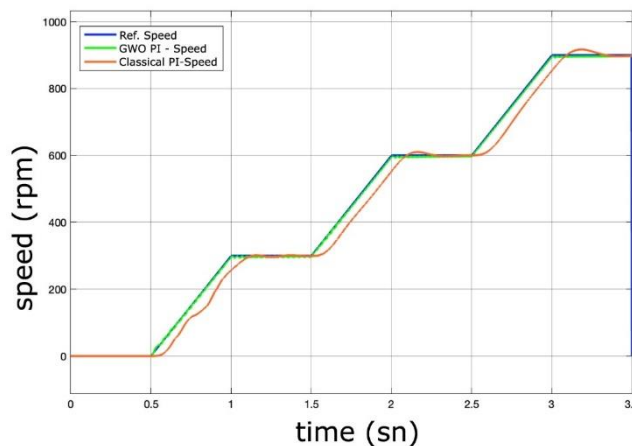


Figure 5. Speed-time Chart of the BLDC Motor with PI, GWO-PI

### *Color Space Modeling and Co-Simulation of Speed Control of BLDC Motor with FPGA*

Similarity in MATLAB/Simulator modeled in FPGA via System Generator. In the modeling work, the PI, the Key Signals, and the Sensor block were re-modelled with FPGA.

The modeling used improved  $K_p$  and  $K_i$  parameters obtained by the GWO-PI optimization method in the second phase. Figure 6 shows a model with FPGA of the BLDC motor speed control PI, key signal, and position sensor blocks, modeled through the System Generator.

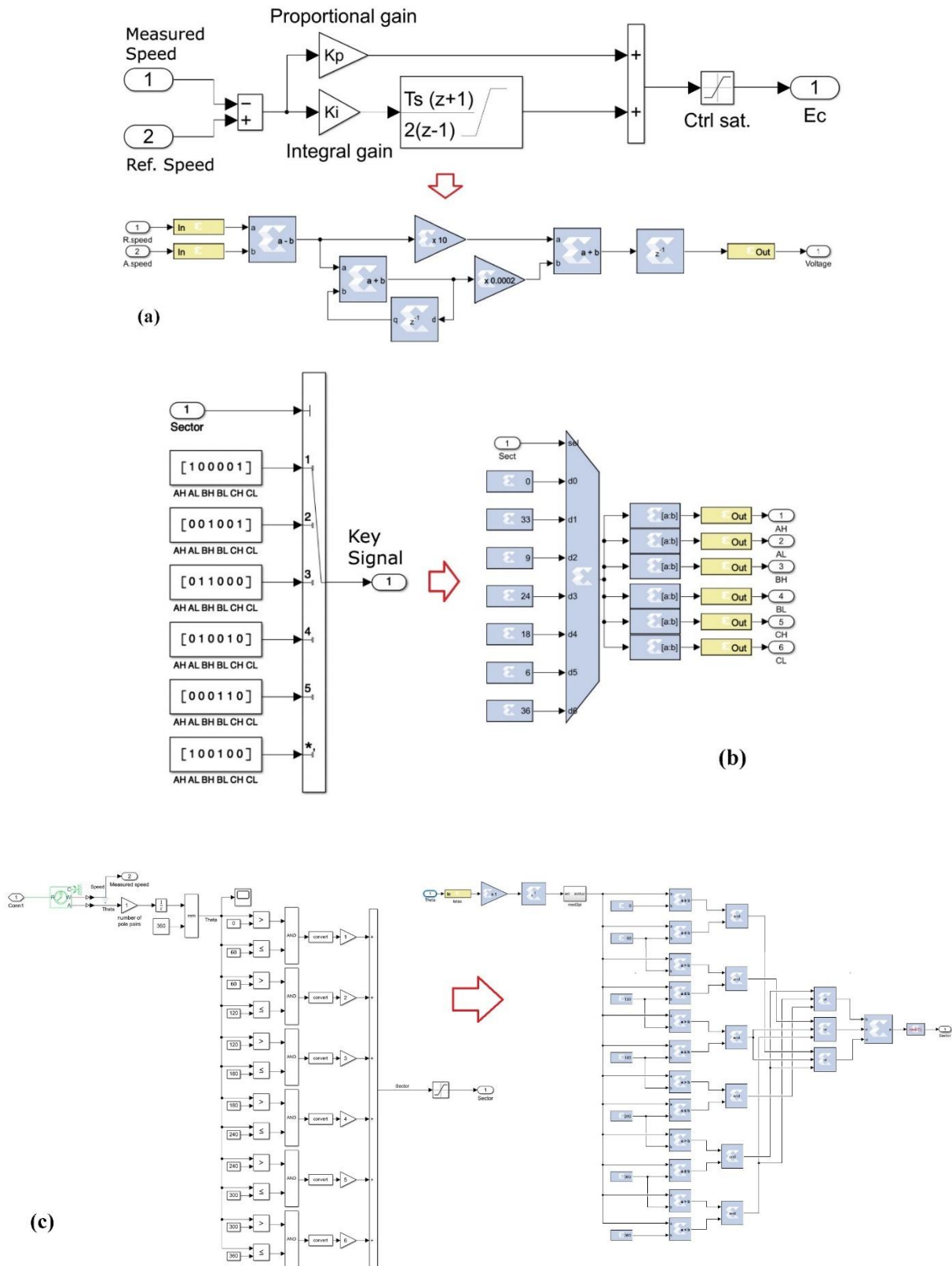


Figure 6. (a) PI, (b) Key Signal, (c) Models of Position Sensors Blocks with FPGA

A co-simulation of the parallel study in the next phase was carried out. The applicability of the study through co-simulation has been tested in industry. Figure 7 shows a co-simulation of the BLDC motor speed control.

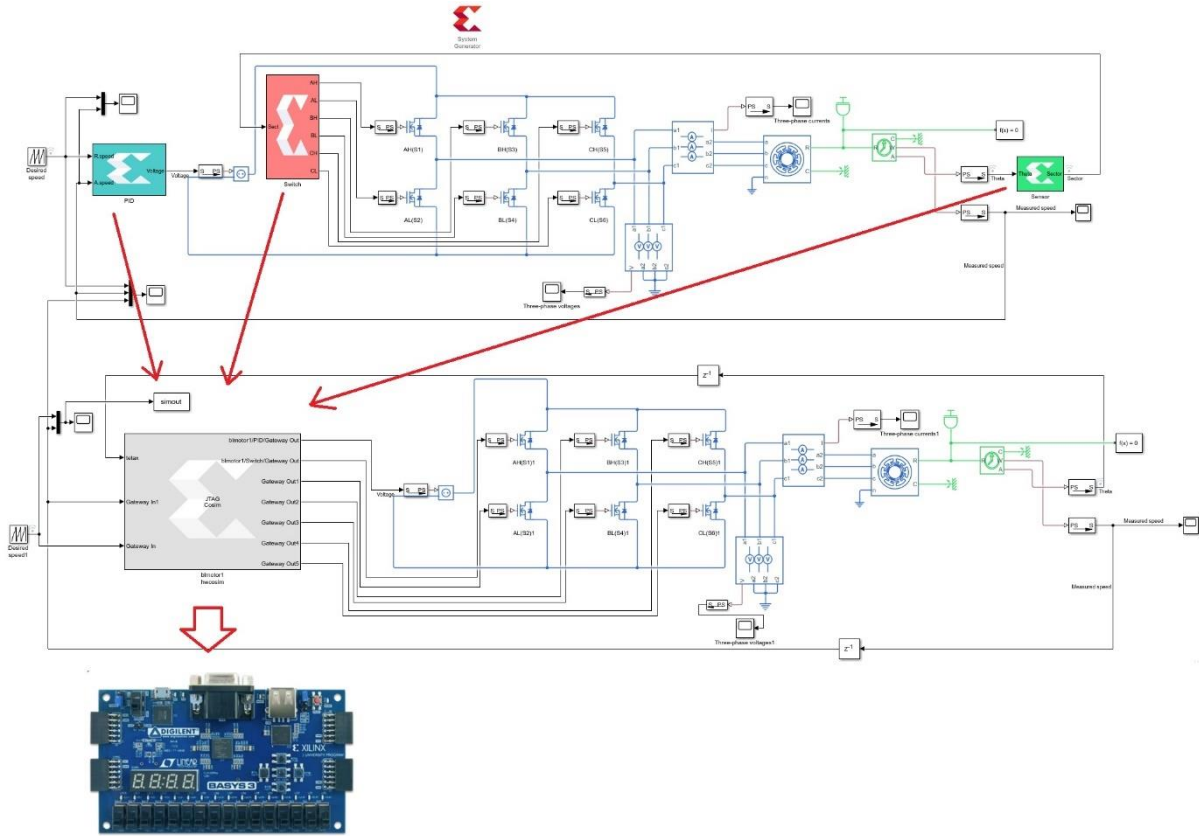


Figure 7. (a) PI, (b) Key signal, (c) Models of Position Sensors Blocks with FPGA

Figure 8 displays a picture of the experimental investigation that is displayed beneath the text. The speed control of a BLDC motor was made using the FPGA block optimization of the Gray Wolf PI provided by the AMD-Xilinx System Generator in the Matlab/Simulink program.

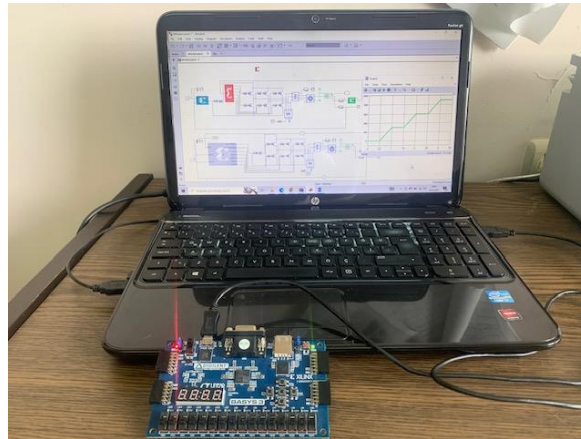


Figure 8. Experimental Application of BLDC Motor Speed Control with Basys3 FPGA Card

## CONCLUSION

When traditional controllers are used, disadvantages arise, especially due to the non-linear mathematical model with uncertainties. With this motivation, this study aims to develop an alternative solution to existing studies to solve the problem in question. That is, the purpose is to determine the PI coefficients for speed control of the brushless DC motor using GWO and then implement it with FPGA. Using MATLAB / Simulink, the control strategy model for the BLDC motor was first constructed during the investigation stages. In determining the coefficient of controllers, the speed of BLCD was gradually increased, that is the BLDC motor began to turn at 300 rpm in 0.5 seconds, then 600 and 900 rpm in 1 second intervals. Speed control results were obtained with the classical PI controller and the

GWO method was optimized using the ITAE cost function to improve the  $K_p$  and  $K_i$  values of the PI parameters.  $K_p$  and  $K_i$  values obtained with classical PI and GWO-PI were compared with the reference speed and the improvement of speed control in optimization was observed. That is, the speed change obtained with GWO-PI has the same change as the reference speed. However, the classical PI speed exhibits a change close to the reference speed. It is seen also that successful studies have been carried out in PID parameter determination related to BLDC, but most of these studies have been completed on simulations, not on hardware implementation. The difference in this study is that the simulation study was tested on hardware. The performance obtained from the GWO-PI method was simulated on FPGA via the model's Systems Generator program with increased values. The results of the simulation were co-simulated with the BASYS3 FPGA training card. Improved GWO-PI results show that the BLDC motor can be used in industry at increasing speeds.

## THANKS

I would like to thank Dr. Muhammet Ali ARSERIM a member of the Dicle University Faculty of Electrical Electronics Engineering, who supported the FPGA application of the study.

## REFERENCES

- Abro, K. A., Atangana, A. & Gómez-Aguilar, J. (2022). Chaos control and characterization of brushless DC motor via integral and differential fractal-fractional techniques. *International Journal Of Modelling and Simulation*, 43(4), 416-425. <https://doi.org/10.1080/02286203.2022.2086743>
- Ahmed, S. & Yahia, K. (2024). Implementation of fuzzy logic controller algorithm with mf optimization on FPGA. *Statistics, Optimization and Information Computing*, (12), 182-199. DOI: 10.19139/soic-2310-5070-1790
- Ansari, U., Alam, S., & Jafri, S. M. U. N., (2011). Modeling and control of three phase BLDC motor using PID with genetic algorithm. *Proceedings - 2011 UKSim 13th International Conference on Modelling and Simulation, UKSim 2011*, 189–194. <https://doi.org/10.1109/UKSIM.2011.44>
- Antic, S., Lukovic, V., Rosic, M. & Pesovic, U. (2023, June). FPGA digital circuit for actuator and sensor FDI of DC motor with an amplifier. *International Conference on Electrical Electronics and Computer Engineering (ICETRAN)*. East Sarajevo.
- Anwar, M. N., Pan, S., (2013). Synthesis of the PID controller using desired closed-loop response. *10th IFAC International Symposium on Dynamics and Control of Process Systems*, 46 (32), 385-390.
- Arserim, M. A. Haydaroglu, C., Acar, H. & Uçar, A. (2019). Forming and co-simulation of square and triangular waveforms by using system generator. *Balkan Journal of Electrical & Computer Engineering*, 7(3), 337-341. DOI: 10.17694/bajece.505842
- Banerjee, S., Kumar, S. S., Alam, A., (2022). Whale Optimization Algorithm (WOA) Based Speed Control of BLDC Motor. *2022 IEEE 2nd International Conference on Sustainable Energy and Future Electric Transportation (SeFeT)*, Hyderabad, India, 2022, pp. 1-6, doi: 10.1109/SeFeT55524.2022.9909419.
- Bharatkar, S.S., Yanamshetti, R., Chatterjee, D., & Ganguli, A.K. (2011). Dual-Mode Switching Technique for Reduction of Commutation Torque Ripple of Brushless Dc Motor. *IET Electr. Power Appl.*, 5, 193–202
- Digilent, <https://digilent.com/shop/basys-3-artix-7-fpga-trainerboard-recommended-for-introductoryusers> (Accessed 18.08.2022).
- Gökbulut, M, Dandil, B, Bal, C., (2006). *A Hybrid Neuro-Fuzzy Controller for Brushless DC Motors*. Editor: Savacı FA. *Artificial Intelligence and Neural Networks*, 125-132, Springer Berlin Heidelberg.
- Hooshmand, M., Yaghobi, H. & Jazaeri, M. (2023). Speed and rotor position estimation for sensorless brushless DC motor drive based on particle filter. *Electrical Engineering*, 105, 1797–1810. <https://doi.org/10.1007/s00202-023-01773-y>
- Ibrahim, H. E. A., Hassan, F. N., & Shomer, A. O., (2014). Optimal PID control of a brushless DC motor using PSO and BF techniques. *Ain Shams Engineering Journal*, 5(2), 391–398. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2013.09.013>
- Intidam, A., Fadil, H. E., Housny, H., Idrissi, Z. E., Lassoui, A., Nady, S. & Laafouabdeslam, A. J. (2023). Development and experimental implementation of optimized PI-ANFIS controller for speed control of a brushless DC motor in fuel cell electric vehicles. *Energies*, 4396 (16), 1-23. <https://doi.org/10.3390/en16114395>

- Jin Y, Tang Z, Wen Y, Zou, H., (2006). High performance adaptive control for BLDC motor with realtime estimation of uncertainties. 21th Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, Dallas, TX, USA, 19-23
- Krishnan, R. (2017). Switched Reluctance Motor Drives: Modeling, Simulation, Analysis. Design, and Applications; CRC Press: Boca Raton, FL, USA, ISBN 1315220067.
- Liu, Y, Zhao, J, Xia, M, Luo, H., (2014). Model reference adaptive control-based speed control of brushless DC motors with low-resolution Hall-effect sensors. IEEE Transactions on Power Electronics, 29(3), 1514-1522.
- Masoudi, H., Kiyoumars, A., Madani, S. M. & Ataei, M. (2023). Closed-loop direct power control of brushless dc motor in field weakening region. IEEE Transactions On Transportation Electrification.
- Miller, T.J.E. (1989). Brushless Permanent-Magnet and Reluctance Motor Drives. Clarendon Press: Oxford, UK.
- Mirjalili, S. & Lewis, A. (2014). Grey wolf optimizer. Advances in Engineering Software, 69, 41-46. <http://dx.doi.org/10.1016/j.advengsoft.2013.12.007>
- Mirjalili, S. (2015). How effective is the grey wolf optimizer in training multi-layer perceptrons. Appl Intell, 43, 150-161. DOI 10.1007/s10489-014-0645-7
- Muniraj, C., Kamatchi, K.V., Periasamy, B., Karthikeyan, G., Deepak, S. & Muhammed, M. (2023). Experimental implementation of speed control of a brushless DC motor using FPGA. Proceedings of the Second International Conference on Automation, Computing and Renewable Systems (ICACRS), IEEE.
- Nasri, M., Nezamabadi-Pour, H. & Maghfoori, M. (2007). A PSO-based optimum design of PID controller for a linear brushless DC motor. International Journal of Electrical and Information Engineering, 1(2), 171-175. [scholar.waset.org/1307-6892/10876](http://scholar.waset.org/1307-6892/10876)
- Padula, F. & Visioli, A. (2011). Tuning rules for optimal PID and Fractional-order PID controllers. Journal of Process Control, Cilt: 21, No:1, s:69-81.
- Premkumar, K, Manikandan, B.V., (2014). Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System based speed controller for brushless DC motor. Neurocomputing, 138, 260-270.
- Ramakrishnan, A., Shunmugalatha, A. & Premkumar, K. (2023). An improved tuning of PIDcontroller for pv battery-powered brushless DC motor speed regulation using hybrid horse herd particle swarm optimization. International Journal of Photoenergy, 2777505, pp:1-23. <https://doi.org/10.1155/2023/2777505>
- Shaikh, M. S., Hua, C., Jatoi, M. A., Ansari, M. M. & Qader A. A. (2021). Application of grey wolf optimisation algorithm in parameter calculation of overhead transmission line system. IET Science, Measurement & Technology, (15), 218-231. DOI: 10.1049/smt2.12023
- Shary, D. K., Nekad, H. J. & Alawan, M. A. (2023). Speed control of brushless dc motors using (conventional, heuristic, and intelligent) methods-based PID controllers. Indonesian Journal of Electrical Engineering And Computer Science, 30 (3), 1359-1368. 10.11591/ijeecs.v30.i3
- Tarczewski, T., & Grzesiak, L. M., (2018). An Application of Novel Nature-Inspired Optimization Algorithms to Auto-Tuning State Feedback Speed Controller for PMSM. IEEE Transactions on Industry Applications, 54(3), 2913–2925. <https://doi.org/10.1109/TIA.2018.2805300>
- Udayakumar, A. K., Raghavan, R. R. V., Houran, M. A., Elavarasan, R. M., Kalavathy, A. N. & Hossain, E. (2023). Three-port bi-directional DC-DC converter with solar pv system fed BLDC motor drive using FPGA. Energies, 624 (16), pp: 1-21. <https://doi.org/10.3390/en16020624>
- Usman, A. & Rajpurohit, B. S. (2020). Design and control of a BLDC motor drive using hybrid modeling technique and FPGA based hysteresis current controller. IEEE, India.
- Wang, H., Chau, T., Liu, W. & Goetz, S. M. (2023). Design and control of wireless permanent-magnet brushless DC motors. IEEE Transactions on Energy Conversion, 38(4), 2969-2979. <https://doi.org/10.1109/TEC.2023.3292178>.
- Wang, H.P., Liu Y.T., (2006). Integrated design of speed-sensorless and adaptive speed controller for a brushless DC motor. IEEE Transactions on Power Electronics, 21(2), 518-523.
- Wang, Y, Xia, C, Zhang, M, Liu D., (2007). Adaptive speed control for brushless DC motors based on genetic algorithm and RBF neural network". 2007 IEEE International Conference on Control and Automation, Guangzhou, China.

Yorat, E., Özbek, N. S. & Sarıbulut, L. (2023). Fırçasız doğru akım motor kontrol yöntemlerinin düşük maliyetli mikrodenetleyici tabanlı gerçek zamanlı deneylerle performans değerlendirmesi. Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 11(2), 498-510. 10.29109/gujsc.1229896

Younus, S. M. Y., Kutbay, U. & Rahebi, J. F. H. (2023). Hybrid gray wolf optimization–Proportional integral based speed controllers for brush-less dc motor. Energies, 1640(16), 1-18. <https://doi.org/10.3390/en16041640>

Zhou, Y. (2022). A Summary of PID Control Algorithms Based on AI-Enabled Embedded Systems. Security and Communication Networks, vol. Article ID 7156713, 7 pages



# Kahramanmaraş Sütçü İmam University Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 25.03.2024  
Kabul Tarihi : 25.04.2024

Received Date : 25.03.2024  
Accepted Date : 25.04.2024

## FACILE ULTRASONIC-ASSISTED ZIF-67 SYNTHESIS AND USE IN PHENOL REMOVAL FROM AQUEOUS SOLUTIONS

### BASIT ULTRASONİK-DESTEKLI ZIF-67 SENTEZİ VE SULU ÇÖZELTİLERDEN FENOLÜN UZAKLAŞTIRILMASINDA KULLANIMI

Cihan GEÇGEL<sup>1\*</sup> (ORCID: 0000-0001-7998-0811)

<sup>1</sup>Mersin University, Advanced Technology Education Research and Application Center, Mersin, Türkiye

\*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Cihan GEÇGEL, cgecgel@mersin.edu.tr

#### ABSTRACT

Recently, water-stable ZIF MOFs, a new material class with a very large surface area, have attracted attention for the removal of organic pollutants. This type of MOF's excellent adsorption capacities, large pore volumes, and recyclability performances stand out compared to many other adsorbents. In this work, the ZIF-67 structure, a cobalt-containing ZIF, was synthesized using the ultrasound-assisted solvothermal method, and its phenol adsorption performance was investigated. The characterization of the ZIF-67 structure was carried out by SEM-EDS, XRD, FTIR, and nitrogen adsorption analyses. Nitrogen adsorption data showed that ZIF-67 had microporosity, and the surface area calculated from the BET model was 1656 m<sup>2</sup>/g. To synthesize ZIF-67, optimization of phenol adsorption, one of the important pollutants in water, was investigated by response surface method (RSM) for initial phenol concentration, adsorbent concentration, pH, and temperature variables. At the operating levels determined by RSM, the most effective removal of 92.2% was obtained at 30°C, 1 g/L adsorbent concentration, 20 mg/L initial phenol concentration, and pH 6.5. The adsorption isotherm of phenol onto ZIF-67 was fit to the Langmuir model, which is a monolayer interaction. According to the Langmuir isotherm model, the maximum phenol adsorption capacity of ZIF-67 was determined as 303.0 mg/g.

**Keywords:** Experimental design, phenol adsorption, zeolitic imidazole framework, ultrasonic-assisted synthesis

#### ÖZET

Oldukça geniş yüzey alanına sahip yeni bir malzeme sınıfı olan suya dayanıklı ZIF MOF'lar, organik kirleticilerin uzaklaştırılması konusunda son yıllarda dikkat çekmektedir. Bu tip MOF'ların mükemmel adsorpsiyon kapasiteleri, geniş gözenek hacimleri ve geri dönüştürülebilirlik performansları diğer birçok adsorbanla karşılaştırıldığında öne çıkmaktadır. Bu çalışmada da kobalt içerikli bir ZIF yapısı (ZIF-67) ultrasonik destekli solvotermal yöntem kullanılarak sentezlendi ve fenol adsorpsiyon performansı araştırıldı. Sentezlenen ZIF yapısının karakterizasyonu SEM-EDS, XRD, FTIR ve nitrojen adsorpsiyon analizleri ile gerçekleştirildi. Azot adsorpsiyon verileri, ZIF-67'nin mikro gözenekliliğe sahip olduğunu ve Brauner Emmet Teller (BET) modelinden hesaplanan yüzey alanının 1656 m<sup>2</sup>/g olduğunu gösterdi. ZIF-67'yi sentezlemek için sudaki önemli kirleticilerden biri olan fenol adsorpsiyonunun optimizasyonu, başlangıç fenol derişimi, adsorbent derişimi, pH ve sıcaklık değişkenleri için yanıt yüzey yöntemi (RSM) ile araştırıldı. RSM ile belirlenen çalışma seviyelerinde %92,2'lik en etkili giderim 30°C'de, 1 g/L adsorban derişiminde, 20 mg/L başlangıç fenol derişiminde ve pH 6,5'te elde edildi. Fenolün ZIF-67 üzerine adsorpsiyon izotermi, tek katmanlı bir etkileşim olan Langmuir modeline uyuyordu. Langmuir izoterm modeline göre ZIF-67'nin maksimum fenol adsorpsiyon kapasitesi 303,0 mg/g olarak belirlendi.

**Anahtar Kelimeler:** Deneysel tasarımı, Fenol adsorpsiyonu, Zeolitik imidazol kafesler, Ultrasonik destekli sentez



## INTRODUCTION

Metal-organic frameworks (MOFs) are a new type of nanoporous crystalline material constructed by metal ions (or metal nodes) and organic binders. They have shown great potential as materials for gas separation and storage, sensing, catalysis, and biomedicine due to their large surface area, adjustable pore size, and good physicochemical characteristics. Zeolitic imidazole frameworks (ZIF) are also a subset of MOFs that are topologically similar to zeolites. ZIFs have an anionic structure as opposed to MOFs' neutral structures. It is the extra cage ions that balance the negative charge in their structure, and ion exchange occurs thanks to these ions (Czaja et al., 2009; C. Duan et al., 2022). Because they can maintain chemical stability in a humid environment, unlike many MOFs, they have potential applications in areas like heterogeneous catalysis, separation processes, and sensors in aqueous mediums.

ZIFs constitute a distinct and intriguing subclass of porous MOFs, consisting of imidazolate ligands and tetrahedral metal cations ( $M^{1/4} Zn$  or  $Co$ ) ( Qian et al., 2012; C. Duan et al., 2022). For the synthesis of ZIFs, several synthesis methods have been developed. The principal techniques include Sono-chemical, Electrochemical, Mechano-chemical, Solvo-thermal, Hydro-thermal, and Microwave methods (Kalauni et al., 2022). Reaction time, temperature, pressure, solvent type, starting material ratio, and initial pH are crucial parameters to consider when using MOF synthesis techniques (Czaja et al., 2009). In terms of the applicability of MOFs, it is also desired that the synthesis be environmentally friendly and economical. Producing MOFs quickly and with minimal harm to the environment is possible with sonochemically-assisted synthesis.

Phenol is an organic compound that is discharged from wastewater from various industries, including the coal processing, petrochemical, pharmaceutical, polymeric resin, and pesticide industries (Xie et al., 2020). It belongs to the class of organic compounds that are toxic and can lead to either acute or chronic illnesses (Gundogdu et al., 2012). Serious problems with the environment and human health can result from even very low concentrations of phenol in water. Furthermore, the potential for phenol to convert into more harmful substances through interactions with other compounds is considered a significant concern, in addition to its inherent toxicity (Gundogdu et al., 2012). International regulatory agencies do not want low levels of phenol in surface waters because of this.

MOFs have been extensively researched for their potential to remove a variety of dangerous organic compounds, including dyes, pesticides, and aromatic hydrocarbons (G. Liu et al., 2018; Dai et al., 2021; Kouser et al., 2022; Garg & Sabouni, 2023). In this study, the phenol adsorption ability of the ZIF-67 synthesized was examined. The effect of process variables on phenol removal, such as temperature, initial phenol concentration, adsorbent dose concentration, and pH, was investigated with the response surface method face-centered composite design. The isotherms of phenol to ZIF-67 were examined to determine the adsorption mechanism. Facile and rapid ultrasonic-assisted synthesis of ZIF-67 structure is a relatively new technique. This study, in which the characterization of the synthesized ZIF-67 is presented and its phenol removal performance is evaluated, will contribute to the literature for studies in these areas.

## MATERIALS AND METHODS

### *ZIF-67 Synthesis*

In the synthesis of the ZIF-67 structure, 2-methylimidazole (MeIM) was used as the linker, cobalt nitrate salt as the metal source, and ultrapure water as the solvent. For the synthesis of ZIF structures, 2 mmol of  $Co(NO_3)_6 \cdot 6H_2O$  (Sigma Aldrich, 99%) salt and 2 mmol of MeIM (Acros-Organics, 99%) were mixed in 50 mL of ultrapure water until a clear solution was obtained. It was kept in an ultrasonic bath for 30 minutes and then in an oven at 80 °C for 2 hours. At the end of the period, the mixture was centrifuged, washed several times with water, and dried in methanol in a vacuum oven kept at room temperature.

### *Characterization of ZIF-67*

The synthesized ZIF-67 structure was characterized by scanning electron microscopy- energy dispersive X-ray spectroscopy (SEM-EDS), X-ray diffraction (XRD), Fourier-transform infrared analysis (FTIR), and nitrogen adsorption measurements. The SEM images and chemical analysis of ZIF-67 were recorded with a Zeiss Supra 55 field emission instrument (Carl Zeiss, Germany). The XRD pattern was obtained using a Rigaku Smartlab model XRD (Japan) at  $Cu-K\alpha$  radiation ( $\lambda = 1.54 \text{ \AA}$ ). The analysis was carried out in continuous scans from 2° to 50° at a scan rate of 2 theta min<sup>-1</sup>. The FTIR spectra were recorded with the MIR mode at room temperature by accumulating 10 scans at a 1 cm<sup>-1</sup> resolution in the 4000–400 cm<sup>-1</sup> region by a Perkin Elmer/MIR spectrometer with a Pike Technologies Gladi ATR accessory. The nitrogen adsorption isotherm was analysed at 77 K using a Micromeritics

Tristar Orion II 3020 surface area and porosimetry analyzer (Micromeritics, Norcross, USA). The sample was degassed at 573 K for 12 h using a sample degas system (Micromeritics VacPrep 061, Norcross, USA) before N<sub>2</sub> adsorption measurement. Density functional theory (DFT), Barrett-Joyner-Halenda (BJH), t-plot, Langmuir, and Brunauer-Emmett-Teller (BET) models were employed to analyze the surface properties based on the resulting isotherms.

### Phenol Adsorption Experiments

The face-centered central composite design (FCCD) model was utilized in the design of adsorption experiments to extract phenol from water using the synthesized ZIF-67. The experimental design was created at 3 levels for 4 independent variables temperature (A), adsorbent concentration (B), initial phenol concentration (C), and pH (D). Phenol removal (%) adsorption was determined as a response. Table 1 includes independent variables, codes, and levels for the used model design.

**Table 1.** Face-Centred Central Composite Design Variables, Codes, and Levels

Variables, unit	Codes	Levels
Temperature, (°C)	A	-1 0 +1
Initial Phenol concentration, (mg/L)	B	-1 0 +1
Adsorbent concentration, (g/L)	C	-1 0 +1
pH	D	-1 0 +1

Experiments on phenol adsorption were conducted in a 250 mL erlenmeyer with a 100 mL working volume. The desired initial phenol concentration ( $C_i$ ) was prepared by diluting the 200 mg phenol/L solution. In preliminary studies, the equilibrium time was determined to be 120 minutes. The concentration of phenol in the aqueous solution was detected using a gas chromatography flame ionization detector (GC-FID Agilent 6890A). GC-FID was equipped with a polyethylene glycol column (HP-Innowax, 30m x 0.25 mm x 0.25  $\mu$ m) and an autosampler. The GC-FID working parameters were: inlet temperature, 250 °C; carrier gas, Helium; oven conditions, isocratic 170 °C for 10 min; injection mode, 1/10 split; injection volume, 1.0  $\mu$ L; detector temperature, 270 °C. In the analysis, benzyl alcohol (Benzyl alcohol; 99%) was used as an internal standard, analytical grade phenol (Sigma-Aldrich; 99.5%) was used as a reference, and acetone was used for dilutions. The calibration curve was created to be between 20-100 mg/L. The phenol (%) removal was calculated with Equation 1.

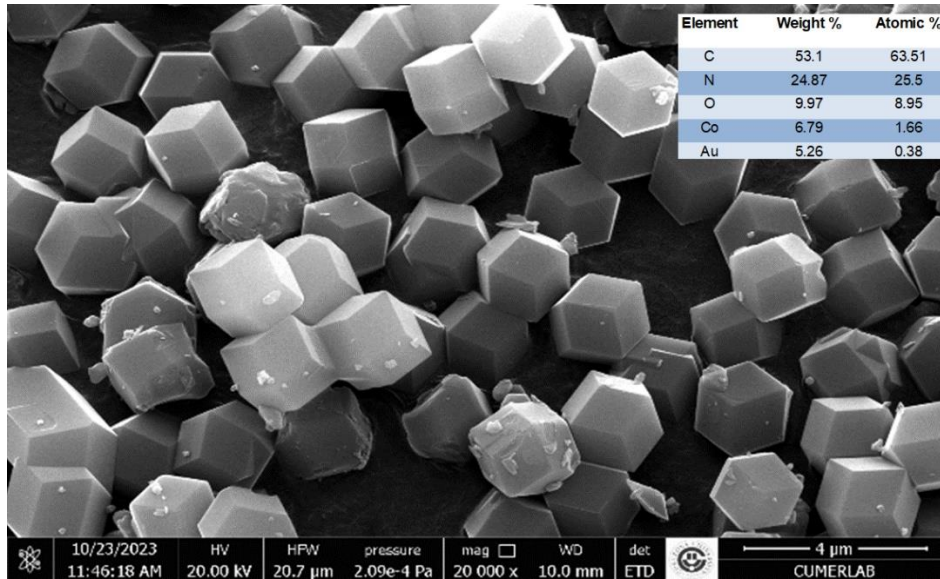
$$\text{Removal of phenol (R, \%)} = \frac{C_i - C_e}{C_i} \times 100 \quad (1)$$

where  $C_i$  and  $C_e$  are the initial and equilibrium phenol concentrations, respectively.

## RESULTS AND DISCUSSION

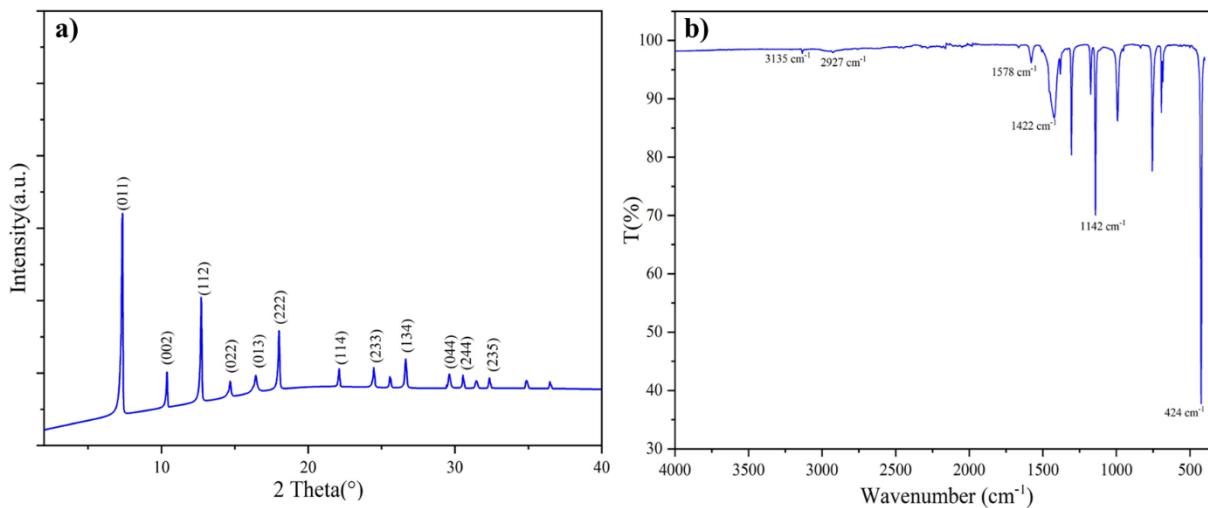
### Characterization

The morphology of ZIF-67 synthesized with ultrasonic support was first clarified by SEM and EDX analyses. Figure 1a, the image of the SEM of ZIF-67, shows that the ZIF-67 crystals are in a polyhedral shape with sizes about 1  $\mu$ m. ZIF-67 crystal structures with similar shapes and different sizes have been reported in the literature (Qin et al., 2017; Wu et al., 2016). It may be concluded that for ZIF-67, a compound with the chemical formula, the element distribution is consistent. EDS analysis for ZIF-67, a compound with the chemical formula C<sub>24</sub> H<sub>30</sub> Co<sub>3</sub> N<sub>12</sub> O<sub>2</sub>, shows that the elemental distribution is consistent.



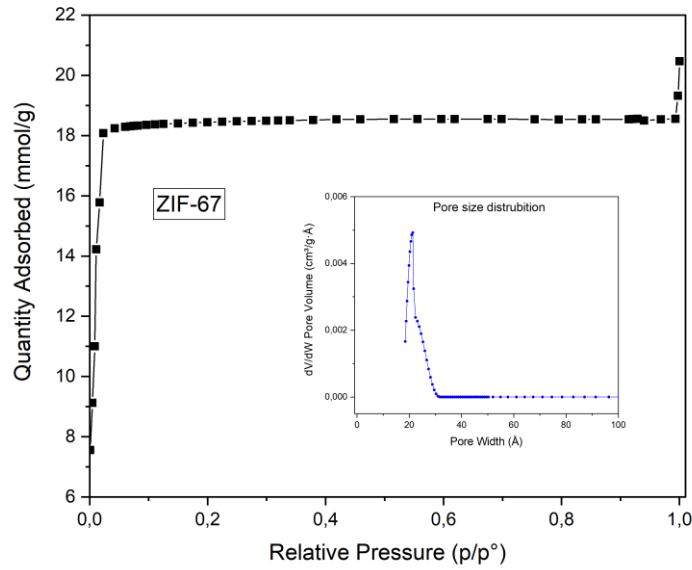
**Figure 1.** SEM Image and EDS Analysis of ZIF-67

Figure 2 shows the XRD pattern and FTIR spectrum of the as-synthesized ZIF-67. When the XRD pattern of the ZIF-67 structure given in Figure 2a was compared with the simulated model given in the literature, it was observed that the product was compatible with pure ZIF-67 (J. Qian et al., 2012; L. Qian et al., 2018; S. Duan et al., 2024). The ZIF-67 structure contains many diffraction peaks in the range of 2–40° in the 2θ. Selectable diffraction peaks 2θ=7.3°, 10.3°, 12.7°, 14.7°, 16.4°, 18.0°, 22.1°, 24.5°, 26.6°, 29.6°, 30.5°, and 32.3° crystal planes are fully compatible (0 1 1), (0 0 2), (1 1 2), (0 2 2), (0 1 3), (2 2 2), (1 1 4), (2 3 3), (1 3 4), (0 4 4), (2 4 4), and (2 3 5), respectively. Analysis of the surface functional groups of the ZIF-67 structure was evaluated by FTIR analysis in Figure 2b. The peaks at 2922 cm<sup>-1</sup> and 3135 cm<sup>-1</sup> in the FTIR spectrum of the ZIF-67 structure are due to the stretching vibration of the aliphatic C-H and O-H of MeIM, respectively. The peak at 1581 cm<sup>-1</sup> results from the C=N ligand. The peak at 1422 cm<sup>-1</sup> indicates the C-C group from MeIM. The peak of 424 cm<sup>-1</sup> corresponds to the successful complexation of cobalt ions with imidazole (L. Qian et al., 2018; S. Duan et al., 2024). Briefly, the FTIR spectrum of the ZIF-67 structure synthesized in this study shows that MeIM and Co ions are successfully coordinated and coincide with the studies given in the literature for ZIF-67.



**Figure 2.** a. XRD Pattern and b. FTIR Spectrum of ZIF-67

The characterization of the surface properties of ZIFs is very important for adsorption and catalysis applications. The nitrogen adsorption isotherm created to determine the textural properties of the synthesized ZIF-67 structure, such as surface area and porosity, is shown in Figure 3. It can be seen from Figure 3 that the ZIF-67 adsorption isotherm is quite similar to the Type 1 isotherm type. This shows that the structure has microporosity. Moreover, the inset graph in Figure 3 shows that ZIF-67 has a narrow pore size distribution according to the nonlocal density functional theory (NLDFT) method.



**Figure 3.** Nitrogen Adsorption Isotherm and Pore Size Distribution Plot (Inset) of ZIF-67

Table 2 displays the ZIF-67 structure's surface characteristics, such as specific surface area, micropore volume, pore size, and pore volume. BET and Langmuir models calculated ZIF-67's surface area to be 1656 m<sup>2</sup>/g and 1813 m<sup>2</sup>/g, respectively. The results showed that the maximum porous volume was 0.643 cm<sup>3</sup>/g, and the microporous volume was 0.632 cm<sup>3</sup>/g. The t-plot model's calculation of the micropore surface area is extremely close to the total surface area, indicating that microporosity is the predominant porosity. The pore size value of 1.08 nm calculated by BJH confirms the microporosity of the synthesized ZIF-67. The microporosity and specific surface area of ZIF-67 were consistent with other studies of ZIF-67 produced by different synthesis techniques ( J. Qian et al., 2012; Pan et al., 2016; Nguyen Thi Thanh Tu et al., 2019).

**Table 2.** The Experimental Results of BET Surface Area, Average Pore Diameter, Maximum Pore Volume, and Particle Size of ZIF-67

	S <sub>BET</sub> (m <sup>2</sup> /g)	S <sub>Langmuir</sub> (m <sup>2</sup> /g)	Average pore size <sup>a</sup> (nm)	Maximum Pore Volume <sup>b</sup> (cm <sup>3</sup> /g)	t- plot micro pore volume (cm <sup>3</sup> /g)	t-plot micro pore area m <sup>2</sup> /g
<b>ZIF-67</b>	1656	1813	1.08	0.643	0.632	1643

<sup>a</sup>Barrett-Joyner-Halenda (BJH) adsorption model, <sup>b</sup> Horvath-Kawazoe model at P/P<sup>0</sup> = 0.929

## Adsorption Experiments

### Adsorption isotherms

The adsorption mechanism of phenol onto ZIF-67 can be analyzed with adsorption isotherms created using adsorption equilibrium data. The two most widely used sorption models, the Langmuir isotherm model and the Freundlich isotherm model were applied to investigate the phenol's adsorption onto the ZIF-67 structure. The assumption that adsorption is a monolayer is the foundation of the Langmuir isotherm. The saturated adsorption capacity can be computed in this manner. The following equation shows the Langmuir model in its linear form Equation 2:

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{K_L q_{max}} + \frac{C_e}{q_{max}} \quad (2)$$

where q<sub>e</sub> is the equilibrium adsorption capacity (mg/g), K<sub>L</sub> is the Langmuir constant related to the sorption energy, C<sub>e</sub> is the equilibrium phenol concentration (mg/L), and q<sub>max</sub> is the maximum amount of phenol per unit weight of ZIF-67 (mg/g) to form a complete monolayer on the surface.

The concept, based on the Freundlich isotherm, assumes that adsorption on a heterogeneous surface is not uniform but is the result of a multilayer process. The linear form of the Freundlich isotherm model is a line equation with shift ln K<sub>F</sub> and slope 1/n. Freundlich isotherm constants are found from the log C<sub>e</sub> versus log q<sub>e</sub> graph according to Equation 3:

$$\log q_e = \log K_F + \frac{1}{n} \log C_e \quad (3)$$

Adsorption isotherms were investigated at concentrations ranging from 20 to 100 mg phenol/L, a constant adsorbent concentration of 1 g/L, and 30 °C. Table 3 presents the linearized isotherm data for both models along with the calculated model constants ( $K_L$ ,  $K_F$ , and  $n$ ) and correlation coefficients ( $R^2$ ). Many studies on phenol adsorption have suggested that adsorption data fit these two models, indicating a mixed adsorption behavior. When the correlation coefficients ( $R^2$ ) are compared, the higher value of the Langmuir model results in it being more suitable than the Freundlich model. This indicated that the adsorption of phenol took place in a monolayer within the specified working range of phenol concentration. Stated differently, ZIF-67 exhibited a uniform phenol adsorption interface. The maximum phenol adsorption capacity value of 303.0 mg/g determined by the Langmuir isotherm for ZIF-67 was noteworthy.

**Table 3.** The Constants for the Langmuir and Freundlich Isotherms

Isotherms	Constans	Value
<b>Langmuir</b>	$R^2$	0.991
	$K_L$ (L/g)	0.028
	$q_{max}$ (mg/g)	303.0
<b>Freundlich</b>	$R^2$	0.985
	$K_F$ (mg/g) (L/mg) <sup>-n</sup>	193.5
	$n$	1.219

The phenol adsorption capacity for ZIF-67 was determined as 303.0 according to the Langmuir model at initial concentrations ranging from 20 to 100 mg/L. Phenol adsorption capacities of some adsorbents are summarized in Table 4. Table 4 shows that ultrasonic-assisted synthesized ZIF-67 was prominent in phenol adsorption.

**Table 4.** The Phenol Adsorption Capacity of Some Adsorbents

Adsorbents	$q_{max}$ (mg/g)	References
Commercial AC	212.9	Xie et al., 2020
MIL-53(Cr)	398.0	Maes et al., 2011
Coconut magnetic AC	116.0	Gonçalves Júnior et al. 2022
Activated Clay	18.9	Djebbar et al. 2012
Functional chitosan	131.5	Li et al. 2009
Modified granular coconut AC	143.0	Desmiarti et al. 2019
Sugarcane bagasse AC	42.9	Mohtashami et al. 2018
Activated carbon fibers	110.2	Liu et al. 2010
Oily sludge AC	434.0	Mojoudi et al. 2019
Alkaline modified olive stone AC	500.0	Nouha et al. 2019
Ultrasonic assisted ZIF-67	303.0	This work

### ***Effects of variables on the phenol adsorption***

In this section, the effect of parameters such as temperature 20-40 °C (A), adsorbent concentration 0.5-1.5 g/L (B), initial phenol concentration 20-100 mg/L (C), and pH 4-9 (D) on the phenol adsorption process was investigated

using the face-centered central composite design (FCCD). The following Equation 4 was used to determine the number of experiments based on the k factor: where k and cp (6) represent the factor and the center point numbers, respectively.

$$N = 2^k + 2k + 6 \tag{4}$$

Phenol removal (%) was chosen as the answer, and the statistical model suggested 30 experiments, as seen in Table 5. The data provided suggests that the most effective removal efficiency achieved was 92.2% at a temperature of 30°C, an adsorbent concentration of 1 g/L, an initial phenol concentration of 20 mg/L, and a pH of 6.5.

**Table 5.** Experimental Design and Responses.

Run	A: Temperature	B: Adsorbent Concentration	C: Initial Phenol Concentration	D: pH	Removal phenol
	°C	g/L	mg/L		%
1	30	1	100	6.5	84.7
2	40	0.5	20	9	72.3
3	20	0.5	100	9	58.5
4	30	1	20	6.5	92.2
5	30	1	60	6.5	85.8
6	30	1	60	6.5	86.1
7	20	0.5	20	9	54.6
8	30	1	60	6.5	85.9
9	20	1.5	20	9	84.5
10	20	1.5	20	4	83.4
11	40	0.5	20	4	74.6
12	30	1	60	9	81.6
13	20	1.5	100	4	90.1
14	40	0.5	100	9	54.7
15	20	1.5	100	9	88.7
16	30	1	60	6.5	84.2
17	30	1	60	6.5	86.2
18	40	1	60	6.5	80.4
19	20	0.5	100	4	60.3
20	20	1	60	6.5	82.6
21	40	1.5	100	4	72.6
22	40	1.5	100	9	74.2
23	30	1	60	4	80.3
24	30	1	60	6.5	85.7
25	40	1.5	20	4	88.7
26	40	1.5	20	9	86.4
27	30	0.5	60	6.5	64.6
28	20	0.5	20	4	58.7
29	40	0.5	100	4	59.2
30	30	1.5	60	6.5	88.9

Statistical Model Fit Summary (used Design-Expert 11 software) suggested that phenol removal by ZIF-67 fit the quadratic model (Table 6). There is a reasonable agreement between the adjusted R<sup>2</sup> of 0.9892 and the predicted R<sup>2</sup> of 0.9700; there is a less than 0.2 difference.

**Table 6.** Statistical Fit Summary

Source	Sequential p-value	Lack of Fit p-value	Adjusted R <sup>2</sup>	Predicted R <sup>2</sup>	
Linear	0.0001	< 0.0001	0.5217	0.3687	
2FI	0.1898	< 0.0001	0.5856	0.0448	
<b>Quadratic</b>	<b>&lt; 0.0001</b>	<b>0.0799</b>	<b>0.9892</b>	<b>0.9700</b>	<b>Suggested</b>
Cubic	0.5535	0.0289	0.9886	0.5170	Aliased

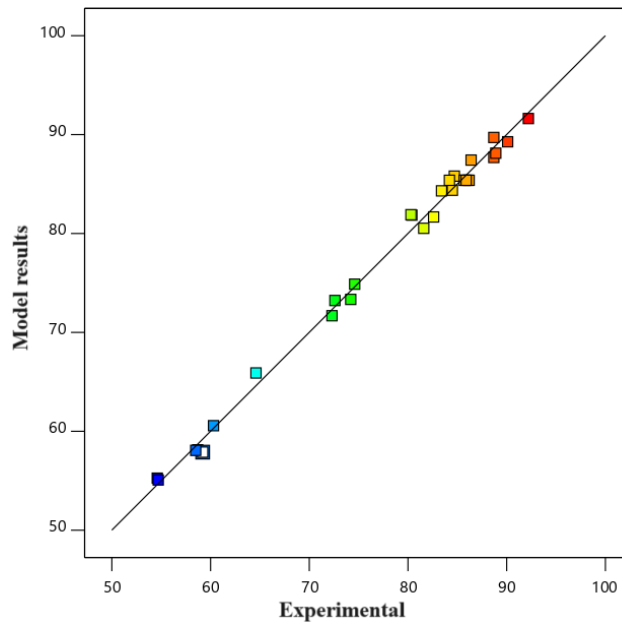
A statistical technique called analysis of variance (ANOVA) is employed to assess how well independent variables influence the response. ANOVA was used to assess the quality of the resulting model; the results are shown in Table 7. For phenol removal, the model's F value was found to be 189.86, indicating its significance. Generally speaking, noise accounts for 0.01% of F values. P-values below 0.05 signify the significance of the model terms. Significant model terms in this instance are B, C, D, AB, AC, BD, A<sup>2</sup>, B<sup>2</sup>, C, and D<sup>2</sup>. The model terms are not significant if the values are greater than 0.1000. Consequently, the ANOVA results for the removal of phenol by adsorption on ZIF-67 suggest that the model fit. Additionally, a comparison of the experimental and projected results for the removal of phenol is shown in Figure 4. It is evident that there is a straight line connecting the experimental and model results.

**Table 7.** ANOVA Results of the Models Obtained by FCCD

Source	Sum of Squares	df	Mean Square	F-value	p-value	
<b>Model</b>	4033.19	14	288.08	189.86	< 0.0001	significant
<b>A-Temperature</b>	0.1606	1	0.1606	0.1058	0.7495	
<b>B-Adsorbent Concentration</b>	2222.22	1	2222.22	1464.55	< 0.0001	
<b>C-Phenol Concentration</b>	152.54	1	152.54	100.53	< 0.0001	
<b>D-pH</b>	8.54	1	8.54	5.63	0.0315	
<b>AB</b>	178.89	1	178.89	117.90	< 0.0001	
<b>AC</b>	377.33	1	377.33	248.68	< 0.0001	
<b>AD</b>	0.1056	1	0.1056	0.0696	0.7955	
<b>BC</b>	6.38	1	6.38	4.20	0.0583	
<b>BD</b>	8.56	1	8.56	5.64	0.0313	
<b>CD</b>	0.1406	1	0.1406	0.0927	0.7650	
<b>A<sup>2</sup></b>	33.92	1	33.92	22.36	0.0003	
<b>B<sup>2</sup></b>	181.44	1	181.44	119.58	< 0.0001	
<b>C<sup>2</sup></b>	28.76	1	28.76	18.95	0.0006	
<b>D<sup>2</sup></b>	45.02	1	45.02	29.67	< 0.0001	
<b>Residual</b>	22.76	15	1.52			
<b>Lack of Fit</b>	20.07	10	2.01	3.72	0.0799	not significant
<b>Pure Error</b>	2.70	5	0.5390			
<b>Cor Total</b>	4055.95	29				

The obtained model-fit equation for phenol adsorption was shown in model Equation 5. Model Equation 5 shows that variables A and B have a positive effect on phenol elimination, but variables C and D have a negative effect. The magnitudes of the coefficients of the equation indicate that B (adsorbent concentration) for phenol removal is the most effective variable.

$$Y_{R(\%)}=0.094A+11.11B-2.91C-0.689D-3.34AB-4.86AC-0.081AD+0.631BC+0.731BD+ 0.094CD-3.62A^2-8.37B^2+3.33C^2-4.17D^2+85.38 \quad (5)$$

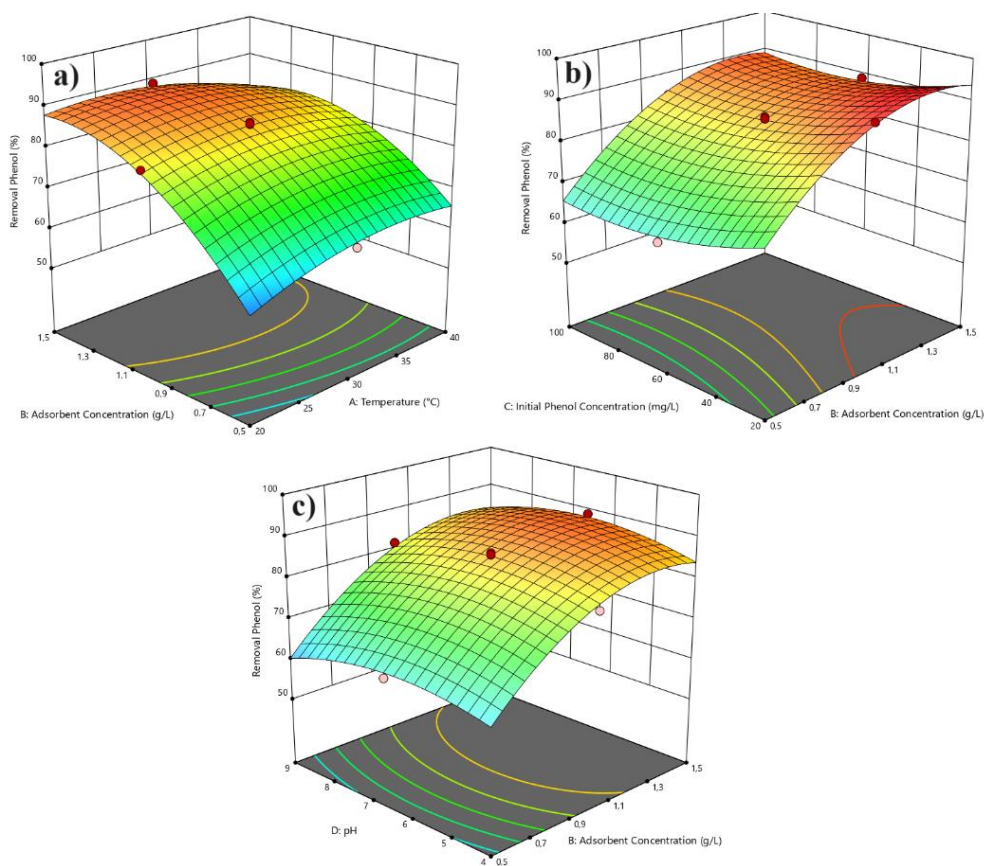


**Figure 4.** Comparison of Experiment and the FCCD Model Results for Phenol Adsorption Onto ZIF-67

***Interactive effect of variables on phenol adsorption***

The interactive effect of adsorbent concentration, which is the most important variable for phenol adsorption with ZIF-67, with other variables has been shown by the response surface 3D graphs (Figure 5-a-c) in the experimental range. These graphs allow for the prediction of the interactive influence of independent variables on the response to phenol removal. The interaction effect of temperature and adsorbent concentration on the percentage of phenol removed is shown in Figure 5a, with an initial phenol concentration of 60 mg/L and pH of 6.5. It can be seen from Figure 5a that phenol removal increases significantly as the adsorbent concentration changes from 0.5 g/L to 1.5 g/L at 20 °C. The highest phenol removal is achieved at 1.5 g/L adsorbent concentration and 20 °C temperature. On the contrary, at 40 °C, as the adsorbent concentration changed from 0.5 g/L to 1.5 g/L, phenol removal increased until 1.0 g/L and then decreased. The most likely reason for this result is that as the adsorbent concentration increases at this temperature, due to the agglomeration of the adsorbent, the active adsorption sites decrease, or the passage of phenol molecules to the active sites is prevented. The interaction effect of the initial phenol concentration and the adsorbent concentration on the phenol adsorption percentage is displayed in Fig. 5b at constant temperature (30 °C) and pH (6.5). It can be seen in Figure 5b that phenol adsorption percentage increases significantly with increasing adsorbent concentration at low (20 mg/L) and high (100 mg/L) initial phenol concentrations. According to the graph in Figure 5b, the highest phenol removal percentage occurred at the initial phenol concentration of 20 mg/L, and the phenol removal percentage decreased slightly in the 60 mg/L phenol initial concentration region. The interaction effect of the pH and the adsorbent concentration on the phenol adsorption percentage is displayed in Fig. 5c at constant temperature (30 °C) and initial phenol concentration (60 mg/L). It can be seen in Figure 5c that the most effective phenol adsorption percentage occurs at neutral pH. This result may have been caused by the occupation of the active sites of the adsorbent under alkaline and acidic conditions.





**Figure 5.** 3D Surface Graph of the Interaction Effects: **a** Temperature (°C) and Adsorbent Concentration(g/L), **b** Adsorbent Concentration(g/L) and Initial Phenol Concentration (mg/L), **c** Adsorbent Concentration (g/L) and pH

## CONCLUSION

This study investigated the adsorptive removal of phenol, a dangerous pollutant in water, by ZIF-67, which was synthesized in a simple and environmentally friendly manner. ZIF-67 was synthesized using the ultrasonically assisted hydrothermal method in a very short time, and its characterization was accomplished. SEM images showed that the synthesized ZIF structure consisted of uniform polyhedral structures with a size of 1  $\mu\text{m}$ . The XRD pattern of ZIF-67 was quite consistent with the literature. The adsorption isotherm showed that the ZIF-67 structure is microporous. The effects of variables such as temperature, adsorbent concentration, initial phenol concentration, and pH on the adsorption of phenol on ZIF-67 were investigated with the experimental program created with FCCD. ANOVA findings showed that the most effective variable was the adsorbent concentration. The adsorption mechanism of phenol on the ZIF-67 was investigated by Langmuir and Freundlich models. Experimental data revealed that the phenol adsorption on the ZIF-67 is compatible with the Langmuir model, and the maximum adsorption capacity of the ZIF-67 is 303.3 mg/g. As a result, it has been shown that the ZIF-67 structure synthesized in this study has notable potential for phenol adsorption. The data presented in this study may provide some preliminary information on the adsorption of phenol and similar organics by ZIF-67. Advanced environmental and economic studies are needed to evaluate this study for further application.

## ACKNOWLEDGEMENTS

Thanks to the Mersin University Scientific Research Projects Unit for financial support (BAP project No. 2023-1-AP4-4878) and the Mersin University Advanced Technology, Education, Research, and Application Center (MEITAM), from whose infrastructure we benefited.

## REFERENCES

- Czaja, A. U., Trukhan, N., & Müller, U. (2009). Industrial applications of metal–organic frameworks. *Chemical Society Reviews*, 38(5), 1284–1293. <https://doi.org/10.1039/b804680h>
- Dai, H., Yuan, X., Jiang, L., Wang, H., Zhang, J., & Zhang, J. (2021). Recent advances on ZIF-8 composites for

- adsorption and photocatalytic wastewater pollutant removal: Fabrication , applications and perspective. *Coordination Chemistry Reviews*, 441, 213985. <https://doi.org/10.1016/j.ccr.2021.213985>
- Desmiarti, R., Martynis, M., Trianda, Y., Li, F., Viqri, A., & Yamada, T. (2019). Phenol adsorption in water by granular activated carbon from coconut shell. *Chemical Engineering*, 10(8), 1488-1497.. doi:10.14716/ijtech.v10i8.3463.
- Djebbar, M., F. Djafri, M. Bouchekara, and A. Djafri. 2012. "Adsorption of Phenol on Natural Clay." *Applied Water Science* 2(2): 77–86. doi:10.1007/s13201-012-0031-8.
- Duan, C., Yu, Y., & Hu, H. (2022). Recent progress on synthesis of ZIF-67-based materials and their application to heterogeneous catalysis. *Green Energy and Environment*, 7(1), 3–15. <https://doi.org/10.1016/j.gee.2020.12.023>
- Duan, S., Long, X., Liu, J., Jin, X., Zhao, G., & Li, J. (2024). Zeolitic Imidazole Framework ( ZIF )– Sponge Composite for Highly Efficient U(VI) Elimination. *Molecules*, 29(Vi), 408.
- Garg, R., & Sabouni, R. (2023). Efficient removal of cationic dye using ZIF-8 based sodium alginate composite beads: Performance evaluation in batch and column systems. *Chemosphere*, 342(September), 140163. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.140163>
- Gonçalves Júnior, D. R., de Araújo, P. C. C., Simões, A. L. G., Voll, F. A. P., Parizi, M. P. S., de Oliveira, L. H., ... & de Jesus Santos, E. (2022). Assessment of the adsorption capacity of phenol on magnetic activated carbon. *Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering*, 17(1), e2725. doi:10.1002/apj.2725.
- Gundogdu, A., Duran, C., Senturk, H. B., Soylak, M., Ozdes, D., Serencam, H., & Imamoglu, M. (2012). Adsorption of phenol from aqueous solution on a low-cost activated carbon produced from tea industry waste: Equilibrium, kinetic, and thermodynamic study. *Journal of Chemical and Engineering Data*, 57(10), 2733–2743. <https://doi.org/10.1021/je300597u>
- Kalauni, K., Vedrtam, A., Wdowin, M., & Chaturvedi, S. (2022). ZIF for CO<sub>2</sub> Capture: Structure, Mechanism, Optimization, and Modeling. *Processes*, 10(12). <https://doi.org/10.3390/pr10122689>
- Khay, I., Chaplais, G., Nouali, H., Ortiz, G., Marichal, C., & Patarin, J. (2016). Assessment of the energetic performances of various ZIFs with SOD or RHO topology using high pressure water intrusion-extrusion experiments. *Dalton Transactions*, 45(10), 4392–4400. <https://doi.org/10.1039/c5dt03486h>
- Kouser, S., Hezam, A., Khadri, M. J. N., & Khanum, S. A. (2022). A review on zeolite imidazole frameworks: synthesis, properties, and applications. *Journal of Porous Materials*, 29(3), 663–681. <https://doi.org/10.1007/s10934-021-01184-z>
- Li, J. M., Meng, X. G., Hu, C. W., & Du, J. (2009). Adsorption of phenol, p-chlorophenol and p-nitrophenol onto functional chitosan. *Bioresource Technology*, 100(3), 1168-1173. doi:10.1016/j.biortech.2008.09.015.
- Liu, G., Li, L., Huang, X., Zheng, S., Xu, X., Liu, Z., Zhang, Y., Wang, J., Lin, H., & Xu, D. (2018). Adsorption and removal of organophosphorus pesticides from environmental water and soil samples by using magnetic multi-walled carbon nanotubes @ organic framework ZIF-8. *Journal of Materials Science*, 53(15), 10772–10783. <https://doi.org/10.1007/s10853-018-2352-y>
- Liu, Q. S., Zheng, T., Wang, P., Jiang, J. P., & Li, N. (2010). Adsorption isotherm, kinetic and mechanism studies of some substituted phenols on activated carbon fibers. *Chemical Engineering Journal*, 157(2-3), 348-356. doi:10.1016/j.cej.2009.11.013.
- Liu, Y., Kravtsov, V. C., & Eddaoudi, M. (2008). Template-directed assembly of zeolite-like metal-organic frameworks (ZMOFs): A usf-ZMOF with an unprecedented zeolite topology. *Angewandte Chemie - International Edition*, 47(44), 8446–8449. <https://doi.org/10.1002/anie.200802680>
- Maes, M., Schouteden, S., Alaerts, L., Depla, D., & De Vos, D. E. (2011). Extracting organic contaminants from water using the metal–organic framework Cr III (OH)·{O<sub>2</sub>C–C<sub>6</sub>H<sub>4</sub>–CO<sub>2</sub>}<sub>2</sub>. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 13(13), 5587-5589. doi:10.1039/c0cp01703e.
- Mohtashami, S. A., Kolar, N. A., Kaghazchi, T., Asadi-Kesheh, R., & Soleimani, M. (2018). Optimization of sugarcane bagasse activation to achieve adsorbent with high affinity towards phenol. *Turkish Journal of Chemistry*, 42(6), 1720-1735. doi:10.3906/kim-1806-71.

- Mojoudi, N., N. Mirghaffari, M. Soleimani, H. Shariatmadari, C. Belver, and J. Bedia. 2019. "Phenol Adsorption on High Microporous Activated Carbons Prepared from Oily Sludge: Equilibrium, Kinetic and Thermodynamic Studies." *Scientific Reports* 9(1): 1–12. doi:10.1038/s41598-019-55794-4.
- Tu, N. T. T., Sy, P. C., Thien, T. V., Toan, T. T. T., Phong, N. H., Long, H. T., & Khieu, D. Q. (2019). Microwave-assisted synthesis and simultaneous electrochemical determination of dopamine and paracetamol using ZIF-67-modified electrode. *Journal of Materials Science*, 54(17), 11654-11670. <https://doi.org/10.1007/s10853-019-03709-z>
- Nouha, S., Souad, N. S., & Abdelmottalab, O. (2019). Enhanced adsorption of phenol using alkaline modified activated carbon prepared from olive stones. *Journal of the Chilean Chemical Society*, 64(1), 4352-4359. doi:10.4067/s0717-97072019000104352.
- Pan, Y., Li, Z., Zhang, Z., Tong, X. S., Li, H., Jia, C. Z., Liu, B., Sun, C. Y., Yang, L. Y., Chen, G. J., & Ma, D. Y. (2016). Adsorptive removal of phenol from aqueous solution with zeolitic imidazolate framework-67. *Journal of Environmental Management*, 169, 167–173. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.12.030>.
- Qian, J., Sun, F., & Qin, L. (2012). Hydrothermal synthesis of zeolitic imidazolate framework-67 (ZIF-67) nanocrystals. *Materials Letters*, 82(2012), 220–223. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2012.05.077>.
- Qian, L., Lei, D., Duan, X., Zhang, S., Song, W., Hou, C., & Tang, R. (2018). Design and preparation of metal-organic framework papers with enhanced mechanical properties and good antibacterial capacity. *Carbohydrate Polymers*, 192, 44–51. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.03.049>.
- Qin, J., Wang, S., & Wang, X. (2017). Applied Catalysis B: Environmental Visible-light reduction CO<sub>2</sub> with dodecahedral zeolitic imidazolate framework ZIF-67 as an efficient co-catalyst. *Applied Catalysis B, Environmental*, 209, 476–482. <https://doi.org/10.1016/j.apcatb.2017.03.018>.
- Wu, H., Qian, X., Zhu, H., Ma, S., Zhu, G., & Long, Y. (2016). Controlled synthesis of highly stable zeolitic imidazolate framework-67 dodecahedra and their use towards the templated formation of a hollow Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub> catalyst for CO oxidation. *RSC Advances*, 6(9), 6915–6920. <https://doi.org/10.1039/c5ra18557b>.
- Xie, B., Qin, J., Wang, S., Li, X., Sun, H., & Chen, W. (2020). Adsorption of Phenol on Commercial Activated Carbons: Modelling and Interpretation. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(3). <https://doi.org/10.3390/ijerph17030789>.



# Kahramanmaraş Sütçü İmam University

## Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 23.01.2024  
Kabul Tarihi : 28.08.2024

Received Date : 23.01.2024  
Accepted Date : 28.08.2024

### POROZİTE ANALİZİNE DERİN ÖĞRENME YAKLAŞIMI: U-NET İLE DİNAMİK EŞİKLEME

#### A DEEP LEARNING APPROACH TO POROSITY ANALYSIS: DYNAMIC THRESHOLDING WITH U-NET

Saim ERVURAL<sup>1\*</sup> (ORCID: 0000-0003-4104-1928)  
Emre Burak ERTUŞ<sup>2</sup> (ORCID: 0000-0002-3897-2409)  
Hüseyin Furkan CERAN<sup>3</sup> (ORCID: 0009-0006-2169-4680)

<sup>1-3</sup> KTO Karatay Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Konya, Türkiye  
<sup>2</sup> KTO Karatay Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Konya, Türkiye

\*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Saim Ervural, saim.ervural@karatay.edu.tr

#### ÖZET

Gözenekli malzemelerin porozite değerinin belirlenmesinde birçok fiziksel yöntem kullanılmaktadır ve bu yöntemler genellikle maliyetli cihazlar marifetiyle uygulanmaktadır. Ayrıca malzemelerde farklı seviyelerde (mikro, mezo ve makro) gözeneklilik bulunması kullanılacak yöntem seçimini de etkilemektedir. Bunun yanında görüntü işleme yöntemleri kullanılarak da porozite değeri hesaplanabilmekte, böylece hem zaman hem de maliyet tasarrufu sağlanabilmektedir. Bu çalışmada görüntü işleme tekniğindeki eşik belirleme aşamasında ImageJ programı kullanılarak sayısal porozitesi eşikli görüntü olarak görüntü verisine aktarılmıştır. Oluşturulan eşikli etiket verileri ile girdi SEM görüntüleri eşlenmiş ve oluşturulan veriseti veri artırma teknikleri kullanılarak genişletilmiştir. Çalışmada evrişimli sinir ağlarının özelleşmiş bir versiyonu olan U-Net mimarisi kullanılmış ve U-Net mimarisi, mikroskop görüntülerini segmentlere ayırarak gözenekli bölgeleri belirlemiş ve bu segmentlerin eşiklenmiş görüntülerine dayalı olarak gözeneklilik değerleri hesaplanmıştır. Uygulamada literatürden elde edilen gözenekli malzemelerin SEM görüntüleri kullanılmış, etiket görüntüleri olarak ise Arşimet prensibindeki porozite değerlerine göre gözenekli malzemenin ikili çıktıları manuel olarak eşiklenerek kaydedilmiştir. Çalışma sonucunda genel olarak fiziki ölçümlerle korelasyon sağlamış ve derin öğrenmeden faydalanan dinamik eşikleme sayesinde klasik görüntü işleme yöntemlerine göre daha başarılı sonuçlar elde edilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Gözenekli malzemeler, porozite, derin öğrenme, görüntü işleme

#### ABSTRACT

Many physical methods are used to determine the porosity of materials and these methods are generally applied by employing high cost devices. Also, the existence of variable levels of porosity (micro, meso and macro) in the material affects the type of method to be used. The porosity value can also be calculated using image processing methods, thus saving both time and money. In this study, the numerical porosity value was transferred to the image data as a thresholded image by using ImageJ software during the threshold determination phase in the image processing technique. The generated thresholded label data and the input SEM images were mapped, and the generated dataset was enhanced using the data augmentation methods. The U-Net architecture, a specialised version of convolutional neural networks, was used in the study. The U-Net architecture segmented the microscope images to identify porous regions and calculated porosity values based on the thresholded images of these segments. SEM images of porous materials obtained from the literature were used in the application, and the binary outputs of the porous material according to the porosity values in Archimedes' principle were manually thresholded and recorded as label images. Results were generally correlated with physical measurements and more successful results were obtained than classical image processing methods, thanks to dynamic thresholding using deep learning.

**Keywords:** Porous materials, porosity, deep learning, image processing.

ToCite: ERVURAL, S., ERTUŞ, E.B., & CERAN, H.F., (2024). POROZİTE ANALİZİNE DERİN ÖĞRENME YAKLAŞIMI: U-NET İLE DİNAMİK EŞİKLEME. Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 27(3), 1069-1077.

## GİRİŞ

Bilimin ve teknolojinin hızla gelişmesi ile birlikte gözenekli yapıların önemi artmakta ve kimya, biyoteknoloji ve atık giderimi gibi endüstriyel alanlarda kullanımları her zamankinden daha fazla hale gelmektedir. Gözenekli malzemelerin gözeneklilik, gözenek boyut dağılımı, toplam gözenek hacmi, geçirgenlik, toplam yüzey alanı gibi fiziksel özelliklerinin yüksek doğrulukta ve hızlı bir şekilde analiz edilmesi bu alanda çalışan bilim insanlarının üstesinden gelmeye çalıştıkları zorluklarından biri olarak karşımıza çıkmaktadır. Arşimet prensibine dayalı sıvı satürasyon yöntemleri, civalı porozimetre, gaz piknometre ve gaz adsorpsiyon yöntemleri geleneksel gözeneklilik ölçümlerinde sıklıkla başvurulan yöntemlerdir (Ishizaki et al., 2013). Son yıllarda gelişen görüntü işleme teknikleriyle birlikte gözenek yapısı ve gözenek geometrisi hakkında bilgi görüntü analizinden de elde edilebilir hale gelmiştir. Geleneksel yöntemlere harcanan zaman ve maliyeti ortadan kaldırma imkânı sunan dijital görüntü analiz teknikleri gözeneklilik özelliklerinin kendi aralarındaki ilişkiyi kavrama açısından da önemlidir (Arena et al., 2017; Buckman et al., 2017; Ogura et al., 2010).

Bir malzemenin dijital görüntüsünü alabilmek için farklı görüntüleme teknikleri mevcuttur. Elektron mikroskobu (SEM), optik mikroskop, X-ışını bilgisayarlı tomografi (BT) taraması, dijital görüntülerin elde edilmesinde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bu teknikler arasında, X-ışını BT taraması, gözenek yapılarının 3 boyutlu dijital görüntülerini elde edilmesini sağlayan özel yöntemlerden biridir. BT cihazlarına erişim olanağının kısıtlı olması görüntüleme maliyetini artırmakta ve araştırmacıları alternatif tekniklere yöneltmektedir (Malik et al., 2022). Optik mikroskop aracılığı ile alınan görsellerde ise homojen olmayan gözenek dağılımı durumunda yeterli doğruluk sağlanamamaktadır (Kazup et al., 2022).

Araştırmacılar malzemelerin dijital görüntüleri ile dijital görüntü analiz tekniklerinden yararlanarak gözeneklilik tahmini yapma yoluna sıkça başvurmuşlardır. Sulem & Ouffroukh (2006) kumtaşındaki gözenekliliği değerlendirmek için görüntü işlemeyi kullanmışlardır. Benzer şekilde, Garfi vd. (2020), kayaçlardaki gözeneklilik tahminlerinin görüntü işleme yöntemlerine duyarlılığını vurgulamıştır. Leu vd. (2014) kumtaşında çok fazlı akış için görüntü işleme üzerine bir duyarlılık çalışması yaparak, gözeneklilik ve geçirgenliği laboratuvar ölçümleriyle karşılaştırmıştır. Ayrıca, görüntü işleme, kemik analizi (Aly et al., 2011), nanolif gözeneklilik ölçümü (Ghasemi-Mobarakeh et al., 2007) ve hatta geçirgen beton numunelerinde gözeneklilik tahmini (Ahn et al., 2014) gibi çeşitli alanlarda uygulanmıştır. Görüntü işlemenin gözeneklilik tahminindeki çok yönlülüğü, farklı disiplinlerde kullanımını ortaya koymakta ve çeşitli malzemelerin gözeneklilik özelliklerini anlamada önemini göstermektedir. Gözeneklilik tahminlerinin doğruluğu ve güvenilirliği, uygun görüntü işleme tekniklerinin uygulanmasına büyük ölçüde bağlıdır ve bu metodolojinin bilimsel araştırma ve endüstriyel uygulamalardaki önemini ortaya koymaktadır.

Malzemenin gözeneklilik analizinde görüntü işleme yöntemleri genellikle belirli bir eşikleme (thresholding) algoritması kullanarak gözenekleri renk üzerinden belirli alt ve üst sınırlara göre belirler. Belirlenen eşiklere göre gözeneklilik miktarı hesaplanır. Uygulamada kullanılan veriler ImageJ programı ile nümerik porozite değerine denk olacak şekilde eşiklenmiştir. ImageJ görüntülerin eşik değerlerini otomatik belirleyen nümerik bir algoritma kullanır (Schneider et al., 2012). Yapılan çalışmada anlamsal bölütleme ağlarından olan U-Net kullanılarak dinamik eşikleme yapılmış ve malzeme gözenekliliği tespit edilmiştir. Bu çalışmada, malzeme gözenekliliğini belirlemek için U-Net semantik segmentasyon modeli kullanılarak dinamik bir eşikleme yöntemi uygulanmıştır. Çalışmanın sonuçları Arşimet yöntemi kullanılarak elde edilen gözeneklilik değerleri, malzemede görüntü işleme ve otomatik yeniden yapılandırma arayüzü olan MIPAR (Materials Image Processing and Automated Reconstruction) (Sosa et al., 2014) yazılımından elde edilen sonuçlar ve K-Means Kümeleme (Cardoso et al., 2020) yöntemi kullanılarak elde edilen gözeneklilik değerleri ile karşılaştırılmıştır.

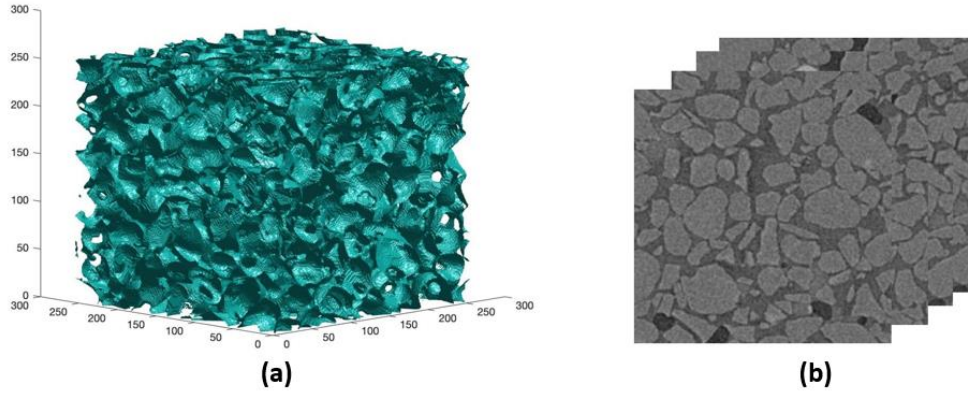
## MATERYAL VE YÖNTEM

Bu bölümde kullanılan veri seti, veri artırımı teknikleri, U-Net mimarisi ve eşiklenmiş görüntülerden gözenekliliğin hesaplanması konularına değinilmiştir.

### *Veriseti*

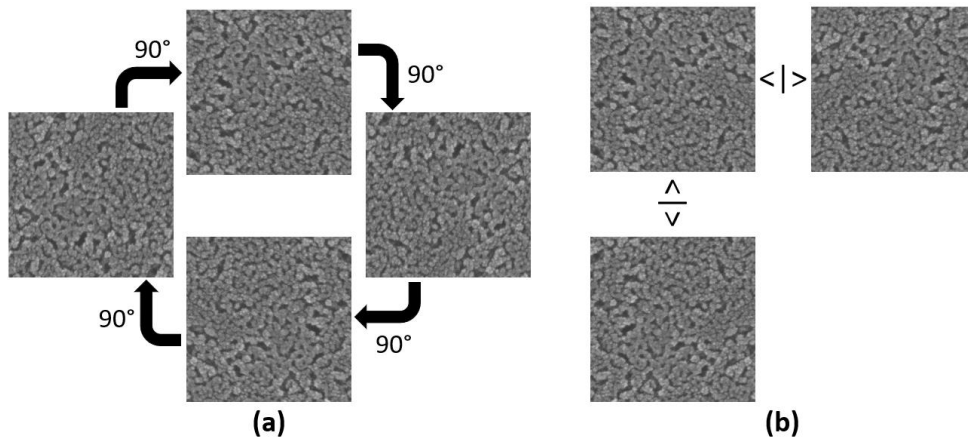
Bu çalışmada, gözenekli malzemelerin gözeneklilik değerlerini belirlemek için kullanılan veri seti, hem fiziksel yöntemlerle elde edilen SEM görüntülerinden hem de sentetik olarak üretilmiş BT görüntülerinden oluşturulmuştur. Veri setinin oluşturulmasında izlenen adımlar ve kullanılan teknikler veri toplama ve veri artırımı başlıkları altında incelenmiştir.

Veri Toplama: SEM görüntüleri, fiziksel yöntemler kullanılarak gözenekliliği belirlenmiş 50 adet gözenekli malzemeye ait elektron mikroskobu görüntüleri çeşitli makalelerden temin edilmiştir (F. Chen et al., 2023; Ertuş, 2020; Li et al., 2020; Lin et al., 2019; Xie et al., 2019; Lacerda et al., 2018; Mazón & Piedad, 2018; Peng et al., 2018; Wu et al., 2018; Gültekin et al., 2017; M. Chen et al., 2016; Zou & Malzbender, 2016; Castilho et al., 2015; Chinnam et al., 2015; Deng et al., 2014; Fukushima & Yoshizawa, 2014; Novais et al., 2014; Pinto et al., 2014; Zawrah et al., 2014; Yang et al., 2013; R. Zhang et al., 2012; Zuo et al., 2011; Fukushima et al., 2010; Y. Zhang et al., 2010; Barmala et al., 2009; Kim et al., 2009; E.-J. Lee et al., 2007; M. Lee & Sordelet, 2006; Barea et al., 2005; Díaz & Hampshire, 2004; Nakahira et al., 2002). Ek olarak gözenekliliği tanımlı sentetik olarak üretilmiş 44 adet BT kesik görüntüsü kullanılmıştır. Şekil 1’de 3 Boyutlu BT tarama verisinden 2 boyutlu görüntü dizisi çıkarımı örneği gösterilmektedir.



**Şekil 1.** 3 Boyutlu BT Tarama Verisinden 2 Boyutlu Görüntü Dizisi Çıkarımı. **a)** BT Görüntüsü, **b)** Katman Taramasından Elde Edilen 2 Boyutlu Görüntü Dizisi

Veri artırımı: Eğitim için tercih edilen U-Net mimarisi kısıtlı veri kümeleri için uygun olsa bile bu mimari içinde kullanılan görsel verilerinin sayısı böyle karmaşık bir sınıflandırma eğitimi için yetersiz kalmaktadır. Az sayıda veri kümesi ile yapılan derin öğrenme eğitimlerinde verilerin ezberlenmesi ve sınıflandırmanın başarı ile yapılamaması söz konusudur. Bu sorunun çözülmesi amacıyla çeşitli geometrik ve morfolojik işlemler (aynalama, döndürme, keskinleştirme vs.) kullanarak veri kümesinde artırıma gidilebilmektedir (Ervural, 2021).

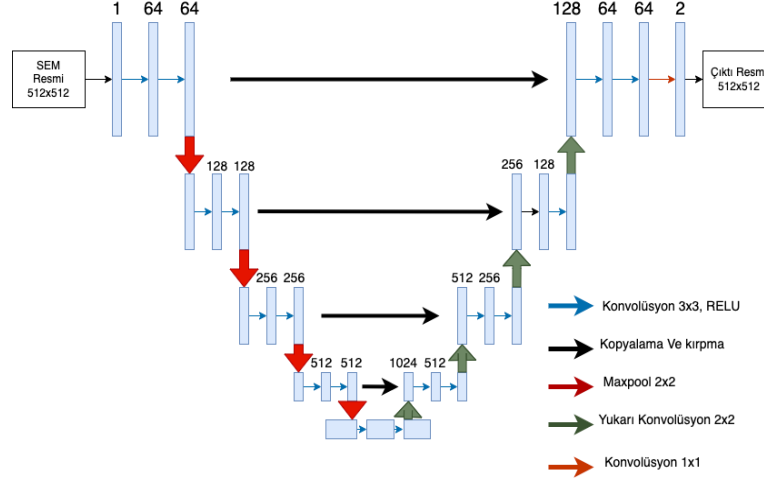


**Şekil 2.** Verisetinin Artırılması; **a)** Görüntü Döndürme, **b)** Görüntü Yansıtma

Bu amaçla eldeki veri kümesindeki her görüntüye önce aynalama ardından 90, 180 ve 270 derecelik döndürme uygulanarak çoğaltılır ve bu sayede toplamda 94 adet olan veri sayısı 9 katına çıkarılarak 846 adet görüntü elde edilmiştir. Görüntü verisini döndürmek porozite oranında değişim oluşturmamaktadır. Kullanılan geometrik dönüşümler Şekil 2’de gösterilmiştir. Veri artırımı ile birlikte toplamda 846 görüntüye ulaşan veri seti, eğitim ve test aşamaları için ayrılmıştır. Eğitim aşamasında kullanılan veri seti 635 görüntüden oluşurken, test aşamasında kullanılan veri seti ise 211 görüntüden oluşmaktadır.

### U-Net Mimarisi

U-Net, görüntü bölütleme için tasarlanmış simetrik yapıya sahip bir evrişimli sinir ağı mimarisidir (Koç & Akgün, 2021). Diğer bölütleme ağlarına kıyasla daha az eğitim verisi ile öğrenilmesi nedeniyle sınırlı veri içeren uygulamalarda kullanımı yaygınlaşmıştır. Bir daralan alt örnekleme yolundan (sol taraf) ve genişleyen üst örnekleme yolundan (sağ taraf) oluşmaktadır. U-Net mimarisi şematik olarak Şekil 3'te görülmektedir. U-Net mimarisinin sağladığı avantajlar ise ağı eğitmek için az sayıda girdi gereksinimi, çok ölçekli bir tanıma ve füzyon ile görüntü özelliklerinin farkına varabilme kabiliyeti, basit bir ağ yapısına sahip olması sebebiyle GPU ile çok hızlı sonuçlar verebilmesi ve yüksek kalitede piksel düzeyinde bölütleme sonuçları sunabilmesidir.



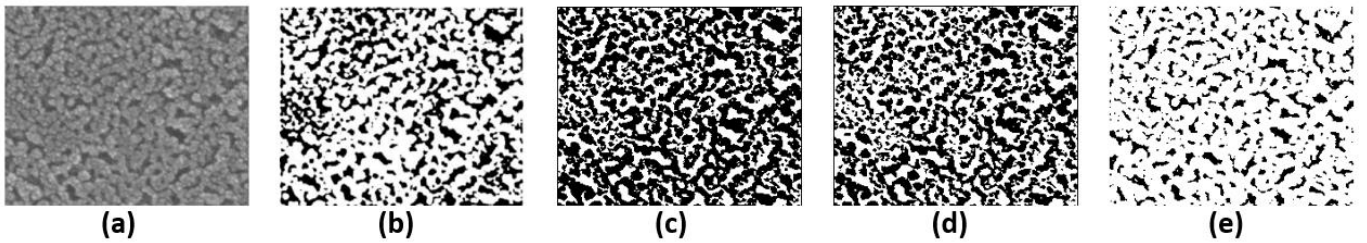
Şekil 3. Uygulamada Kullanılan U-Net Mimarisi (Koç & Akgün, 2021)

Segmentasyon için uygun eşik değerleri şekilde gösterilen, konvolüsyon, havuzlama, kopyalama ve kırpma, katmanları içeren 9 katmanlı U-Net modeli kullanılarak gerçekleştirilmiştir. U-Net modelinin son katmanında algoritma tarafından üretilen eşik değerine göre segmente edilmiş 512x512 boyutundaki çıkış görüntüsü üretilmektedir. Bu görüntü hesaplama aşamasına aktarılarak gözeneklilik değeri belirlenmektedir.

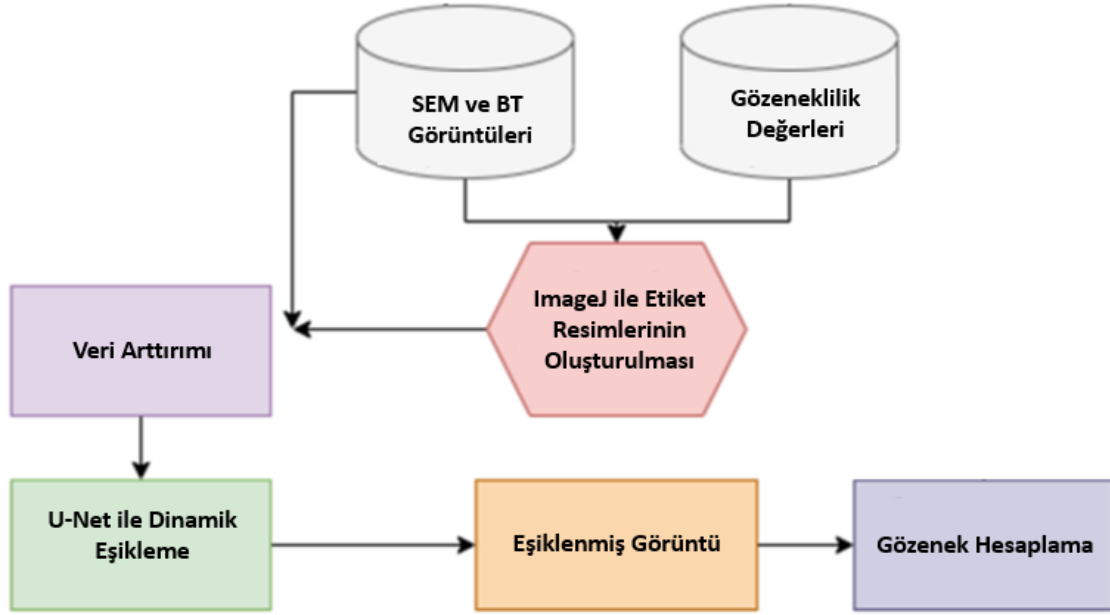
### Eşiklenmiş Görüntülerden Gözenekliliğin Hesaplanması

Eğitilen yapay sinir ağı modeli girdi olarak aldığı SEM görüntüsünü eşikleyerek çıktı katmanında döndürmektedir. Bu çıktı görüntüsünde siyah pikseller boşluğu, beyaz pikseller ise malzemeyi temsil etmektedir. Porozite ise siyah piksellerin toplam piksellere oranlanması ile bulunmuştur ve bu hesaplama için formül Eşitlik 1'de verilmiştir. Şekil 4'te hesaplama aşamasında kullanılan eşiklenmiş görsellere ait örnek bir görsel görülmektedir. Şekil 5'te ise sistemin genel blok gösterimi verilmiştir.

$$\text{Gözeneklilik} = \left( \frac{V_{\text{boşluk}}}{V_{\text{toplam}}} \right) \times 100 \quad (1)$$



Şekil 4. Eşiklenmiş Görselde Gözenek Yapıları; a) Ham SEM Görüntüsü (Ertuş, 2020), b) U-Net, c) ImageJ, d) MIPAR e) K-Means Kümeleme



**Şekil 5.** U-Net Yöntemiyle Dinamik Eşikleme ve Gözeneklilik Hesaplama Yaklaşımına İlişkin Genel Blok Gösterim

Önerilen yöntemde ham SEM görüntüleri ve bu görüntülere uygulanan dönüşümler sonucu üretilen artırılmış verisetinden ImageJ yöntemi ile etiket görüntüleri oluşturulmuştur. Fiziksel olarak ölçülmüş gözeneklilik değerleri ile görüntüler eşleştirilmesi ile oluşturulan etiket görüntüleri gözetimli öğrenme prensibi gereği ağı eğitimi ve test sürecinde gözeneklilik değerini temsil etmektedir. Daha sonra U-Net mimarisi ile her girdi görüntüsü değişken eşik değerleri olarak segmente edilmiştir. Eşitlik 1’de verilen  $V_{boşluk}$  segmentasyon sonrası elde edilen görüntüdeki boşlukların hacmini,  $V_{toplam}$  ise görüntünün toplam hacmini temsil eder. Bu hesaplama sonucunda her bir segmentasyon sonucu elde edilen görüntü için bir gözeneklilik değeri elde edilir, böylece malzemenin gözeneklilik durumu görsel veriler üzerinden hesaplanmış olur.

## BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu çalışmada sınırlı veri ile başarılı sonuçlar veren derin öğrenme yöntemlerinden biri olan U-Net mimarisi ile görüntü segmentasyonu gerçekleştirilmiştir. U-Net mimarisinin hızlı olması ve hafif veriler üzerinde ideal başarı göstermesi nedeniyle materyal üzerinde yapılan testlerde U-Net modeli tercih edilmiştir. Bu sayede modelin çok daha verimli ve hızlı segmentasyon yaptığı gözlemlenmiştir. Eğitime ait kayıp değerleri Şekil 6’da gösterilmiştir.



**Şekil 6.** Eğitim Sürecine Ait Yitim Değeri Grafiği

Bu çalışmada kullanılan 846 görüntü içeren veri setinin ~%75’lik bölümü olan 635 görüntü ağı eğitimi için kullanılmış kalan 211 görüntü ise test aşamasına aktarılmıştır. İncelenen test verilerine ait Arşimet metodu sonuçları referans alınarak önerilen derin öğrenme tabanlı dinamik eşikleme metodunun ürettiği gözeneklilik değerleri ve diğer yöntemler tarafından hesaplanan gözeneklilik değerleri karşılaştırılmıştır. Elde edilen tüm sonuçlar Tablo 1’de



özetlenmiştir. İncelenen görsellerde U-Net ile dinamik eşikleme tekniği kullanılarak elde edilen ölçümler deneysel verilere kıyasla ortalama  $89.6 \pm 5.3$  benzerlik göstermektedir.

**Tablo 1.** Farklı Yöntemler İçin Gözeneklilik Ölçüm Sonuçları

Yöntem	U-NET	ImageJ	K-Means	MIPAR
Ortalama % Doğruluk	$89.6 \pm 5.3$	$89.5 \pm 4.1$	$41.6 \pm 1.6$	$86.1 \pm 2.1$

Yaygın olarak kullanılan ImageJ (Otsu algoritması) ve MIPAR algoritması ile hesaplanan gözeneklilik değerleri incelendiğinde doğruluk oranı sırasıyla ortalama  $89.5 \pm 4.1$  ve  $86.1 \pm 2.1$  değerine ulaşmaktadır. Bu sonuçlar, bu iki yöntemin porozite oranlarını doğru bir şekilde belirlenmesinde U-NET'e yaklaştığını göstermektedir. Diğer taraftan K-Means ile yapılan hesaplamalarda  $41.6 \pm 1.6$  gibi düşük bir doğruluk oranı elde edilmiştir. Bu sonuçlar, U-NET'in malzemelerin porozite oranlarını doğru bir şekilde belirlemede etkili bir araç olduğunu göstermektedir. U-NET derin öğrenme prensiplerine dayanarak karmaşık ilişkileri öğrenme kapasitesine sahiptir. Bunun, mikroskop görüntülerindeki ince detayları daha iyi kavramasına yardımcı olduğu düşünülmektedir. U-Net, çeşitli özellik haritalarını kullanarak bilgi kayıplarını minimize etmektedir. Böylece gözenek segmentasyonunda daha kesin sonuçlar elde edilmesine katkı sağlamıştır. U-Net, genellikle veri artırımı ve seyrekleştirme gibi tekniklerle eğitilerek daha genelleştirilebilir ve aşırı uyuma karşı daha dirençli bir modeldir. Dinamik eşik değeri belirleme yöntemi, farklı SEM görüntüleri için esnek bir şekilde eşik değerinin ayarlamasını sağlar.

Literatürde yer alan porozite hesaplamasında görüntü işleme tekniklerinin kullanıldığı bazı çalışmalar incelendiğinde; Rezaei vd. tarafından gerçekleştirilen çalışmada, İki eşikli Otsu algoritması, en doğru sonuçları vermiştir. Bu yöntem, helyum porozimetri ile uyumlu sonuçlar elde etmiştir ve genellikle yüksek doğruluk sağlamıştır. Ancak, yöntem mikroporozite varlığında zorlanmıştır. Çalışmada doğruluk metriği hesaplanmamış ortalama kare hatanın karekökü olarak tanımlanan ve bir modelin tahminlerinin gerçek değerlerden ne kadar sapma gösterdiğini ölçmek için kullanılan RMSE değerleri hesaplanmıştır (Rezaei et al., 2019). Elia vd.'nin yürüttüğü araştırmaya göre görüntü işleme yöntemleri, doğrudan ölçümler ve fiziksel yöntemlerle elde edilen sonuçlarla iyi bir uyum göstermiştir. Porozite doğruluğunun, kullanılan geleneksel yöntemlere göre genellikle iyi performans gösterdiği ifade edilmiş ancak sapma veya doğruluk miktarları hesaplanmamıştır (Elia et al., 2016). Haines vd. gerçekleştirdikleri çalışmada çeşitli karbonat litofasiyelerinde poroziteyi nicelendirmek için görüntü analizinin kullanımını araştırmaktadır. Toplam porozite, gözenek faz alanının toplam görüntü alanına oranı olarak hesaplanmıştır. Bu görüntü tabanlı porozite, doğruluğu değerlendirmek için He-porozimetresi ve sıvalı porozimetre ile elde edilen değerlerle karşılaştırılmıştır. Doğruluk litofasiyelerin dokusuna göre değişkenlik göstermiştir; mikroporozite içeren litofasiyelerde doğruluk %10'dan fazla sapma göstermiştir (Haines et al., 2015).

## SONUÇ

Bu çalışmada gözeneklilik değerlerinin belirlenmesinde U-Net mimarisini esas alan derin öğrenme tabanlı dinamik eşikleme yöntemi kullanılmış ve bu yöntemin başarımı diğer yöntemlerle karşılaştırılmıştır. Böylece derin öğrenme modeli tarafından her gözenekli malzeme görseline ait eşik değerleri ayrı ayrı belirlenmiş ve 8 bit (256 renk) SEM görüntüsü 1 bit (2 renk) siyah-beyaz görüntüye dönüştürülerek bölütlenmiştir. Görsellerdeki siyah piksellerin sayısının, tüm piksel sayısına oranı hesaplanarak gözeneklilik tespiti gerçekleştirilmiştir.

Elde edilen sonuçlar, U-Net tabanlı dinamik eşikleme yönteminin, manuel eşikleme ve diğer geleneksel görüntü işleme yöntemlerine kıyasla daha yüksek bir doğrulukla gözeneklilik tespit ettiğini ortaya koymuştur. Test veri setinde ortalama doğruluk oranı  $\%89.6 \pm 5.3$  olarak hesaplanmıştır. Deneysel sonuçlar, önerilen yöntemin gözeneklilik tespiti konusunda yüksek doğruluk ve güvenilirlik sağladığını göstermiştir.

Literatürde, gözeneklilik tespitinde kullanılan geleneksel yöntemler genellikle manuel eşikleme ve görüntü işleme tekniklerine dayanmaktadır. Bu yöntemler, genellikle düşük doğruluk ve kullanıcıdan kullanıcıya değişen sonuçlar üretmektedir. Kullanılan veri seti, mikroskop görüntülerinden elde edilen çeşitli gözenekli malzemeleri içermektedir.

Veri setinin homojenliğini ve çeşitliliğini artırmak amacıyla çeşitli veri artırma teknikleri uygulanmıştır. Bu teknikler arasında döndürme ve yansıtma işlemleri yer almakta olup, bu işlemler modelin farklı varyasyonlardaki görüntüleri öğrenmesini sağlamıştır. Sonuçlar, veri artırma tekniklerinin modelin genelleme yeteneğini artırdığını ve performansını iyileştirdiğini göstermiştir.

Bu çalışmanın sonuçları, endüstriyel uygulamalar için de büyük bir potansiyele sahiptir. Özellikle malzeme bilimi ve mühendisliği alanında, gözeneklilik tespiti önemli bir rol oynamaktadır. Önerilen yöntem, hızlı ve doğru bir şekilde gözeneklilik tespiti yapılabilmesi sayesinde, malzeme kalitesinin kontrolü ve üretim süreçlerinin iyileştirilmesi için kullanılabilir. Ayrıca, bu yöntemin diğer mikroskop görüntüleme ve malzeme analiz uygulamalarına da uyarlanabilir olması, geniş bir kullanım alanı sunmaktadır. Gelecekteki çalışmalar, yöntemimizin farklı malzeme türlerine ve farklı görüntüleme tekniklerine uyarlanabilirliğini araştırmayı hedeflemelidir. Ayrıca, daha büyük ve çeşitli veri setleri kullanılarak yöntemin genelleme yeteneği ve performansı daha da artırılabilir. Bunun yanı sıra, yöntemimizin gerçek zamanlı uygulamalar için optimize edilmesi, endüstriyel süreçlerde daha etkin kullanılmasını sağlayacaktır.

Çalışmanın devamında porozite oranının yanında gözenek sayısı ve boyut dağılımı vs. gibi özelliklerinde hesaplamaya dahil edilmesiyle geliştirilebilir bir yapıya evrilebileceği ve veri sayısının daha fazla olduğu uygulamalarda daha iyi sonuçlar verebileceği öngörülmektedir.

## KAYNAKLAR

- Ahn, J., Jung, J., Kim, S., & Han, S.-I. (2014). X-ray image analysis of porosity of pervious concretes. *GEOMATE Journal*, 6(11), 796-799.
- Aly, A. F., Agameia, A., Eldesouky, A. S., & Sharaf, M. A. (2011). Scaffold development and characterization using CAD system. *Am. J. Biomed. Sci*, 3(4), 268-277.
- Arena, E., Rueden, C., Hiner, M., Wang, S., Yuan, M., & Eliceiri, K. (2017). Quantitating the cell: turning images into numbers with ImageJ, Wiley Interdiscip. *Rev. Dev. Biol.*, 6.
- Barea, R., Osendi, M. I., Ferreira, J. M., & Miranzo, P. (2005). Thermal conductivity of highly porous mullite material. *Acta materialia*, 53(11), 3313-3318.
- Barmala, M., Moheb, A., & Emadi, R. (2009). Applying Taguchi method for optimization of the synthesis condition of nano-porous alumina membrane by slip casting method. *Journal of Alloys and Compounds*, 485(1-2), 778-782.
- Buckman, J., Bankole, S. A., Zihms, S., Lewis, H., Couples, G., & Corbett, P. W. (2017). Quantifying porosity through automated image collection and batch image processing: case study of three carbonates and an aragonite cemented sandstone. *Geosciences*, 7(3), 70.
- Cardoso, V. G., da Silva Barros, E. N., & Barbosa, J. A. (2020). Porosity features extraction based on image segmentation technique applying k-means clustering algorithm. *Rio Oil & Gas*.
- Castilho, M., Gouveia, B., Pires, I., Rodrigues, J., & Pereira, M. (2015). The role of shell/core saturation level on the accuracy and mechanical characteristics of porous calcium phosphate models produced by 3Dprinting. *Rapid Prototyping Journal*, 21(1), 43-55.
- Chen, F., Zhao, J., Wang, H., Li, H., Yin, G., Cai, M., . . . Shen, Q. (2023). Oil-Retention and Oil-Bearing Tribological Properties of Nanoporous Copper Prepared Using a Chemical Dealloying Method. *Metals*, 13(7), 1232.
- Chen, M., Zhu, L., Dong, Y., Li, L., & Liu, J. (2016). Waste-to-resource strategy to fabricate highly porous whisker-structured mullite ceramic membrane for simulated oil-in-water emulsion wastewater treatment. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 4(4), 2098-2106.
- Chinnam, R., Bernardo, E., Will, J., & Boccaccini, A. (2015). Processing of porous glass ceramics from highly crystallisable industrial wastes. *Advances in Applied Ceramics*, 114(sup1), S11-S16.
- Deng, W., Yu, X., Sahimi, M., & Tsotsis, T. T. (2014). Highly permeable porous silicon carbide support tubes for the preparation of nanoporous inorganic membranes. *Journal of Membrane Science*, 451, 192-204.
- Díaz, A., & Hampshire, S. (2004). Characterisation of porous silicon nitride materials produced with starch. *Journal of the European Ceramic Society*, 24(2), 413-419.
- Elia, P., Nativ-Roth, E., Zeiri, Y., & Porat, Z. e. (2016). Determination of the average pore-size and total porosity in porous silicon layers by image processing of SEM micrographs. *Microporous and Mesoporous Materials*, 225, 465-471.
- Ertuş, E. B. (2020). Production and characterization of hierarchically porous transparent glasses.

- Ervural, S. (2021). Sınırlı veri setiyle sınıflama uygulamalarına yeni bir yaklaşım.
- Fukushima, M., Nakata, M., Zhou, Y., Ohji, T., & Yoshizawa, Y.-i. (2010). Fabrication and properties of ultra highly porous silicon carbide by the gelation–freezing method. *Journal of the European Ceramic Society*, 30(14), 2889-2896.
- Fukushima, M., & Yoshizawa, Y. i. (2014). Fabrication of highly porous silica thermal insulators prepared by gelation–freezing route. *Journal of the American Ceramic Society*, 97(3), 713-717.
- Garfi, G., John, C. M., Berg, S., & Krevor, S. (2020). The sensitivity of estimates of multiphase fluid and solid properties of porous rocks to image processing. *Transport in Porous Media*, 131(3), 985-1005.
- Ghasemi-Mobarakeh, L., Semnani, D., & Morshed, M. (2007). A novel method for porosity measurement of various surface layers of nanofibers mat using image analysis for tissue engineering applications. *Journal of applied polymer science*, 106(4), 2536-2542.
- Gültekin, E. E., Topateş, G., & Kurama, S. (2017). The effects of sintering temperature on phase and pore evolution in porcelain tiles. *Ceramics International*, 43(14), 11511-11515.
- Haines, T. J., Neilson, J. E., Healy, D., Michie, E. A., & Aplin, A. C. (2015). The impact of carbonate texture on the quantification of total porosity by image analysis. *Computers & geosciences*, 85, 112-125.
- Ishizaki, K., Komarneni, S., & Nanko, M. (2013). *Porous Materials: Process technology and applications* (Vol. 4): Springer science & business media.
- Kazup, Á., Fegyverneki, G., & Gács, Z. (2022). Evaluation of the Applicability of Computer-Aided Porosity Testing Methods for Different Pore Structures. *Metallography, Microstructure, and Analysis*, 11(5), 774-789.
- Kim, C. E., Yoon, J. S., & Hwang, H. J. (2009). Synthesis of nanoporous silica aerogel by ambient pressure drying. *Journal of sol-gel science and technology*, 49, 47-52.
- Koç, A. B., & Akgün, D. (2021). U-net mimarileri ile glioma tümör segmentasyonu üzerine bir literatür çalışması. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*(26), 407-414.
- Lacerda, L. D., Souza, D. F., Nunes, E. H., & Houmard, M. (2018). Macroporous alumina structures tailored by freeze-casting using naphthalene–camphor as freezing vehicle. *Ceramics International*, 44(13), 16010-16016.
- Lee, E.-J., Koh, Y.-H., Yoon, B.-H., Kim, H.-E., & Kim, H.-W. (2007). Highly porous hydroxyapatite bioceramics with interconnected pore channels using camphene-based freeze casting. *Materials Letters*, 61(11-12), 2270-2273.
- Lee, M., & Sordelet, D. (2006). Nanoporous metallic glass with high surface area. *Scripta materialia*, 55(10), 947-950.
- Leu, L., Berg, S., Enzmann, F., Armstrong, R. T., & Kersten, M. (2014). Fast X-ray micro-tomography of multiphase flow in berea sandstone: A sensitivity study on image processing. *Transport in Porous Media*, 105(2), 451-469.
- Li, Z., Zhang, Z., Zhao, W., Li, X., Han, G., & Zhang, J. (2020). A simple method to control the pore structure and shape of freeze-cast porous SiC ceramics. *Ceramics International*, 46(16), 26078-26084.
- Lin, X., Gong, H., Zhang, Y., Bi, J., Feng, Y., Liu, Y., & Wang, S. (2019). Dielectric properties of porous SiC/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> ceramics by polysilazane immersion-pyrolysis. *Progress in Natural Science: Materials International*, 29(2), 184-189.
- Malik, J., Kiranyaz, S., Al-Raoush, R. I., Monga, O., Garnier, P., Fofou, S., . . . Baveye, P. C. (2022). 3D Quantum Cuts for automatic segmentation of porous media in tomography images. *Computers & Geosciences*, 159, 105017.
- Mazón, P., & Piedad, N. (2018). Porous scaffold prepared from  $\alpha'$  L-Dicalcium silicate doped with phosphorus for bone grafts. *Ceramics International*, 44(1), 537-545.
- Nakahira, A., Tamai, M., Miki, S., & Pezzotti, G. (2002). Fracture behavior and biocompatibility evaluation of nylon-infiltrated porous hydroxyapatite. *Journal of materials science*, 37, 4425-4430.
- Novais, R. M., Seabra, M., & Labrincha, J. (2014). Ceramic tiles with controlled porosity and low thermal conductivity by using pore-forming agents. *Ceramics International*, 40(8), 11637-11648.
- Ogura, K., Yamada, M., Hirahara, O., Mita, M., Erdman, N., & Nielsen, C. (2010). Gigantic montages with a fully automated FE-SEM (serial sections of a mouse brain tissue). *Microscopy and Microanalysis*, 16(S2), 52-53.

- Peng, Y., Chen, J., Song, A. Y., Catrysse, P. B., Hsu, P.-C., Cai, L., . . . Wu, D. S. (2018). Nanoporous polyethylene microfibrils for large-scale radiative cooling fabric. *Nature sustainability*, 1(2), 105-112.
- Pinto, J., Dumon, M., Rodriguez-Perez, M. A., Garcia, R., & Dietz, C. (2014). Block copolymers self-assembly allows obtaining tunable micro or nanoporous membranes or depth filters based on PMMA; fabrication method and nanostructures. *The Journal of Physical Chemistry C*, 118(9), 4656-4663.
- Rezaei, F., Izadi, H., Memarian, H., & Baniassadi, M. (2019). The effectiveness of different thresholding techniques in segmenting micro CT images of porous carbonates to estimate porosity. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 177, 518-527. doi:<https://doi.org/10.1016/j.petrol.2018.12.063>
- Schneider, C. A., Rasband, W. S., & Eliceiri, K. W. (2012). NIH Image to ImageJ: 25 years of image analysis. *Nature methods*, 9(7), 671-675.
- Sosa, J. M., Huber, D. E., Welk, B., & Fraser, H. L. (2014). Development and application of MIPAR™: a novel software package for two-and three-dimensional microstructural characterization. *Integrating materials and manufacturing innovation*, 3, 123-140.
- Sulem, J., & Ouffroukh, H. (2006). Shear banding in drained and undrained triaxial tests on a saturated sandstone: Porosity and permeability evolution. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 43(2), 292-310.
- Wu, Z., Sun, L., Pan, J., & Wang, J. (2018). Highly porous Y<sub>2</sub>SiO<sub>5</sub> ceramic with extremely low thermal conductivity prepared by foam-gelcasting-freeze drying method. *Journal of the American Ceramic Society*, 101(3), 1042-1047.
- Xie, B., Zhao, H., Long, H., Peng, J., & Liu, R. (2019). 3D characteristics of pores in SiC particle preforms with different starch contents by X-ray micro-computed tomography. *Ceramics International*, 45(18), 23924-23933.
- Yang, H., Li, J., Zhou, Z., & Ruan, J. (2013). Structural preparation and biocompatibility evaluation of highly porous Tantalum scaffolds. *Materials Letters*, 100, 152-155.
- Zawrah, M., Khattab, R., Girgis, L. G., El Shereefy, E., & Sawan, S. A. (2014). Effect of CTAB as a foaming agent on the properties of alumina ceramic membranes. *Ceramics International*, 40(4), 5299-5305.
- Zhang, R., Fang, D., Pei, Y., & Zhou, L. (2012). Microstructure, mechanical and dielectric properties of highly porous silicon nitride ceramics produced by a new water-based freeze casting. *Ceramics International*, 38(5), 4373-4377.
- Zhang, Y., Yokogawa, Y., Feng, X., Tao, Y., & Li, Y. (2010). Preparation and properties of bimodal porous apatite ceramics through slip casting using different hydroxyapatite powders. *Ceramics International*, 36(1), 107-113.
- Zou, Y., & Malzbender, J. (2016). Development and optimization of porosity measurement techniques. *Ceramics International*, 42(2), 2861-2870.
- Zuo, K. H., Zhang, Y., Zeng, Y.-P., & Jiang, D. (2011). Pore-forming agent induced microstructure evolution of freeze casted hydroxyapatite. *Ceramics International*, 37(1), 407-410.



# Kahramanmaraş Sütçü İmam University

## Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 02.02.2024  
Kabul Tarihi : 22.07.2024

Received Date : 02.02.2024  
Accepted Date : 22.07.2024

### HAYCAM VS EIGENCAM FOR WEAKLY-SUPERVISED OBJECT DETECTION ACROSS VARYING SCALES

### FARKLI ÖLÇEKLERDE ZAYIF DENETİMLİ NESNE TESPİTİ İÇİN HAYCAM VE EIGEN KARŞILAŞTIRILMASI

Ahmet Haydar ORNEK<sup>1</sup> (ORCID: 0000-0001-7254-9316)  
Murat CEYLAN<sup>2\*</sup> (ORCID: 0000-0001-6503-9668)

<sup>1</sup> Huawei Türkiye R&D Center, Service Application DC, İstanbul 34764, Türkiye

<sup>2</sup> Konya Technical University, Electrical & Electronics Engineering Department, Konya 42130, Türkiye

\* Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Ahmet Haydar ORNEK, ahmet.haydar.ornek2@huawei.com

#### ABSTRACT

When a classification process is performed using Class Activation Maps, which is one of the Explainable Artificial Intelligence approaches, the areas influencing the classification on the input image can be revealed. In other words, it is demonstrated which part of the image the classifier model looks at to make a decision. In this study, a 200-class classification model was trained using the open-source dataset CUB 200 2011, and the classification results were visualized using the EigenCAM and HayCAM methods. When comparing object detection performances based on the areas influencing classification, the EigenCAM method reaches an IoU (Intersection over Union) value of 30.88%, while the HayCAM method reaches a value of 41.95%. The obtained results indicate that outputs derived using Principal Component Analysis (HayCAM) are better than those obtained using Singular Value Decomposition (EigenCAM).

**Keywords:** Explainable artificial intelligence, activation map, deep learning, eigencam, haycam

#### ÖZET

Açıklanabilir Yapay Zeka yaklaşımlarından biri olan Sınıf Aktivasyon haritaları ile bir sınıflama işlemi gerçekleştirildiği zaman, giriş görüntüsü üzerindeki sınıflamaya etki eden alanlar ortaya çıkarılabilmektedir. Yani bir sınıflayıcı modelin görüntünün hangi kısmına bakarak karar verdiği gösterilmektedir. Bu çalışmada açık kaynak bir veri seti olan CUB 200 2011 kullanılarak 200 sınıflı bir sınıflama modeli eğitilmiş ve sınıflama sonuçları EigenCAM ve HayCAM yöntemleri kullanılarak görselleştirilmiştir. Sınıflamaya etki eden alanlar kullanılarak gerçekleştirilen nesne tanıma performansları karşılaştırıldığında EigenCAM yöntemi %30.88 IoU değerine ulaşırken HayCAM yöntemi %41.95 değerine ulaşmaktadır. Elde edilen çıktılar Temel Bileşenler Analizi kullanılarak elde edilen sonuçların (HayCAM), Tekil Değer Ayırımı kullanılarak elde edilen sonuçlardan (EigenCAM) daha iyi olduğunu göstermektedir.

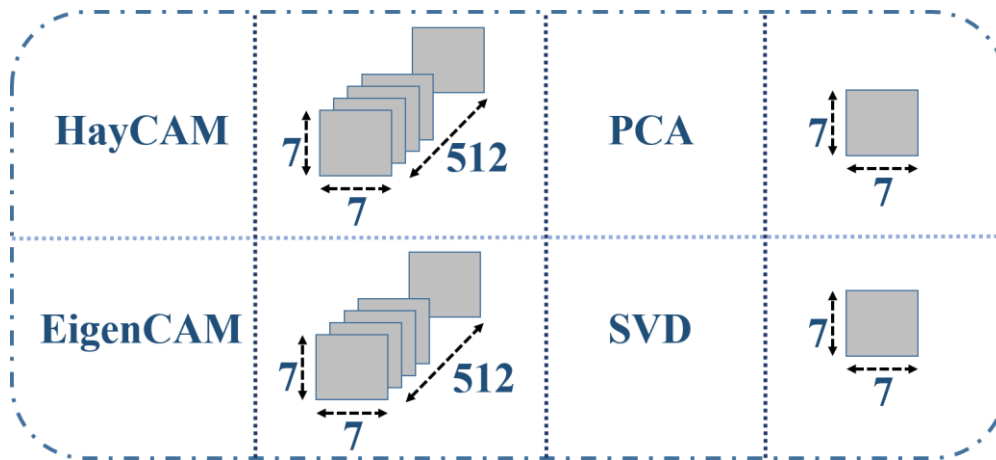
**Anahtar Kelimeler:** Açıklanabilir yapay zeka, aktivasyon haritası, derin öğrenme, eigencam, haycam

## INTRODUCTION

The rapid evolution of Artificial Intelligence (AI) has emphasized the importance of developing models that not only deliver accurate results but also provide insights into their decision-making processes (Krizhevsky et al., 2012). This has led to a growing focus on Explainable Artificial Intelligence (XAI) approaches, aiming to enhance transparency and interpretability (Arrieta et al., 2020). In this study, we explore the application of Class Activation Maps (CAMs) during the classification process as one such XAI approach. CAMs enable the identification of specific regions on the input image that significantly influence the classification decision, offering a better understanding of the model's reasoning (van der Velden et al., 2022).

With the XAI, CAMs serve as a crucial tool for visualizing areas in the input image that contribute most to the classification outcome. Specifically, we investigate the EigenCAM (Muhammad & Yeasin, 2020) and HayCAM (A. Ornek & Ceylan, 2022) methods, employing them in training a 200-class classification model on the CUB 200 2011 open-source dataset (Wah et al., 2011). Through extensive experimentation, our objective is to compare the performances of these visualization methods in revealing influential areas for accurate object detection.

The core of our exploration lies in the comparative analysis of object detection results obtained through EigenCAM and HayCAM. Utilizing the Intersection over Union (IoU) metric (D. Zhou et al., 2019) as a key indicator of alignment between predicted and ground truth bounding boxes, we observe a significant disparity. EigenCAM achieves a 30.88% IoU value, whereas HayCAM surpasses it with a notably higher value of 41.95% IoU. As shown in Figure 1, we leverage analytical techniques like Principal Component Analysis (PCA) (Wu et al., 2018) and Singular Value Decomposition (SVD) (Stewart, 1993) to underscore the superiority of insights derived from HayCAM over EigenCAM, particularly in the context of XAI. Both methods decrease the filter size from 512 to 1, but using different techniques. Although HayCAM originally reduced the number of filters to 19, in this study it was arranged to reduce the number of filters to 1 filter.



**Figure 1.** HayCAM and EigenCAM. While HayCAM Uses PCA to Decrease the Filters to 1 Filter, EigenCAM Uses SVD

The contributions of this study are threefold: First, we showcase the practical application of explainable AI in real-world datasets by utilizing the CUB 200 2011 open-source dataset in training a 200-class classification model. Second, the application of EigenCAM and HayCAM methods for visualizing classification results provides valuable insights into the decision-making process of the model, emphasizing crucial areas for accurate classification. Third, the comparison of object detection performance, based on areas influencing classification, reveals that HayCAM achieves a higher IoU.

The paper is structured as follows: Section 2 gives related works in XAI and Class Activation Maps. Section 3 details the dataset, and Section 4 describes the methodology, including the steps taken to train the classification model and visualize the results. Section 5 presents the experimental results, and Section 6 discusses the implications. Finally, Section 7 concludes the paper and outlines potential avenues for future research.

## RELATED WORK

Visual XAI is a field focused on enhancing the transparency and interpretability of deep learning models (Ornek & Ceylan, 2022). It aims to unveil the decision-making processes of these models, fostering a better understanding of their inner workings (van der Velden et al., 2022). Various XAI methods, such as Class Activation Mapping (CAM) (B. Zhou et al., 2016), Gradient-weighted Class Activation Mapping (GradCAM) (Selvaraju et al., 2017), GradCAM++ (Chattopadhyay et al., 2018), HayCAM (A. Ornek & Ceylan, 2022), and EigenCAM (Muhammad & Yeasin, 2020), generate activation maps highlighting image regions contributing to model decisions, thus facilitating comprehension of object identification mechanisms. These methods play a crucial role in promoting transparency and interpretability, building trust in responsible and ethical deep learning model usage.

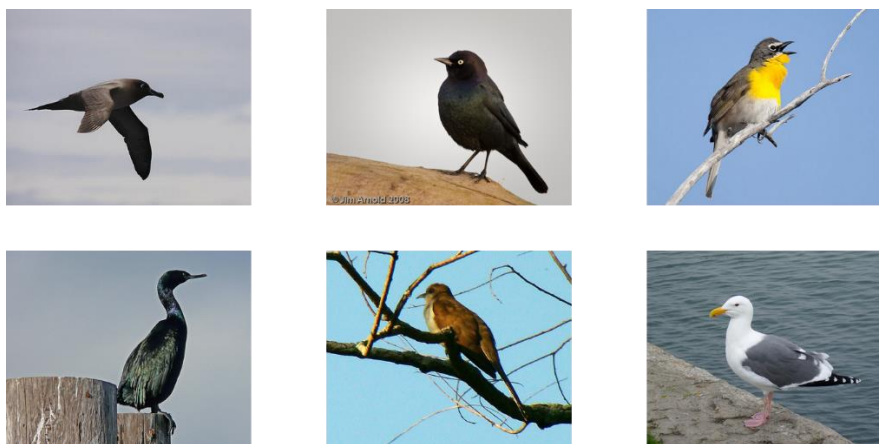
GradCAM, a widely adopted visualization technique for understanding deep neural networks, generates heatmaps by computing gradients of CNN feature maps' output scores. Building on GradCAM, techniques like GradCAM++ consider second-order gradients for more precise heatmaps, capturing finer details. EigenCAM employs SVD to capture intrinsic feature map structures, producing robust heatmaps even amidst noise or perturbations.

CodCAM is an ensemble visual XAI method (Ornek & Ceylan, 2023), it uses the activation maps of different XAI methods such as GradCAM, and outputs a focused activation map. Although CodCAM provides a better activation mapping, its computational cost is higher than the single XAI methods.

HayCAM uses Principal Component Analysis (PCA) to further streamline filter sizes in the last convolutional layer. Empirically selecting filter sizes based on detected objects enables focused area extraction. Given that numerous filters may lead to scattered areas on images. Although HayCAM originally reduces the number of filters to 19, in this study, HayCAM reduces filters to one, enhancing focus on targeted areas during small object detection. CodCAM and HayCAM are two techniques that were developed in the doctoral dissertation of the first author (Ornek, 2023).

## DATASET

CUB-200-2011 is an expanded iteration of CUB-200, a dataset comprising 200 distinct bird species (Wah et al., 2011). This dataset is widely regarded as a challenging benchmark for image classification tasks. The extended version of CUB-200-2011 amplifies the number of images per category by approximately twofold, thereby providing a more comprehensive and diverse collection of bird images. The extended version includes new part localization annotations, which enriches the dataset with more detailed and accurate information about the birds' anatomical features. Each image in the dataset is annotated with bounding boxes, part locations, and attribute labels, which makes the dataset a valuable resource for training and testing machine learning algorithms. Randomly selected images are shown in Figure 2.



**Figure 2.** Sample Images from the Dataset

The foundation of our study rests on the utilization of the CUB 200 2011 dataset, a widely recognized and openly accessible dataset within the computer vision community. CUB 200 2011 comprises a diverse collection of images featuring 200 different bird species, each labeled with fine-grained details. 11780 images are used in this study. The counts of objects in 10 ratio intervals are presented in Table 1.

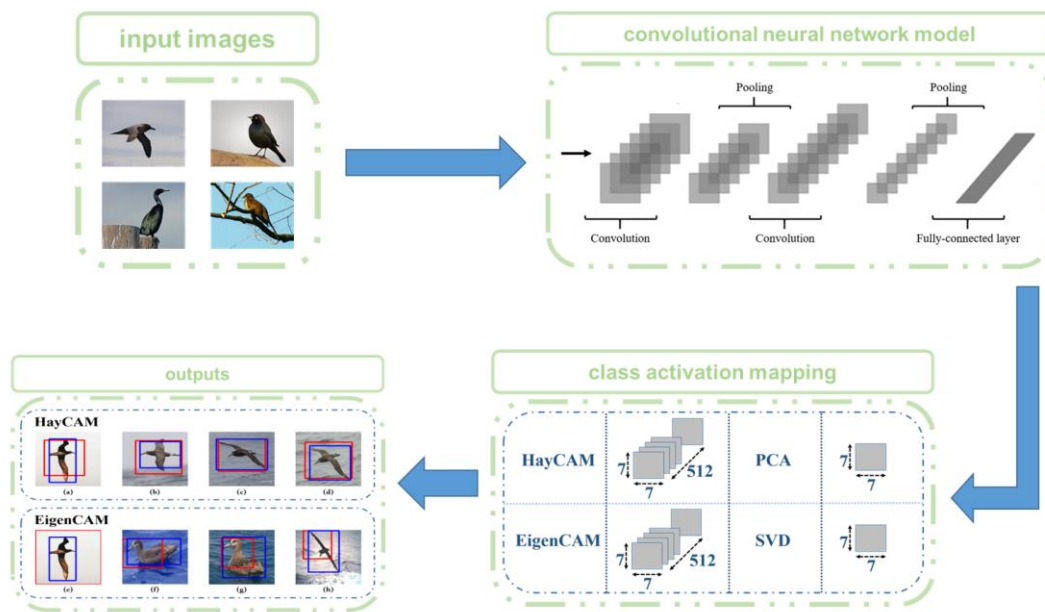
**Table 1.** Number Of Objects

Object/Image Ratio	Object Count
100% - 90%	522
90% - 80%	1290
80% - 70%	2173
70% - 60%	2767
60% - 50%	2558
50% - 40%	1752
40% - 30%	587
30% - 20%	126
20% - 10%	5
10% - 0%	0

Table 1 shows the distribution of images in the dataset based on their ratio. Between 100% and 90%, there are 522 images, between 90% and 80%, there are 1290 images, and so on. This dataset not only provides a rich variety of avian species but also presents a challenge for classification models due to the intricacies of distinguishing between closely related bird types. The inclusion of such a comprehensive dataset serves as a robust testing ground for evaluating the effectiveness of our XAI approach.

**METHOD**

In this section, we outline the comprehensive methodology employed in our study, encompassing the key stages of Convolutional Neural Networks (CNNs) application, model training, Class Activation Mapping (CAM), dimensionality reduction, and the evaluation metric of Intersection over Union (IoU). The general view of the study can be seen in Figure 3.



**Figure 3.** The General View of the Study

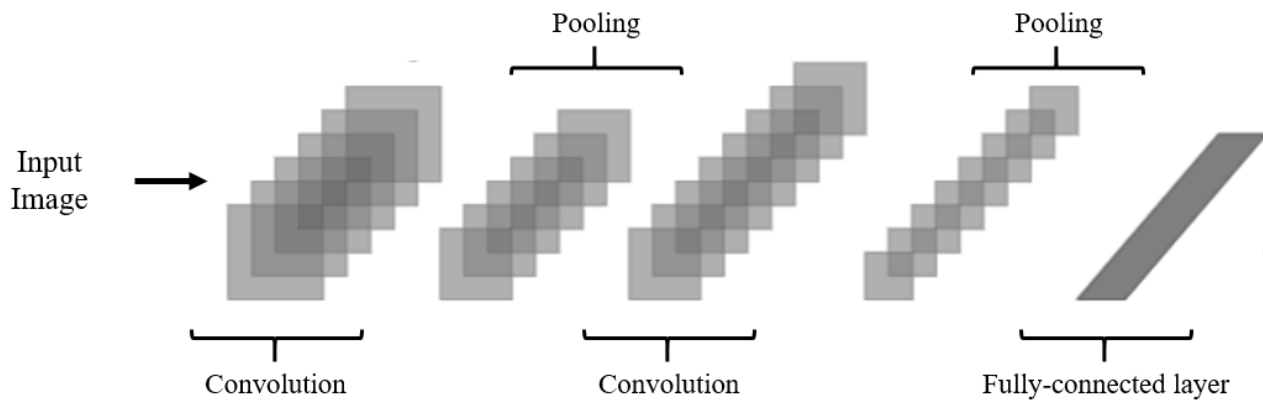
As shown in Figure 3, an input image is fed into a deep learning model, and class activation maps are obtained using the HayCAM and EigenCAM.

**Convolutional Neural Networks**

Convolutional Neural Networks (CNNs) (Krizhevsky et al., 2012), as a deep learning method, perform with high accuracy in applications such as image classification and object detection. A CNN model consists of two fundamental layers: the filtering layer and the classification layer as seen in Figure 4. In the filtering layer, convolution and pooling operations are conducted. The convolution operation is applied to the input image, resulting in a feature map.



Further convolution operations are applied to these obtained feature maps, extracting different features within the image. These features can be edges, textures, and more complex structures as the network deepens. The pooling operation reduces the dimensions of the obtained feature maps. For instance, applying a 2x2 pooling to a 256x256 filter yields a feature map of size 128x128.



**Figure 4.** A CNN Model Including 2 Convolutions, 2 Poolings, and A Fully-Connected Layer

CNNs have emerged as a powerful class of neural network architectures, particularly for image and video analysis. CNNs automatically learn hierarchical representations of visual features directly from raw input data.

Fully connected layers, typically situated at the end of the network, produce final predictions. The trainable parameters of CNNs allow them to adapt to the data through the process of backpropagation, where the model learns optimal weights to minimize a predefined loss function.

### **Model Training**

Training robust models often involves leveraging transfer learning, a technique that harnesses the knowledge gained from pre-trained models on large datasets and adapts it to new, specific tasks. One widely used architecture for such transfer learning tasks is ResNet-18, a variant of the Residual Network (ResNet) architecture (He et al., 2016).

Transfer learning is a technique that involves using a pre-trained model, which has been trained on a large dataset, and adapting it to a specific task or domain (Kornblith et al., 2019; Simonyan & Zisserman, 2014). This method is especially useful when there is limited labeled data available for the target task. The pre-trained model acts as a feature extractor, capturing general features from the original dataset. In the context of image classification, ResNet-18, with its ability to learn hierarchical representations, has proven to be an effective choice for transfer learning.

The training procedure for an AI model using transfer learning with ResNet-18 involves the following steps:

- **Pre-training:** Start with a pre-trained ResNet-18 model, often pre-trained on a large dataset like ImageNet, to capture general features.
- **Feature Extraction:** Freeze the weights of the early layers and extract features from the pre-trained model for the specific dataset of interest.
- **Fine-tuning:** Modify the last few layers of the network to match the target task's output, and fine-tune the model on the new dataset to adapt it to the specific classification or detection task.
- **Training:** Train the modified ResNet-18 model on the target dataset with labeled examples, using techniques like stochastic gradient descent or its variants.

This approach significantly accelerates training for specific tasks, especially when labeled data is limited, and it capitalizes on the ability of ResNet-18 to capture intricate hierarchical features. The combination of transfer learning and the ResNet-18 architecture has become a staple in various computer vision applications.

### **Class Activation Mapping**

CAMs is a technique that enhances interpretability and localizes the areas within an image that contribute to the network's classification decision (B. Zhou et al., 2016). CAMs provide a visual representation of the importance of different regions in the input image, revealing where the network focuses its attention during the classification process. By incorporating CAMs into CNNs, we not only harness the network's ability to learn hierarchical features but also gain valuable insights into the discriminative regions contributing to its decisions. This fusion of CNNs and CAMs not only enhances accuracy in tasks like image classification and object detection but also facilitates a deeper understanding of the reasoning behind the network's predictions, making it a potent tool for XAI applications.

CAMs are an interpretability technique that provides visual insights into the decision-making process of neural networks, particularly in image classification tasks. CAMs highlight the regions of an input image that significantly contribute to the model's classification decision.

In its simplest form, a CAM is generated by taking the weighted sum of the feature maps from the final convolutional layer of a neural network. Let  $F_i$  be the activation map of the  $i$ -th channel in the final convolutional layer, and  $w_i$  be the corresponding weight for that channel. The CAM for a specific class  $c$  is computed as follows (Eq. 1):

$$CAM_c = \sum_i w_i \cdot F_i \quad (1)$$

The weights  $w_i$  are derived from the final fully connected layer or global average pooling layer of the network.

Gradient-weighted Class Activation Mapping (Grad-CAM) (Selvaraju et al., 2017) enhances the basic CAM (B. Zhou et al., 2016) concept by incorporating gradient information. It computes the gradients of the predicted class score with respect to the feature maps. The importance weights  $w_i$  are proportional to the gradients, and the CAM is calculated similarly. Grad-CAM provides finer localization of discriminative regions.

EigenCAM (Muhammad & Yeasin, 2020) extends the CAM concept by introducing an eigen decomposition step. It involves computing the singular values of the weight matrix used in the CAM computation by using SVD. EigenCAM aims to capture more nuanced information about the significant features contributing to the classification decision.

HayCAM (A. Ornek & Ceylan, 2022) further refines the CAM approach by incorporating PCA. This allows for a more detailed representation of the relationships among features, leading to enhanced localization accuracy compared to traditional CAM methods. Even if HayCAM reduces the number of filters to 19, it was arranged to reduce the number of filters to 1 filter.

CAMs, including Grad-CAM, EigenCAM, and HayCAM, have found applications in various domains, such as object detection, image segmentation, and weakly-supervised object detection. Comparative analysis of these techniques, considering factors like interpretability, localization accuracy, and computational efficiency, helps in selecting the most suitable CAM variant.

### ***Dimensionality Reduction***

Principal Component Analysis (PCA) and Singular Value Decomposition (SVD) are two powerful mathematical techniques that have found widespread application in a variety of fields, including data science, signal processing, computer vision, and machine learning. These techniques are used for dimensionality reduction and feature extraction, which are essential tasks in many applications where high-dimensional data needs to be processed and analyzed efficiently.

PCA is a technique that aims to transform the original data into a new coordinate system, where the maximum variance lies along the first principal component, the second maximum along the second component, and so forth. The transformation is achieved through the process of identifying the eigenvectors and eigenvalues of the covariance matrix of the data. This involves the use of statistical techniques to analyze the data and identify patterns and trends that can be used to create new insights and understandings.

The covariance matrix, denoted as  $C$ , is calculated as follows (Eq. 2):

$$C = \frac{1}{k-1} \sum_{i=1}^k (B_i - \bar{B})(B_i - \bar{B})^T \quad (2)$$

where  $B_i$  represents the data points,  $\bar{B}$  is the mean of the data, and  $k$  is the number of data points.

The eigenvectors of  $C$  form the principal components, and the corresponding eigenvalues indicate the variance along each component.

SVD is another powerful mathematical technique that is closely related to PCA. It is used to decompose a matrix into its constituent parts, which can be used for a variety of tasks, including image compression, data compression, and signal processing. SVD decomposes a matrix  $B$  into three other matrices:  $Y$ ,  $\Sigma$ , and  $P^T$ . For a given matrix  $B_{m \times k}$ , where  $m$  is the number of rows and  $k$  is the number of columns (Eq. 3):

$$B = Y \Sigma P^T \quad (3)$$

where:

- $Y$  is a matrix that contains the left singular vectors and is orthogonal,
- $\Sigma$  is a diagonal matrix that has singular values on its diagonal,
- $P^T$  is the transpose of a matrix that contains the right singular vectors and is orthogonal.

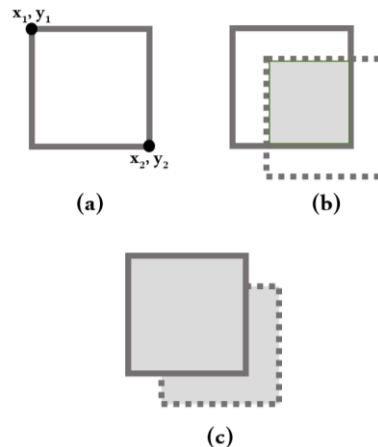
The singular values in  $\Sigma$  represent the square roots of the eigenvalues of  $B^T B$  or  $BB^T$ .

While both PCA and SVD are closely related, with PCA essentially being a specific application of SVD, they differ in their objectives. PCA focuses on finding the axes of maximum variance, whereas SVD decomposes a matrix into its singular values and vectors. SVD provides a full decomposition, making it more versatile, but for dimensionality reduction, PCA is often more intuitive and computationally efficient.

### ***Intersection over Union (IoU) in Weakly-Supervised Object Detection***

Weakly-supervised object detection (Shao et al., 2022) leverages methods such as CAM to overcome the challenge of limited labeled data. The activation maps are employed to guide the learning process, enabling the network to identify objects without requiring precise bounding box annotations. This approach significantly reduces the manual labeling effort while still achieving competitive detection performance. By harnessing weak supervision, CAM-based object detection models can learn to recognize objects with only image-level labels, demonstrating promising potential for deployment across various domains where labeled data is scarce or expensive to obtain.

Intersection over Union (IoU) is a metric that is widely used to evaluate the accuracy of object detection models. The IoU provides a quantitative measure of how well the predictions of the bounding boxes align with the ground truth bounding boxes. The IoU is calculated by dividing the area of overlap between the predicted and ground truth bounding boxes by the area of their union. A bounding box, intersection, and union areas are shown in Figure 5. A high IoU score indicates that the model's predictions are accurate and that the bounding boxes are tightly aligned with the ground truth, while a low IoU score suggests that the model's predictions are inaccurate and require further refinement.



**Figure 5.** Bounding Box, Intersection, and Union Regions

Let  $BB_{pred}$  and  $BB_{gt}$  represent the predicted and ground truth bounding boxes, respectively. The area of overlap  $Area_{overlap}$  is given by the intersection of the two bounding boxes (Eq. 4, Eq. 5, Eq. 6):

$$a_1 = \max\left(0, \min\left(x_{max}^{pred}, x_{max}^{gt}\right) - \max\left(x_{min}^{pred}, x_{min}^{gt}\right)\right) \quad (4)$$

$$a_2 = \max\left(0, \min\left(y_{max}^{pred}, y_{max}^{gt}\right) - \max\left(y_{min}^{pred}, y_{min}^{gt}\right)\right) \quad (5)$$

$$Area_{overlap} = a_1 \times a_2 \quad (6)$$

Where  $x_{min}$ ,  $x_{max}$ ,  $y_{min}$ , and  $y_{max}$  denote the minimum and maximum coordinates of the bounding boxes.

The area of union  $Area_{union}$  is calculated as the sum of the individual areas of the predicted and ground truth bounding boxes minus the area of overlap (Eq. 7):

$$Area_{union} = Area_{pred} + Area_{gt} - Area_{overlap} \quad (7)$$

The IoU is then computed as the ratio of the area of overlap to the area of union (Eq. 8):

$$IoU = \frac{Area_{overlap}}{Area_{union}} \quad (8)$$

In weakly-supervised object detection, IoU metrics play a crucial role in assessing the localization accuracy of detected objects. The IoU metric becomes particularly valuable in scenarios where object boundaries are not precisely defined, allowing for a more flexible evaluation of detection performance.

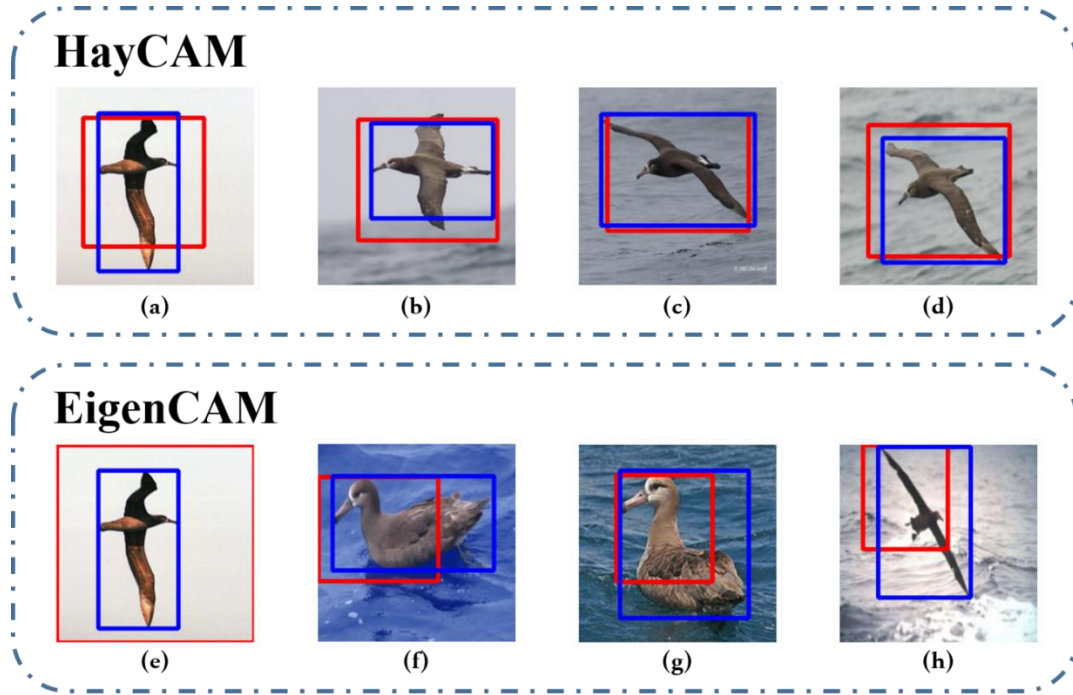
## EXPERIMENTS AND RESULTS

The study was conducted to assess the impact of object size on object detection performance. To achieve this, the ratios of objects within images were calculated based on the corresponding image areas. The calculation was carried out in intervals such as 100% to 90%, 90% to 80%, and so forth, down to 10% to 0%. This method allowed for a systematic exploration of how varying object sizes influence the object detection capabilities of the model. The results from EigenCAM and HayCAM, as presented in Table 2, provide a detailed insight into the IoU values across different object/image ratios.

**Table 2.** IoU Results of Detections

Object/Image Ratio	EigenCAM	HayCAM
100% - 90%	<b>0.5583</b>	0.5289
90% - 80%	0.4853	<b>0.5528</b>
80% - 70%	0.4218	<b>0.5536</b>
70% - 60%	0.3425	<b>0.5190</b>
60% - 50%	0.2674	<b>0.4574</b>
50% - 40%	0.2034	<b>0.3794</b>
40% - 30%	0.1684	<b>0.3116</b>
30% - 20%	0.1595	<b>0.2684</b>
20% - 10%	0.1732	<b>0.2047</b>

Table 2 shows the IoU results for two different methods, EigenCAM and HayCAM, for various object/image ratios. The IoU is a measure of the overlap between two boxes, and it is used to evaluate the performance of object detection algorithms. Table 2 shows that HayCAM outperforms EigenCAM for most of the object/image ratios. For example, for the object/image ratio of 80-70%, HayCAM achieves an IoU of 0.5536, while EigenCAM achieves an IoU of 0.4218. However, for the object/image ratio of 100-90%, EigenCAM achieves the highest IoU of 0.5583, while HayCAM achieves an IoU of 0.5289. EigenCAM method achieves an average 30.88% IoU, while the HayCAM method achieves 41.95% IoU. The visual results are given in Figure 6.



**Figure 6.** Visual Results of HayCAM (a, b, c, d) and EigenCAM (e, f, g, h). Object/Image Ratios Are (a) 32.06% (b) 28.54% (c) 44.40% (d) 42.51% (e) 32.06% (f) 38.28% (g) 51.06 (h) 35.74

The results suggest that HayCAM is a more effective method for object detection than EigenCAM, especially for object/image ratios below 80%. The results also show that the performance of both methods decreases as the object/image ratio decreases. This is expected, as it becomes more difficult to detect objects as they become smaller in relation to the image size. The results can be used to guide the selection of object detection methods for different applications, depending on the object/image ratio and the desired level of performance.

## DISCUSSION

Table 2 shows the Intersection of Union (IoU) values for EigenCAM and HayCAM across various object/image ratios. This discussion delves into the observed trends, highlighting the strengths and weaknesses of each method in localizing objects within images.

Examining the table reveals a notable variation in performance between EigenCAM and HayCAM across different object/image ratios. EigenCAM exhibits a strong start in the 100% to 90% ratio, outperforming HayCAM with an IoU of 0.5583. However, a shift occurs in favor of HayCAM in subsequent intervals (90% to 80% and beyond), where it consistently achieves higher IoU values than EigenCAM. This trend suggests that HayCAM is particularly adept at handling diverse object sizes within images, showcasing its robustness in capturing relevant features.

One striking observation is the consistent outperformance of HayCAM throughout the majority of the presented ratios. In particular, 80% to 70% and 90% to 80% intervals stand out with HayCAM achieving IoU values of 0.5536 and 0.5528, respectively, demonstrating its capacity to accurately identify and localize objects across a spectrum of sizes. The sustained superiority of HayCAM implies its efficacy in scenarios where objects exhibit variations in scale, making it a promising choice for interpretable object detection models.

EigenCAM's initial strength, as evidenced by the high IoU in the first ratio, diminishes in subsequent intervals. The declining trend suggests that EigenCAM may face challenges in consistently localizing objects as their sizes vary. Understanding these nuances is crucial for practitioners to select interpretable methods based on the specific requirements of their object detection tasks.

The comparative analysis of EigenCAM and HayCAM results holds significant implications for model interpretability in object detection. While EigenCAM may excel in certain scenarios, HayCAM's consistent

performance across a broader range of object sizes highlights its versatility. This insight enables researchers and practitioners to make informed choices regarding the selection of interpretable methods based on the characteristics of their datasets and the challenges posed by varying object scales.

The discussed results underscore the importance of evaluating interpretable methods in the context of diverse object scales. The observed trends contribute valuable insights into the strengths and limitations of EigenCAM and HayCAM, guiding future endeavors in the development and application of interpretable models for object detection tasks.

## CONCLUSION

In conclusion, the presented investigation into the object detection performance of EigenCAM and HayCAM across varying object/image ratios provides valuable insights into the interpretability and adaptability of these methods. The experimental results revealed nuanced trends, with EigenCAM showcasing initial strength in accurately localizing objects within the 100% to 90% ratio but experiencing a decline in performance in subsequent intervals. Conversely, HayCAM consistently outperformed EigenCAM, demonstrating robust localization capabilities across a spectrum of object sizes. This suggests that the choice between these interpretable methods should be contingent on the specific challenges posed by varying object scales within images.

The observed trends in the IoU values highlight the importance of understanding the intricacies of interpretable models for object detection. The consistent superiority of HayCAM implies its potential applicability in real-world scenarios where objects exhibit diverse scales, enhancing the model's ability to provide meaningful and reliable insights into decision-making processes. The findings contribute to the broader discourse on model interpretability, emphasizing the need for nuanced assessments in diverse contexts.

For future work, it is crucial to delve deeper into the factors influencing the performance of HayCAM. Conducting a thorough analysis of the model's response to specific object characteristics and dataset attributes can provide a more nuanced understanding. Additionally, exploring enhancements to these CAM methods or combining them with other interpretability techniques may further improve their robustness and generalizability. The integration of additional datasets with distinct characteristics can contribute to a more comprehensive evaluation of these interpretable methods in various real-world scenarios. Addressing these aspects will pave the way for the refinement and advancement of interpretable models, fostering their broader adoption in complex object detection tasks.

## ACKNOWLEDGMENT

This study was supported by Huawei Türkiye R&D Center.

## REFERENCES

- Arrieta, A. B., Díaz-Rodríguez, N., Del Ser, J., Bennetot, A., Tabik, S., & Barbado, A. (2020). Explainable artificial intelligence (XAI): Concepts, taxonomies, opportunities and challenges toward responsible AI. *Information Fusion*, 58, 82–115. <https://doi.org/10.1016/j.inffus.2019.12.012>
- Chattopadhyay, A., Sarkar, A., Howlader, P., & Balasubramanian, V. N. (2018). Grad-CAM++: Generalized gradient-based visual explanations for deep convolutional networks. In 2018 IEEE Winter Conference on Applications of Computer Vision (WACV) (pp. 839–847). <https://doi.org/10.1109/WACV.2018.00097>
- He, K., Zhang, X., Ren, S., & Sun, J. (2016). Deep residual learning for image recognition. In Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition (pp. 770–778). <https://doi.org/10.1109/CVPR.2016.90>
- Kornblith, S., Shlens, J., & Le, Q. V. (2019). Do better imagenet models transfer better? In Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition (pp. 2661–2671). <https://doi.org/10.1109/CVPR.2019.00277>
- Krizhevsky, A., Sutskever, I., & Hinton, G. E. (2012). Imagenet classification with deep convolutional neural networks. *Advances in neural information processing systems*, 25. <https://doi.org/10.1145/3065386>
- Muhammad, M. B., & Yeasin, M. (2020). Eigen-cam: Class activation map using principal components. In 2020 international joint conference on neural networks (ijcnn) (pp. 1–7). <https://doi.org/10.1109/IJCNN48605.2020.9206626>

- Ornek. (2023). Developing a new explainable artificial intelligence method (doctoral dissertation). Konya Technical University. (No DOI available for the dissertation)
- Ornek, A., & Ceylan, M. (2022). Haycam: A novel visual explanation for deep convolutional neural networks. *Traitement Du Signal*, 39 (5), 1711–1719. <https://doi.org/10.18280/ts.390529>
- Ornek, A. H., & Ceylan, M. (2022). A novel approach for visualization of class activation maps with reduced dimensions. In *2022 innovations in intelligent systems and applications conference (asyu)* (pp. 1–5). <https://doi.org/10.1109/ASYU56188.2022.9925400>
- Ornek, A. H., & Ceylan, M. (2023). Codcam: A new ensemble visual explanation for classification of medical thermal images. *Quantitative InfraRed Thermography Journal*, 1–25. <https://doi.org/10.1080/17686733.2023.2167459>
- Selvaraju, R. R., Cogswell, M., Das, A., Vedantam, R., Parikh, D., & Batra, D. (2017). Grad-cam: Visual explanations from deep networks via gradient-based localization. In *Proceedings of the IEEE international conference on computer vision* (pp. 618–626). <https://doi.org/10.1109/ICCV.2017.74>
- Shao, F., Chen, L., Shao, J., Ji, W., Xiao, S., Ye, L., Xiao, J. (2022). Deep learning for weakly-supervised object detection and localization: A survey. *Neurocomputing*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2105.12694>
- Simonyan, K., & Zisserman, A. (2014). Very deep convolutional networks for large-scale image recognition. *arXiv preprint arXiv:1409.1556*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1409.1556>
- Stewart, G. W. (1993). On the early history of the singular value decomposition. *SIAM review*, 35 (4), 551–566. <https://doi.org/10.1137/1035134>
- van der Velden, B. H., Kuijf, H. J., Gilhuijs, K. G., & Viergever, M. A. (2022). Explainable artificial intelligence (xai) in deep learning-based medical image analysis. *Medical Image Analysis*, 79 , 102470. doi: <https://doi.org/10.1016/j.media.2022.102470>
- Wah, C., Branson, S., Welinder, P., Perona, P., & Belongie, S. (2011). Caltech (Tech. Rep. No. CNS-TR-2011-001). California Institute of Technology. (Technical reports typically do not have DOIs)
- Wu, S. X., Wai, H.-T., Li, L., & Scaglione, A. (2018). A review of distributed algorithms for principal component analysis. *Proceedings of the IEEE*, 106 (8), 1321–1340. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2018.2846568>
- Zhou, B., Khosla, A., Lapedriza, A., Oliva, A., & Torralba, A. (2016). Learning deep features for discriminative localization. In *Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition* (pp. 2921–2929). <https://doi.org/10.1109/CVPR.2016.319>
- Zhou, D., Fang, J., Song, X., Guan, C., Yin, J., Dai, Y., & Yang, R. (2019). Iou loss for 2d/3d object detection. In *2019 international conference on 3d vision (3dv)* (pp. 85–94). <https://doi.org/10.1109/3DV.2019.00019>



# Kahramanmaraş Sütçü İmam University Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 11.05.2024  
Kabul Tarihi : 15.06.2024

Received Date : 11.05.2024  
Accepted Date : 15.06.2024

## HARÇ ATIĞI İKAMELİ MİKRO BETONLARDA SERTLEŞMİŞ HAL VE MİKROYAPI DEĞERLENDİRİLMESİ

### EVALUATION OF HARDENED STATE AND MICROSTRUCTURE PROPERTIES OF MORTAR WASTE SUBSTITUTED MICRO CONCRETES

Melek AKGÜL<sup>1</sup> (ORCID: 0000-0001-8815-3762)

Osman HANSU<sup>2\*</sup> (ORCID: 0000-0003-1638-4304)

<sup>1</sup> Munzur Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Tunceli, Türkiye

<sup>2</sup> Gaziantep İslam Bilim ve Teknoloji Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Gaziantep, Türkiye

\*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Osman HANSU, osman.hansu@gibtu.edu.tr

#### ÖZET

İnşaat yıkıntı atığının sürdürülebilirlik ve geri dönüşüm süreçlerine dahil edilme çalışmaları özellikle yıkım gücü büyük depremler ve kentsel dönüşüm stratejileri sonrası hız kazanmıştır. Bu deneysel çalışmada, İnşaat Harç Atığı (HA)'nın CEM-I 42,5R çimentoya hacimce değişken oranlarda ikame edilmesi ile tasarlanan Mikro Beton (MB)'ların fiziksel, mekanik, durabilite ve mikroyapı özellikleri incelenmiştir. HA çimentoya hacimce %0, %5, 10, 15, 20, 25, 30 oranlarında ikame edilmiştir. Referans setinde kullanılan bağlayıcı miktarı 830 kg/m<sup>3</sup>'tür. Tüm MB karışımlarında su ve Silis Dumanı (SD) miktarı sabittir ve sırasıyla 400 kg/m<sup>3</sup> ve 150 kg/m<sup>3</sup> olarak tasarımda kullanılmıştır. 20 ± 2 °C sıcaklıkta kirece doymun su kürü 7 ve 28 gün olmak üzere iki farklı periyotta uygulanmıştır. Ayrıca birer takım numune 28 gün su kürü sonrası 56. ve 90. güne kadar laboratuvar ortamında bekletilmiştir. İlgili deney günlerinde sertleşmiş numuneler ile bir dizi fiziksel, mekanik ve durabilite deneyleri gerçekleştirilmiştir. Mikroyapı analizi değerlendirmeleri 28 günlük su kürü sonrası %0, %15 ve %30 HA ikamelili numuneler ve karışımda kullanılan HA'nın X-ışını Difraktometresi (XRD) verilerden sağlanmıştır. Tüm veriler karşılaştırmalı grafikler ile sunulmuştur. Sonuç olarak, %10 HA'nın ikame edildiği 7 ve 28 günlük numunelerde mekanik özellikleri iyileşmesine rağmen, bu oran dahil tüm ikame oranlarında ve sonraki yaşlarda mukavemet kayıpları gözlenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Harç atığı, mikro beton, mekanik özellikler, fiziksel özellikler, mikroyapı.

#### ABSTRACT

Studies on the inclusion of construction debris waste in sustainability and recycling processes have gained momentum, especially after major earthquakes and urban regeneration strategies. In this experimental study, the physical, mechanical, durability and microstructural properties of Micro concrete (MC) designed by substituting varying proportions of Construction Mortar Waste (MW) by volume into CEM-I 42,5R cement were investigated. MW was substituted into the cement at 0%, 5%, 10%, 15%, 20%, 25%, 30% by volume. The amount of binder used in the reference set was 830 kg/m<sup>3</sup>. The amount of water and Silica Fume (SF) was kept constant in all MC mixtures and used in the design as 400 kg/m<sup>3</sup> and 150 kg/m<sup>3</sup> respectively. Lime saturated water curing was applied at 20 ± 2 °C for two different periods of 7 and 28 days. In addition, one set of specimens was kept in the laboratory until the 56th and 90th day after 28 days of water curing. On the respective test days, a series of physical, mechanical and durability tests were performed with the hardened specimens. The evaluations microstructural analysis were obtained from X-Ray Diffractometer (XRD) data of 0%, 15% and 30% MW substituted specimens and MW used in the mixture after 28 days of water curing. All data are presented in comparative graphs. As a result, although the mechanical properties improved in the 7 and 28-day specimens in which 10% HA was substituted, strength losses were observed at all substitution rates including this rate and at subsequent ages.

**Keywords:** Mortar waste, micro concrete, mechanical properties, physical properties, microstructure.

ToCite: AKGÜL, M., & HANSU, O., (2024). HARÇ ATIĞI İKAMELİ MİKRO BETONLARIN SERTLEŞMİŞ HAL VE MİKROYAPI DEĞERLENDİRİLMESİ. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 27(3), 1089-1101.



## GİRİŞ

Dünya ekonomisinde kayda değer bir hacme sahip olan inşaat sektörü (Bayrak & Telatar, 2021) yıllık 6 milyar ton CO<sub>2</sub> salınımına neden olmaktadır (Huang vd., 2018) ve bu veriye bağlı olarak yapılan değerlendirmelere göre sektör, en büyük endüstriyel kirlilik kaynağı olan sektörler sıralamasında ilk üçte yer alır. İnşaat sektörünün en önemli üretim süreçlerinden biri çevreci ve sürdürülebilir kabul edilmeyen çimento üretim sürecidir (Gao vd., 2017). Çünkü çimento üretim süreci, yıllık 500,000 tondan fazla kükürt dioksit (SO<sub>2</sub>), azot dioksit (NO<sub>2</sub>) ve karbonmonoksit (CO) yayılımından sorumludur. Çimento üretimine bağlı CO<sub>2</sub> emisyonunun yaklaşık %83,1'i yakma işleminden kaynaklanır (Kwon vd., 2015). Ayrıca sürecin sebep olduğu hava kirliliği; partikül madde (PM), azot oksitler (NO<sub>x</sub>) ve sülfür dioksit (SO<sub>2</sub>) salınımı şeklindedir (Korkmaz, 2019). Ülkelerin sürdürülebilir kalkınma hedefleri; doğal kaynakların korunması, atıkların azaltılması, bertarafı ve geri dönüşüm süreçleri ile şekillenir (Aydın İpekçi, Coşkun, & Tıkansak Karadayı, 2017). Atıkların birçoğu bertaraf edilirken geri kazanımı ile ilgili çalışmalar ancak 1990'lardan sonra ivme kazanmıştır (Aydın İpekçi vd., 2017). Son 50 yılda birçok ülke çevre yasaları doğrultusunda bina yıkıntı atıklarının da dahil olduğu çoğu atık türünün bertarafı ve geri dönüşümü için stratejiler geliştirmiştir (Gao vd., 2017). Agregaya veya çimentoya ikame ürün olarak yeni ürün arayışlarına yönelik yapılan çalışmalarda; üretilen beton veya harç elemanların mekanik ve durabilite özelliklerinin çoklu fonksiyonlar ile değerlendirilmesi hem mühendislik hem de sürdürülebilir üretim açısından önemlidir. Bu çalışmalarda elde edilen sonuçlar, bazı ikame oranlarının optimum fayda düzeyini sunmanın yanı sıra çevre ve atmosferin korunumuna önemli katkılar sağlanabileceği yönündedir (Etili vd., 2024; Akgül & Etili, 2024, 2023; Hansu & Etili, Etili, 2023a, 2023b, 2022; 2022a, 2022b; Cemalgi vd., 2021; Akgül vd., 2020; Cemalgi & Etili, 2020, 2019; Cemalgi, vd., 2018; Etili vd., 2021, 2018a; Gesoglu vd., 2017).

20. Yüzyıl süresince inşa edilmiş birçok yapı türü ve özellikle binalar son 20 yılda yıpranma ve büyük yıkımlar sonrası inşaat yıkıntı atığı (İYA) sorununa dönüşmüştür. Kentsel dönüşüm ve büyük afetler sonrası meydana gelen İYA Avrupa'da üretilen toplam atıkların büyük bir kısmını oluşturmaktadır (Gálvez-Martos vd., 2018). Dünya Yeşil Bina Konseyi'nin verilerine göre, küresel atıkların yaklaşık %50'si inşaat sektöründen kaynaklanan atıklardan oluşmaktadır (Joseph vd., 2023). Bu anlamda inşaat sektörünün önemli üretim ve geri dönüşüm stratejilerine ihtiyacı vardır (Tu, Chen, & Hwang, 2006). Son yıllarda yapılan birçok akademik ve sektörel çalışma İYA'nın bertarafından çok geri dönüşüm sürecine dahil edilmesini hedefleyen stratejilere dayanır (Aydın İpekçi vd., 2017; Tu vd., 2006). Geri dönüşüm süreci sonrası İYA, zemin iyileştirmesinden, karayolu tasarımlarına kadar geniş bir yelpazede kullanım alanına sahiptir (Omrane vd., 2017; Lidmila vd., 2013). İYA'nın en önemli geri dönüşüm ürünü Geri Dönüştürülmüş Agregaya (GDA)'dır. Özellikle GDA'nın ince ve iri agregaya ikame edilmesi, beton ve harç sistemlerinin mekanik, fiziksel ve durabilite özelliklerinde belirleyicidir. Bu sebeple GDA'nın yapısal inşaatlarda kullanımı halen sınırlıdır. GDA'nın su emme kapasitesinin yüksek olması ve kusurlu agregaya formu gibi kullanımını etkileyen baskın özellikleri vardır. Çünkü su emme oranındaki artış ve düzensiz fiziki şekil işlenebilirliği büyük oranda etkilemektedir. Ayrıca GDA'ların çevrelendiği harç matrisi agregaya incelik modülü ile değişkenlik gösterebilir. Bazı çalışmalar bu durumun dezavantajlarını azaltmak için çimento dozajındaki artışı uygulanabilir kabul etse de halen iyileştirilmesi gereken mekanik ve fiziksel olgular söz konusudur (Hafez vd., 2020; Tu vd., 2006; Ajdukiewicz & Kliszczewicz, 2002; Hansen, 1986;). Benzer eğilim İYA'nın öğütme ve ön işlemler sonrası çimentoya ikame edilerek kullanımının değerlendirildiği çalışma sonuçlarında da sunulmuştur (Günel vd., 2024; Yu & Shui, 2014). Sertleşmiş harç elemanların öğütülüp farklı sıcaklıklarda (300, 620, 900 C<sup>0</sup>) kalsinasyonu sonrası çimentoya ikame ürün olma potansiyeli olduğu kabul edilmektedir (Shui vd., 2009; Castellote vd., 2004;). Portland Çimentoya oranla CO<sub>2</sub> emisyon oranının %94 azaltılabileceği kabul edilen atık ürün kalsinasyon sıcaklığı 450-800 °C aralığıdır (He vd., 2019). Ancak kalsinasyon sonrası da Portland Çimentoya kıyasla su ihtiyacındaki artış ve hızlı rehidratasyon tespit edilmiştir (Shui vd., 2009).

MB; parçacık boyutu yaklaşık 0,5 mm'den 1 µm'ye kadar değişen mikro agregalarla tasarlanmış, yüksek performanslı çimento esaslı ürünlerdir (Felekoğlu, 2007). Genellikle tasarımda ince öğütülmüş ve çoğu zamanda puzolonik özellikteki bileşenler agregaya olarak tercih edilir. MB genel olarak "en büyük tane büyüklüğü 0,1-1 mm arasında değişen farklı tipteki toz malzemelerle" hazırlanan özel bir tasarım türü olarak kabul edilir (Etili vd., 2024; Etili, 2023a, 2022a; Thomas vd., 2021). MB'lerin taze hal işlenebilirlik özelliklerinin tahsisi genellikle sabit S/B oranı ve buna bağlı olarak değişken plastikleştirici katkı miktarı ile sağlanır (Thomas vd., 2021; Felekoğlu vd., 2009; Felekoğlu, 2007). MB'lerde büzülme çatlağı oluşumu hassasiyetini azaltmak önemli bir araştırma sorunsalıdır. Bu amaçla farklı kür uygulamaları hatta büzülme engelleyici kimyasalların yanı sıra çatlağın yayılma ve genişlemesini sınırlayıcı liflerin kullanımı yaygındır (Akgül & Etili, 2023; Etili, 2022a; Etili vd., 2018b). Büzülme çatlağı oluşum süreci parçacık boyutu dağılımı ile ilişkilidir. Su ihtiyacını artırıcı mikro agregaya ve bağlayıcılar bu süreci olumsuz etkiler. Parçacık boyutu dağılımının optimizasyonu ile maksimum kompaktlık elde etmek MB elemanların birçok

mühendislik özellikleri üzerinde etkilidir. Mikro agregaların parçacık boyutu arttıkça eğilme mukavemetinde azalma gözlenmektedir. Bunun yanı sıra kullanım alanındaki çeşitliliğe bağlı olarak değişimle birlikte; kendiliğinden yerleşebilme, vibrasyonla yerleşme veya püskürtme yoluyla yerleştirme durumları için tasarımdan istenen reolojik davranışlar farklılık göstermektedir (Felekoğlu, 2009).

HA'nın ikincil ön çalışmalar gerektirmeden sadece mekanik parçalanma ve öğütme ile çimentoya ikame ürün olarak MB üretiminde kullanımını amaçlamaktadır. Karışım tasarımında bir tanesi referans olmak üzere toplamda 7 farklı MB karışım oluşturulmuştur. Çimentoya hacimce ikame edilen HA'nın değişim oranı artan %5'lik oranlar ile %0-%30 bandındadır. Tüm MB setleri için toplamda 42 adet 50x50x50 mm ayrıtlı küp ve 84 adet 40x40x160 mm ayrıtlı prizma üretilmiştir. MB setlerinin test yaşı 7, 28, 56 ve 90 gündür. Sertleşmiş numuneler ile etüv kurusu birim hacim ağırlık, porozite, su emme, eğilmede çekme, eksenel basınç ve yarmada çekme dayanımı deneyleri gerçekleştirilmiştir. Ayrıca mikroyapı analizleri 28 günlük %0, %15 ve %30 HA ikamesi içeren MB setleri ve karışımında kullanılan HA tozu ile gerçekleştirilmiştir.

## MATERYAL VE METOT

MB'lerin tasarımında kullanılan malzeme ve uygulanan deneysel süreçler bu bölümde alt başlıklar ile sunulmuştur.

### Materyal

MB üretimi için çalışma kapsamında CEM-I 42,5R çimento (PÇ) (TS EN 197-1, 2011), SD, doğal kum (DK), çimentoya ikame HA, şehir şebeke suyu (TS EN 1008, 2003) ve ürün kodu Sika Visco Crete Hi-Tech-28 olan polikarboksilat bazlı yüksek oranda su azaltıcı kullanılmıştır (TS EN 934-2+A1, 2014). HA, önce küçük parçalar şeklinde kırılmış ardından konkasörde kırılarak 2 mm'lik elek ile elenmiş ve ikincil bir öğütme ve eleme işlemi sonrası 0,063 mm'lik kare gözlü elek altı malzeme çalışmada kullanılmıştır. DK, 0-4 mm'lik agrega yığınınından temin edilmiş ve eleme sonrası 1 mm kare gözlü elek altı malzeme karışım tasarımında kullanılmıştır. DK'ye ait elek analizi verisi Tablo 1'de sunulmuştur (TS EN 933-1, 2012).

**Tablo 1.** DK'nin Elek Analizi

Elek açıklığı (mm)	Yığılı Geçen (%)
1	100,00
0,5	57,00
0,25	11,90
0,125	7,72
0,063	0,95

PÇ, SD, HA, DK ve akışkanlaştırıcının özgür ağırlığı sırasıyla 3,15, 2,32, 2,38 ve 2,58 ve 1,06'dır. Karışım tasarımında kullanılan PÇ ve SD'nin teknik özellikleri sırasıyla Tablo 2 ve Tablo 3'te verilmiştir.

**Tablo 2.** PÇ'nin Teknik Özellikleri

Kimyasal bileşim (%)	CaO	63,57
	SiO <sub>2</sub>	19,34
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,75
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4,15
	MgO	2,90
	SO <sub>3</sub>	3,15
	K <sub>2</sub> O	0,81
Na <sub>2</sub> O	0,41	
Kızdırma kaybı	1,92	
Blaine (cm <sup>2</sup> /g)	3804	
Özgül ağırlık (gr/cm <sup>3</sup> )	3,15	

**Tablo 3.** SD'nin Teknik Özellikleri

SiO <sub>2</sub>	93%
H <sub>2</sub> O(Nem)	0,3%
Kızdırma kaybı	3,5%
+45 µ	2,5%
Hacim yoğunluğu	0,55-0,65 kg/dm <sup>3</sup>
BET	Min 1 5-28 m <sup>2</sup> /gr (doğruluk 23,36 m <sup>2</sup> /gr)

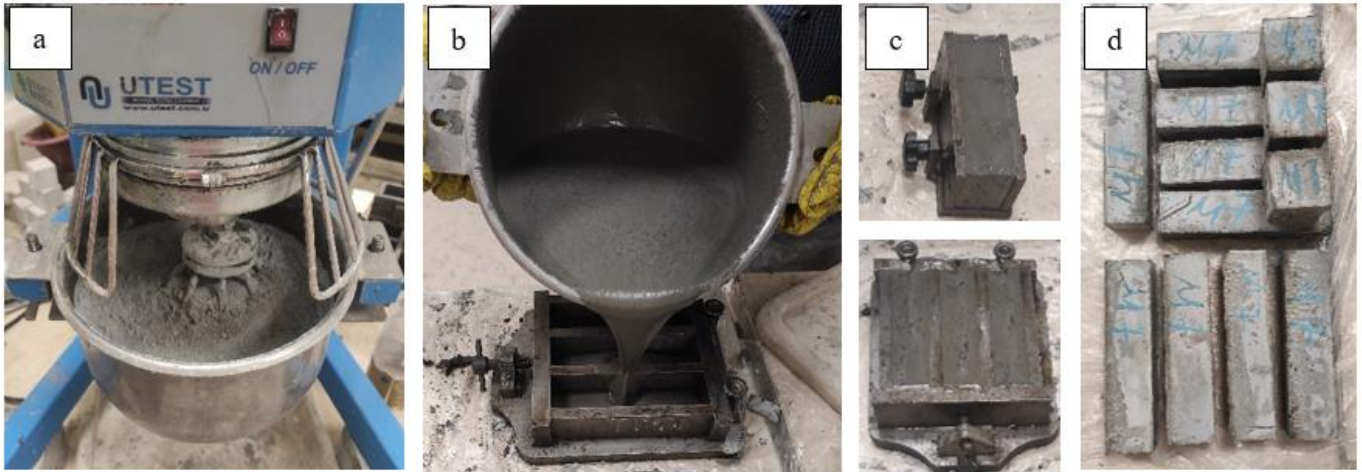
## Metot

HA'nın ikame oranı değişken tutularak 1 adet MB karışımı referans olmak üzere 7 farklı MB karışımı deneysel çalışma kapsamında üretilmiştir. MB'nin çimento ile değişim oranı hacimce % 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30'dur. S/B oranı referans setinde 0.46 olarak alınmıştır. Tüm MB setlerinde kullanılan su miktarı  $382 \text{ kg/m}^3$  ve SD miktarı  $150 \text{ kg/m}^3$  ile sınırlandırılmıştır. Akışkanlaştırıcının kullanım miktarı, üretici firma kullanım sınır değer aralığı korunarak, MB'lerin işlenebilirlik ve vizkozitesinin tahsisi için değişken oranlarda tutulmuştur. MB setlerine ait  $1 \text{ m}^3$  karışım tasarımı Tablo 4'te verilmiştir.

**Tablo 4.** MB Karışım Tasarımı ( $\text{kg/m}^3$ )

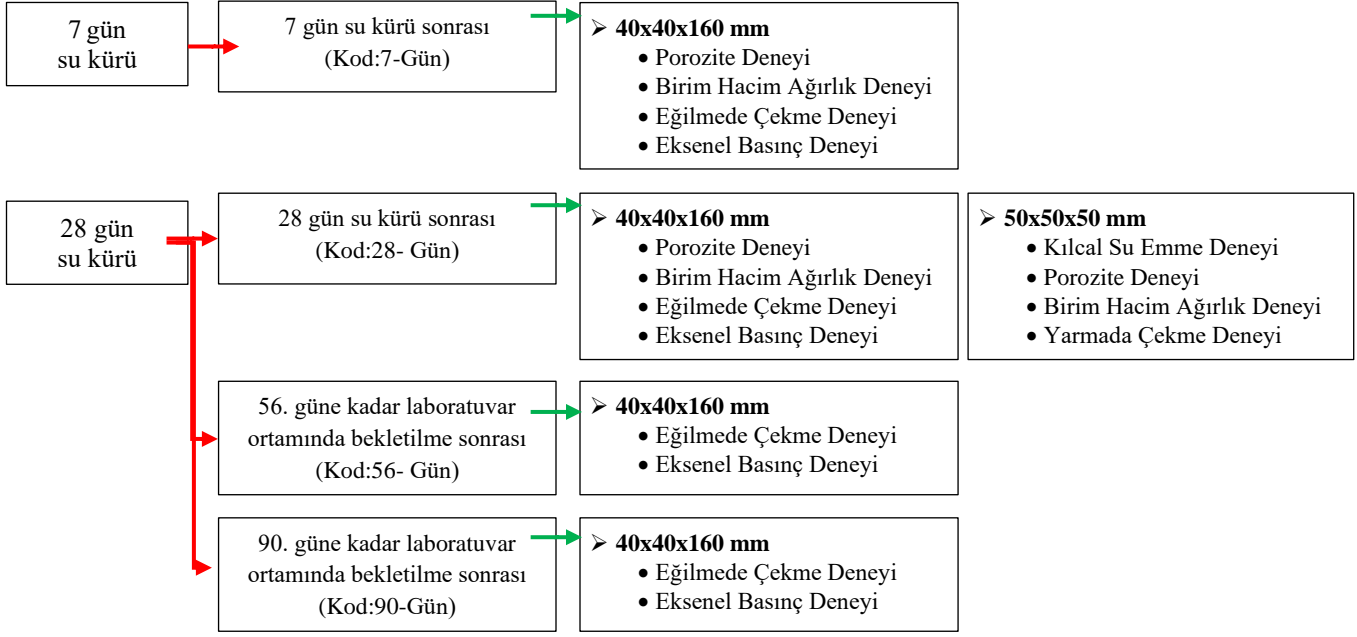
	MB-HA0	MB-HA5	MB-HA10	MB-HA15	MB-HA20	MB-HA25	MB-HA30
PC	680	646	612	578	544	510	476
SD	150	150	150	150	150	150	150
HA	0	25,7	51,4	77,1	102,8	128,4	154,1
Su	382	382	382	382	382	382	382
Akışkanlaştırıcı	5,45	5,55	5,70	5,75	5,80	6,00	6,20
DK	855	855	855	855	855	855	855

Karışımlarının üretiminde  $3 \text{ dm}^3$  kapasiteli laboratuvar tipi mikser kullanılmıştır (Şekil 1.a). Küp ve prizma kalıplara sıkıştırılmadan yerleştiren MB'ler (Şekil 1.b ve Şekil 1.c.), 24 saat sonunda kalıplardan çıkarılıp  $20 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$  sıcaklıkta kirece doymun su kürü ile 7 ve 28. güne kadar olgunlaştırılmıştır. Toplamda 42 adet küp ve 84 adet prizma numune üretilmiştir (Şekil 1.d).



**Şekil 1.** Numune Hazırlama Süreci

Numunelerin olgunlaştırılmasında 2 farklı kür şartları (su ve su+hava kürü) ve 4 farklı periyot (7, 28, 56, 90) esas alınmıştır. Numuneler 4 gruba ayrılmış birinci grup 7 gün, diğer 3 grup ise 28 gün  $20 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$  sıcaklıkta kirece doymun su küründe bekletilmiştir. 28 gün su kürü sonrası numune gruplarından bir takım 28. günde ilgili deneylerde kullanılmış, diğer iki takım ise sırasıyla 56. ve 90. deney gününe kadar laboratuvar ortamında bekletilmiş ve akabinde ilgili deneyler yapılmıştır. Numune kodları, kür şartları ve numune yaşını belirtir şekilde oluşturulmuştur. Örnekle; MB-HA0 referans setini ifade ederken; 7-Day, 7 gün su kürü uygulanan numune grubunu; 56-Day, 28 gün su kürü sonrası 56. deney gününe kadar laboratuvar ortamında bekletilen numune grubunu ifade etmektedir. Şekil 2. MB setleri ile gerçekleştirilen deneysel prosedürü ve numune kodlama verisini sunmaktadır.



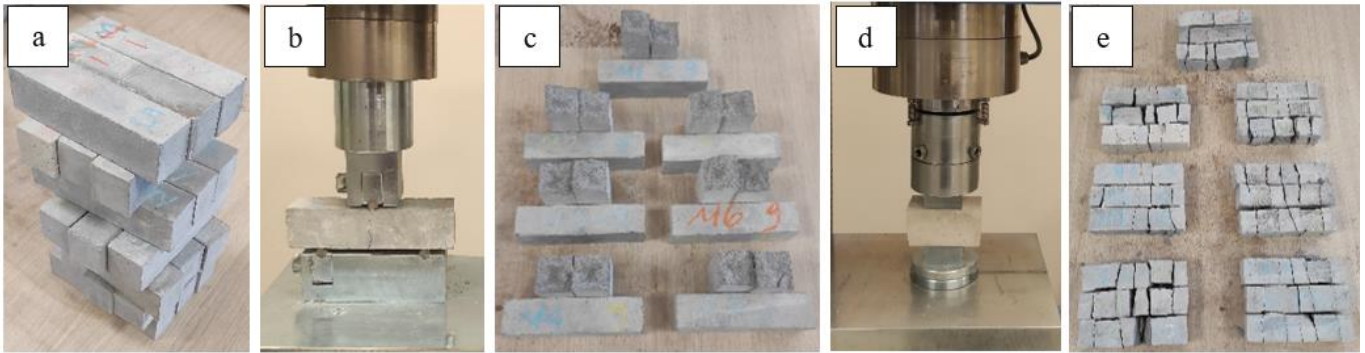
Şekil 2. MB Setleri, Numune Kodları, Kür ve Test Prosedürü

### DeneySEL Çalışma

Üretilen tüm MB setleri ile etüv kurusu birim hacim ağırlık, porozite, kılcal su emme, eğilmede çekme dayanımı, eksenel basınç dayanımı ve yarmada çekme dayanımı deneyleri gerçekleştirilmiştir. Mikroyapı değerlendirmesi %0, %15 ve %30 HA içeren numuneler ve karışımda kullanılan HA tozu ile belirlenmiş, tüm deneysel çalışma ve mikroyapı analizi verileri bulgular bölümünde grafikler yardımı ile yorumlanmış ve karşılaştırılmıştır.

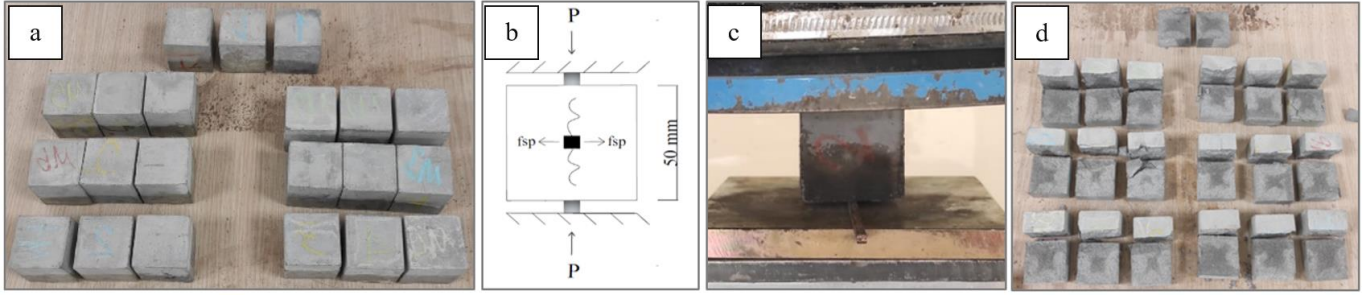
### Mekanik Özelliklerin Belirlenmesi

Şekil 2’de verilen deney günlerinde 40x40x160 mm ayrıtlı prizma numuneler ile eksenel basınç deneyi (ASTM C348-02, 2002) 15 kN yükleme kapasiteli üniversal bir test makinesi ile gerçekleştirilmiştir. Deney sonrası elde edilen 2’şer adet numune parçası ile 250 kN kapasiteli üniversal basınç dayanımı test pres makinesi kullanılarak eksenel basınç deneyi (ASTM C349-08, 2008) yapılmıştır (Şekil 3). Eksenel basınç deneyinde 1 kN/s basınç yükü uygulanmıştır (ASTM C109/C109M, 2007).



Şekil 3. Eğilmede Çekme ve Eksenel Basınç Deneyi

28 gün kirece doymun su kürü uygulanan 50x50x50 mm ayrıtlı numuneler ile yarmada çekme deneyi gerçekleştirilmiştir (Şekil 4).



Şekil 4. Yarmada Çekme Deneyi

### ***Fiziksel ve Durabilite Özelliklerinin Belirlenmesi***

Fiziksel özelliklerin tespitinde 40x40x160 mm ayrıtlı prizma ve 50x50x50 mm ayrıtlı küp numuneler kullanılmıştır. Çalışma prosedürüne göre tüm numunelerin su kürü sonrası sırasıyla su içindeki asılı ağırlığı, doymuş kuru yüzey ağırlığı ve etüv kurusu ağırlığı saptanarak; etüv kurusu birim hacim ağırlık ve porozite oranı tespit edilmiştir.

28 günlük küp numuneler ile kılcal su emme deneyi gerçekleştirilmiştir. Su kürü sonrası, 24 saat hava sirkülasyonlu etüv de  $110 \pm 2$  °C'de bekletilerek etüv kurusu sabit ağırlığı sağlanmış numuneler laboratuvar ortamında oda sıcaklığına kadar bekletilip, dört tarafı su geçirmez parafin tabakasıyla yalıtılmıştır. Yalıtılmayan iki yüzeyden biri su ile temas edecek şekilde su haznesine yerleştirilmiş ve 0, 5, 10, 30, 60, 240 ve 1440 dakikalarında tek yüzeyden ( $50 \times 50$  mm<sup>2</sup>) emilen su miktarı 0,01 g hassasiyeti ile tespit edilmiştir (ASTM C1585-13, 2013).

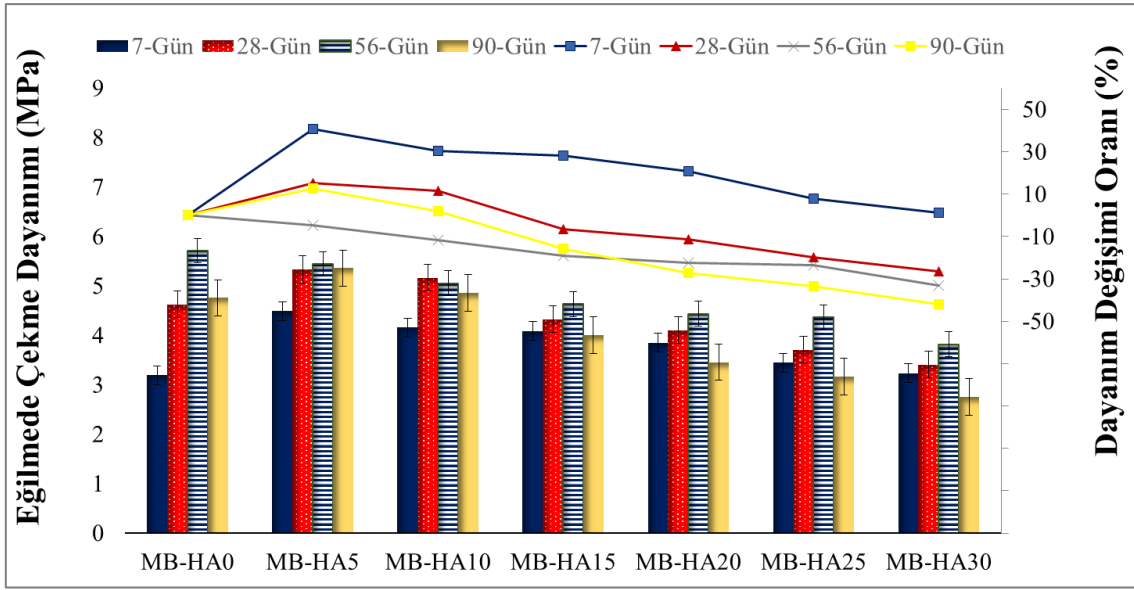
### ***Mikroyapının Belirlenmesi***

Mikroyapı analizine yönelik değerlendirmeler; 28 gün su kürü sonrası MB-HA0, MB-HA15 ve MB-HA30 setlerine ait numunelerden elde edilen toz örnekler ve karışımda kullanılan HA tozunun XRD verilerine dayanır. Analizlerde kullanılan numune örnekleri, aksel basınç dayanımı deneyinde kullanılan numunelerin deney sonrası yeterli boyut ve miktarda öğütülmesi ile sağlanmıştır. Mikroyapı analizleri Munzur Üniversitesi MUNTEAM bünyesinde RİGAKU-Miniflex 600 X-ışını kırınım cihazı ile gerçekleştirilmiştir.

## **BULGULAR VE TARTIŞMA**

### ***Eğilmede Çekme Dayanımı Bulguları***

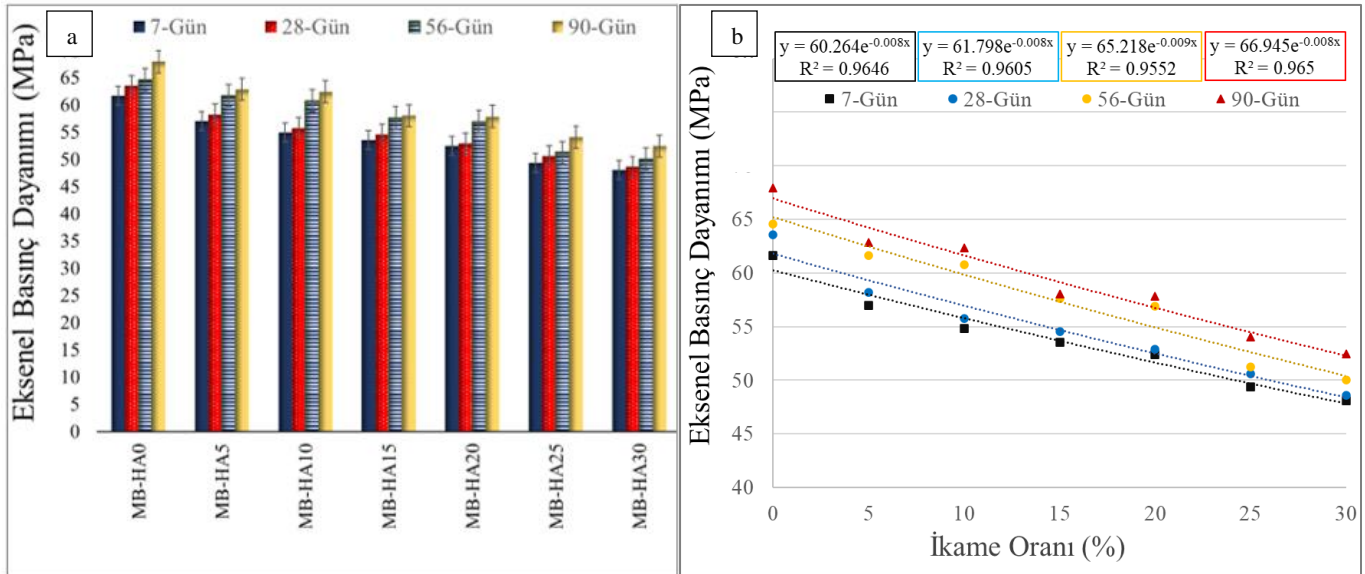
7, 28, 56 ve 90 günlük numuneler ile gerçekleştirilen eğilmede çekme deneyi verileri Şekil 5'te sunulmuştur. 7-Gün ve 28-Gün numunelerinde en yüksek eğilmede çekme dayanımı MB-HA5 setine aittir. Tüm karışımların 7-Gün setleri referans setine göre daha fazla eğilmede çekme dayanımı vermektedir. 28-Gün numunelerinde eğilmede çekme dayanımı verileri MB-HA0, MB-HA5 ve MB-HA10 için sırasıyla 4,63, 5,33, 5,16 MPa'dır ve referans setinden MB-HA5 setine kadar artış ile devam etmektedir. Ancak MB-HA10 setinden MB-HA30 setine kadar eğilmede çekme dayanımı azalmakta ve bu aralıktaki tüm grupların çekme dayanımı referans setinden daha düşük değerler vermektedir. Harç atığı ikameli çalışmalar (Moon vd., 2005) ile benzerlik içeren bu sonuçlara ilaveten; 56-Gün ve 90-Gün numunelerinin eğilmede çekme dayanımı verileri incelendiğinde; 56-Gün numunelerinde eğilmede çekme dayanımının kendi grupları içinde artışa devam ettiği (MB-HA10 hariç) ancak 90-Gün numunelerinde benzer eğilimi vermediği görülmektedir. Bu durum akışkanlaştırıcının ve SD'nin ilerleyen yaşlardaki mekanik performansa etkisi ile açıklanabilir (Etlı, 2022a, 2023a; Etlı vd., 2024; Thomas vd., 2021). Eğilmede çekme dayanımı verileri literatürdeki mikro elemanlardan sağlanan sonuçlar ile örtüşmektedir. Mikro elemanlar bünyesindeki mikro agregaya bağlı olarak gevrek yapıda bir davranış sergiler. Bu hali ile büzülme hassasiyeti klasik betona ve harç elemanlara göre çok daha fazladır (Victor & Tetsushi, 1998).



Şekil 5. Eğilmede Çekme Dayanımı Sonuçları

### Eksenel Basınç Dayanımı Bulguları

Eksenel basınç verileri 7, 28, 56 ve 90 günlük numuneler ile gerçekleştirilen deneysel çalışma sonuçlarını içermektedir (Şekil 6). Eksenel basınç dayanımı en yüksek olan MB seti MB-HA0 olan referans setidir. Artan HA'nın MB'lerde eksenel basınç dayanımını azalttığı Şekil 6'da sunulan verilerden tespit edilmiştir. Tüm yaşlarda en yüksek eksenel basınç dayanımı referans setine aittir. 28-Gün numunelerinin MB-HA0 setinde 63,55 MPa olan eksenel basınç dayanımı aynı kür grubunun MB-HA30 setine kadar azalmaktadır. En fazla eksenel basınç kaybının yaşandığı MB-HA30 setinde bu değişim referans setine göre yaklaşık -%23,5'tir. Tüm ikame durumları için artan kür süresine bağlı olarak 7-Gün'den 90-Gün'e kadar eksenel basınç artmaktadır. HA katkı oranı %0'dan %30'a artarken eksenel basınç dayanımı düşük periyotta seyretse de kür süresine bağlı artış HA ikame oranından olumsuz etkilenmez. Çimentoya ikame ürünler aktif bileşen miktarını doğrudan azaltır. Bu durum basınç dayanımı başta olmak üzere mekanik performans kriterleri üzerinde olumsuz etkiye sahiptir. Benzer deneysel çalışma verileri ile Şekil 6'da verilmiş olan tüm HA ikame durumlarında elde edilen sonuçlar benzerlik göstermektedir (Kim, 2017; Moon vd., 2005).

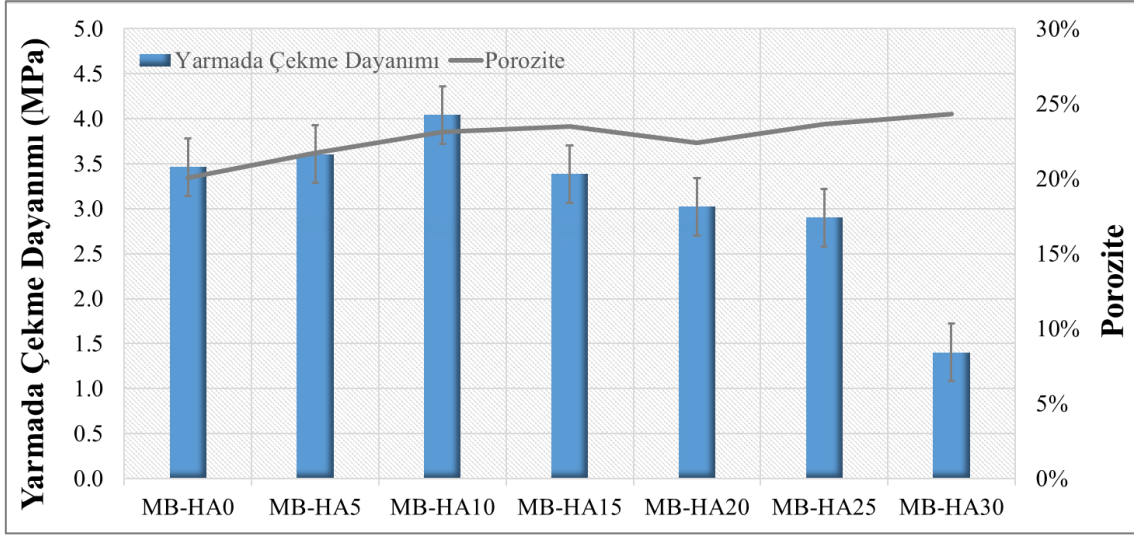


y: Eğilmede çekme dayanımı (MPa)  
x: İkame oranı (%)

Şekil 6. Eksenel Basınç Dayanımı Sonuçları

### Yarmada Çekme Dayanımı Bulguları

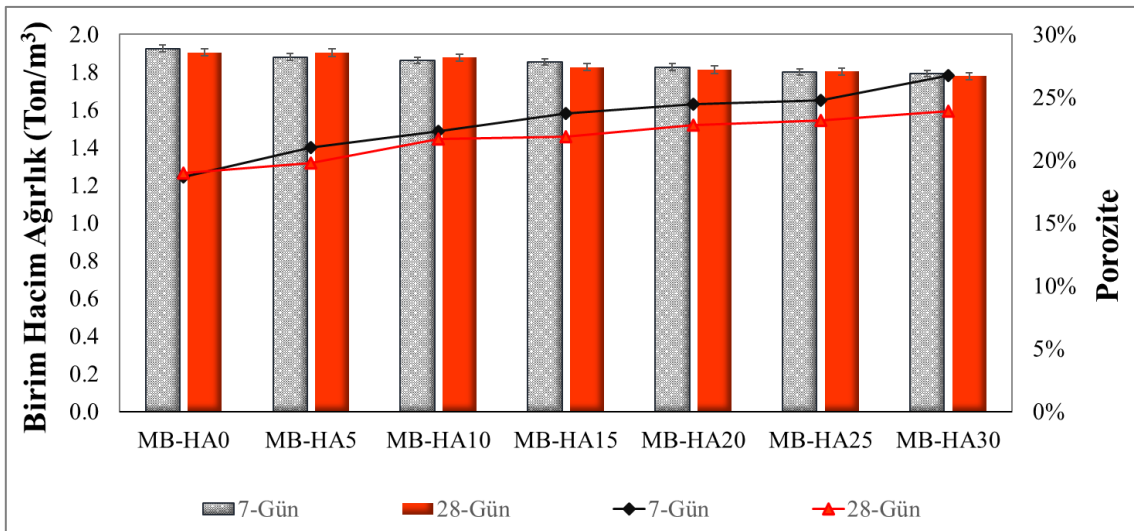
50x50x50 ayrıtlı 28-Gün numuneleri ile gerçekleştirilen porozite ve yarmada çekme dayanımı verileri Şekil 7'de verildiği gibidir. En yüksek yarmada çekme dayanımı 4,04 MPa ile MB-HA10 setine aittir. MB-HA10'dan sonra yarmada çekme dayanımı düşüş sergiler. En düşük çekme dayanımı ve en yüksek porozitenin kaydedildiği MB-HA30 setinin küp numuneleri için porozite değeri yaklaşık %24'tür. %5 ve %10 HA ikamesi içeren MB-HA5 ve MB-HA10 setlerinde yarmada çekme dayanımı referans setine oranla artış gösterir. Ayrıca tüm setlerin porozite oranı referans setine oranla %2-%5 bandında daha fazladır.



Şekil 7. Yarmada Çekme Dayanımı ve Porozite Sonuçları

### Etüv Kuru Birim Hacim Ağırlık ve Porozite Bulguları

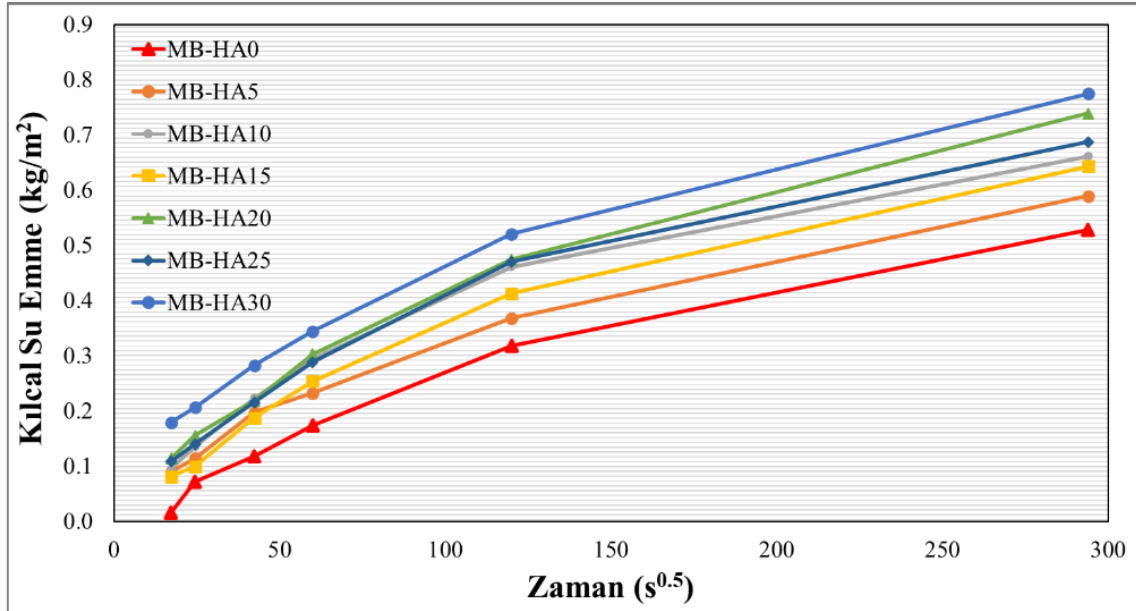
40x40x160 mm ayrıtlı prizma numuneleri ile gerçekleştirilen etüv kuru birim hacim ağırlık ve porozite verileri Şekil 8'de verilmiştir. En düşük birim hacim ağırlık değeri MB-HA30 setine aittir. Ayrıca en fazla porozite oranı da yine aynı setin 7-Gün ve 28-Gün setlerinde kaydedilmiştir. Referans setine oranla birim hacim ağırlıktaki değişim -%1 ile -%7 aralığındadır. Artan HA oranı ile porozite artar ve etüv kuru birim hacim ağırlık azalır. Birim hacim ağırlıktaki değişim azalan PÇ oranı ve artan HA oranı ile de ilişkilidir. Bu durum PÇ ile HA'nin özgül ağırlık farkından kaynaklanabilir. Birim hacim ağırlıktaki değişim dar bir aralıkta kalsa da porozite de değişim HA ikamesinden daha çok etkilenir.



Şekil 8. Etüv Kuru Birim Hacim Ağırlık ve Porozite Sonuçları

### Kılcal Su Emme Bulguları

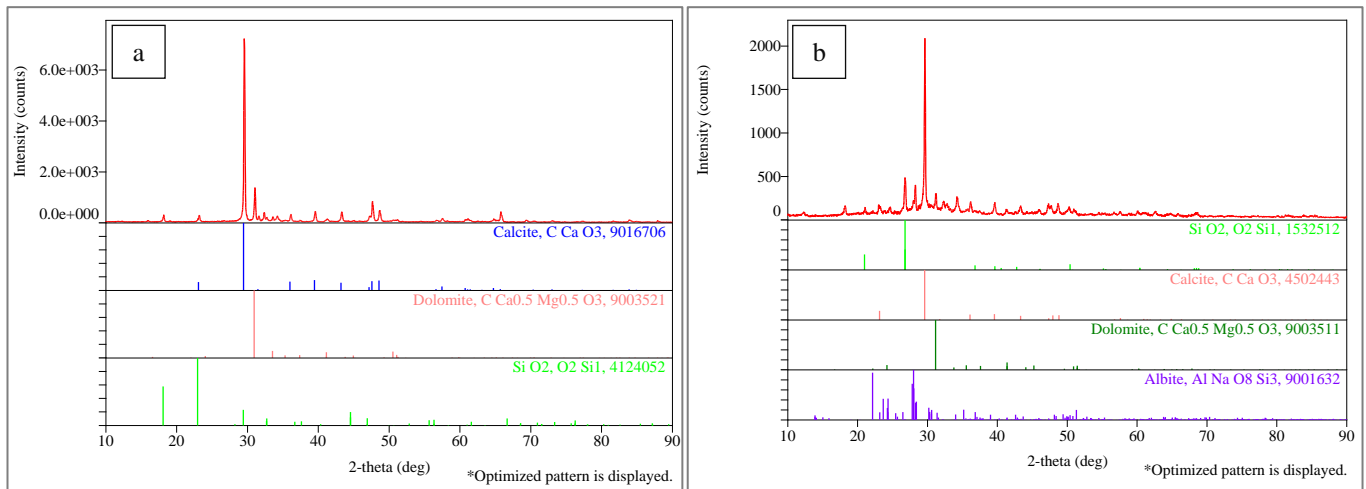
28-Gün küp numuneler ile gerçekleştirilen tek yüzeyden birim alanda emilen kılcal su miktarının zamana bağlı değişimi Şekil 9'da verilmiştir. HA oranının artması ile kılcal su emme miktarı artmaktadır. En fazla ve en az kılcal su emme miktarı sırasıyla MB-HA30 ve MB-HA0 setinde kaydedilmiştir.



Şekil 9. Kılcal Su Emme Deneyi Sonuçları

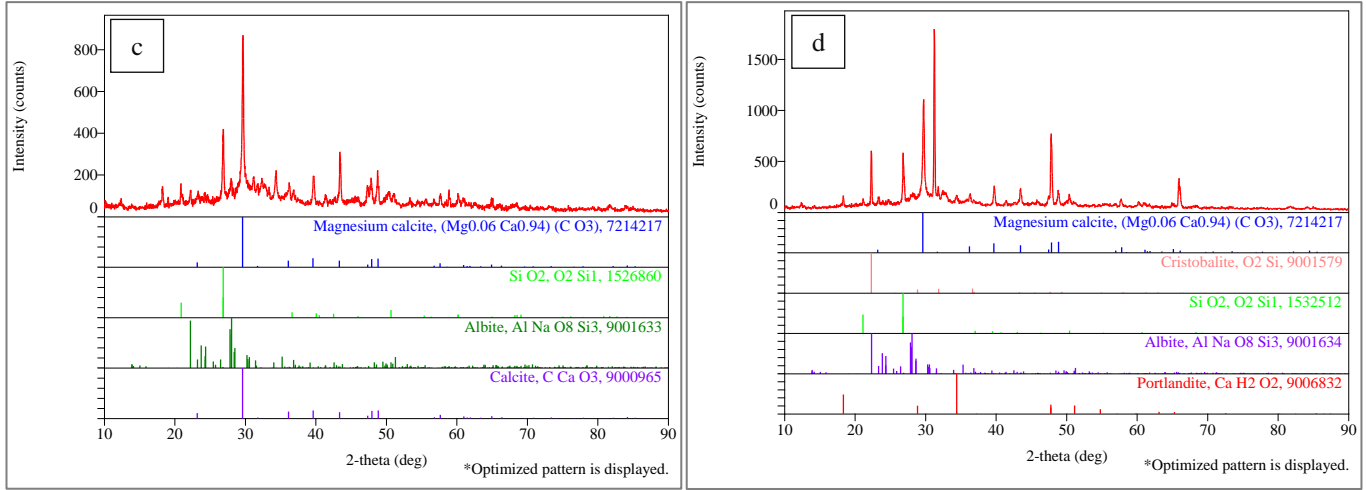
### Mikroyapı Bulguları

Mikroyapı analizi kapsamında yapılan XRD testinde, karışımlarda kullanılan HA ve %0, %15, %30 HA içeren numune gruplarından elde edilen örnekler kullanılmıştır. Örneklerden elde edilen grafikler Şekil 10'da verilmiştir. Karışımda kullanılan HA'nın; Calcite, Dolomit, SiO<sub>2</sub> pikleri yoğun olarak gözlenmektedir (Şekil 10.a). İkinci XRD analizi verisi MB-HA0 setine ait numunelerden elde edilmiştir. Bu set referans numune grubunu temsil etmektedir (Şekil 10.b). MB-HA0 setinde en yüksek pikler Calcite için gözlemlenmiştir. MB-HA15 ve MB-HA30 karışımlarında ise HA oranı sırası ile %15 ve %30 olmakla birlikte yine en yüksek pik değerleri Calcite değerleri olarak görülmektedir. Elde edilen XRD sonuçları referans karışımı hariç Albite, Magnezyum Calcite ve Dolomit içermektedir. Bunlar doğal kayalardan elde edilen mineral içerikleridir (Özay vd., 2020). Özellikle geri dönüşüme ait malzeme harçlardan temin edildiğinden içeriğinde doğal kayaların bulunduğu söylenebilir.



Şekil 10. XRD Sonuçları a. HA, b. MB-HA0, c. MB-HA15, d. MB-HA30





Şekil 10 (Devamı). XRD Sonuçları a. HA, b. MB-HA0, c. MB-HA15, d. MB-HA30

## SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Çalışma kapsamında; MB'lerin tasarımındaki PÇ miktarı HA ile %0-%30 aralığında değiştirilerek 7 farklı MB üretilmiştir. 4 farklı numune yaşında mekanik ve durabilitenin tespitine yönelik deneyler yapılmıştır. Ayrıca karışımlarda kullanılan HA ve %0, %15, %30 HA ikameli olarak üretilen MB setlerinden sağlanan örnekler ile mikro yapı analizleri uygulanmıştır. MB tasarımlarında HA miktarının artırılması ve PÇ miktarının azaltılmasına bağlı olarak mekanik dayanımda kayıplar tespit edilmiştir. Bu hali ile referans seti en yüksek eksenel basınç dayanımına sahiptir ve eksenel basınçtaki en fazla kayıp yaklaşık %23,5 ile MB-HA30 setine aittir. 7-Gün ve 28-Gün numunelerinde en yüksek eğilmede çekme dayanımı MB-HA5 setine aittir. Tüm HA ikame edilen setlerde erken yaş (7-Gün) eğilmede çekme dayanımı referans setine oranla artmaktadır. Ayrıca 28-Gün setlerinde %5 ve %10 HA ikameli gruplarda eğilmede çekme dayanımı referans setine oranla artış ile kaydedilmiştir. Erken yaş eğilmede çekme dayanımına pozitif katkı sunan HA, 90 gün sonunda sadece %5 HA ikameli setlerde benzer eğilimi sergilemektedir. HA'nın ikamesi yarmada çekme dayanımını üzerinde de benzer etkiye sahiptir. %5 ve %10 HA ikameli gruplarda yarmada çekme dayanımı artmakta, diğer ikame durumlarında ise referans setinin altında değerler almaktadır. HA ikame oranının artması ile kılcal su emme oranı artmaktadır. Birim hacim ağırlık, referans seti ve diğer tüm ikame durumları için yakın değer aralığında kalsa da porozite oranı HA ikamesi ile artış eğilimi göstermektedir. MB'lerde amaçlanan en önemli 4 olgudan biri "hedef işlenebilirlik özelliğine göre istenen reolojik davranışı sağlayabilmek"tir. Çimento ve mikro agregaların tasarım matrisinde bir arada bulunmasını sağlayan çeşitli kuvvetler vardır. Parçacıklar karşılıklı etkileşim halindedir ve suyun polarize edilebilirliği üzerinde koloidal kökenli kuvvetler söz konusudur (Houst vd., 2002). Çalışma kapsamında üretilen tüm MB'ler hedeflenen işlenebilirlik düzeyindedir. Ancak PÇ'ya ikame edilen HA'nın karışımın suyu ihtiyacını arttırdığı tespit edilmiştir. Ayrıca HA'nın MB tasarımdaki artan miktarı aktif bileşen miktarını azaltmaktadır. HA ikamesine bağlı değişen vizkoziteyi düzenlemek için artırılan akışkanlaştırıcı miktarı ve karışımda kullanılan SD, ilerleyen yaşlarda mekanik dayanım üzerinde negatif etki sunabilir. Bu sebeple HA'nın yalnızca öğütme işlemi ile çimentoya ikame edilmesi kullanılan HA'nın kimyasal ve fiziksel özellikleri ile yakından ilişkilidir. Buna alternatif olarak, HA'nın kalsinasyonu veya HA'nın dolgu malzemesine ikame edilmesi daha faydalı bir yaklaşım olabilir. Öğütme işlemi sonrası uygun dağılım ile bilhassa ince taneler bakımından zengin malzeme ihtiyacının HA ile sağlanması sürdürülebilir bir yaklaşım olacaktır.

## KAYNAKLAR

- Ajdukiewicz, A., & Kliszczewicz, A. (2002). Influence of recycled aggregates on mechanical properties of HS/HPC. *Cement and Concrete Composites*, 24(2), 269-279. [https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(01\)00012-9](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(01)00012-9)
- Akgül, M., Doğan, O., & Etili, S. (2020). Farklı Çimento ile Üretilen Granül Atık Kauçuk Agregaların İkame Edilmiş Kendiliğinden Yerleşen Beton Harcının Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi. *Uluslararası Mühendislik Araştırma ve Geliştirme Dergisi*, 12(2), 787-798. <https://doi.org/10.29137/umagd.734614>
- Akgül, M., & Etili, S. (2023). Effect of Partial Inclusion of Tiles and Brick Waste as Binders in SCM Elements on Fresh State and Early Age Mechanical Properties. *3rd International Conference on Innovative Academic Studies*, 699-706.

- Akgül, M., & Etili, S. (2024). Investigation of the variation of mechanical and durability properties of elements manufactured with rubber substituted SCMs with element height. *Construction and Building Materials*, 428, 136300. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.136300>
- ASTM C109/C109M. (2007). Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens). *ASTM International*, 32(10), 2141-2147. <https://doi.org/10.1520/C0109>
- ASTM C348-02. (2002). *ASTM C348-02 Standard test method for flexural strength of hydraulic cement mortars*. 7.
- ASTM C349-08. (2008). Standard test method for compressive strength of hydraulic-cement mortars (using portions of prisms broken in flexure). *ASTM International*, 1-4.
- ASTM C1585-13. (2013). *Standard Test Method for Measurement of Rate of Absorption of Water by Hydraulic Cement Concretes*, *ASTM International 41*. 1-6.
- Aydın İpekçi, C., Coşkun, N., & Tıkansak Karadayı, T. (2017). İnşaat Sektöründe Geri Kazanılmış Malzeme Kullanımının Sürdürülebilirlik Açısından Önemi. *TUBAV, II. Uluslararası Sürdürülebilir Yapılar Sempozyumu ISBS-2015*, 10(2), 43-50.
- Bayrak, İ. C., & Telatar, O. M. (2021). İnşaat Sektörü ve Ekonomik Büyüme İlişkisi: Türkiye Ekonomisi Üzerine Ampirik Bir Analiz. *Gümüşhane Üniversitesi Sosyal Bilimler Dergisi (GUSBEED)*, 12(3).
- Castellote, M., Alonso, C., Andrade, C., Turrillas, X., & Campo, J. (2004). Composition and microstructural changes of cement pastes upon heating, as studied by neutron diffraction. *Cement and Concrete Research*, 34(9), 1633-1644. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(03\)00229-1](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(03)00229-1)
- Cemalgil, S., & Etili, S. (2019). Polypropylene Fiber Katkılı Kendiliğinden Yerleşen Harçların Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi. *Munzur 1. Uluslararası Uygulamalı Bilimler Kongresi*, 101-110.
- Cemalgil, S., & Etili, S. (2020). Numune Boyutunun Kauçukla Modifiye Edilmiş Kendiliğinden Yerleşen Betonun Basınç Dayanımı Üzerindeki Etkileri. *International Journal of Pure and Applied Sciences*, 6(2), 118-129. <https://doi.org/10.29132/ijpas.789480>
- Cemalgil, S., Etili, S., & Onat, O. (2018). Curing effect on mortar properties produced with styrene-butadiene rubber. *Computers and Concrete*, 21(6), 705-715. <https://doi.org/10.12989/cac.2018.21.6.705>
- Cemalgil, S., Onat, O., Tanaydın, M. K., & Etili, S. (2021). Effect of waste textile dye adsorbed almond shell on self compacting mortar. *Construction and Building Materials*, 300, 123978. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123978>
- Etili, S. (2022a). Evaluation of curing time for micro concrete mixes containing silica fume, nano-silica and fly ash. *İstanbul Ticaret Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 21(42), 304-316. <https://doi.org/10.55071/ticaretfbid.1093891>
- Etili, S. (2022b). Investigation of the Effect of Glass Sand Used in SCC on the Behavior of the SCC Stress- Strain Relationship. *International Journal of Innovative Engineering Applications*, 6(2), 237-244. <https://doi.org/10.46460/ijiea.1108476>
- Etili, S. (2023a). Effect of glass sand used as aggregate on micro-concrete properties. *Journal of the Croatian Association of Civil Engineers*, 75(01), 39-51. <https://doi.org/10.14256/JCE.3538.2022>
- Etili, S. (2023b). Evaluation of the effect of silica fume on the fresh, mechanical and durability properties of self-compacting concrete produced by using waste rubber as fine aggregate. *Journal of Cleaner Production*, 384, 135590. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135590>
- Etili, S., Cemalgil, S., & Onat, O. (2018a). Mid-Temperature Thermal Effects on Properties of Mortar Produced with Waste Rubber as Fine Aggregate. *International Journal of Pure and Applied Sciences*, 4(1), 10-22. <https://doi.org/10.29132/ijpas.341413>
- Etili, S., Cemalgil, S., & Onat, O. (2018b). Properties of Self-Compacting Mortars with Different Contents of Synthetic Macro Fiber. *6th International Symposium on Innovative Technologies in Engineering and Science*, 593-602.
- Etili, S., Cemalgil, S., & Onat, O. (2021). Effect of pumice powder and artificial lightweight fine aggregate on self-compacting mortar. *Computers and Concrete*, 27(3), 241-252. <https://doi.org/10.12989/cac.2021.27.3.241>

- Etli, S., Yılmaz, T., & Hansu, O. (2024). Effect of White-Portland cement containing micro and nano silica on the mechanical and freeze-thaw properties of self compacting mortars. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 50, 101614. <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2023.101614>
- Felekoğlu, B. (2007). Effects of PSD and surface morphology of micro-aggregates on admixture requirement and mechanical performance of micro-concrete. *Cement and Concrete Composites*, 29(6), 481-489. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2006.12.008>
- Felekoğlu, B. (2009). Yüksek Performanslı Mikro Beton Tasarımı. *Dokuz Eylül Üniversitesi, Doktora Tezi, İzmir*.
- Felekoğlu, B., Tosun, K., & Baradan, B. (2009). Effects of fibre type and matrix structure on the mechanical performance of self-compacting micro-concrete composites. *Cement and Concrete Research*, 39(11), 1023-1032. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2009.07.007>
- Gao, T., Shen, L., Shen, M., Liu, L., Chen, F., & Gao, L. (2017). Evolution and projection of CO2 emissions for China's cement industry from 1980 to 2020. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 74, 522-537. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.02.006>
- Gesoglu, M., Güneyisi, E., Hansu, O., Etli, S., & Alhassan, M. (2017). Mechanical and fracture characteristics of self-compacting concretes containing different percentage of plastic waste powder. *Construction and Building Materials*, 140, 562-569. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.02.139>
- Günel, G., Alakara, E. H., Demir, İ., & Sevim, O. (2024). Geri Dönüştürülmüş Çimento Harç Tozunun Çimento Bağlayıcılı Kompozitler Üzerindeki Etkisi. *Politeknik Dergisi*, 27(2), 533-543. <https://doi.org/10.2339/politeknik.1135957>
- Hafez, H., Kurda, R., Kurda, R., Al-Hadad, B., Mustafa, R., & Ali, B. (2020). A Critical Review on the Influence of Fine Recycled Aggregates on Technical Performance, Environmental Impact and Cost of Concrete. *Applied Sciences*, 10(3), 1018. <https://doi.org/10.3390/app10031018>
- Hansen, T. C. (1986). Recycled aggregates and recycled aggregate concrete second state-of-the-art report developments 1945–1985. *Materials and Structures*, 19(3), 201-246. <https://doi.org/10.1007/BF02472036>
- Hansu, O., & Etli, S. (2022). Beton ile Üretilen Suda Yüzebilir Kano Tasarımı Üzerine Bir Araştırma. *European Journal of Science and Technology*, (35), 330-334. <https://doi.org/10.31590/ejosat.1052105>
- He, Z., Zhu, X., Wang, J., Mu, M., & Wang, Y. (2019). Comparison of CO2 emissions from OPC and recycled cement production. *Construction and Building Materials*, 211, 965-973. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.289>
- Houst, Y. F., Bowen, P., & Siebold, A. (2002). Some basic aspects of the interaction between cement and superplasticizers. *Innovations and Developments in Concrete Materials and Construction*, 12, 225-234.
- Joseph, H. S., Pachiappan, T., Avudaiappan, S., Maureira-Carsalade, N., Roco-Videla, Á., Guindos, P., & Parra, P. F. (2023). A Comprehensive Review on Recycling of Construction Demolition Waste in Concrete. *Sustainability*, 15(6), 4932. <https://doi.org/10.3390/su15064932>
- Kim, Y.-J. (2017). Quality properties of self-consolidating concrete mixed with waste concrete powder. *Construction and Building Materials*, 135, 177-185. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.174>
- Korkmaz, A. V. (2019). *Portland Çimento Üretiminde ve Kullanımında İş Güvenliği Risklerinin ve Sağlık Önlemlerinin Değerlendirilmesi*. MT Bilimsel(15), 21-30.
- Kwon, E., Ahn, J., Cho, B., & Park, D. (2015). A study on development of recycled cement made from waste cementitious powder. *Construction and Building Materials*, 83, 174-180. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.02.086>
- Lidmila, M., Tesárek, P., Plachy, T., Rácová, Z., Padevět, P., Nežerka, V., & Zobal, O. (2013). Utilization of Recycled Fine-Ground Concrete from Railway Sleepers for Production of Cement-Based Binder. *Applied Mechanics and Materials*, 486, 323-326. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.486.323>
- Moon, D.-J., Moon, H.-Y., & Kim, Y.-B. (2005). Fundamental Properties of Mortar Containing Waste Concrete Powder. *Geosystem Engineering*, 8(4), 95-100. <https://doi.org/10.1080/12269328.2005.10541243>

- Omrane, M., Kenai, S., Kadri, E.-H., & Ait-Mokhtar, A. (2017). Performance and durability of self compacting concrete using recycled concrete aggregates and natural pozzolan. *Journal of Cleaner Production*, 165, 415-430. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.07.139>
- Özay, P., Karagülle, M., Kardeş, S., & Karagülle, M. Z. (2020). Chemical and mineralogical characteristics of peloids in Turkey. *Environmental Monitoring and Assessment*, 192(12), 805. <https://doi.org/10.1007/s10661-020-08777-2>
- Shui, Z., Xuan, D., Chen, W., Yu, R., & Zhang, R. (2009). Cementitious characteristics of hydrated cement paste subjected to various dehydration temperatures. *Construction and Building Materials*, 23(1), 531-537. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.10.016>
- Thomas, C., Tamayo, P., Setién, J., Ferreño, D., Polanco, J. A., & Rico, J. (2021). Effect of high temperature and accelerated aging in high density micro-concrete. *Construction and Building Materials*, 272, 121920. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121920>
- TS EN 197-1. (2011). Çimento- Bölüm 1: Genel çimentolar- Bileşim, özellikler ve uygunluk kriterleri. *Türk Standartları Enstitüsü, Ankara*.
- TS EN 933-1. (2012). *Agregaların geometrik özellikleri için deneyler - Bölüm 1: Tane büyüklüğü dağılımının tayini - Eleme yöntemi*. Ankara.
- TS EN 934-2+A1. (2014). Kimyasal katkıları - Beton, harç ve şerbet için - Bölüm 2: Beton kimyasal katkıları - Tarifler, gerekler, uygunluk, işaretleme ve etiketleme. *Türk Standartları Enstitüsü, Ankara*.
- TS EN 1008. (2003). *Beton-Karma suyu-Numune alma, deneyler ve beton endüstrisindeki işlemlerden geri kazanılan su dahil, suyun, beton karma suyu olarak uygunluğunun tayini kuralları*.
- Tu, T. Y., Chen, Y. Y., & Hwang, C. L. (2006). Properties of HPC with recycled aggregates. *Cement and Concrete Research*, 36(5), 943-950. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2005.11.022>
- Victor, C. L., & Tetsushi, K. (1998). Engineered Cementitious Composites for Structural Applications. *Innovations Forum in ASCE J. Materials in Civil Engineering*, 10(2).
- Yu, R., & Shui, Z. (2014). Efficient reuse of the recycled construction waste cementitious materials. *Journal of Cleaner Production*, 78, 202-207. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.05.003>



# Kahramanmaraş Sütçü İmam University Journal of Engineering Sciences



Geliş Tarihi : 06.04.2024  
Kabul Tarihi : 13.06.2024

Received Date : 06.04.2024  
Accepted Date : 13.06.2024

## MOTION CAPTURE TEKNOLOJİLERİ ÜZERİNE BİBLİYOMETRİK BİR ARAŞTIRMA

### A BIBLIOMETRIC STUDY ON MOTION CAPTURE TECHNOLOGIES

Gülseren DİNVAR PEKŞEN<sup>1\*</sup> (ORCID: 0000-0002-5147-3014)  
Tolga BARMAN<sup>2</sup> (ORCID: 0000-0001-7938-5780)

<sup>1</sup> Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Radyo, Televizyon ve Sinema Bölümü, Çanakkale, Türkiye  
<sup>2</sup> Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Radyo, Televizyon ve Sinema Bölümü, Çanakkale, Türkiye

\*Sorumlu Yazar / Corresponding Author: Gülseren DİNVAR PEKŞEN, gulseren.dinvar@comu.edu.tr

#### ÖZET

İnsan ve obje hareketlerinin gerçekçi bir şekilde kamera ve sensörler yardımıyla 3D hareket verilerine dönüştürülmesini sağlayan sisteme "motion capture" teknolojisi denilmektedir. Bu teknoloji askeri alandan tıbbı, sinema ve dijital oyun gibi eğlence endüstrilerine kadar çok geniş bir alanda kullanılmaktadır. Bu çalışma, 2014-2024 yılları arasında Scopus veri tabanından elde edilen motion capture teknolojisi konu alan çalışmaların bibliyometrik ve betimsel analizini ortaya koymayı amaçlamaktadır. Bu kapsamda Scopus' ta 10 yıllık araştırma aralığında konu başlığı olarak "motion capture" teknolojisi araştıran 1938 makaleye ulaşılmıştır. 1938 makalenin bibliyometrik verileri analiz edilmiş ve tablolar aracılığıyla görselleştirilmiştir. Bulgulara göre; motion capture üzerine yazılan 1938 çalışmanın 90 farklı ülkenin araştırmacıları tarafından üretildiği saptanmıştır. Bu çalışmada sinema, reklam ve dijital oyun endüstrisi gibi eğlence sektörü tarafından kullanıldığı varsayılan motion capture teknolojisinin literatürdeki yaygın çalışma alanlarının çok daha geniş bir alana yayıldığı gözlemlenmiştir. Araştırma bulgularına göre; 1938 makalenin %27,6 gibi büyük bir oranı bilgisayar bilimleri, %23,1 mühendislik, % 8,3 tıp, %6,9 fen bilimleri, %4,5 oranında sosyal, sanat ve beşerî bilimler alanların da üretildiği tespit edilmiştir. Çalışma bulguları göstermektedir ki; motion capture teknolojileri yakın gelecekte gündelik hayatın hemen her alanında, insan hayatına adapte bir araç olacaktır. Bilimsel çalışmalar da bu doğrultuda gelişim göstermelidir.

**Anahtar Kelimeler:** Hareket yakalama, sensör, bibliyometrik, biyomekanik, sanal gerçeklik.

#### ABSTRACT

The system that allows human and object movements to be realistically converted into 3D motion data with the help of cameras and sensors is called motion capture technology. This technology is used in a wide range of fields, from the military to medicine to the entertainment industries such as cinema and digital game. This study aims to present a bibliometric and descriptive analysis of the studies on motion capture technology obtained from the Scopus database between 2014-2024. 1938 articles were found in Scopus, which investigated "motion capture" technology as a subject title in a 10-year research interval. The bibliometric data of 1938 articles were analyzed and visualized in tables. It was determined that 1938 studies on "motion capture" were produced by researchers from 90 different countries. In this research, it has been observed that motion capture technology, which is assumed to be used by the entertainment sector such as cinema, advertising and digital game industry, has a much wider range of fields of study in the literature. According to the findings of the research, it was determined that 27.6% of the 1938 articles were produced in computer sciences, 23.1% in engineering, 8.3% in medicine, 6.9% in natural sciences, and 4.5% in social sciences, arts and humanities. The study shows that motion capture technologies will be a tool adapted to human life in almost every field of daily life in the near future. Scientific studies should also develop in this direction.

**Keywords:** Motion capture, sensor, bibliometric, biomechanics, virtual reality.

To Cite: DİNVAR PEKŞEN, G., & BARMAN, T., (2024). MOTION CAPTURE TEKNOLOJİLERİ ÜZERİNE BİBLİYOMETRİK BİR ARAŞTIRMA. *Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 27(3), 1102-1116.

## GİRİŞ

İnsan ve obje hareketlerinin gerçekçi bir şekilde kamera ve sensörler yardımıyla 3D animasyona dönüştürülmesini sağlayan teknoloji; Motion Capture/ MoCap/ Hareket Yakalama olarak ifade edilmektedir. Bu teknoloji mühendislik alanlarından, askeri alana, sağlık sektörüne, sinema ve dijital oyun gibi eğlence endüstrilerine kadar çok geniş bir alanda kullanılmaktadır. Kökeni 19. yüzyılın sonlarına doğru insan ve hayvan hareketlerini incelemek için kronofotografik çalışmalar yapan iki öncü fotoğrafçı Eadweard Muybridge ve Etienne-Jules Marey'e kadar dayanmakta olan "motion capture" teknolojisi, günümüzde çok çeşitli alanlarda kullanılmaya ve gelişmeye devam etmektedir (Delbridge, 2015).

Motion Capture sistemleri teknolojik alandaki gelişmelere paralel olarak; özellikle mühendislik alanındaki yeni teknik çalışmalarla günden güne çeşitlenmektedir. Bu çeşitlenme hem sistemlerin farklılaşmasına hem de farklı alanlarda kullanım alanlarının çoğalmasına ve çeşitlenmesine neden olmaktadır. Günümüzde motion capture; mühendislik, sağlık, sinema endüstrisi, oyun, spor, biyokimya, tasarım ve askeri alanlarda dâhil olmak üzere çeşitli alanlarda pratik karşılığı bulunan, gelişmeye ve kullanım alanlarını çeşitlendirmeye devam eden bir teknolojidir.

Bu çalışmanın ana amacı; 2014-2024 yılları arasında Scopus veri tabanında listelenen "motion capture" başlığına ilişkin bilimsel çalışmaları nicelik ve nitelik bakımından incelemek ve alana ilişkin bibliyometrik gözlem veri setlerini görsel ve betimsel olarak paylaşmaktır. Çalışmanın ana problemi; motion capture teknolojisinin bilimsel alanda hangi trendleri takip etmekte olduğu, ne yönde ilerleme kaydettiği, bilimsel alanda nasıl, hangi dikkatlerle incelenmekte olduğudur. Çalışmada bibliyometrik yöntem başvurulacaktır. Bibliyometrik yöntem, kayıtlı bilginin özelliklerinin ve eğilimlerinin incelenmesinde, bilimsel çalışmaların sayısal verilerine ve grafiksel yorumuna dayanan nicel bir araştırma yöntemidir (Patra, Bhattacharya & Verma, 2006). Son yıllarda akademik çalışmalarda literatürü ve alandaki gelişmeleri gözlemlemek adına sıkça başvuru alan bibliyometri, araştırmacılara konuya dair güçlü gözlem yapabilmeye imkân tanıyan etkili bir araştırma tekniğidir. Bu çalışma özelinde de disiplinler arası çalışmaların daha yoğun olarak indexlendiği Scopus veri tabanı, veri toplama alanı olarak belirlenmiş ve yayınların yoğunlaştığı son 10 yıllık dönem araştırma aralığına odaklanılmıştır. Çalışma; 1 Ocak 2014 ve 6 Şubat 2024 yılları arasında Scopus veri tabanında listelenen "motion capture" anahtar kelimesi doğrultusunda bulguların 1938 bilimsel araştırma makalesini kapsamaktadır. Scopus veri tabanından elde edilen 1938 makalenin bibliyometrik veri setleri, VOSviewer 1.6.20 yazılımı kullanılarak incelenmiş ve bibliyometrik tablolar aracılığıyla görselleştirilmiştir.

Çalışmada, disiplinler arası bir çalışma alanı olan motion capture teknolojisine ilişkin; hangi disiplinin ne türde çalışmalar üreterek öne çıkmakta olduğu, hangi disiplinin/disiplinlerin bilimsel olarak geride kaldığına ilişkin veri setlerine odaklanılmaktadır. MoCap gibi bilgisayar ve mühendislik teknolojilerine dayanan sistemler konusunda öncü olan ülkelerin, teknolojik alandaki başarılarını bilimsel alana ne ölçüde aktarabildiklerine dair bilimsel yayıncılık faaliyetleri incelenmektedir. Bu bağlamda çalışmada; ülkelerin, yazarların, organizasyonların akademik performanslarına, üretim ilişkilerine, ortaklıklarına, istikrarlarına ilişkin; çeşitli veriler, grafikler ve görsel haritalar halinde bilgiler paylaşılmaktadır. Araştırma bulguları; teknik ve teknolojik alanda motion capture teknolojisine ilişkin akademik literatürün nasıl ve ne yönde çerçevelenmekte olduğunu ortaya koymaktadır. Ayrıca çalışma bulguları ve sonuçları, farklı disiplinlere ilişkin literatürdeki boşlukları açığa çıkarmakta ve yeni araştırmaların geliştirilmesine de imkân tanımaktadır. Çalışma verilerinin bibliyometrik yöntem aracılığıyla değerlendirilmesi ve yıllara, yazar(lara), ülkelere, atıf oranlarına, en sık kullanılan anahtar kelimelere göre bulut kümelerine ayrılarak görselleştirilmesi, alana ilişkin derli toplu bir gözlem alanı oluşturacaktır. Dolayısıyla çıktılar bakımından araştırma, diğer araştırmacılar için literatürdeki genel yönelimlere dair nicel bir kaynak verisi anlamına da gelmektedir. Bu yönüyle de ulusal uluslararası bilimsel yayıncılık faaliyetlerine ilişkin önemli bir katkı sağlama potansiyeline sahiptir. Literatürdeki genel yönelimleri, veri setlerinin arasındaki ilişkileri, yeni araştırma alanlarını krono-mantıksal olarak da gruplandıran bu sistematik yöntem sayesinde, alandaki gelişmeler izlenebilir ve ihmal edilen, zayıf bırakılan boşluklar deşifre edilebilir. Bu bakımdan çalışmada farklı yazarlar, ülkeler, dergiler, organizasyonlar tarafından motion capture teknolojisine ilişkin hangi dikkatler üzerinden, ne yönde tartışılmakta olduğunun tespit edilmesi, alanlardaki boşlukların giderilmesi bakımından son derece önemlidir.

## KAPSAM: MOTION CAPTURE TEKNOLOJİSİ

Günümüzdeki tanımı ile motion capture (hareket yakalama/ MoCap) teknolojisi, canlı ya da cansız olması fark etmeksizin bir özne ya da nesnenin hareketinin 3 boyutlu veriler halinde dijital bir ortama kaydedilmesi işlemidir (Kitagawa & Windsor, 2008; Menache, 2011; Delbridge, 2015; Rossney, 2022). Yakalanan bu hareketler ile gerçeğe

yakın fiziksel davranışlar sergileyen animasyon karakterleri oluşturulması amaçlanmaktadır. Hareket, dijital olarak 360 derece olarak kaydedilerek ekran tabanlı 3D uzayda bir animasyon modeline aktarılmaktadır (Delbridge, 2015). Motion capture teknolojileri sensör türüne (optik ve optik olmayan), sensör tipine (aktif ve pasif), kullanılan aktarma mekanizmalarına (manyetik, mekanik ve ataletsel), bağlantı durumlarına (çevrimiçi ve çevrimdışı) göre farklı şekillerde sınıflandırılabilirler. Bu sınıflandırmalar genellikle birbirlerini de kapsayan kümelerden oluşmaktadır. İşaretleyici tabanlı hareket yakalamanın bazı popüler yöntemleri; akustik sistem (acoustical system), mekanik sistem (mechanical system), manyetik sistem (magnetic system), optik sistem (optical system) olarak sıralanabilir (Erdem, 2021). Genel literatür tanımlamalara bakıldığında ise bu teknolojilerin çoğu zaman optik (optical) ve optik olmayan (non-optical) sistemler olarak iki ana başlık altında incelenmekte olduğu gözlemlenmektedir. Diğer teknolojik farklılıkların da bu başlıklar altında farklı alt kategoriler ile birbirlerinden ayrıldığı görülmektedir ancak bu konuda yapılan araştırmalarda tam anlamıyla bir fikir birliği oluşmuş değildir. Örneğin; Dower & Langdale (2022) motion capture teknolojilerini; optik (optical), ataletsel (inertial) ve işaretleyicisiz (markerless) motion capture sistemleri olmak üzere üç ana türe ayırırken, Galantucci ve diğerleri (2010) optik ve optik olmayan motion capture sistemleri olarak iki ayırmış; işaretleyicisiz (markerless) sistemleri optik (optical), ataletsel (inertial) sistemleri ise optik olmayan (non-optical) sistemlerin birer alt kategorisi olarak değerlendirmiştir. Herda vd. (2000) ise, bağlantı durumlarına göre motion capture sistemlerini, çevrimiçi (online) ve çevrimdışı (offline) olmak üzere ikiye ayırmıştır. Çevrimiçi motion capture sistemleri, çoğunlukla manyetik sensörler kullanan, hareketi yakalanan özne veya nesneden oluşturulan bir sanal iskeleti gerçek zamanlı olarak sunabilen sistemlerdir. Buna rağmen veri çıktılarının kalitesi ve sensörlerin daha hantal olması sebebiyle bu sistemler ile yüksek kalitede hareketlerin yakalanması zorlaşmaktadır. Çevrimdışı motion capture sistemleri ise genellikle kızılötesi aracılığıyla birden fazla kamera görüntüsünden optik hareket yakalamaya dayanmaktadır. Hareketin yakalanması ve yakalanan hareketin görselleştirilmesi için iki aşamalı bir süreç gerekmektedir. Çevrimiçi sistemlere göre daha uzun bir sürece sahip olsa da daha karmaşık ve gerçekçi hareketlerin kaydedilmesi için bu sistemler tercih edilmektedir.

Optik motion capture sistemleri, MoCap aktörünün iskelet ve eklem verilerini, kızılötesi senkronize kameralar aracılığı ile algılayıp, 3 boyutlu uzayda, kartezyen koordinat dizileri biçiminde dijital verilere dönüştüren sistemlerdir (Guerra Filho, 2005; Dower & Langdale, 2022). Sistem, işaretleyicili (marker-based) ve işaretleyicisiz (markerless) optik sistemler olarak ikiye ayrılmaktadır. İşaretleyici optik kullanan sistemler, aktörün vücudunun eklem konumlarına veya özel noktalarına kameraların algılayacağı işaretleyicilerin yerleştirilmesi ve bu işaretleyicilerden alınan verilerin bilgisayara aktarılması şeklinde bir yapı ile çalışmaktadır (Guerra Filho, 2005). Bu işaretleyiciler pasif veya aktif özellikte olabilmektedirler. Pasif işaretleyiciler yansıtıcı malzemelerden yapılan ve ışığın yansımaya bağlı olarak kameralar tarafından algılanan bir yapıdadır (Kitagawa & Windsor, 2008). Aktif işaretleyiciler ise genellikle sensörlerin duyarlı olduğu kızılötesi spektrumda ışık kaynağı içeren ve donanım tarafından gerçek zamanlı olarak algılanan bir yapıdadır (Van der Kruk & Reijne, 2018). İşaretsiz optik motion capture sistemleri ise aktörün hareketlerinin yakalanması için özel bir kostüm giymelerini gerektirmeyen, bilgisayarla görü algoritmalarını kullanan bir teknoloji türüdür (Nogueira, 2011). Bu algoritmaların oluşturulması sürecinden aktörün silueti ve vücudunun ana hatları bir işaretleyiciye gerek duyulmadan veriye dönüştürülmektedir (Guerra Filho, 2005). Bu sistemler, işaretleyici ihtiyacını ortadan kaldırması, aktörün hazırlık sürecini azaltması, iskelet sistemi harici hareket verilerini algılama konusundaki başarısı açısından önemli avantajları beraberinde getirmektedir (Corazza vd., 2006). Optik sistemler, hareket verilerini yüksek bir doğruluk derecesi ile yakaladığı için filmler, video oyunları, sanal gerçeklik uygulamaları gibi yüksek ayrıntı ve gerçekçilik beklenen alanlarda tercih edilmektedir. Sistemin dezavantajları arasında yüksek hesaplama maliyetine gereksinim duyabilmesi, işaretleyicilerin birbirlerini perdeleyerek verilerin sağlıklı bir şekilde kaydedilememesi ihtimali ve işaretleyicilerin kaybedilebilmesi sayılabilir (Guerra Filho, 2005).

Motion capture teknolojisinin bir diğer ana türü olan optik olmayan (non-optical) motion capture sistemleri ise manyetik, mekanik ve ataletsel sistemler olarak alt kategorilere ayrılmaktadır. Manyetik motion capture sistemleri, optik sistemler yerine elektromanyetik sensörlerin aktörün vücuduna yerleştirilmesi ile hareket verisini alan sistemlerdir (O'Brien vd., 2000). Bu sistem çok fazla kablo barındırdığı için hareketin kısıtlanabilmesi dezavantajına sahiptir. Buna karşın 3 boyutlu gerçek zamanlı veriyi düşük işlem maliyeti ile işleyebilmesi nedeniyle tercih edilmektedir (Guerra Filho, 2005). Mekanik motion capture sistemleri ise transdüser ve potansiyometrelerden oluşan özel eklemli bir giysi aracılığı ile çalışan sistemlerdir. Buna karşın giysilerin kısıtlayıcı yapısı nedeniyle yüksek serbestlik gerektiren hareketlerin yapılması mümkün olmamaktadır. Ayrıca kırılabilir olması, sensörlerin sabit konfigürasyona sahip olması ve düşük örnekleme oranı mekanik sistemlerin dezavantajlarındandır (Kitagawa & Windsor, 2008). Ataletsel (inertial) motion capture sistemleri ise, bir özne ya da nesnenin hareket hızını, ivmesini veya yönünü ölçmek için jiroskop, manyetometre ve ivmeölçer ölçüm birimlerinin kullanılmasını içeren hareket

sistemleridir. Sensörler, özne ya da nesnenin iskeletindeki kilit noktalara yerleştirilir ve ataletsel hareket verileri kablosuz olarak bir bilgisayara aktarılır. Bu sistem optik sistemlerdeki belirli bir alanda bulunma kısıtlılığını ortadan kaldırır ancak manyetik alanlar nedeniyle oluşabilecek potansiyel parazitlere maruz kalınabilir (Dower & Langdale, 2022). Giyilen özel eklemli giysi sayesinde aktörün hareketlerinin açısız değerleri doğrudan bilgisayar verilerine dönüştürülmektedir. Gerçek zamanlı veri işlenebilmesi, düşük işlem maliyeti, manyetik veya elektrik parazitlerine maruz kalmaması ve taşınabilir olması sebebiyle tercih edilebilmektedirler. Ancak birebir uyumu yakalamak ve bilgisayara aktarmak konusunda mevcut bazı handikaplı durumlar, sorunlar geride bırakılmış değildir. Öte yandan Vicon, Optitrack, Qualisys gibi optik tabanlı, iPi Soft, Perception Neuron, Xsens gibi optik tabanlı olmayan hareket yakalama yazılım şirketleri; pek çok alanda sektörel beklentilere cevap vermeyi başaran firmalar arasındadır. Son yıllarda yapay zekanın gelişmesi ile hareket yakalama yazılım şirketleri de yapay zekâ destekli teknolojileri kendi üretimlerine entegre etmeye başlamışlardır. Deepmotion, Wonder Dynamics, Rokoko Vision, Move AI, Plask Motion gibi yapay zekâ destekli hareket yakalama sistemleri kullanıcı dostu alternatif çözümler sunmaya ve teknolojiyi geliştirmeye devam etmektedir.

### ***Motion Capture Teknolojisinin Gelişimi ve Kullanım Alanları***

Hareket yakalamanın tarihi, 19. yüzyılın sonlarına doğru insan ve hayvan hareketlerini incelemek için kronofotografik çalışmalar yapan iki öncü fotoğrafçı Eadweard Muybridge ve Etienne-Jules Marey'e kadar dayanmaktadır (Delbridge, 2015). Muybridge'in 1878-1879 yılları arasında gerçekleştirmiş olduğu "The Attitudes of Animals in Motion" [Hareket Halindeki Hayvanların Davranışları] serisi ve Marey'in 1882 yılında Fusil Photographique adını verdiği, saniyenin 720'de 1'i oranında bir hızla 12'şer adet fotoğraf çekebilen tüfek benzeri fotoğraf makinesi ile kuşlar üzerine yaptığı "Flight of The Birds According To The Instantaneous Photographs of Mr. Marey" [Bay Marey'in Anlık Fotoğraflarına Göre Kuşların Uçuşu] çalışması fotoğrafçılık bağlamında ilk hareket yakalama çalışmalarına örnek olarak verilebilir. Marey, 1878 yılından itibaren gerçekleştirdiği çalışmalar ile geliştirdiği "grafik yöntem" ile bedensel hareketin sürekli grafikler, çizelgeler ve geometrik diyagramlar olarak kaydedilmesini sağlamış ve bu da filmler, video oyunları, biyomekanik, klinik tıp gibi alanlarda kullanılan "Motion Capture ya da MoCap" olarak adlandırılan hareket yakalama teknolojisinin temelini oluşturmuştur (Paterson, 2021). Bu temel, 1915 yılında karikatürist Max Fleischer tarafından icat edilen, hareketlerin animasyon karakterlere gerçekçi bir şekilde aktarılmasını sağlayan rotoskop yöntemi ile pekiştirilmiştir (Menache, 2011).

1962 yılına gelindiğinde Lee Harrison III, Animac isimli analog grafik animasyon üretebilen bir bilgisayar icat etmiştir. Harrison'un, 1960'ların sonlarına doğru, bu bilgisayar üzerinden Computer Image Corporation ile geliştirdiği Scanimate sistemi, bir nesnenin ya da bir insanın hareketlerinin gerçek zamanlı olarak kaydedilmesi ve animasyonlar içinde kullanılmasına olanak sağlamıştır. Motion capture teknolojisinin basit bir öncülü olarak adlandırılacak bu teknoloji, Harrison'a 1972 yılında Emmy ödülü kazandırmıştır (Sturman, 1998; Auslander, 2017).

1970'lerde motion capture teknolojisi askeri alanda da kullanılmaya başlanmıştır. ABD ordusu özel bir fon ayırarak, pilotların baş hareketlerini takip etmek amacıyla manyetik izleme cihazları geliştirmiştir. Bu izleme cihazları ilerleyen yıllarda teknolojinin belirleyici altyapılarından bir tanesine dönüşmüştür. 1990'larda animasyonlar için kullanılan motion capture teknolojisinin temeli bu çalışma üzerinden şekillenmiştir (Delaney, 1998). Bununla birlikte 1970'li yılların sonundan başlayarak, özellikle 1980'lerin ortasına değin zirve noktasına ulaşan analog grafik animasyondan dijital grafik animasyona geçiş süreci, motion capture teknolojisinin de günümüzdeki tanımı ile adlandırılmasına neden olmuştur.

1970'lerin ortasında Myron Krueger tarafından Connecticut Üniversitesi'nde geliştirilen "Videoplace" ile artırılmış gerçeklik çalışması yapılmıştır. Krueger, bir katılımcının canlı video görüntüsünü bilgisayar grafikleriyle birleştirmiştir. Bir kamera yardımı ile bilgisayar grafiklerini, katılımcının hareketlerine gerçek zamanlı olarak tepki verebilecek şekilde düzenleyen Krueger, bilgisayar grafikleriyle gerçek insan bedenini etkileşime sokan ilk çalışmalardan bir tanesine imza atmıştır (Krueger ve diğerleri, 1985). 1983 yılında, MIT Görsel Çalışmalar alanında yüksek lisans yapan Delle Rae Maxwell, aynı üniversitenin Bilgisayar Bilimleri ve Elektrik Mühendisliği öğrencisi Carol Ginsberg ile tasarladıkları "Graphical Marionette" ile hareket yakalama teknolojileri adına önemli bir çalışma ortaya koymuşlardır. Maxwell, bu çalışmayı "Graphical Marionette: A Modern-Day Pinocchio" [Grafik Kukla: Günümüz Pinokyosu] başlığıyla yüksek lisans tezi olarak sunmuştur. Maxwell tezinde (1983), Graphical Marionette sistemini; "tam vücut takibi yoluyla insan hareketinin ince dinamiklerini yakalamaya odaklanan, bilgisayara girilen çeşitli girdilerle canlandırılan "grafik kuklalar" tasarlamaya yönelik bir prototip sistem" olarak tanımlamıştır. Graphical Marionette Sistemi; vücudu bir veri yapısı olarak soyutlamakta ve bir şablon dosyasına dönüştürüp, hareket



verilerini animasyon için sistematik bir forma karşılık gelecek şekilde bedenle eşleştirmektedir. Graphical Marionette Sistemi modern anlamda motion capture teknolojisi için çok önemli bir adım olsa da özellikle dönemin bilgisayarlarının yeterince hızlı olmaması motion capture teknolojisinin gelişmesinde önemli bir engel oluşturmuştur. Bu ve benzeri tarzda ilerleyen sistemler 1988 yılında çıkan Silicon Graphics 4D bilgisayarlarına kadar çok tekil örnekler verebilmiş; teknik altyapının yeterliliği nedeniyle hızlı bir ilerleme ve gelişim gösterememiştir (Sturman,1998).

1985 Super Bowl XIX finalinde yer alan ve Robert Abel and Associates tarafından yapılan bir konserve yiyecek reklamı olan “Brilliance” motion capture teknolojisinin ticari anlamda başarılı bir şekilde kullanıldığı ilk örnek olarak karşımıza çıkmaktadır. Gerçek insan gibi hareket eden bir kadın robotun 3 boyutlu animasyon olarak gösterildiği bu reklam filmi, ticari motion capture endüstrisinin başlangıç noktası olmuştur (Delbridge, 2015; Menache, 2011). Bu noktadan itibaren hem oyun hem de film endüstrisi, bu teknolojinin kendi alanlarında etkili bir biçimde kullanılabileceğini öngörmüştür.1989 yılında Apple II platformu için geliştirdiği “Prince of Persia” [Pers Prensi] oyunu ile Jordan Mechner, VHS kasetlere çektiği kardeşi David Mechner’in hareketlerini rotoskop yöntemi ile oyunundaki karaktere aktarması ile hareket yakalamanın oyunlarda kullanımının öncül örneklerinden bir tanesini verebilmiştir (Mechner, 2023). 1994 yılına gelindiğinde ise Sega tarafından geliştirilen “Virtua Fighter 2” [Sanal Dövüşçü 2] ve Time Warner Interactive tarafından geliştirilen “Rise of the Robots” [Robotların Yükselişi] dövüş oyunları optik tabanlı motion capture teknolojisini kullanarak karakter hareketlerini oluşturan ilk örneklerden olmuşlardır (Kitagawa & Windsor, 2008; Paterson, 2021; Baker, 2020).

Film endüstrisi de oyun endüstrisi ile paralel bir gelişim sürecini takip etmiştir. 1990 yapımı “Total Recall” [Gerçeğe Çağrı] filminde bazı görsel animasyonlar yarı otomatik rotoskop yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir (Bregler, 2007). Bu gelişme, endüstride gelişmekte olan bilgisayar destekli görüntü üretimi CGI (computer generated imagery) teknolojisi alanını da tetiklemiş, motion capture teknolojisinin birlikte gelişmesine olanak sağlamıştır.1990’ların sonu ile 2000’lerin başı, motion capture teknolojisinin film endüstrisi alanında tam anlamıyla benimsendiği yıllardır. Milenyumun hemen öncesinde 1999 yapımı “Star Wars: Episode I Phantom Menace” [Yıldız Savaşları: Bölüm I Gizli Tehlike] filminde yer alan Jar Jar Binks karakteri, optik tabanlı motion capture teknolojisi kullanılarak yapılan, ana cast olarak filmde yer alan ilk tam eklemlili insansı aktördür. Hemen akabinde 2001-2003 yılları arasında gösterime girmiş olan “The Lord of the Rings” [Yüzüklerin Efendisi] üçlemesinde yer alan Gollum karakteri de yine benzer şekilde MoCap teknolojisi ile oluşturulmuştur. Tam eklemlili insansı aktöre Gollum karakteri de önemli bir örnek niteliğindedir. (Parent vd., 2010). Bunlara ek olarak, 2000 yapımı “Sinbad: Beyond the Veils of Mist” [Sinbad: Sis Perdesinin Ötesinde] animasyon filmi motion capture teknolojisinin bir filmin yapım sürecinin ana teknolojisi olarak kullanılması açısından önemli bir noktada yer almaktadır (Baker, 2020). Bu film ile motion capture teknolojisi özellikle animasyon filmlerde ana teknolojilerden bir tanesi olarak kullanılmaya başlanmıştır. Yönetmen Robert Zemeckis’in üstlenmekte olduğu 2004 yapımı “The Polar Express” [Kutup Ekspres] animasyon filmi örnek olarak verilebilir (Menache, 2011). Bu örnekler film endüstrisinde MoCap aktörlüğü denilen yeni bir iş kolunun ortaya çıkmasına da sebep olmuştur. Hareketi yakalama sisteminde gerçek insan hareketi akıcı ve doğal olduğu için, oyuncular bilinçli olarak geleneksel animasyon gibi performans göstermezlerse donuk bir oyunculuk söz konusu olmaktadır (Kitagawa & Windsor, 2008). Dolayısıyla sinema sanatının gelişmesine paralel olarak gelişim gösteren; kamera önü oyunculuk, sinematik oyunculuk gibi MoCap oyunculuğu da alanda tartışılmaya ve gelişmeye başladığı bu çalışma verilerinde de gözlemlenmiştir.

Motion capture (MoCap) sistemleri teknolojik alandaki gelişmelere paralel olarak; özellikle mühendislik alanındaki yeni teknik çalışmalarla günden güne çeşitlenmektedir. Bu çeşitlenme hem sistemlerin farklılaşmasına hem de farklı alanlarda kullanım alanlarının çoğalmasına ve çeşitlenmesine neden olmaktadır. Günümüzde motion capture; mühendislik, sağlık, sinema endüstrisi, oyun, spor, biyokimya, tasarım ve askeri alanlar dâhil olmak üzere çeşitli alanlarda pratik karşılığı bulunan, gelişmeye ve kullanım alanlarını çeşitlendirmeye devam eden bir teknolojidir.

## MATERYAL VE YÖNTEM

### *Araştırmanın Amacı*

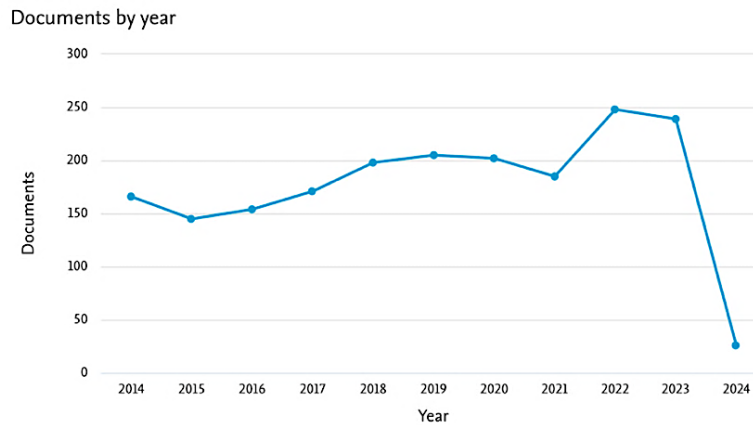
Bibliyometrik yöntem; kayıtlı bilginin özelliklerinin ve eğilimlerinin incelenmesinde, bilimsel çalışmaların sayısal verilerine ve grafiksel yorumuna dayanan nicel bir araştırma yöntemidir (Patra, Bhattacharya & Verma, 2006). Bu analiz yöntemi, araştırma alanına ilişkili bağlantı kümelerini görsel haritalar sunarak değerlendirme imkânı sağlamaktadır. Bibliyometrik yöntem, araştırma konusunu atıf oranlarına, etkileşim/bağlantı gücüne göre; ülke, yazar, kurum/organizasyon, eş yazarlık, sponsorluk ve sık tercih edilen kelime verileri üzerinden çerçeveleştirir ve

derinlemesine bir gözlem alanı sunar. Bilimsel iletişimin yapısını ve sürecini incelemek için veri setlerini paylaşır (Borgman & Furner, 2002). Elde edilen istatistiksel bilgi setlerinin sistemli görsel haritaları; araştırılan konunun öne çıkan noktalarına ve genel eğilimlerine dair kapsamlı bir değerlendirme alanını inşa eder. Araştırılan alana ilişkin ana kurucu faktörlerin, kurum ve kişilerin belirlenmesi, yapıların sınanması ve alanın gelişip genişlemesinde bibliyometrik yöntem başvurulur (Yüncü & Karagöz, 2013). Bibliyometrik yöntem, araştırma konusuna dair öncü yazar, kaynak, ülke ve organizasyon temelli çalışmaların ortaklıklarını haritalandırdığı için, çalışmaların iş birlikleri ve genel seyrine dair güçlü bir ilişkisellik ağı yöntemi olarak da öne çıkmaktadır. Dolayısıyla bibliyometri; son yıllarda akademik çalışmalarda literatürü çerçevelemek için sıklıkla kullanılan, araştırmacılara konuya dair güçlü gözlem yapabilme imkânı tanıyan etkili bir tekniktir. Bu çalışma 2014-2024 yılları arasında Scopus veri tabanından elde edilen “Motion Capture” teknolojisini konu alan araştırmaların bibliyometrik ve betimsel analizini ortaya koymayı amaçlamaktadır. Bu eksende kavramsal çerçevesi ve literatürü disiplinler arası pek çok alanda karşılık bulan motion capture teknolojisinin bilimsel literatürüne ilişkin veri setleri, bibliyometrik analiz yöntemiyle çözümlenecektir. Bibliyometrik analiz yöntemiyle, “Motion Capture” kavramına ilişkin akademik çalışmaların hangi alanlarda, ne yoğunlukta, nasıl şekillenmekte olduğuna ilişkin bilimsel araştırma verisi ortaya konulacaktır.

### Veri Analizi ve Veriler Hakkında Genel Bilgiler

6 Şubat 2024 tarihinde, Scopus veri tabanının üzerinden, “Motion Capture” anahtar kelimesi doğrultusunda yapılan taramada 1938 çalışmaya ulaşılmıştır. Veri hâkimiyetini güçlendirmek ve çalışmaya belli sınırlılıklar getirebilmek adına: çalışma başlığında motion capture kelimesinin geçmesi bir sınırlılık ölçütü olarak belirlenmiştir. Bibliyometrik analiz verisi CSV dosya uzantısı olarak dışa aktarılmıştır. Yayınların bibliyometrik veri setleri; yazar/yazarlar, çalışma başlıkları, atıf sayıları, bağlantı linkleri, yazarların bağlı oldukları kurumlar, organizasyonlar, iş birlikleri ülkelerden oluşmaktadır. Bibliyometrik yöntem, bilimsel çalışmaların sayısal verilerine ve grafiksel yorumuna dayanan nicel bir araştırma yöntemidir. Bu çalışmada da yayınların yoğunlaşmakta olduğu gözlemlenen, son 10 yıllık araştırma aralığında konu başlığı/ makale başlığında doğrudan “Motion Capture” teknolojisi yer alan 1938 çalışmaya ulaşılmıştır. Scopus veri tabanından alınan 1938 çalışmanın bibliyometrik verileri VOSviewer 1.6.20 yazılımı kullanılarak analiz edilmiş ve tablolar yardımıyla görselleştirilmiştir. Veri tabanı olarak Scopus’un tercih edilme nedeni arşiv konusunda nicel olarak daha yüksek veriyi indekslemesi nedeniyledir. VOSviewer dışında araştırmacılara farklı bibliyometrik analizler yapma imkânı sağlayan program araçları da mevcuttur. Bu çalışmada ara yüz kullanımı bakımından pratiklik sağlaması ve işlevselliği nedeniyle VOSviewer 1.6.20 yazılımına başvurulmuştur. VOSviewer bibliyometrik ağlar oluşturmak ve görselleştirmek için kullanılan bir yazılımdır.

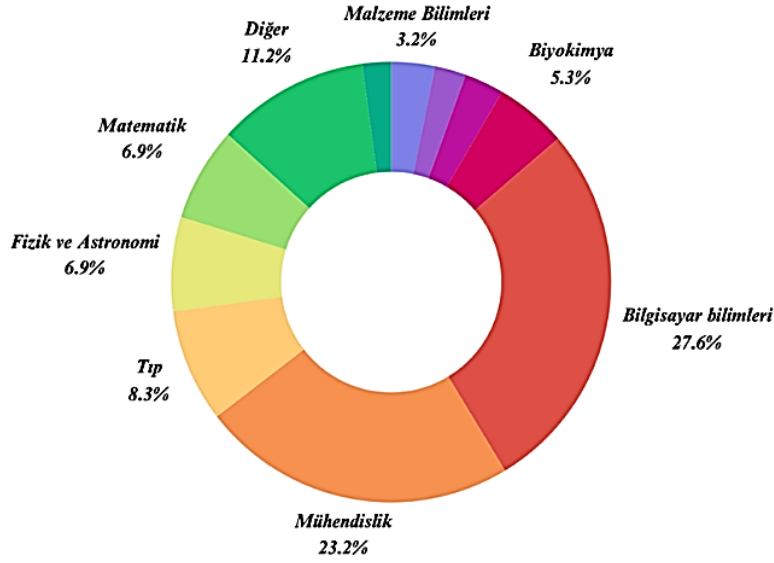
Üretilen çalışmaların yıllara göre dağılımını gösteren grafik aşağıdaki gibidir.



Şekil 1. Çalışmaların Yıllara Göre Dağılımı

Araştırma bulgularına göre; 1938 çalışmanın %27,6 gibi büyük bir oranı bilgisayar bilimleri; %23,1 mühendislik; %8,3 tıp; %6,9 oranında hem astronomy hem de matematik gibi fen ağırlıklı alanlarda üretildiği tespit edilmiştir. Sosyal bilimleri, sanat ve beşeri bilimleri gibi alanlarda ise %4,5 oranında yayına rastlanmıştır. Nitekim araştırma; sinema, reklam ve dijital oyun endüstrisi gibi sanat ve eğlence sektörü tarafından sık kullanılan motion capture teknolojisinin, literatürdeki izdüşümünün de bu disiplinlerin çalışma odağında olması varsayımına dayanmaktadır. Ancak motion capture teknolojisine ilişkin bilimsel literatür mühendislik ve sağlık alanlarında yoğunlaşırken, genel kanının aksine sosyal ve sanat temelli disiplinlerde literatürün zayıf kaldığı tespit edilmiştir. Yaratıcılık bu alanın temel kavramı olması gerekirken anahtar kelimelere bakıldığında da daha çok mühendislik, teknoloji üzerine çalışmaların ağırlıklı olarak yürütülmekte olduğu ilk etapta dahi gözlemlenebilmiştir.

Üretilen çalışmaların disiplinlere göre dağılımını gösteren grafik aşağıdaki gibidir.



Şekil 2. Çalışmaların Disiplinlere Göre Dağılımı

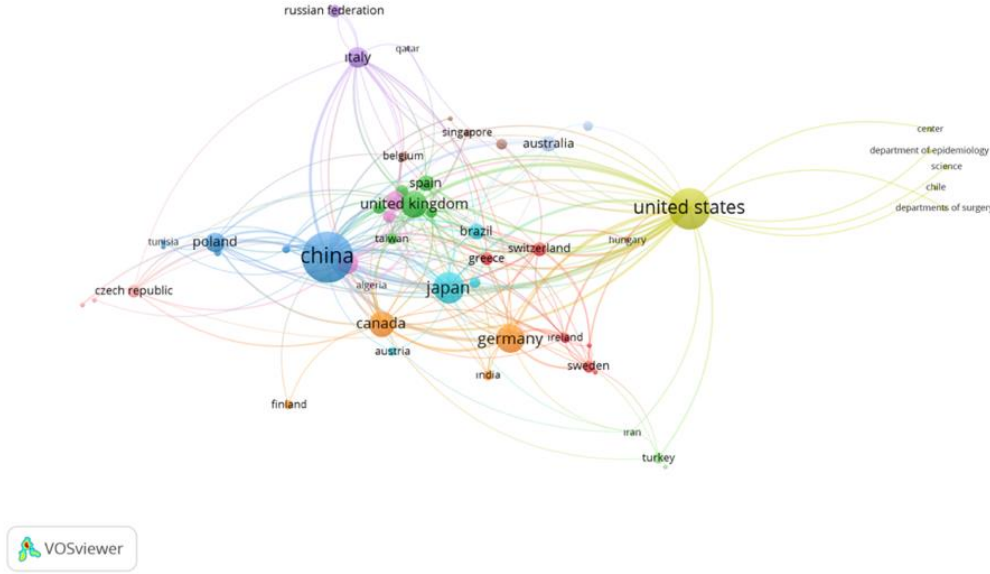
### Araştırma Soruları

- Ülke atf analizinde, en çok atf olarak öne çıkan ülkeler hangileridir?
- Yazar atf analizinde, en çok atf olarak öne çıkan yazarlar kimlerdir?
- Doküman atf analizinde, en çok atf olarak öne çıkan bilimsel dokümanlar hangileridir?
- Atf yapılan kaynaklar arasında, en çok ortak atf olarak öne çıkan kaynaklar hangileridir?
- Organizasyonların atf analizinde, en çok atf olarak öne çıkan kurumlar hangileridir?
- Referanslarının ortak atf analizinde, en çok atf olarak öne çıkan referans kaynakları hangileridir?
- Yazarların anahtar kelimelerinin birlikte görülme analizinde, öne çıkan kelimeler hangileridir?

### BULGULAR

#### Ülkelerin Atf Analizi (Analysis to Citation of Countries)

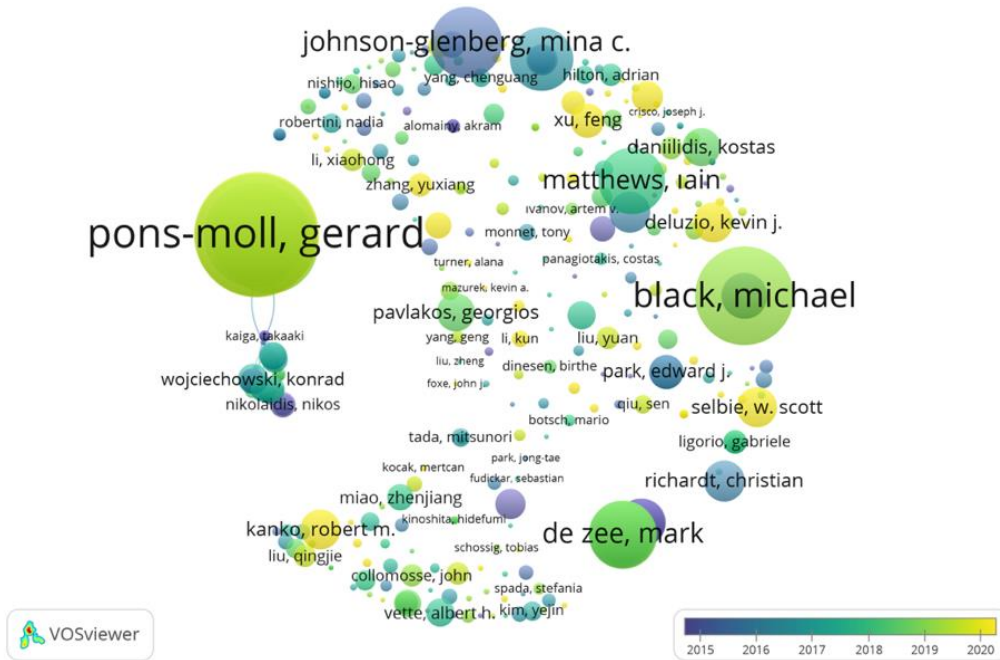
Çalışmada “motion capture” anahtar kelimesine ilişkin ülke bazlı atf ağlarının haritalamasını ortaya koymak için, bir ülkenin en az 1 yayını olması ve ülkelerin söz konusu çalışmalarının en az 1 atıfa sahip olması şeklinde bir daraltma yapılmıştır. Bu daraltma neticesinde, ülkelerin sinema endüstrisine ilişkin ürettikleri yayınların dağılımında 90 farklı ülkenin verisine ulaşılmıştır. Programın yönlendirmesiyle 90 ülke aralarında ilişki tespit edilen 54 ülke ile sınırlandırılmış ve 12 kümeye, 224 bağlantıya, 558 toplam bağlantı gücüne erişilmiştir. Bu doğrultuda yayın sayıları bakımından; Çin 333, ABD 217, Japonya 130, Almanya 101, İngiltere 89 yayın üreterek, öne çıkan ülkeler arasında gözlemlenmiştir. Atf sayıları bakımından ise; İngiltere 4476, Çin 2738, Kanada 2098, Almanya 1458, İngiltere 1255, Japonya 1120 atf olarak, binin üzerinde atf sayısına ulaşan ülkeler arasında listelenmiştir. Toplam bağlantı güçleri bakımından ise; Çin 189, ABD 171, İngiltere 68, Kanada 66, Almanya 58 etkileşim alanına sahip olarak haritalanmıştır. Türkiye “motion capture” üzerine ürettiği 15 dokümanda ABD, Kanada, Almanya, İsveç ve İran ile iş birliği ilişkisi kurmuş, 47 atıfa ve 8 toplam bağlantı gücüne erişim sağlamıştır.



**Harita 1.** Ülkelerin Atıf Analizi

### ***Yazarların Atıf Analizi (Analysis to Citation of Authors)***

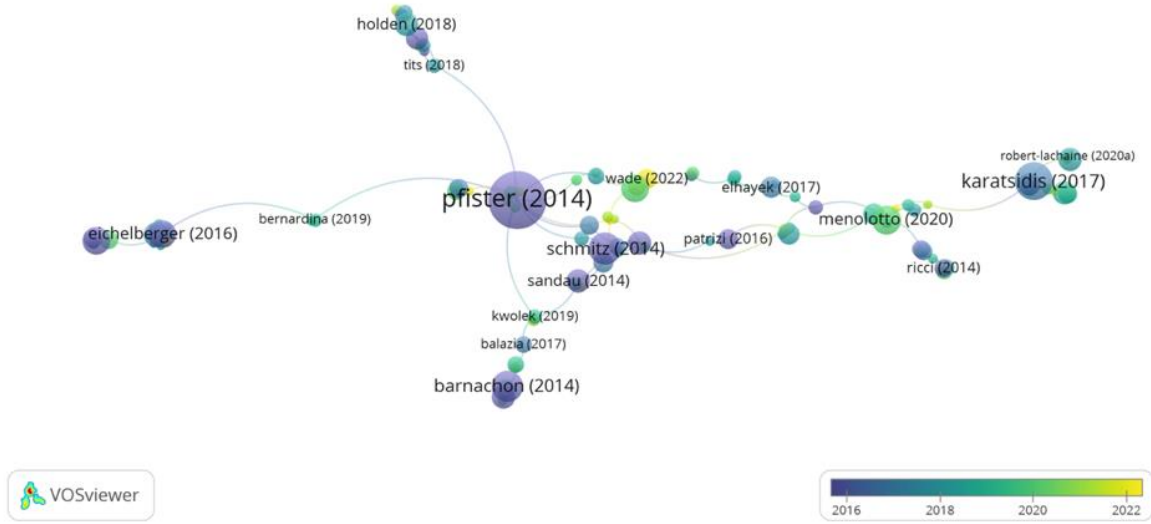
Yazar-atıf ağlarını tespit etmek üzere yapılan analizde; bir yazarın en az 2 yayın üretmiş olması ve en az 10 atıf kriteri ile ağ haritası çıkarılmış ve toplamda 457 gözlem biriminin birbiri ile ilişkisi tespit edilmiştir. 457 gözlem biriminin görsel haritasının oluşturulması esnasında; 245 küme, 704 bağlantı ve 1066 toplam bağlantı gücü tespit edilmiştir. En yüksek atıf alan beş yazar; Gerard Pons-Moll 596, Christian Theobalt 576, Helge Rhodin, 477, Michael Black 447, Nikolaus F. Troje 437'dir. Alanda en çok yayın üreten yazar 13 doküman ile Zhenjiang Miao'dur. Miao tüm çalışmalarından 92 atıf elde etmiş ancak 0 toplam bağlantı gücüne erişim sağlamıştır. Miao'yu takip eden Konrad Wojciechowski 9 doküman ile 109 atıf, 15 toplam bağlantı gücü, Mark De Zee 4 doküman, 288 atıf, 18 toplama bağlantı gücü; Giang Zhang 8 doküman, 28 atıf, 13 toplam bağlantı gücü; Helge Rhodin 8 doküman, 477 atıf 10 toplam bağlantı gücü; Mina C. Johnson Glenberg 2 doküman, 301 atıf, 0 bağlantı gücü ile görsel haritada öne çıkan yazarlar olarak kaydedilmiştir.



**Harita 2.** Yazarların Atıf Analizi

### ***Dokümanların Atıf Analizi (Citation of Document)***

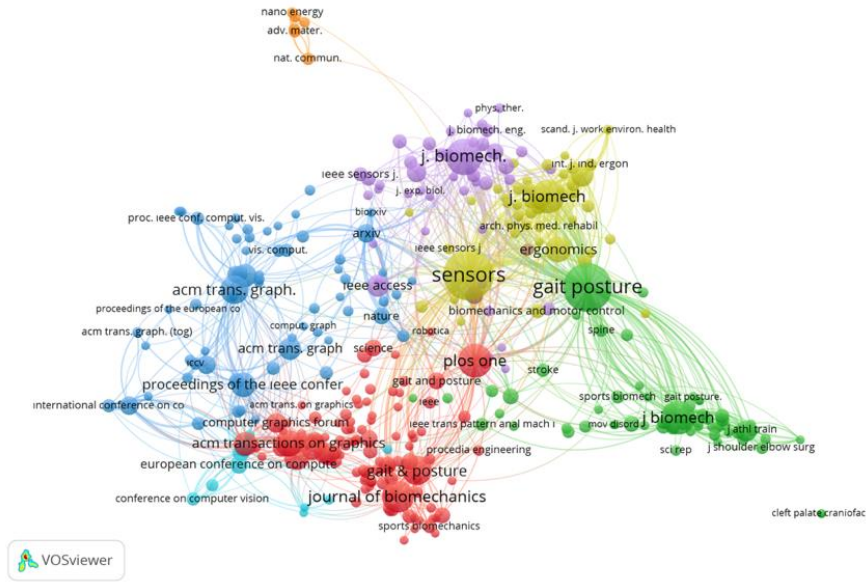
Çalışmada erişilen 1939 doküman 10 atıf almış çalışmalar özelinde daraltılarak 455 çalışmayla sınırlandırılmıştır. 455 çalışma aralarında ilişki bulunan 102 araştırma gözlem biriminden 17 kümeye, 118 bağlantıya erişim sağlanmıştır. Bu haritalamada; Pfister (2014) olarak gösterilen makale çalışması 370 atıf ve 13 toplam bağlantı gücü ile öne çıkmıştır. Joo (2015) 276, Van der Kruk (2018) 263, Park (2015b.) 224 Johnson Glenberg (2014) 205 atıf ile en çok atıf alan dokümanlar arasındadır. En yüksek toplam bağlantı gücüne sahip yayımlar ise; 2014 yılına ait Pfister'in 370 atıf alan çalışması 13, 2016 yılında Eichelberger 93 atıf alan çalışması 11, 2015 yılına ait Schmitz'in 65 atıf alan çalışmasıdır 8 toplam bağlantı gücüne erişmiştir. 2016 yılında Faber'ın 60 atıf alan yayını 7, Yunus'un 2021 yılında ürettiği çalışması 23 atıfla 7 toplam bağlantı gücü ile ilk beşte yer alan yayımlar arasında gözlemlenmiştir. "Comparative Abilities of Microsoft Kinect and Vicon 3D Motion Capture for Gait Analysis" [Yürüyüş Analizi için Microsoft Kinect ve Vicon 3D Hareket Yakalamanın Karşılaştırmalı Yetenekleri] adlı bu çalışma tıp alanındadır. Alexandra Pfister, Alexandre M. West, Shaw Bronner, Jack Adam Noah tarafından üretilen bu çalışmanın ABD'de farklı kurumlarda çalışmakta olan araştırmacılar tarafından üretildiği tespit edilmiştir.



**Harita 3.** Dokümanların Atıf Analizi

### ***Atıf Yapılan Kaynakların Ortak Atıf Analizi (Co- Citation of Cited Sources)***

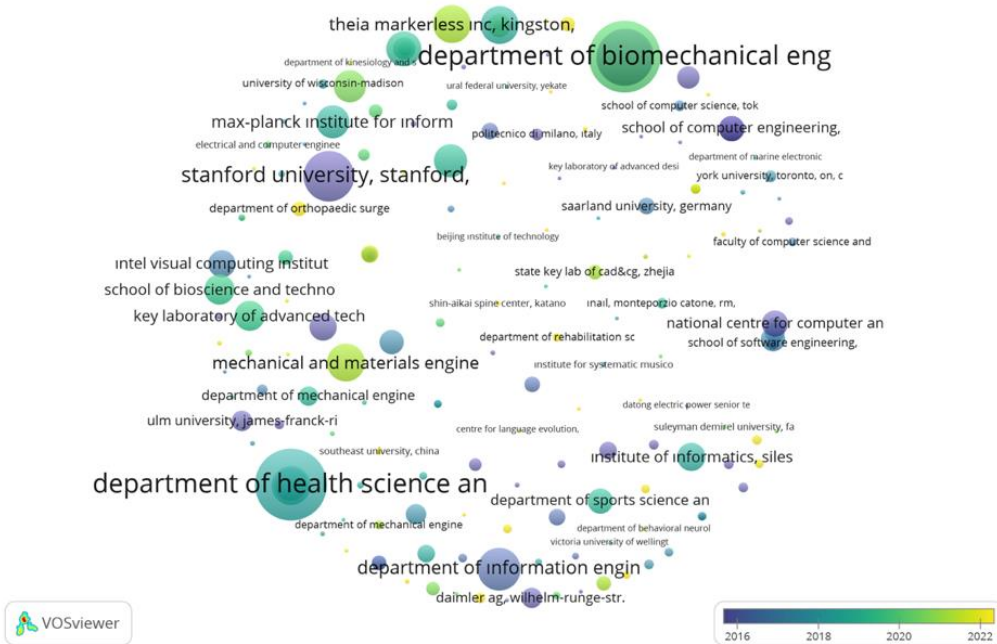
Çalışmanın bu aşamasında 20880 farklı analiz birimi (Sources), çalışma verilerine hakimiyet sağlamak adına 15 atıf alan çalışma özelinde daraltılmıştır. Bu doğrultuda, 356 analiz ögesi, 8 küme 12451 bağlantı, 137921 toplam bağlantı gücü bulgulanmıştır. Bu haritalamada Sensors 933 atıfla, 321 bağlantı ve 15585 toplam bağlantı gücüyle birinci sırada listelenmiştir. Görsel haritada 849 atıf ile ikinci sırada yer alan kaynak Gait Posture 245 bağlantı, 14130 toplam bağlantı gücü elde etmiştir. Üçüncü sırada yer alan J. Biomech 151 bağlantı, 441 atıf, 8442 toplam bağlantı gücüne erişmiştir.



**Harita 4.** Atıf Yapılan Kaynakların Ortak Atıf Analizi

### **Organizasyonların Atıf Analizi (Citation Analysis of Organization)**

Organizasyonlar arası atıflara dair ağ haritası oluşturmak üzere 3916 organizasyon üzerinden analiz yapılmıştır. Bu analizde organizasyon tarafından en az 1 eserin yayımlanması ve 1 atıf alınması kriteri kapsamında aralarında ilişki bulunan 190 gözlem birimine erişilmiştir. 190 organizasyon analiz verisi ile yapılan bu haritalama neticesinde; 13 küme, 18 bağlantı, 21 toplam bağlantı gücü tespit edilmiştir. Bu görsel haritada Aalborg Üniversitesi, (Danimarka) Teknoloji ve Bilim Sağlığı Departmanı 270 atıfla birinci sırada yer alırken, Delft Teknik Üniversitesi (Hollanda) Biyomekanik Mühendislik Departmanı 267 atıfla ikinci sırada, Stanford Üniversitesi (ABD) 162 atıfla üçüncü sırada kaydedilmiştir. Lublin Teknoloji Üniversitesi (Polonya), Pekin Üniversitesi (Çin) Jinan Üniversitesi (Çin) ürettikleri 5 yayın ile alanda en fazla yayın üreten üniversiteler arasında listelenmiştir.

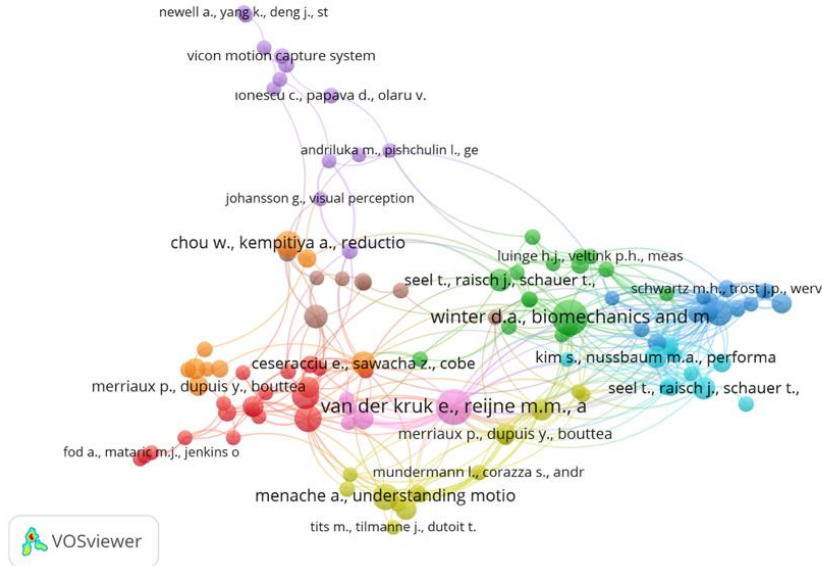


**Harita 5.** Organizasyonların Atıf Analizi

### Referansların Ortak Atıf Analizi (Co-Citation of Cited References)

Araştırmaya konu olan 1938 analiz biriminin tamamından elde edilen toplam 47175 referans, atıf yapılan bir referansın minimum atıf sayısı 5 olarak belirlenerek daraltılmış ve 116 çalışmaya ulaşılmıştır. En yüksek toplam bağlantı dizinine sahip atıfta bulunulan referans kaynakları seçilerek oluşturulan haritada; 9 kümeye, 407 bağlantıya, 550 toplam bağlantı gücüne erişilmiştir. Bu haritada özellikle sağlık ve spor bilimleri alanındaki çalışmaların öne çıkmakta olduğu gözlemlenmiştir. Delft Üniversitesi'nden iki araştırmacının; Eline Van Der Kruk & Marco M. Reijne'nin 2018 yılına ait makale çalışmaları: "Accuracy of Human Motion Capture Systems for Sport Applications; State of Theart Review" [Spor Uygulamaları İçin İnsan Hareket Yakalama Sistemlerinin Doğruluğu; Son Teknoloji İncelemesi] 29 atıf, 54 toplam bağlantı gücü ile birinci sırada yer almaktadır.

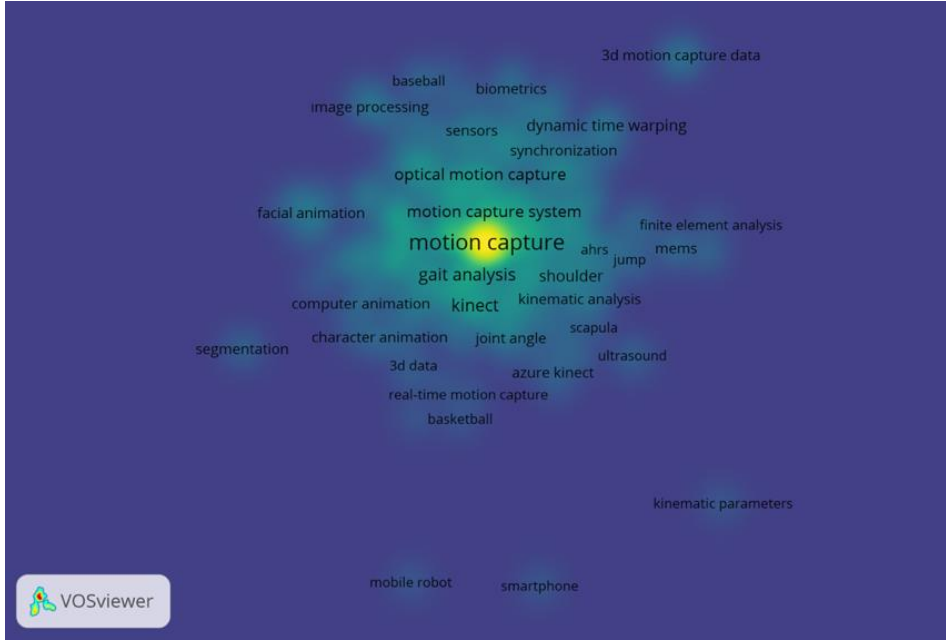
İkinci sırada David A. Winter'ın ilk olarak 1976 yılında basılan kitap çalışmasının, 2009 yılına ait dördüncü basımı "Biomechanics and Motor Control of Human Movement" [İnsan Hareketinin Biyomekaniği ve Motor Kontrolü] öne çıkmaktadır. Üçüncü sırada ise Alberto Menache'nin "Understanding Motion Capture for Computer Animation" [Bilgisayar Animasyonu İçin Hareket Yakalamayı Anlamak] adlı kitap çalışması izlenmiştir. Motion Capture konusunda kapsamlı bilgiler sunan bu kitap çalışması, en son teknolojileri, metodolojiyi ve mevcut motion capture endüstrisindeki gelişmeleri incelemektedir.



Harita 6. Referansların Ortak Atıf Analizi

### Yazarların Anahtar Kelimelerinin Birlikte Görülme Sıklığı (Co-Occurrence of Author Keywords)

Araştırma kapsamında en sık kullanılan anahtar sözcüklerin tespiti için en az üç kez tekrar eden kelimelere odaklanılmıştır. 4138 kelimedenden 349 kelimenin arasında ilişki ağı tespit edilmiştir. En az 3 defa görülen ve aralarında ilişki ağı olduğu gözlemlenen kelimeler üzerinden yapılan yoğunluk analizi sonucunda; toplam bağlantı gücü açısından en güçlü kelimeler; "motion capture" 988, "kinematics" 188, "biomechanics" 155, "gait analysis" 147, "deep learning" 119, olarak bulgulanmıştır. 663 tekrarla "motion capture" birinci sıradayken, "kinematics" 76 tekrarla ikinci, "biomechanics" 68, tekrarla üçüncü, "virtual reality" 66 tekrarla dördüncü ve "gait analysis" 56 tekrarla beşinci sırada haritalanmıştır.



**Harita 7.** Anahtar Kelimelerin Birlikte Görülme Sıklığına İlişkin Yoğunluk Analizi

## DEĞERLENDİRME, SONUÇ VE ÖNERİLER

“Motion Capture” anahtar kelimesi doğrultusunda Scopus veri tabanındaki çalışmaların dağılımı tablolar ve şekiller aracılığıyla görselleştirilerek haritalandırılmıştır. En yüksek yayın sayısına ulaşılan 2022 yılında 249 çalışmaya ulaşılmıştır. Araştırma kapsamına giren 1938 çalışmanın 919’u makale, 914’ü konferans bildirisi, 44’ü kitap bölümü 33’ü eleştiri, 3’ü kitap çalışması olarak kaydedilmiştir. Kapsam dahilinde bulguların diğer 25 çalışmanın ise çeşitli veri notları, editör mektupları ya da geri çekilen çalışmalardan oluştuğu gözlemlenmiştir. Motion capture teknolojisi üzerine yayınlanan çalışmaların dağılımında 90 farklı ülkenin verisine ulaşılmıştır. 12 farklı dilde üretilen yayınların, 1860’ı İngilizcedir. Yayınların dillere göre dağılımı; 47 Çince, 6 Rusça, 5 İspanyolca, 4 Korece, 4 Portekizce 3 Almanca, 3 Japonca, 2 Türkçe, 2 Lehçe, 1 Fransızca, 1 Hırvatça dillerinde kaydedilmiştir. Yayın sayıları bakımından önde gelen ülkeler arasında ABD, İngiltere, Çin, Japonya, Almanya gibi teknolojiye yön veren lider ülkelerin ve İngilizce üretilen yayınların öne çıkmakta olduğu tüm bibliyometrik haritalarla saptanmıştır.

Ülke atf haritasında; Çin 333, ABD 217, Japonya 130, Almanya 101, İngiltere 89 yayın üreterek öne çıkan ülkeler arasında izlenmiştir. Atf sayıları bakımından ise; İngiltere 4476, Çin 2738, Kanada 2098, Almanya 1458, İngiltere 1255, Japonya 1120 atf olarak, binin üzerinde atf sayısına ulaşan ülkeler arasında listelenmiştir. Toplam bağlantı güçleri bakımından ise; Çin 189, ABD 171, İngiltere 68, Kanada 66, Almanya 58 etkileşim alanına sahip olarak haritalanmıştır. Türkiye “motion capture” üzerine ürettiği 15 dokümanda ABD, Kanada, Almanya, İsveç ve İran ile iş birliği ilişkisi kurmuş, 47 atıfa ve 8 toplam bağlantı gücüne erişim sağlamıştır.

190 gözlem birimine erişilen kurum/organizasyon analizinde de atf sayıları bakımından özellikle Avrupa ülkelerinin, sağlık ve mühendislik alanlarının önde gelmemekte olduğu gözlemlenmiştir. Danimarka Aalborg Üniversitesi, Teknoloji ve Bilim Sağlığı Departmanı 270 atıfla birinci sırada yer alırken, Hollanda Delft Teknik Üniversitesi Biyomekanik Mühendislik Departmanı 267 atıfla ikinci sırada yer almaktadır. ABD Stanford Üniversitesi de çeşitli alanlarda ürettiği yayınlarla 162 atıfa erişerek üçüncü sırada kaydedilmiştir. Alanda en fazla bilimsel yayın üreten üniversiteler arasında ise; Lublin Teknoloji Üniversitesi (Polonya), Pekin Üniversitesi (Çin) Jinan Üniversitesi (Çin) listelenmiştir. Ancak bu üniversiteler alana ilişkin beşer yayın ürettikleri halde, güçlü network ve iş birliktelikleri kuramamaları dolayısıyla atf sayıları bakımından düşük bağlantı gücüyle haritalanmıştır.

En yüksek atf alan yazarların analiz haritasında öne çıkan beş yazar; Gerard Pons- Moll 596, Christian Theobalt 576, Helge Rhodin, 477, Michael Black 447, Nikolaus F. Troje 437’dir. En yüksek toplam bağlantı gücüne sahip yayın ise; 2014 yılına ait 370 atf alan Alexandra Pfister’in ilk yazar olduğu çalışmadır. Tıp alanındaki bu çalışma ABD’de farklı kurumlarda çalışmakta olan araştırmacılar tarafından üretilen, ortak yazarlık ilişkisine dayanan bir çalışmadır. Doküman, atf sayıları ve toplam bağlantı güçleri bakımından; bilgisayar bilimleri alanında üretilen yayınlar %27,6’lık bir dilime karşılık gelirken mühendislik alanında üretilen yayınlar %23,2’lik bir dilimle



gözlemlenmiştir. Bu iki disiplin, motion capture alanına ilişkin güncel gelişmeleri yakından izleyerek, teknolojik ilerlemeleri bilimsel olarak kayıt altına almak konusunda önde gelen alanlar arasında izlenmiştir.

17 atıf, 9 toplam bağlantı gücüyle izlenen referansların ortak atıf analiz haritasında bulgularının gibi; “motion capture” anahtar kelimesi etrafında çerçevelenen bilimsel yayımlar daha çok mühendislik temelli, bilgisayar teknolojileri, sağlık ve spor bilimleri alanlarında ilerlemektedir. Grup sensörlerinin izlenmesinde ve kaydedilmesinde daha ucuz kamera sistemlerinin ve elektromanyetik alanların nasıl kullanılabileceği, bilgiye erişim konusunda geniş imkânlar verecek veri eldivenlerinin tasarımı gibi teknik ve teknolojik gelişme odaklı yayımlar hem atıf hem de toplam bağlantı güçleriyle öne çıkmaktadır. Atıf yapılan kaynakların ortak atıf analizinde de genellikle Q1 ve Q2 listelerinde öne çıkmakta olan uluslararası üç derginin liste başında izlenmekte olduğu tespit edilmiştir. Görsel haritada Sensors dergisi 933 atıfıyla birinci sırada listelenirken, Gait Posture 849 atıf ile ikinci sırada, J. Biomech 441 atıf ile üçüncü sırada listelenmiştir. Sensors; sensör bilimi ve teknolojisi üzerine uluslararası, hakemli, açık erişimli bir dergidir. Gait & Posture dergisi; hareket ve dengenin tüm yönleriyle ilgili güncel temel ve klinik araştırmaların yayımlanmaya odaklanırken, Journal of Biomechanics dergisi; biyolojik problemleri araştıran çalışmaların mekanik prensipleri kullanmasını, orijinal bulguların raporlanmasını incelemektedir. Bu haritalamada da bilgisayar bilimleri, mühendislik ve sağlık araştırmalarının öne çıkmakta olduğu gözlemlenmektedir. Literatürü çerçevelendiren diğer disiplinler arasında sosyal bilimler, sanat temelli çalışmalara da rastlanmıştır. Ancak “motion capture” teknolojisine ilişkin bilimsel literatür mühendislik, bilgisayar bilimleri ve sağlık alanlarında yoğunlaşırken, genel kanının aksine tüm haritalarda sosyal ve sanat temelli disiplinlerde literatürün oldukça zayıf kalmakta olduğu bulgulanmıştır.

Çalışma vesilesiyle tespit edilen konuya ilişkin en önemli eksiklik; bu alanlardaki çalışmaların nicelik ve nitelik olarak, teknik ve teknoloji temelli bakış açılarının dışında da incelenmesi gerekliliğidir. Anahtar kelimelere bakıldığında da daha çok mühendislik, teknoloji, teknik zeminde ilerleyen çalışmaların anahtar kelimelerinin ağırlıkta olduğu sonucuna varılmıştır. Keza sanat ve tasarım ağırlıklı çalışmalarda rastlanılabileceği yüksek anahtar kelimelerinin çok daha sınırlı sayıda tekrar ettiğine dönük harita bulguları da alandaki bilgi eksikliğini ortaya koymaktadır. Anahtar kelimelerinin birlikte görülme sıklığı analizinde; animation 24, character animation 8, 3D animation 6, video games sadece 3 tekrar ile haritalanmıştır. Nitekim toplam bağlantı güçleri ve atıf sayıları bakımından da sosyal ve sanat temelli çalışmaların daha zayıf ilişkisellik ağına sahip olduğu ve geri planda kaldığı gözlemlenmiştir.

Motion capture teknolojisi film ve oyun endüstrisinde yükselen bir teknoloji olmasına karşın, bilimsel alandaki izdüşümü aynı seviyede izlenmemektedir. Dolayısıyla çalışma bu ve benzeri eğilimleri ortaya koyması nedeniyle; alandaki nitel ve nicel araştırmalara kaynaklık edebilir ve ihmal edilen konu başlıklarına dair bir yol haritası sunabilir. Nitekim sinema endüstrisinde ve dijital oyun dünyasında “artırılmış gerçeklik” çalışmalarının yaygınlaşmasıyla birlikte; MoCap teknolojisine ilişkin bilimsel yayıncılık yönelimlerinin de değişmeye başladığı çalışma çıktıları arasındadır. Bilhassa 2016 sonrası dönemde, hareketi yakalama konusuna ilişkin yayın sayılarında ciddi bir artışın olduğu, 2022 yılında ise yayınların en yüksek rakama ulaştığı kayıt altına alınmıştır. Bu bağlamda son dönem yayınlarda; sanal gerçeklik ve hareketi yakalama teknolojileriyle birlikte değişen oyunculuk performanslarına dönük çalışmalara da özel bir yönelimin başladığından söz etmek mümkündür (Kade D. vd. 2018: Xuhui, 2021: Cannavò vd. 2023).

Yaratıcılık, tasarım odaklı düşünme, özgünlük bu alanın temel dinamosu, bilgi üretim kaynağı olması gerekirken bu çerçevede üretilen bilimsel yayınların oldukça sınırlı düzeyde izlenmesi araştırmancının en çarpıcı bulguları arasındadır. Son 10 yıllık veri analizi göstermektedir ki; motion capture teknolojisi yakın bir gelecekte gündelik hayatın hemen her alanında insan hayatını kolaylaştıran teknolojik bir araç olacaktır. Dolayısıyla bilimsel çalışmaların da güncel teknolojik gelişmeler doğrultusunda ilerlemekte olduğu ve kapsamını genişlettiği haritalarda öne çıkmaktadır. Ancak yaratıcılığa dayalı bu teknolojinin daha işlevsel kullanım alanlarının tespiti için sosyal bilimler ve sanat alanlarında da çok daha fazla araştırmaya konu olması gerekmektedir. Çalışmanın önemli bir bulgusu da alandaki bu boşluğun vurgulanması ve gelecek çalışmaları ihmal edilen konulara ilişkin bilinçlendirmesidir. Bu bakımdan sanat, tasarım ağırlıklı disiplinlerin akademik performanslarının sektörel beklentilerle uyumlu olmadığı tüm haritalarda açıkça gözlenmiştir.

Elde edilen tüm araştırma sonuçlarının, çalışmaya getirilen sınırlılıklar nedeniyle, birtakım handikaplı, kısıtlı tarafları söz konusudur. Çalışma özelinde, sadece Scopus veri tabanında taranan çalışmalara yer verilmesi, Web of Science, PubMed, Proquest, Google Scholar, Semantic Scholar, YÖK Tez Arşivi, DergiPark gibi uluslararası ve ulusal arşivlerdeki bilimsel çalışmalara dönük analiz verilerine yer verilmemesi bu çalışmanın en önemli sınırlılığdır. Ayrıca bu çalışmada sadece 1 Ocak 2014-6 Şubat 2024 yılları arasındaki yayınların dağılımına odaklanılmaktadır.

Bu bakımdan benzer bir çalışma, farklı veri tabanları üzerinden ya da farklı dönemlere ilişkin olarak da yürütülebilir. Böylece aynı çerçeveye sahip iki çalışmanın veri setleri ve araştırma sonuçları karşılaştırılarak, yeni araştırma çıktılarına erişim sağlanabilir. Dolayısıyla yeni araştırmacılar için önerimiz “motion capture” alanındaki gelişmeleri yakından izlemek adına, bilimsel yayınların arşivlenmesinde ortamın/mecranın etkisine ilişkin karşılaştırmalı bir analiz yapmalarındır. Kuşkusuz benzer kapsama sahip farklı araştırmaların da yürütülmesi; “motion capture” konusuna ilişkin bilimsel yayıncılık faaliyetlerinin seyrine dair güncel araştırmaların anlık olarak yakından izlenmesine ve yönlendirilmesine anlamlı yanıtlar verecektir. Ayrıca teknolojiyle paralel olarak ilerleyen kayıtlı bilimsel bilginin nitelikli şekilde tanımlanıp çoğalması ve tasnif edilmesi konusunda da bilim dünyasına önemli katkılar sağlayacaktır.

## KAYNAKLAR

- Auslander, P. (2017). Film Acting and Performance Capture. *PAJ: A Journal of Performance and Art*, 39(3), 7-23. [https://doi.org/10.1162/PAJJ\\_a\\_00376](https://doi.org/10.1162/PAJJ_a_00376)
- Baker T. (2020). The History of Motion Capture within the Entertainment Industry. Unpublished thesis. Metropolia University of Applied Sciences, Helsinki, Finland.
- Borgman, C. L. & Furner, J. (2002). Scholarly communication and bibliometrics. *Annual Review of Information Science and Technology*, 36(1), 2-72. <https://doi.org/10.1002/aris.1440360102>
- Bregler, C. (2007). Motion capture technology for entertainment. *IEEE Signal Processing Magazine*, 24(6), 160-158. <https://doi.org/10.1109/MSP.2007.906023>
- Cannavò, A. F., Praticò, G., Bruno, A., & Lamberti F. (2023, July). AR-MoCap: using augmented reality to support motion capture acting, 2023 IEEE Conference Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR). Shanghai, China, (pp. 318-327). <https://doi.org/10.1109/VR55154.2023.00047>
- Corazza, S., Muendermann, L., Chaudhari, A. M., Demattio, T., Cobelli, C., & Andriacchi, T. P. (2006). A Markerless Motion Capture System to Study Musculoskeletal Biomechanics: Visual Hull and Simulated Annealing Approach. *Annals of biomedical engineering*, 34, 1019-1029. <https://doi.org/10.1007/s10439-006-9122-8>
- Delaney, B. (1998). On The Trail of The Shadow Woman: The Mystery of Motion Capture. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 18(5), 14-19. <https://doi.org/10.1109/38.708556>
- Delbridge, M. (2015). Motion capture in performance: an introduction. Springer Science & Business Media.
- Dower J. & Langdale P. (2022). Performing for motion capture: A guide for practitioners. London, UK: Bloomsbury Publishing.
- Erdem, S. (2021). Sanalı Gerçeğe Dönüştürmede Hareket Yakalama Teknolojisi. *Dijital Commucication Journal*, 4(5), 16-32. <http://dx.doi.org/10.51295/dicoj.25>
- Galantucci, L. M., Lavecchia, F., & Percoco, G. (2010). A simple photogrammetric system for automatic capture and measurement of facial soft tissues during movement. In *Innovative Developments in Design and Manufacturing* (pp. 169-174). CRC Press.
- Guerra-Filho, G. (2005). Optical Motion Capture: Theory and Implementation. *RITA*, 12(2), 61-90. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:16410896>
- Herda, L., Fua, P., Plankers, R., Boulic, R., & Thalmann, D. (2000, January). Skeleton-based motion capture for robust reconstruction of human motion. In *Proceedings Computer Animation 2000* (pp.77-83). IEEE. <https://doi.org/10.1109/CA.2000.889046>
- Imanullah, M., Yuniarno, E.M., Sooai, A.G., (2019). A Novel Approach in Low-cost Motion Capture System Using Color Descriptor and Stereo Webcam. *International Journal of Technology*, 10(5), 942-952 <https://doi.org/10.14716/ijtech.v10i5.2789>
- Kade, D., Lindell, R., Ürey, H., & Özcan, O. (2018). Supporting motion capture acting through a mixed reality application. In F. Cipolla-Ficarra (Eds.), *Optimizing human-computer interaction with emerging technologies* (pp. 248-273). Pensilvanya: IGI Global.

- Kitagawa, M., & Windsor, B. (2008). *MoCap for artists: workflow and techniques for motion capture*. New York: Routledge.
- Krueger, M. W., Gionfriddo T., & Hinrichsen K. (1985, April). VIDEOPLACE—An Artificial Reality. *Association for Computing Machinery*, 16 (4), 35–40 <https://doi.org/10.1145/317456.317463>
- Maxwell, D. R. (1983). *Graphical marionette: a modern-day Pinocchio*. Unpublished master's thesis. Massachusetts Institute of Technology. Cambridge.
- Mechner J. (2023). Prince of persia rotoscoping 1986. YouTube. [https://www.youtube.com/watch?v=AbbX\\_Mq-gdg](https://www.youtube.com/watch?v=AbbX_Mq-gdg) /Accessed 04.04.04
- Menache, A. (2011). *Understanding motion capture for computer animation*. San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers.
- Nogueira, P.A. (2011). *Motion Capture Fundamentals A Critical and Comparative Analysis on Real-World Applications*. <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:35967233>
- O'Brien, J.F., Bodenheimer, B., Brostow, G.J., & Hodgins, J.K. (2023). Automatic joint parameter estimation from magnetic. *Motion Capture Data*. ArXiv, abs/2303.10532.
- Parent, R., Ebert, D. S., Pauly, M. V., Peachey, D., Perlin, K., Pfister, H., ... & Musgrave, F. K. (2010). *Computer animation complete: all-in-one: learn motion capture, characteristic, point-based, and Maya winning techniques*. San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers Inc.
- Paterson, M. (2021). The Birth of Motion Capture: Transcribing The Phenomena of Bodily Movement Through the “Graphic Method”. *Multimodality & Society*, 1(2), 195-215. <https://doi.org/10.1177/26349795211040323>
- Patra, S. K., Bhattacharya, P. & Verma, N. (2006). Bibliometric Study of Literature on Bibliometrics. *DESIDOC Journal of Library & Information Technology*, 26(1), 27-32. <https://doi.org/10.14429/dbit.26.1.3672>
- Rossney, B. (2022). *Reimagining characters with unreal engine's metahuman creator: elevate your films with cinema-quality character designs and motion capture animation*. UK: Packt Publishing.
- Sturman, D. (1998). The State Of Computer Animation. *ACM SIGGRAPH Computer Graphics*, 32(1), 57-61. <https://doi.org/10.1145/279389.279467>
- Van der Kruk, E., & Reijne, M. M. (2018). Accuracy of Human Motion Capture Systems for Sport Applications; State of The Art Review. *European journal of sport science*, 18(6),806-819. <https://doi.org/10.1080/17461391.2018.1463397>
- Xuhui Z., (2021, January). A design method of group animation fusion motion capturing data based on virtual reality technology, 2021 13th International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation Beihai, China (ICMTMA) (pp. 261-265). <https://doi.org/10.1109/ICMTMA52658.2021.00063>
- Yüncü, HR. & Karagöz, D. (2013). Sosyal Ağ Analizi ile Turizm Alanında Yazılmış Doktora Tezlerinin Araştırma Konularının İncelenmesi. *Adıyaman Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*, (15),205-232. <https://doi.org/10.14520/adyusbd.666>