





T.C. ESKİŞEHİR OSMANGAZİ ÜNİVERSİTESİ  
MÜHENDİSLİK ve MİMARLIK FAKÜLTESİ DERGİSİ

e-ISSN : 2630 - 5712



# ESKİŞEHİR OSMANGAZİ ÜNİVERSİTESİ MÜHENDİSLİK ve MİMARLIK FAKÜLTESİ DERGİSİ

JOURNAL OF ENGINEERING AND ARCHITECTURE FACULTY  
OF ESKİŞEHİR OSMANGAZİ UNIVERSITY



**YIL/YEAR : 2025**

**CİLT/VOLUME : 33**

**SAYI/ISSUE : 3**



**T.C. ESKİŞEHİR OSMANGAZI ÜNİVERSİTESİ**  
**MÜHENDİSLİK ve MİMARLIK FAKÜLTESİ DERGİSİ**

e-ISSN : 2630 - 5712



**SAHİBİ / OWNER**

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Adına  
Prof. Dr. Haldun KURAMA  
Dekan

**EDİTÖR / EDITOR IN CHIEF**

Prof. Dr. Haldun KURAMA ([hkurama@ogu.edu.tr](mailto:hkurama@ogu.edu.tr))

**EDİTÖR YADIMCISI / ASSOCIATE EDITOR**

Prof. Dr. Melih İPHAR ([miphar@ogu.edu.tr](mailto:miphar@ogu.edu.tr))

**ALAN (BÖLÜM) EDİTÖRLERİ / AREA EDITORS**

<b>Bölüm / Department</b>	<b>Adı ve Soyadı / Name</b>
Bilgisayar Mühendisliği Computer Engineering	Dr. Öğr. Üyesi Esra N. YOLAÇAN <a href="mailto:yolacan@ogu.edu.tr">yolacan@ogu.edu.tr</a>
Biyomedikal Mühendisliği Biomedical Engineering	Dr. Öğr. Üyesi Sultan BÜTÜN ŞENGEL <a href="mailto:sultanbutun.sengel@ogu.edu.tr">sultanbutun.sengel@ogu.edu.tr</a>
Elektrik-Elektronik Mühendisliği Electrical-Electronics Engineering	Dr. Öğr. Üyesi Gökhan DINDİŞ <a href="mailto:gdindis@ogu.edu.tr">gdindis@ogu.edu.tr</a>
Endüstri Mühendisliği Industrial Engineering	Doç. Dr. Feriştah ÖZÇELİK <a href="mailto:fdurmaz@ogu.edu.tr">fdurmaz@ogu.edu.tr</a>
İnşaat Mühendisliği Civil Engineering	Doç. Dr. Hakan ÖZBAŞARAN <a href="mailto:ozbasaran@ogu.edu.tr">ozbasaran@ogu.edu.tr</a>
Jeoloji Mühendisliği Geology Engineering	Prof. Dr. Volkan KARABACAK <a href="mailto:karabacak@ogu.edu.tr">karabacak@ogu.edu.tr</a>
Kimya Mühendisliği Chemical Engineering	Dr. Öğr. Üyesi Uğur SELENGİL <a href="mailto:uselen@ogu.edu.tr">uselen@ogu.edu.tr</a>
Maden Mühendisliği Mining Engineering	Prof. Dr. Sabiha KOCA <a href="mailto:skoca@ogu.edu.tr">skoca@ogu.edu.tr</a>
Makine Mühendisliği Mechanical Engineering	Prof. Dr. Haydar ARAS <a href="mailto:haras@ogu.edu.tr">haras@ogu.edu.tr</a>
Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Metallurgical and Materials Engineering	Dr. Öğr. Üyesi Ersu LÖKÇÜ <a href="mailto:elokcu@ogu.edu.tr">elokcu@ogu.edu.tr</a>
Mimarlık Architecture	Doç. Dr. Başak GÜÇYETER <a href="mailto:basakgucyeter@gmail.com">basakgucyeter@gmail.com</a>
Uçak Mühendisliği Aeronautical Engineering	Prof. Dr. Melih KUŞHAN <a href="mailto:mkushan@ogu.edu.tr">mkushan@ogu.edu.tr</a>
Yazılım Mühendisliği Software Engineering	Dr. Öğr. Üyesi İlker ÖZÇELİK <a href="mailto:ilker.ozcelik@ogu.edu.tr">ilker.ozcelik@ogu.edu.tr</a>



ÖN DEĞERLENDİRME / PRE-CONTROL

Bölüm	Adı ve Soyadı
Bilgisayar Müh. / Computer Engineering	Araş. Gör. Dr. Zuhâl TEPECİK CAN <a href="mailto:zcan@ogu.edu.tr">zcan@ogu.edu.tr</a>
Biyomedikal Mühendisliği/Biomedical Engineering	Dr. Öğr. Üyesi Yapıncak GÖNCÜ <a href="mailto:yapincak.goncu@ogu.edu.tr">yapincak.goncu@ogu.edu.tr</a>
Elektrik ve Elektronik Müh. / Electrical-Electronics Engineering	Araş. Gör. Dr. Feyza YILMAZ <a href="mailto:f.yilmaz@ogu.edu.tr">f.yilmaz@ogu.edu.tr</a>
Endüstri Müh. / Industrial Engineering	Araş. Gör. Kardelen Bahar ERDEN <a href="mailto:kardelen.erden@ogu.edu.tr">kardelen.erden@ogu.edu.tr</a>
İnşaat Müh. / Civil Engineering	Dr. Öğr. Üyesi Meltem ERYILMAZ YILDIRIM <a href="mailto:meryilmaz@ogu.edu.tr">meryilmaz@ogu.edu.tr</a>
Jeoloji Müh. / Geology Engineering	Araş. Gör. Duru CESUR <a href="mailto:daral@ogu.edu.tr">daral@ogu.edu.tr</a>
Kimya Müh. / Chemical Engineering	Araş. Gör. Fırat YILMAZ <a href="mailto:firat.yilmaz@ogu.edu.tr">firat.yilmaz@ogu.edu.tr</a>
Maden Müh. / Mining Engineering	Araş. Gör. Dr. Işıl KILIÇKAPLAN TOKCAN <a href="mailto:ikilickaplan@ogu.edu.tr">ikilickaplan@ogu.edu.tr</a>
Makine Müh. / Mechanical Engineering	Araş. Gör. Hakan SERTEL <a href="mailto:hsertel@ogu.edu.tr">hsertel@ogu.edu.tr</a>
Metalurji ve Malzeme Müh. / Metallurgical and Materials Engineering	Araş. Gör. Dr. Işın AKAY ERDOĞAN <a href="mailto:iakay@ogu.edu.tr">iakay@ogu.edu.tr</a>
Mimarlık/Architecture	Doç. Dr. Nazife Aslı KAYA ÜÇÖK <a href="mailto:nasli.kayaucok@ogu.edu.tr">nasli.kayaucok@ogu.edu.tr</a>
Uçak Mühendisliği/Aeronautical Engineering	Prof. Dr. Melih KUŞHAN <a href="mailto:mkushan@ogu.edu.tr">mkushan@ogu.edu.tr</a>
Yazılım Mühendisliği/Software Engineering	Araş. Gör. Sergen AŞIK <a href="mailto:sergen.asik@ogu.edu.tr">sergen.asik@ogu.edu.tr</a>



EDİTÖRLER KURULU / EDITORIAL BOARD

- A. Hakan Benzer, Hacettepe Üniversitesi, Ankara, Türkiye, [benzer@hacettepe.edu.tr](mailto:benzer@hacettepe.edu.tr)
- Barbara Tora, AGH University of Science and Technology in Kraków, Poland, [tora@agh.edu.pl](mailto:tora@agh.edu.pl)
- Buket D. Barkana, The University of Akron, Ohio, ABD, [mbbarkana@uakron.edu](mailto:mbbarkana@uakron.edu)
- Cafer Çelik, Atatürk Üniversitesi, Erzurum, Türkiye, [ccelik@atauni.edu.tr](mailto:ccelik@atauni.edu.tr)
- Cahit Helvacı, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir, Türkiye, [cahit.helvacı@deu.edu.tr](mailto:cahit.helvacı@deu.edu.tr)
- Cemal Baykara, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, [baykaracem@itu.edu.tr](mailto:baykaracem@itu.edu.tr)
- Cengiz Dünder, Çukurova Üniversitesi, Adana, Türkiye, [dunder@cu.edu.tr](mailto:dunder@cu.edu.tr)
- Cenk Karakurt, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Türkiye, [cenk.karakurt@bilecik.edu.tr](mailto:cenk.karakurt@bilecik.edu.tr)
- Demircan Canadınç, Koç Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, [dcanadinc@ku.edu.tr](mailto:dcanadinc@ku.edu.tr)
- Derviş Karaboğa, Erciyes Üniversitesi, Kayseri, Türkiye, [karaboga@erciyes.edu.tr](mailto:karaboga@erciyes.edu.tr)
- Emin Çiftçi, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, [eciftci@gmail.com](mailto:eciftci@gmail.com)
- Fatih Altun, Erciyes Üniversitesi, Kayseri, Türkiye, [faltun@erciyes.edu.tr](mailto:faltun@erciyes.edu.tr)
- Fatih Onur Hocaoğlu, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Afyon, Türkiye, [hocaoglu@aku.edu.tr](mailto:hocaoglu@aku.edu.tr)
- Grozanka Bogdanović, University of Belgrade, Technical Faculty in Bor, Serbia, [gbogdanovic@tfbor.bg.ac.rs](mailto:gbogdanovic@tfbor.bg.ac.rs)
- Gürsoy Arslan, Eskişehir Teknik Üniversitesi, Eskişehir, Türkiye, [mgarslan@eskisehir.edu.tr](mailto:mgarslan@eskisehir.edu.tr)
- Habil. Ali Cemal Benim, Duesseldorf University, Duesseldorf, Almanya, [alicemal.benim@hs-duesseldorf.de](mailto:alicemal.benim@hs-duesseldorf.de)
- Hatem Akbulut, Sakarya Üniversitesi, Sakarya, Türkiye, [akbulut@sakarya.edu.tr](mailto:akbulut@sakarya.edu.tr)
- Kadri Dağdelen, Colorado School of Mines, Colorado, ABD, [kdagdelen@mines.edu](mailto:kdagdelen@mines.edu)
- L. Antonio Estévez, University of Puerto Rico, Mayaguez, Puerto Rico, [antonio.estevez@upr.edu](mailto:antonio.estevez@upr.edu)
- Manuel Pozo Rodríguez, Universidad Autónoma of Madrid, İspanya, [manuel.pozo@uam.es](mailto:manuel.pozo@uam.es)
- Mehmet Saltan, Süleyman Demirel Üniversitesi, Isparta, Türkiye, [mehmetsaltan@sdu.edu.tr](mailto:mehmetsaltan@sdu.edu.tr)
- Nurgül Özbay, Bilecik Şeyh Edebali Üniversitesi, Türkiye, [nurgul.ozbay@bilecik.edu.tr](mailto:nurgul.ozbay@bilecik.edu.tr)
- Ömer Nezih Gerek, Eskişehir Teknik Üniversitesi, Eskişehir, Türkiye, [ongerek@eskisehir.edu.tr](mailto:ongerek@eskisehir.edu.tr)
- Paul A. Schroeder, University of Georgia, ABD, [schroe@uga.edu](mailto:schroe@uga.edu)
- Rasim İpek, Ege Üniversitesi, İzmir, Türkiye, [rasim.ipek@ege.edu.tr](mailto:rasim.ipek@ege.edu.tr)
- Serpil Erol, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye, [serpiller@gazi.edu.tr](mailto:serpiller@gazi.edu.tr)
- Şadan Kelebek, Queen's University, Kanada, [sadan.kelebek@queensu.ca](mailto:sadan.kelebek@queensu.ca)
- Şeref Sağıroğlu, Gazi Üniversitesi, Ankara, Türkiye, [ss@gazi.edu.tr](mailto:ss@gazi.edu.tr)
- Yasemin Serin, Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Ankara, Türkiye, [serin@metu.edu.tr](mailto:serin@metu.edu.tr)
- Yüksel Avcıbaşı Güvenilir, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul, Türkiye, [avcibasi@itu.edu.tr](mailto:avcibasi@itu.edu.tr)
- Zeki Aktaş, Ankara Üniversitesi, Ankara, Türkiye, [zaktas@eng.ankara.edu.tr](mailto:zaktas@eng.ankara.edu.tr)



Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, bilim ve teknolojideki son gelişmeleri aktarmak amacıyla;

- ❖ Bilgisayar Mühendisliği
- ❖ Biyomedikal Mühendisliği
- ❖ Elektrik-Elektronik Mühendisliği
- ❖ Endüstri Mühendisliği
- ❖ İnşaat Mühendisliği
- ❖ Jeoloji Mühendisliği
- ❖ Kimya Mühendisliği
- ❖ Maden Mühendisliği
- ❖ Makine Mühendisliği
- ❖ Metalurji ve Malzeme Mühendisliği
- ❖ Mimarlık
- ❖ Uçak Mühendisliği
- ❖ Yazılım Mühendisliği

dallarında; *kuramsal ve uygulamalı araştırma ile tarama* niteliklerinde makaleler yayımlamayı amaçlayan disiplinler arası ve hakemli bir dergidir. Dergi, belirtilen mühendislik branşlarında hızla gelişen alanlarına ilişkin çalışmaları ulaştırmayı amaçlamaktadır.

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi ilk olarak **1986 yılında** "Anadolu Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi" olarak yayın hayatına başlamıştır. 1993 ve 2005 yıllarında yapılan isim değişiklikleri sonrasında, üniversitemiz adının "Eskişehir Osmangazi Üniversitesi" olması nedeniyle derginin adı da "Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi" (ISSN: 1301-045x) haline gelmiştir.

Dergi yılda 2 sayı olarak yayımlanmış olup 2012 yılı sonunda yayın hayatına ara vermiştir.

2018 yılından itibaren e-Dergi olarak yayın hayatına tekrar başlamıştır.

Dergi hakkında ayrıntılı bilgiler

<https://dergipark.org.tr/tr/pub/ogummf>

web sayfasında verilmiştir.

Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi yılda 3 sayı olarak yayımlanmaktadır.

Bu sayılara ek olarak Editörler Kurulu'nun kararıyla, fakültemiz bölümleri tarafında yürütülen bir kongrede sunulan bildiriler "Özel Sayı" olarak yayımlanabilmektedir.

The Journal of Engineering and Architecture Faculty of Eskişehir Osmangazi University is a multidisciplinary and peer-reviewed journal in engineering. The journal is not limited to a particular aspect of science and engineering, but is instead devoted to a wide range of areas in engineering. The journal aims to publish high quality papers in the areas of:

- ❖ Computer Engineering
- ❖ Biomedical Engineering
- ❖ Electrical-Electronics Engineering
- ❖ Industrial Engineering
- ❖ Civil Engineering
- ❖ Geology Engineering
- ❖ Chemical Engineering
- ❖ Mining Engineering
- ❖ Mechanical Engineering
- ❖ Metallurgical and Materials Engineering
- ❖ Architecture
- ❖ Aeronautical Engineering
- ❖ Software Engineering

This journal publishes original theoretical and empirical research papers as well as review papers and case studies related to these areas of engineering. High quality submissions are welcome from academics, researchers, and practitioners.

The Journal of Engineering and Architecture Faculty of Eskişehir Osmangazi University was first launched in 1986. After the name of the journal changed in both 1993 and 2005, consequently, the name is "The Journal of Engineering and Architecture Faculty of Eskişehir Osmangazi University" (ISSN: 1301-045x). The journal was published as 2 issues per year until the end of 2012, then publication of the journal is suspended between 2012-2017.

It has resumed its publication life as an online journal in 2018.

Additional information for the journal is given at web page :

<https://dergipark.org.tr/tr/pub/ogummf>

The Journal of Engineering and Architecture Faculty of Eskişehir Osmangazi University is published as 3 issues per year.

In addition to the regular issues, proceedings of the conferences which are organized by our university are published as special issues depending upon the decision of the Editorial Board.



**T.C. ESKİŞEHİR OSMANGAZİ ÜNİVERSİTESİ  
MÜHENDİSLİK ve MİMARLIK FAKÜLTESİ DERGİSİ**



e-ISSN : 2630 - 5712

Dergi, halen, aşağıda verilen indeksler tarafından taranmaktadır.

The journal is currently indexed in the following databases.



[TR Dizin](#)



[SOBIAD](#)



[EBSCO Host](#)



[INDEX COPERNICUS](#)



[DOAJ \(Directory of Open Access Journals\)](#)



[BASE](#)



[WorldCat](#)



## İÇİNDEKİLER/ CONTENTS

### **Araştırma Makaleleri / Research Articles**

### **Sayfa**

<b>ANOMALİ TESPİTİ VE SUİSTİMAL ÖNLEME: TELEKOMÜNİKASYON SEKTÖRÜNDE BİR UYGULAMA</b> Utku KOC , Özge ÖZALANYALI, Özgür BULUT	1893 – 1905
<b>EFFECT OF DIFFERENT CATALYSTS ON SYNTHESIS OF BIO-BASED POLY (PROPYLENE MALONATE)</b> Ersan EYİLER	1906 – 1913
<b>SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK AÇISINDAN DOĞA DOSTU MALZEMELERİN AKUSTİK KONFORA ETKİSİ: EDİRNE-KALEİÇİ KONUTLARI</b> Pınar KISA OVALI, Buse SUÇEKER	1914 – 1927
<b>TESCİLLİ YIĞMA YAPILARIN DEPREM HASAR GÖREBİLİRLİK DEĞERLENDİRMESİ: FOÇA ÖRNEĞİ</b> Bahar DURMAZ DRINKWATER, Hayriye Oya SAF	1928 – 1946
<b>INVESTIGATION OF TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF POLYMER COMPOSITES PRODUCED WITH NANO CERAMIC REINFORCEMENT UNDER DRY AND ALKYL BASED OIL CONDITIONS</b> Gökçe Mehmet AY, Esad KAYA	1947 – 1954
<b>MODELLING OF SOME EFFECTIVE PARAMETERS IN FINE COAL FLOTATION</b> Derya Öz AKSOY, Sabiha KOCA, Hüseyin KOCA	1955 – 1963
<b>COMPARISON OF THERMAL COMFORT PARAMETERS USING DIFFERENT FEATURE SELECTION ALGORITHMS</b> Resul ÖZLÜK, Türkan GÖKSAL ÖZBALTA	1964 – 1974
<b>GENİŞ-DAR VE DİK-EĞİK AÇIDAN ÇEKİLEN FOTOĞRAFLARIN PARÇA BOYUT ANALİZİNE ETKİSİ: BİR UYGULAMA ÇALIŞMASI</b> Hakan AK	1975 – 1983
<b>MODIFIED ADAPTIVE WEIGHT RAO-3 ALGORITHM FOR CONSTRUCTION TIME-COST TRADE-OFF OPTIMIZATION PROBLEMS</b> Mohammad Azim EIRGASH, Yusuf BALTACI	1984 – 1996
<b>COMPARATIVE ANALYSIS OF MECHANICAL PROPERTIES OF EPOXY COATED AND UNCOATED REINFORCEMENT BAR</b> Kerem AYBAR, Serdal ÜNAL, Ömer KARAGÖZ, Mehmet CANBAZ	1997 – 2004
<b>URBAN DESIGN AND NOISE MANAGEMENT: ENVIRONMENTAL NOISE PROBLEMS AND SOLUTIONS SUGGESTIONS IN MARDIN CITY CENTRE</b> Mehmet Salih AYDIN, Zuhale ÖZÇETİN	2005 – 2016
<b>BİR BOYUTLU ZEMİN TEPKİSİNİN TAHMİNİ: İNÖNÜ HAVZASI ÖRNEĞİ</b> Gizem Nur COŞKUN, Murat TÜRKÖZ, Ebru CİVELEKLER	2017 – 2031
<b>ASENKRON MOTOR RULMAN ARIZA ANALİZİ İÇİN LabVIEW TABANLI GUI TASARIMI</b> Eyüp IRGAT, Abdurrahman ÜNSAL	2032 – 2041



## İÇİNDEKİLER/ CONTENTS

### Araştırma Makaleleri / Research Articles

### Sayfa

**CHARACTERIZATION OF ALIPHATIC COMPOUNDS OBTAINED FROM PROLYSIS OF SUNFLOWER-EXTRACTED BAGASSE**  
Musa ŞÖLENER

2042 - 2046

**Ag İÇEREN Sn FOLYO ANOTLARIN LİTYUM-İYON PİLLERDE ELEKTROKİMYASAL DAVRANIŞI**  
Reşat CAN ÖZDEN

2047 - 2053

**PATH PLANNING CONSIDERING DRIVER PREFERENCES USING ANALYTIC HIERARCHY PROCESS FOR ELECTRIC VEHICLES**  
Mehmet ARIKAN, Sinem BOZKURT KESER, İnci SARIÇİÇEK, Ahmet YAZICI

2054 - 2065

**INSTRUMENTED FIELD DATA-BASED ASSESSMENT ON LOAD TRANSFER BEHAVIOR IN RAMMED AGGREGATE PIER® (RAP) ELEMENTS**  
Ece KURT BAL, Mustafa Kubilay KELEŞOĞLU, Kemal Önder ÇETİN

2066 - 2077

## ANOMALİ TESPİTİ VE SUİSTİMAL ÖNLEME: TELEKOMÜNİKASYON SEKTÖRÜNDE BİR UYGULAMA

<sup>1</sup>Utku KOC, <sup>2</sup>Özge ÖZALANYALI, <sup>3</sup>Özgür BULUT

<sup>1</sup> MEF Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, İstanbul, utku.koc@mef.edu.tr

ORCID No : <https://orcid.org/0000-0001-6699-6195>

<sup>2,3</sup> Turkcell Teknoloji A.Ş., Information&Communication Technologies, Risk Man.&Digital Sales Solutions, İstanbul

<sup>2</sup> ozge.ozalanyali@turkcell.com.tr, ORCID No : <https://orcid.org/0009-0009-8774-2739>

<sup>3</sup> ozgur.bulut@turkcell.com.tr, ORCID No : <https://orcid.org/0009-0002-4651-6232>

Anahtar Kelimeler	Öz
Anomali Tespiti	<p><i>Bu çalışmada, telekom sektöründeki satış kanallarında ortaya çıkan anomalilerin tespitine ve suistimal olabilecek durumların engellenmesine yönelik istatistiksel bir yöntem geliştirilmiştir. Yöntemin geliştirilmesi ve test edilmesi sürecinde 371 farklı satış kanalına ait 9 aylık tüm satış bilgileriyle 340 binden fazla gerçek veri noktası kullanılmıştır. Anomali tespitinde en çok karşılaşılan engellerden biri yöntemin anomali olarak işaretlediği noktaların gerçekten anomali olup olmadığının teyit edilmesindeki zorluktur. Her bir kanalın kendi kontrol grubunu oluşturduğu bu çalışmada ise yöntemin anomali olarak işaretlediği noktaların gerçekten bir anomali olup olmadığı ilgili iş birimi tarafından değerlendirilmiş ve teyit edilmiştir. Her bir satış kanalı için günlük güven aralıkları ayrı ayrı hesaplanmış ve bu aralığın dışına çıkan durumlara hızlı tepki veren bir yöntem kullanılarak olası suistimallerin önüne geçilmiştir. Elde edilen bulgular, önerilen yöntemin anomali tespitinde başarılı olduğunu ve satış süreçlerindeki potansiyel suistimallerin önüne geçtiğini ve dolayısıyla müşteri memnuniyetini artırdığını göstermektedir. Geliştirilen yöntem yüksek performans ve ölçeklenebilirliği sağlamak için çoklu mimari yapısında uygulamaya alınmıştır. Geliştirilen yöntem ve uygulama, güvenlik ve veri bütünlüğü konularında da önemli avantajlar sunmaktadır. İlgili iş birimlerinin hızlı ve etkili kararlar alabilmesi, organizasyonun genel risk yönetimi stratejisine büyük katkı sağlamaktadır. Bu sayede, potansiyel tehditler zamanında tespit edilerek işletmenin güvenlik standartları korunmakta ve sürdürülebilir bir operasyonel çevre yaratılmaktadır. Ayrıca, projenin teknik yapısı anomali tespit sisteminin sürekli iyileştirilmesi hem yazılımın performansını artıracak hem de daha ileri düzeyde veri analizi imkanı sunacaktır. Sonuçlar, telekom şirketlerinin stratejik karar alma süreçlerine önemli katkılarda bulunarak rekabet avantajı sağlamalarına yardımcı olmaktadır.</i></p>
Suistimal Önleme	
Büyük Veri Analizi	
Güvenlik Yönetimi	
Risk Yönetimi	

## ANOMALY DETECTION AND FRAUD PREVENTION: AN APPLICATION IN TELECOMMUNICATIONS

Keywords	Abstract
<p>Anomaly Detection            Fraud Prevention            Big Data Analytics            Security Management            Risk Management</p>	<p><i>This study develops statistical methods to detect anomalies in telecom sales channels to prevent potential misuse. Over 340,000 data points spanning 9 months from 371 different sales channels were utilized during the development and testing of the proposed method. One of the major challenges in anomaly detection is confirming whether the flagged points are indeed anomalies. In this study, each sales channel served as its control group, and the points marked as anomalies by the method are evaluated and validated by the relevant business unit. For each sales channel, daily confidence intervals are calculated separately, and a method providing rapid response is used to prevent potential misuse for cases falling outside these intervals. Findings demonstrate that the proposed method successfully identifies anomalies and prevents potential misuse in sales processes, thus enhancing customer satisfaction. The method is implemented within a multi-architecture structure to ensure high performance and scalability. Additionally, the method and its application offer significant advantages in security and data integrity, enabling quick and effective decision-making by relevant business units, contributing substantially to the organization's overall risk management strategy. This proactive approach safeguards security standards and creates a sustainable operational environment by timely detecting potential threats. Furthermore, the technical structure of the project supports continuous improvement of the anomaly detection system, enhancing software performance and enabling more advanced data analysis. These results provide valuable insights into strategic decision-making for telecom companies, supporting a competitive advantage.</i></p>

Uygulama ve Araştırma Makalesi

Application and Research Article

Başvuru Tarihi : 19.11.2024

Submission Date : 19.11.2024

Kabul Tarihi : 17.11.2025

Accepted Date : 17.11.2025

\* Sorumlu yazar: [utku.koc@mef.edu.tr](mailto:utku.koc@mef.edu.tr), <https://doi.org/10.31796/ogummf.1587899>



Bu eser, Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>) hükümlerine göre açık erişimli bir makaledir.

This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

## 1. Giriş

Bu çalışmada Türkiye'nin lider telekomünikasyon şirketinin 9 aylık 344.232 satış verisi kullanılarak market satış kanallarında oluşan anomalileri tespit etmek ve olası suistimalleri engellemek üzere bir yöntem önerilmiştir. Önerilen yöntemin tespit ettiği anomaliler iş birimi tarafından teyit edilmesi ile alanyazında bir fark katmaktadır. Ayrıca her bir satış kanalının ayrı ayrı değerlendirildiği, kendi kontrol grubunu oluşturduğu yöntem canlı olarak uygulanmasıyla da bir fark oluşturmaktadır. Şirketin farklı satış kanalları bulunmakla birlikte, bu çalışmada özellikle market satış kanalları üzerine odaklanılmıştır. Market kanalı, her bir market zincirinin ayrı bir kanal, her bir satış noktasının ise alt kanal olarak değerlendirildiği bir yapıya sahiptir. Her bir alt kanal, fiziksel bir POS cihazında gerçekleştirilen işlemleri ifade etmektedir. Bu işlemler, TL yükleme veya paket satışı olarak iki ana gruba ayrılmaktadır.

Çalışma temel olarak anomalilerin tespiti olsa da tespit edilen anomalinin bir suistimal olup olmadığı iş birimi tarafından değerlendirilmektedir. Bununla birlikte yöntemin canlı uygulaması anomali düzeyine göre satış kanalını (suistimal değerlendirmesi tamamlanana kadar) geçici olarak kapatmaya olanak sağlamaktadır. Bu sayede önerilen yöntem anomali tespitinin ötesinde suistimal engelleme yöntemi olarak da değerlendirilebilir. Dolayısıyla çalışmamız hem anomali tespiti hem de suistimal tespiti ve engellenmesi alanyazınına katkı sağlamaktadır.

Market kanallarında yapılan satışlarda kullanılan POS cihazları farklı zamanlarda, farklı üreticiler tarafından farklı teknoloji seviyelerinde üretilmişlerdir. Bu sebeple cihazlarda (alt kanallarda) olan satış seçenekleri farklılık gösterebilmektedir. Güncel olmayan bir satış seçeneği bazı alt kanallarda -aktif seçenekler arasında görünmemesine rağmen, kullanılmaya devam edebilmektedir. Böyle bir yanlışlığın sürekli olarak kullanılması suistimal olarak değerlendirilmektedir. Özellikle paket içeriklerinin ve fiyatlarının sıklıkla güncellendiği yüksek enflasyon dönemlerinde bu farklılıklar firmayı zarara uğratmaktadır. Firma, belli coğrafi bölgelere özgü süreli kampanyalar da önermektedir. Bu seçeneklerin sıklıkla başka coğrafi bölgelerde ve süresi dışında kullanımı da suistimal olarak değerlendirilmektedir.

Suistimal ya da anomali olarak değerlendirilebilecek durumlar, gerçekleştirilen işlem sayısı veya işlemin toplam bedeli üzerinden hesaplanmaktadır. Satış adedinde olağandışı yüksek değerler aktif olmayan bir seçeneğin kullanılmasını işaret edebilir. Bunun yanı sıra, bazı alt kanalların satış adedi veya miktarındaki aşırı dalgalanmalar dikkat çekmiştir. Aşırı dalgalanma olan alt kanallar için düşük değerler satış kaybı, yüksek değerler ise suistimal ihtimali olarak değerlendirilebilir. Bu gibi kanalların çok yüksek ya da

düşük satış performansları detaylı bir şekilde incelenmiştir.

Dolandırıcılık veya susitimal tespiti, alanyazında sıklıkla incelenen ve gelişmiş yöntemlerin uygulandığı bir araştırma alanıdır. Özellikle bankacılık ve e-ticaret gibi sektörlerde yapılan çalışmalar, genellikle bireylerin finansal davranışlarının analizi üzerine odaklanmaktadır. Örneğin, kredi kartı dolandırıcılığı tespiti bu alanda en sık karşılaşılan konulardan biridir. Bu çalışmalarda, bir kredi kartı sahibinin veya bireyin alışveriş alışkanlıkları incelenir ve bu kişinin farklı kanallardan yaptığı alışverişlerin anormal olup olmadığı tespit edilmeye çalışılır. Alışveriş yapan kişinin, kredi kartını farklı coğrafi bölgelerde, kısa süre içinde birden fazla kez kullanması veya alışveriş miktarlarında ani bir artış gibi durumlar, potansiyel bir dolandırıcılık vakası olarak değerlendirilir. Dolayısıyla bu tarz çalışmalarda odak noktası, kişinin finansal davranışları ve bu davranışların normal kalıpların dışına çıkıp çıkmadığıdır.

Bizim çalışmamız ise alanyazında sıkça karşılaşılan birey odaklı dolandırıcılık tespiti yaklaşımlarından ayrılmaktadır. Bu çalışmada, odak noktamız alışveriş yapan kişiler değil, bireylere satış yapan kanalların davranışlarıdır. Yani, kredi kartı veya birey üzerinden bir anomali tahmini yapmak yerine, satış yapan market kanallarının satış davranışlarının normal dışı bir durum gösterip göstermediğini analiz ediyoruz. Özellikle telekomünikasyon sektörüne özgü bu çalışmada, şirketin market kanalları üzerinden yapılan TL yükleme ve paket satışlarına odaklanılmaktadır. Burada her bir market kanalı, çeşitli alt kanallar altında organize edilmiş olup, bu alt kanallar fiziksel POS cihazları üzerinden işlem yapmaktadır. Çalışmanın amacı, belirli bir alt kanalın satış davranışında normal dışı, yani anormal bir durum olup olmadığını tespit etmektir.

Dolayısıyla, alanyazındaki dolandırıcılık tespiti çalışmalarından farklı olarak, biz bireysel müşteri hareketlerinden ziyade, satışların gerçekleştirildiği market zincirlerinin ve bu zincirlere bağlı alt kanalların davranış kalıplarını analiz ediyoruz. Kanalların satış adetleri, işlem zamanları, kampanya kullanım şekilleri ve coğrafi dağılımları incelenerek, suistimal veya anomali teşkil edebilecek durumlar tespit edilmeye çalışılmaktadır. Ayrıca, bazı alt kanalların satış rakamlarında gözlemlenen aşırı dalgalanmalar da incelenmiş olup, bu tür davranışların normalden sapmalarının nedenleri araştırılmıştır.

Özetle problem tanımımız her bir satış kanalının günlük satış performansını kendi geçmiş performansı ile karşılaştırarak olağan dışı düşük veya yüksek değerleri tespit etmek üzerine kurgulanmıştır. Olağandışı düşük değerler potansiyel satış kaybı olarak değerlendirilmekte ve ilgili birime yönlendirilmektedir. Olağandışı yüksek satışlar ise anomali olarak

değerlendirilmektedir. Her bir alt kanal için anomali olarak değerlendirilebilecek limitler belirlenmekte ve bu limitler dışındaki satışlara mücade edilmemekte veya bu satış trendleri ilgili birimlerce detaylı incelenmektedir. Telekomünikasyon sektöründe karşılaşılan suistimal risklerini daha geniş bir bağlamda ele alarak, satış kanallarındaki anomalilerin erken tespiti için bir yöntem önerilmektedir.

Makale, bilimsel yazın taramasının ikinci bölümde verilmesi ile devam etmektedir. Üçüncü bölümde veriler hakkında detaylar paylaşılmıştır. Dördüncü bölümde kullanılan yöntemler verilmektedir. Çalışma sonunda önerilen yöntemlerin uygulama detayları beşinci bölümde paylaşılmıştır. Son olarak makale tartışma ve sonuç bölümleri ile tamamlanmıştır.

## 2. Bilimsel Yazın Taraması

Makalenin bu kısmında alanyazındaki ilgili çalışmalar paylaşılmıştır. Çalışmanın konusu alanyazında iki temel alana dayanmaktadır. Bunlar dolandırıcılık tespiti ve önlenmesi ve anomali tespiti olarak ifade edilebilir. Dolandırıcılık tespiti ve önlenmesi alanları özellikle e-ticaret'in gelişmesi ile oldukça ilgi gören bir alan olmuştur.

Rodrigues, Policarpo, Silveira, Righi, Costa, Barbosa, Antunes, Scorsatto ve Arcot (2022), e-ticarette dolandırıcılık tespiti ve önlenmesi üzerine yazılmış 64 makaleyi inceleyen bir yazın taraması gerçekleştirmişlerdir. Dolandırıcılığın özellikle kredi kartı kullanımı ve çevrimiçi ödemeler bağlamında daha belirgin hale geldiği vurgulanmaktadır. Ancak, e-ticaret için dolandırıcılığı önleme stratejilerine dair literatürde önemli bir eksiklik bulunduğu da dikkat çekmektedir. Bu alanda Çok Katmanlı Algılayıcı (Multi-Layer Perceptron) ve En Yakın Komşu (K-Nearest Neighbors) gibi algoritmalar öne çıkarken, e-ticaret sistemlerinde otomatik bot tespiti stratejilerinin yeterince ele alınmadığı da belirtilmektedir.

Öte yandan anomali tespiti konusunda da uzun yıllara yayılan bir alanyazın bulunmaktadır. Bu konudaki çalışmaların alt kolu olarak zaman serileri üzerinde anomali tespiti konusunda Blázquez-García, Conde, Mori ve Lozano (2021) bir özet ve tarama çalışması yayımlamışlardır. Yaptığımız çalışma Blázquez-García ve diğ.'nin (2021) çalışması aykırı değer tespit tekniğini karakterize eden temel unsurlara dayalı bir sınıflandırma sunmaktadır. Biz de çalışmamızın detaylarını bu sınıflandırmayı da kullanarak paylaşacağız.

Aykırı değer "diğer gözlemlerden olan farkının yüksekliği başka bir mekanizma tarafından üretildiği şüphesini uyandıran değer" olarak tanımlanabilir (Hawkins, 1980). Aykırı değerler beklenen davranışı izlemeyen gözlemler olarak düşünülebilir. Bu tanımla aslında iki tür aykırı değer ön plana çıkmaktadır.

İstenmeyen (hatalı) veri ve ilgilenilen (anomali oluşturan) veri. İstenmeyen veri, veri kümesinin kirliliğine bağlı aykırı değerlerdir. Sensörlerden gelmesi gereken ancak hatalı gelen veriler, bir satış verisindeki negatif değerler hatalı verilere örnek gösterilebilir. Bu grupta tespit edilen aykırı değerler genellikle temizlenir ve kullanılmaz. Öte yandan bu çalışmayı ilgilendiren asıl konusunu oluşturan aykırı değerler ikinci gruptadır. İkinci gruptaki aykırı değerlerin tespiti ve incelenmesi anomali tespiti olarak ifade edilebilir. Dolandırıcılık tespiti buna bir örnektir, çünkü ana amaç aykırı değerlerin kendisini tespit etmek ve analiz etmektir.

Xu, Liu ve Yao (2019) yayımladıkları tarama çalışmasında anomali tespiti konusundaki zorluklara dikkat çekmişlerdir. Yüksek boyutlu ve karma veri türlerinde geleneksel mesafe ölçütlerinin yetersiz kaldığını, komşu temelli yöntemler için ise doğru komşu sayısının belirlemenin kritik olduğunu ifade etmektedir. Ayrıca, nadir görülen anomaliler için doğru tespit performansını değerlendirmek de büyük bir zorluktur. Bunun en temel sebebi yöntem tarafından anomali olarak ifade edilen verinin gerçekten (başka bir mekanizma tarafından üretilen) anomali olup olmadığının tespitinin zorluğudur.

Anomaliler genellikle nadir olduğundan ve gerçek verilerde doğrulama verisi çoğu zaman bulunmadığından, tespit performansını etkili ve kapsamlı bir şekilde değerlendirmek de önemli bir zorluktur. Bizim çalışmamızda ise alanyazından farklı olarak yöntemler tarafından anomali-aykırı değer olarak önerilen verinin gerçekten bir anomali oluşturup oluşturmadığı iş birimi tarafından denetlenmiş ve teyit edilmiştir.

Çalışmamızda verileri bir zaman serisine çevirerek analiz ettik. Zaman serilerinde aykırı değer tespiti verinin seri şeklinde ifade edilmesinden ötürü genel yöntemlere göre farklılık göstermektedir. Blázquez-García ve diğ. (2021) tarafından ifade edilen taksonomiye göre aykırı değer tespiti girdi verisine göre tek değişkenli ya da çok değişkenli olabilir. Bizim çalışmamız çok değişkenli zaman serisi kullanmaktadır. Çok değişkenli zaman serilerinde anomali tespit yöntemlerinden birisi zaman serilerini ayırıp tek değişkenli olarak değerlendirmek ve her birinde bir anomali tespit etmektir. Yine aynı taksonomide aykırı değeri noktasal (tek bir değer) veya alt-seri olarak tespit eden yöntemler olarak ayırabiliriz. Bizim çalışmamızda önerdiğimiz yöntem noktasal aykırı değer tespit etmek üzere kurgulanmış olsa da, seri halinde oluşan aykırı değerleri de kısmen tespit edilebilmektedir.

Aykırı değeri beklenenden anlamlı derecede farklı bir değer olarak tanımladığımızda zaman serilerindeki analiz aslında bir beklenen değer aralığı hesaplamaya ve bir sonraki değer bu aralıkta olup olmadığının

veya beklenen değere uzaklığının tespiti olarak özetlenebilir. Beklenen değere olan uzaklık düşünüldüğünde anomali tespiti bir tahminleme problemine dönüşmektedir.

Çok değişkenli zaman serilerinde anomali tespiti konusunda Zhou, Qin, Xu, Sadiq, ve Yu (2018) deniz tabanı gözlem verilerini incelemişlerdir. ARIMA modeli geliştirilerek kayar pencere kullanımıyla veri kalitesi(anomali) kontrolü yapılmıştır. Ayrıca, veri kalitesi sonuçlarını ve işleme sürecini tanımlamak için bir kalite kontrol sistemi önerilmiştir. Yine bu çalışmada standart kalite kontrol yöntemleri ile beklenen değerden 2 veya 3 standart sapma uzaklıkta olan değerler anomali olarak ifade edilmiştir.

Bizim çalışmamızda Zhou ve diğ. (2018) çalışmasına benzer şekilde çok değişkenli veri seti oluşturulmuş, tek değişkenli seriler ayrı ayrı incelenmiş, beklenenden sapma miktarı yüksek olan değerler uzman görüşü ile değerlendirilmiştir.

Munir, Siddiqui, Dengel, ve Ahmed (2019) önerdikleri DeepAnT yaklaşımında da benzer bir yaklaşım uygulamaktadır. Bir zaman serisi tahmin modülü, belirlenen ufuktaki bir sonraki zaman damgasını tahmin etmek için yapay öğrenme yöntemlerini kullanır. Zaman serisinden bir pencereyi girdi olarak alan bu modül, bir sonraki zamandaki beklenen değeri tahmin etmeye çalışır. Tahmin edilen değer, normal veya anormal olarak işaretlenmek üzere anomali tespit modülüne iletilir. Bizim çalışmamızda da buna benzer bir tahmin / işaret yöntemi kullanılmakla birlikte, tahmin ve işaretleme yöntemlerinin istatistik temelli oluşu ve anomali olarak işaretlenen noktaları uzman görüşü ile teyit edilmesi yönünden farklılık göstermektedir.

### 3. Veri ve Yöntem

Bu çalışmada gerçek bir telekomünikasyon firmasının, 01.11.2021 ile 31.07.2022 tarihleri arasındaki 273 iş gününe ait veriler kullanılmıştır. Veriler sadece market kanalı ile yapılan satışları içermektedir. Toplam 6 market grubu bulunmaktadır. Her bir market grubu bir satış ana kanal olarak adlandırılmaktadır. Bazı market gruplarına ait her bir fiziksel market veya büyük marketler için her bir fiziksel POS cihazının verileri ayrı ayrı işlenmektedir. Bu tip durumlar ile 6 ana satış kanalına bağlı 371 adet alt kanal için veriler bulunmaktadır. Bu çalışma kapsamında her bir en detaylı POS cihazı bir kanal olarak ifade edilmektedir. Tüm kanallarda toplam 344.232 adet işlem bulunmaktadır. Ancak, bazı ana kanallar için alt kanal bilgisi mevcut değildir. Bunun nedeni, satış işlemlerinin gerçekleştirildiği POS cihazlarının firmaya değil, satış kanalına ait olmasıdır. Dolayısıyla, her kanal için coğrafi detaylara ulaşmak mümkün olmamıştır. Eldeki veride her bir işlem için ayrı bir satır bulunmaktadır. Her bir satırda işlem yapılan telefon numarası, ana

kanal / alt kanal bilgileri/ satın alınan paket kodları ve ödenen bedelleri, işlemin yapıldığı tarih ve saniye bazında zamanı, ödeme aracı (nakit / kredi kartı) ve işlemin gerçekleşme durumu bulunmaktadır. Çalışmada telefon numarası bilgileri maskelenmiş olduğundan hiç bir kişisel veri kullanılmamıştır. Bu çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Yöntem kısmı verilerin temizleme ve düzenlemesi ile başlamış ve yapılan ön analizlerle verinin haftalık, aylık, günlük (saatlere bağlı) bir trend veya sezonsallık gösterip göstermediği incelenmiştir. Sonrasında klasik zaman serisi analizi için iki performans metriği tanımlanmıştır. Bu metrikler için güven aralığı hesaplanmış ve klasik bir yaklaşım ile güven aralığının dışındaki noktalar anomali olarak işaretlenmiştir. Bunlara ek olarak satış verisinin dinamik ve volatil yapısına uygun iki ek performans metriği tanımlanmıştır. Bu performans metriklerinin şüpheli derecede yüksek seyrettiği durumlar da anomali olarak işaretlenmiştir. Özetle yöntemimiz klasik zaman serisi tahmin ve güven aralığına ek olarak volatilité üzerine istatistiksel yöntemler kullanan hibrit bir yöntemdir. Çalışmanın bu bölümünde veri ve yöntemin detayları verilmiştir.

### 3.1 Veri Temizleme ve Düzenleme

Çalışmamızda her alt kanalın satışları, birbirinden bağımsız coğrafi bölgelerde gerçekleşen işlemler olarak ele alınmıştır. Bu sayede, coğrafi faktörlerin ve bölgesel pazar farklılıklarının satış verilerine olan etkilerini daha iyi izleyebilmek mümkün hale gelmiştir. Alt kanalların coğrafi olarak ayrılması, analiz sürecinde her bir kanalın kendine özgü pazar dinamiklerini anlamaya yönelik daha spesifik bulgular ortaya koymamıza olanak tanımıştır. Böylece, bölgesel pazarlar arasındaki farkları göz önünde bulundurarak anomalilerin daha tutarlı bir şekilde tespit edilmesi amaçlanmıştır. Çalışmanın sınırları dahilinde, aynı coğrafi bölgede veya birbirine fiziksel olarak yakın konumlanan marketlerin satış ilişkileri göz ardı edilmiştir. Bu varsayım, marketlerin satışlarının birbirinden bağımsız olarak değerlendirileceği bir analiz yöntemi benimsenmesine dayanmaktadır. Marketlerin fiziksel yakınlığı dolayısıyla oluşabilecek ortak müşteri kitlesi veya pazar dinamikleri göz önüne alınmamış, bu marketler bağımsız birimler olarak ele alınmıştır. Bu tercih, analiz sürecinde her bir alt kanalın bireysel performansını ve potansiyel anomali göstergelerini izlemeye yönelik bir yaklaşım benimsenmesini sağlamıştır.

Yapılan çalışmanın temel amaçlarından birisi tespit edilen anomalinin bir suistimale işaret edip etmediğidir. Dolayısıyla suistimale işaret etmesi mümkün olmayan anomaliler kısmen daha önemsiz olarak değerlendirilebilir. Çalışma kapsamındaki 273 iş gününün en fazla 30 işgününde aktif olarak veri olan

kanallar düşük hacimli olarak değerlendirilmiştir. Düşük işlem hacmine sahip alt kanalların, anlamlı bir analiz yapılabilmesi için gerekli yeterli veri sağlamadığından belirli bir işlem eşiğinin altında kalan alt kanallar, suistimal potansiyeli bakımından değerlendirilmemiş ve analizden çıkarılmıştır. Söz konusu kanallarda yeterli satış yoğunluğu olmadığı için, bu alanlarda gerçekleşebilecek anormal satış faaliyetlerini belirlemek ve izlemek mümkün olmayacaktır. Bu adım, analiz sonucunun daha güvenilir ve sağlıklı bir veri tabanına dayanmasını sağlayarak, dikkatlerin sadece anlamlı veri setlerine odaklanmasını mümkün kılmaktadır.

Satış işlemleri sırasında bireysel veya sistemsel nedenlerle işlem red veya iptal edilebilmektedir. Böyle durumlarda aynı işlem tekrar edilebilmektedir. Çalışmamızda toplam işlem adedi ve bedeli hesaplanırken red veya iptal işlemleri analiz dışı bırakılmıştır. Bunun nedeni, gerçekleşmeyen işlemlerin anomalileri veya suistimal faaliyetlerini belirlemede yanıltıcı olabileceği düşüncesidir. Gerçekleşen işlemler, analiz sürecinde anlamlı sonuçlar elde edilmesini sağlar çünkü her bir işlem doğrudan sonuca ulaşmış ve kanalın işlem hacmine katkıda bulunmuştur. Bu veri seti üzerinden yapılan değerlendirme, gerçek satış aktivitelerinin izlenmesini kolaylaştırarak anomalileri daha güvenilir bir şekilde belirlemeye olanak tanır.

Çalışmada, her alt kanalın günlük bazda gerçekleştirdiği satış adedi ve bu satışların toplam bedeli analiz edilmiştir. Bu özet veriler, her alt kanalın günlük performansını izlemek ve olası anomali durumlarını tespit etmek açısından temel oluşturmuştur. Satış adedi ve bedel verileri, kanalların hem hacim hem de finansal anlamda ne düzeyde bir işlem yoğunluğuna sahip olduğunu gözlemlemek için kullanılmıştır. Ayrıca, satışların zaman içerisindeki dağılımının izlenmesi, dönemsel veya ani değişimlerin tespitine olanak sağlayarak olası suistimalleri daha belirgin hale getirmektedir.

Analizde kullanılan veriler, bir zaman serisi yaklaşımı ile değerlendirilmiştir. Zaman serisi analizi, satışlardaki dönemsel trendlerin, anomalilerin ve sapmaların izlenmesini sağlar. Zaman içerisindeki satış hacmindeki olağan dışı değişiklikler, özellikle belirli dönemlerde meydana gelen ani yükselişler veya düşüşler, dolandırıcılık potansiyelini ortaya çıkarabilir. Bu tür zaman serisi analizleri, her bir alt kanalın uzun vadeli performansını değerlendirerek, kanallara özgü olağan dışı davranışları ortaya çıkarmak açısından önemlidir.

Anomali tespit sürecinde sadece temel satış verilerini kullanmak yeterli olmadığından, ek özellikler üreterek verinin daha derinlemesine analiz edilmesi hedeflenmiştir. Bu bağlamda hem temel özellikler hem de üretilmiş özellikler kullanılarak daha kapsamlı bir analiz yapılmıştır.

Anomalinin ne olduğu konusu, mevcut alanyazında belirsizliğini koruyan bir konudur. Anomali tanımlamaları, sektör ve bağlama göre değişiklik gösterebilmekte, bu da tespit sürecinde birtakım zorluklara yol açmaktadır. Bir satış kanalında anomalinin ne zaman meydana geldiğini belirlemek zor olabilir, çünkü anormallikler her zaman açıkça görülmeyebilir ve çeşitli faktörlerden etkilenebilir. Yanlış bir tespit, firmanın yanlış kararlar almasına ve dolayısıyla mali kayıplara neden olabilir. Bu tür hatalar, operasyonel süreçlerin verimsizliği ile sonuçlanabileceği gibi, firmaya müşteri memnuniyeti ve itibar kaybı da yaşatabilir.

Finansal verilerdeki düşük sinyal-gürültü oranı, anomalileri tespit etme sürecini daha da zorlaştırmaktadır. Veriler çoğunlukla büyük bir gürültü içerir ve normal işlemlerle anomaliler arasındaki fark oldukça belirsiz olabilir. Sinyal-gürültü oranının düşük olduğu durumlarda, normal işlemlerden sapmaları ayırt etmek için kullanılan yöntemlerin yüksek doğrulukta olması gerekmektedir. Bu nedenle, sadece anomalilerin tanımlanması değil, bu anomalilerin doğru bir şekilde tespit edilmesi ve doğru sınıflandırılması da büyük önem taşımaktadır.

Anomalilerin tespiti kadar, bir suistimal vakası olduğunda bu durumu önlemek de büyük önem taşır. Sadece geçmiş verilere bakarak bir suistimalin tespiti, sürecin tamamlanmış kısmını temsil eder; ancak suistimalin önlenmesi, firmanın gelecekte karşılaşılabileceği kayıpları minimize etmek için kritik bir adımdır. Bu nedenle, potansiyel suistimal durumlarının hızlı bir şekilde fark edilmesi ve gerekli önlemlerin alınması için dinamik ve adaptif bir yaklaşım benimsenmelidir.

Anomali tanımı, sektörlerdeki veri çeşitliliği ve dinamik yapılar nedeniyle her zaman açık ve net bir biçimde yapılamamaktadır. Anomali ile normal durumlar arasındaki sınırlar bulanık olabilir ve literatürdeki bu muğlaklık nedeniyle denetimli (supervised) öğrenme yöntemleri yerine denetimsiz (unsupervised) öğrenme yöntemlerinin kullanılması tercih edilmiştir. Denetimsiz öğrenme yöntemleri, bir etiketleme ihtiyacı olmadan anormal örüntüleri tespit edebilmek için kullanılabilir. Bu yöntemler, verinin yapısal özelliklerini inceleyerek normal davranışların dışına çıkan durumları yakalayabilmek açısından etkili olmuştur. Özellikle bilinmeyen veya öngörülemeyen suistimal vakalarını tanımlamak için denetimsiz algoritmaların kullanılması, firmanın dinamik yapısına uyum sağlamakta ve sistemdeki anomali davranışları daha doğru bir şekilde tespit etmektedir.

Biz de bu çalışmamızda her bir kanalı kendi kontrol grubunu oluşturacak şekilde günlük satış adedinin veya toplam bedelin beklenenden anlamlı derecede saptması veya takip eden günler içinde satışların volatilitésinin yüksek olması olarak ifade ettik. Bu anlamda

kullandığımız tanım ve metrikler şunlardır. Anomali tespiti için ilk olarak kullanılan temel özellikler, her bir kanalın günlük satış performansını ölçmek için kullanılmıştır:

**Günlük Satış Adedi:** Her gün yapılan toplam gerçekleşmiş satış adedidir. Bu veri, işlem hacminin önemli bir göstergesidir.

**Günlük Satış Bedeli:** Günlük gerçekleştirilen satışların toplam parasal değerini ifade eder. Kanalın finansal performansını değerlendirmede kullanılır. Günlük satış adedi ve günlük satış bedelinin ayrı ayrı ele alınmasının sebebi ise aynı kanalda sürekli olarak yüksek bedelli paketlerin satılmasının da bir anomali olarak ifade edilmesidir.

Xu, Liu ve Yao (2019) tarama çalışmasında da belirtildiği gibi klasik metrikler anomali tespitinde yetersiz kalabilmektedir. Daha derin bir analiz yapabilmek amacıyla yukarıdaki temel verilere ek olarak çeşitli üretilmiş özellikler de hesaplanmıştır. Bu şekilde alanyazından farklı bir yaklaşım sergilenmiştir.

- **Aktif Gün Oranı:** Bir kanalın aktif olduğu günlerin (pozitif satış yaptığı günler) toplam iş gününe oranıdır. Bu metrik, kanalın düzenli olarak çalışıp çalışmadığını gösterir. Bu oran düşük olduğunda, kanalın operasyonel performansında bir aksaklık olabileceğine işaret eder.
- **Günlük Ortalama Satış (Sadece Aktif Günler İçin):** Bir kanalın sadece aktif olduğu günlerde ortalama ne kadar satış yaptığını gösterir. Yeni başlayan kanallar için bu ortalama hesaplaması, başlangıçtaki düşük hacimli satışlardan kaynaklanan sapmalardan etkilenmemesi için tasarlanmıştır. Bu şekilde, daha adil ve doğru bir değerlendirme sağlanır.
- **Hareketli Ortalama ve Standart Sapma (7 Günlük ve 30 Günlük):** Her bir gün için son 7 günün ve son 30 günün satış verileri kullanılarak hareketli ortalama ve standart sapmalar hesaplanmıştır. Bu sayede, kanalın kısa vadeli ve uzun vadeli performans trendleri gözlemlenebilir. Bu hesaplamaların sonucunda, ilgili gün için değişim katsayısı (CV) da belirlenmiştir. CV, kanalların satış hacimlerindeki dalgalanmaların ölçülmesi açısından önemli bir göstergedir.

### 3.2. Ön Analiz

Çalışmanın bu kısmında yapılan ön analizler ve bunların sonuçları paylaşılmıştır. Ön analizlerin amacı, veriyi zaman serisine çevirmeden önce, günlük veya saatlik bir trendin olup olmadığını tespit etmektir. Bu aşamada verinin her bir alt kanalın satış verileri, haftanın günlerine, ayın günlerine ve günün saatlerine göre detaylı bir şekilde analiz edilmiştir. Amacımız, satış trendlerinde herhangi bir sezonsallık ya da belirgin bir model olup olmadığını tespit etmek ve bu

verilere dayalı olarak olası anomalileri belirleyebilmek olmuştur.

Her bir alt kanal için haftanın günlerine göre satışlar incelenmiş ve satış faaliyetlerinde haftalık bazda belirgin bir sezonsallık ya da model tespit edilmemiştir. Bu durum, haftanın herhangi bir günü ile satış hacmi arasında anlamlı bir fark bulunmadığını göstermektedir. Genelde pazartesi, hafta ortası veya hafta sonları gibi belirli günlerde yoğunlaşan satış trendleri gözlemlenmemiştir. Satışlar haftanın günlerine dengeli bir şekilde dağılmaktadır, bu da kanal bazında sabit bir pazar aktivitesi olduğunu işaret etmektedir. Hafta sonu / hafta içi değişkenliğinin çok sınırlı olduğu, analiz açısından önemli bir katkı sağlamayacağı iş birimi tarafından da teyit edildiğinden haftanın günü bilgisine yer verilmesine gerek görülmemiştir.

Faturaların ayın belirli günlerde olduğu birçok sektörden biri de telekomünikasyon sektörüdür. Fatura kesim günlerinin ayın belirli günlerine toplanmış olması durumunda fatura günlerinin yakınında bazı aktivite artışları gözlemlenebilmektedir. Ancak market kanallarından yapılan satışlar faturasız hatlara özgü olduğundan ayın günlerine bağlı bir analiz gerekemeyebilir. Yine de ayın günlerine göre bir değişkenlik olup olmadığını tespiti için satışlar ayın günlerine göre de analiz edilmiştir. Belirgin bir sezonsallık ya da trend tespit edilememiştir. Ayın başı, ortası veya sonu gibi belirli günlerde satışların artışı ya da düşüşü gibi sistematik bir davranış gözlenmemiştir. Bu da kanalların satış performanslarının ay içinde stabil olduğunu ve ayın herhangi bir gününde anormal bir yoğunluk olmadığını ortaya koymaktadır. Olası suistimal vakaları açısından da bu stabilite önemli bir bulgu olarak değerlendirilmektedir, çünkü anormal bir odaklanma veya satış artışı söz konusu değildir.

Satış saatlerindeki yoğunluk değişiminin doğrudan kanalın kendi iç özelliği olan mağaza açılış kapanış saatleriyle ilgisi vardır. Kanalın bulunduğu coğrafi bölgeye olan bağlılığı genel trendlerin önüne geçebilmektedir. Örneğin yazlık bölgelerdeki zincir marketlerin çalışma saatleri ile merkezi bölgelerdekilerinki yıl içinde farklılık gösterebilmektedir. Satışlar günün farklı saat dilimlerine (sabah, öğlen, akşam, gece) göre ayrıntılı olarak incelenmiş ve alt kanallar arasında bu saat dilimleri arasında belirgin bir farklılık gözlemlenmemiştir. Sabah, öğlen, akşam veya gece yapılan satışların oranları incelendiğinde, bu oranların yıl içinde farklı aylarda ya da haftanın günlerinde önemli bir değişkenlik göstermediği belirlenmiştir. Yani, günün farklı saatlerinde yapılan satışlar yıl genelinde tutarlı bir dağılım göstermiştir. Ayrıca hafta içi ve hafta sonu arasında da satışların gerçekleşme saatleri açısından anlamlı bir fark bulunmamıştır. Her iki dönem için de satış saatleri benzer bir dağılım

göstermektedir. Bu sebepler üzerine satış saati üzerine detaylı bir analiz yapılmaması kararlaştırılmıştır.

Bu bulgular, alt kanalların satış faaliyetlerinin zaman içerisinde oldukça sabit kaldığını, önemli bir sezonsallık veya dalgalanma olmadığını ortaya koymaktadır. Bu durum, anomalilerin tespiti için sabit bir temel oluşturmakta ve herhangi bir ani değişiklik veya olağan dışı satış davranışı olup olmadığını belirlememize olanak tanımaktadır. Analiz sürecinde karşılaşılan bu tutarlılık, daha sonraki aşamalarda potansiyel suistimal vakalarını daha net bir şekilde tespit edebilmemizi sağlayacaktır.

### Performans Metrikleri

Anomali tespiti sürecinde, satış verilerinin dinamik yapısını daha iyi kavrayabilmek ve olağan dışı davranışları belirleyebilmek amacıyla üç temel performans metriği tanımlanmıştır. Bu metrikler, her bir alt kanalın günlük ve haftalık satış performansını ölçmekte ve anormal durumların daha net bir şekilde belirlenmesine olanak tanımaktadır.

**Günlük Satış Adedi ve Bedeli:** Anomali tespitinde ilk kullandığımız ilk metrik, her bir alt kanalın günlük gerçekleştirdiği satış adedi ve bu satışların toplam bedelidir. Satış adedi, bir alt kanalın işlem hacmini gösterirken, toplam satış bedeli, yapılan işlemlerin parasal karşılığını ifade eder. Günlük bazda bu iki veri, normal satış hacmi ile sapmaların karşılaştırılmasında kritik bir rol oynamaktadır. Normalde, kanal için günler ve haftalar içinde düzenli ilerleyen satış adedi ve bedelinin, ani ve beklenmedik artış veya düşüş göstermesi, olası bir anomalinin habercisi olabilir. Bu nedenle, bu iki gösterge analiz sürecinde temel taşlardan biri olarak kullanılmıştır. Satış adedi veya günlük toplam bedelin ani bir şekilde yükselmesi veya düşmesi, potansiyel suistimal vakalarını belirlemede önemli ipuçları sağlamaktadır.

**Satış Adedi ve Bedeli İçin Haftalık Volatilité (Değişkenlik):** Her bir alt kanalın satış performansı diğerlerinden farklılık gösterir. Dolayısıyla kanallar hep bir arada değil ayrı ayrı değerlendirilmelidir. Ancak her bir kanal için de özellikle birbirini takip eden günlerde çok değişken bir satış beklenmez. Bunu kontrol etmek için ayrı bir volatilité metriği kullandık. Bu volatilité metriği ile alanyazındaki klasik zaman serisi tahmin ve güven aralığı yaklaşımına ek bir katkı sağlamış oluyoruz.

Volatilitéyi ölçmek için kullandığımız metrik, satış adedi ve satış bedelinin haftalık bazda değişim katsayısı (Coefficient of Variation, CV) ile hesaplanmasındadır. CV, bir veri setinin ortalamasına göre standart sapmasının oranını verir ve verinin ortalamasına kıyasla ne kadar değişkenlik gösterdiğini ifade eder. Bu yöntem, satış performansındaki dalgalanmaları daha net bir şekilde ölçmeyi sağlar. Satış adedi ve bedelinde ortalamanın üzerinde bir

dalgalanma, o kanalda olağandışı bir durumun habercisi olabilir.

CV'nin yüksek olduğu durumlar, günlük satış adedi ve bedelinde beklenenden fazla değişkenlik olduğunu gösterir ve bu, olası bir suistimal ya da anormal faaliyet ihtimalini işaret eder. Özellikle CV'nin farklı dönemlerde önemli ölçüde artış göstermesi, kanalın düzenli satış döngüsünden saptığını ve analiz edilmesi gereken bir durum olduğunu ortaya koyar. Bu nedenle, haftalık satış adedi ve bedeli için hesaplanan CV, kanalların satış performansındaki kısa vadeli sapmaları belirlemek ve riskleri değerlendirmek için kritik bir metrik olarak kullanılmıştır.

Değişim katsayısı, ortalamaya göre standardize edilmiş bir ölçü olduğu için kanallar arası karşılaştırma yaparken de oldukça kullanışlıdır. Her kanal için hesaplanan CV, kanalın satışlarının kendi geçmiş verisine göre normal mi yoksa anomalik mi olduğunu daha objektif bir şekilde değerlendirmeyi mümkün kılmaktadır.

**Üst Üste Sıfır Gün Sayısı:** Son performans metriği ise, her bir alt kanal için üst üste sıfır satış günü sayısıdır. Bir alt kanalın uzun bir süre boyunca satış yapmaması, özellikle ticari olarak aktif olduğu bilinen bir kanal için anormal bir durum olarak değerlendirilmektedir. Üst üste belirli bir sayıda sıfır satış günü, kanalın faaliyetlerinde bir duraksama ya da aksama olduğunu gösterebilir. Bu durum, bir teknik arıza veya operasyonel problem ile ilişkilendirilebilir. Öte yandan, sıfır satış günü sayısının yüksek olması, kanalın normal işleyişine ilişkin beklentilerden sapma olduğunu gösteren önemli bir metrik olarak ele alınmaktadır. Bu metrik, sadece suistimal değil, aynı zamanda fırsat kaybı (opportunity lost) açısından da kritik öneme sahiptir. Uzun süre boyunca satış yapmayan kanallar, operasyonel veya stratejik problemlerle karşı karşıya olabilir ve bu fırsat kaybı durumunun tespiti edilmesi gereklidir.

Bu üç metrik, birlikte değerlendirildiğinde, her bir alt kanalın satış davranışlarını detaylı bir şekilde analiz etme ve olağan dışı durumları belirleme imkanı sunmaktadır. Satış adedi ve bedelindeki günlük değişiklikler, haftalık volatilité ve sıfır gün sayısı, anomalilerin belirlenmesinde güçlü göstergeler olarak kullanılmıştır. Bu göstergeler, kanalların operasyonel faaliyetlerinde tutarlılık sağlarken, anormal durumları etkin bir şekilde izleyip, suistimal vakalarının önüne geçme noktasında önemli katkılar sağlamaktadır.

### Güven Aralığı ve Değişim Katsayısı (Coefficient of Variation-CV):

Bu çalışmada kullanılan yöntem, her bir gün için son 7 günün ortalamasını ve son 30 günün standart sapmasını kullanarak güven aralığı (confidence interval) ve CV hesaplamalarına dayanmaktadır. Bu

yöntem, her gün için aşağıdaki adımlarla uygulanmıştır:

- **Güven Aralığı (Confidence Interval):** Her gün için son 7 günün ortalamasıyla ve son 30 günün verileri kullanılarak standart sapma hesaplanmış, birlikte bir güven aralığı oluşturulmuştur. Bu güven aralığı, %98 güven seviyesinde şu formülle hesaplanmıştır:
- **Güven aralığı = Ortalama  $\pm$   $t_{\alpha}$  \* Standart Sapma:** Güven aralığının üst veya alt limitlerinin dışına çıkan satış değerleri, olası bir anomalinin işareti olarak değerlendirilmiştir. Böylece, geçmiş verilerin normal dağılımı çerçevesinde kanalların normal performans aralığı belirlenmiş ve bu aralıktan sapmalar dikkatle izlenmiştir.
- **Değişim Katsayısı (CV - Coefficient of Variation):** Değişim katsayısı, ortalamaya göre standart sapmanın oranını gösterir ve her gün için hesaplanan güven aralıklarının yanı sıra kullanılmıştır. CV, satış verilerindeki dalgalanmaların ne kadar değişken olduğunu ve ortalamadan ne kadar saptığını ölçer. Özellikle, son 7 günün ortalaması ve son 30 gün boyunca hesaplanan standart sapma baz alınarak günlük CV hesaplanmıştır. CV'nin yüksek olduğu durumlar, satış performansında önemli dalgalanmalar olduğunu işaret eder ve bu durumlar olası bir anomali olarak değerlendirilmiştir.

Bu iki yöntem birlikte kullanılarak, her bir kanalın satış davranışları hem kısa hem de uzun vadeli perspektiften izlenmiştir. Güven aralığı ve CV yöntemleri anlık değişikliklerin daha hassas bir şekilde izlenmesini sağlamıştır. Böylece, satış verilerinde ani ve anormal değişikliklerin tespiti daha etkin bir şekilde yapılmıştır.

#### 4. Bulgular

Yapılan çalışma ve analizler sonucunda sonucunda, beklenen değer aralığının tespitinde %98 güven değerini kullandık. Her bir alt kanal için güven aralığını farklı üç yöntem ile hesapladık. İlk yöntemde hem beklenen değer hem de standart sapma bilgilerini son 30 günün verilerini kullanarak hesapladık. Gün içinde (önceki 30 günün verileri kullanılarak hesaplanan) bu aralığın dışında bir satış adedi veya satış bedeli olduğunda bunu anomali olarak ifade ettik. Bu yöntem aslından 30 günlük hareketli ortalama ve etrafındaki bir güven aralığı olarak ifade edilebilir. Hareketli ortalama, verideki trendi takip ettiğinden haftalık değişimlere çok fazla duyarlı olmaktadır. Bu duyarlılık sebebiyle haftalık artış trendleri sürekli olarak anomali olarak değerlendirilmektedir.

İkinci yöntemde ise sadece son 7 günün verilerini kullandık. Bir başka deyişle 7 günlük hareketli ortalama etrafında 7 günlük standart sapma bilgileri ile

bir güven aralığı oluşturduk. Bu aralığın dışında olan bir satış adedi veya toplam bedeli bir anomali olarak değerlendirdik. Bu yöntemde ise standart sapmanın (özellikle önceki yöntemle göre) yüksek olması sebebiyle anomali olan noktalar tespit edilememiştir.

Son olarak satış noktası bazında trendlerdeki değişimi yakalaması açısından son 7 günün ortalamasını ve satış noktasının kendi varyansın daha iyi ifade eden 30 günlük standart sapmayı kullandığımız üçüncü bir yöntem geliştirdik. Bu yöntem hem haftalık trend değişimlerini göz önüne almakta hem de varyansın daha sağlıklı bir biçimde modele dahil edilmesini sağlamaktadır.

Yöntem bölümünde ifade edildiği üzere Değişim Katsayısı (CV - Coefficient of Variation) değeri tüm satış kanalları için ve tüm günler için hesaplanmıştır. Bu konuda Tran ve Tran (2016) CUSUM tablolarında değişim katsayısının etkinliği üzerinde çalışma yapmışlardır. Değişim katsayısının anomali tespitinde kullanımı konusunda Tran Heuchenne ve Thomassey (2020) çok değişkenli zaman serilerinde değişim katsayısının anomali tespitinde kullanımı adına bir çerçeve önermiştir. Tekstil endüstrisinde yapılan bir vaka çalışmasından bu yöntemi bir kontrol grafiği ile nasıl kullanılabileceğine dair bir örnek paylaşmışlardır (Tran ve diğ., 2022). Biz bu çalışmada detaylı bir CUSUM tablosu kullanmasak da Değişim Katsayısının sürekli olarak yüksek seyrettiği durumları bir anomali tespit mekanizması olarak kullandık.

Dokuz aylık verileri kullanarak yaptığımız çalışmada tespit edilen anomali listesinde 24 adet kanal tespit edilmiştir. Bu kanallara ait özetleyici istatistik bilgiler Tablo 1'de paylaşılmıştır. Tabloda ilk sütun kanal adını, ikinci sütun ise analiz edilen toplam 273 iş gününün ne kadarında aktif bir satış olduğunu ifade etmektedir. Üçüncü sütun aktif olan günlerdeki ortalama satış adedini, son olarak dördüncü sütun ise aktif olan günlerdeki ortalama satış bedelini vermektedir.

Anomali tespit edilen kanallara ait anomali özeti ise Tablo 2'de okuyucu ile paylaşılmıştır. Tabloda satırlar kanalları, sütunlar ise anomali kararına sebep olan istatistikleri ifade etmektedir. İkinci sütundaki değerler, satış adedine göre hareketli ortalamanın etrafındaki güven aralığının kaç defa (toplam kaç gün için) ihlal edildiğini göstermektedir. göre alt veya üst sınırın dışında olan günlerin sayısını ifade etmektedir. Üçüncü sütun ise günlük toplam satış bedeline göre ihlal gerçekleşen gün sayısını ifade etmektedir. Yöntem bölümünde ifade edildiği üzere bir kanalda özellikle üst üste hiç satış yapılmayan gün sayısı ise dördüncü sütunda ifade edilmiştir. Son olarak bu kanallara ait oluşan en yüksek değişkenlik katsayısı ise beşinci sütunda paylaşılmıştır.

Tablo 1. Anomali Tespit Edilen Kanallara Ait Özetleyici İstatistikler

Kanal	Aktif gün yüzdesi	Ortalama satış adedi	Ortalama satış bedeli
kanal1	%75,82	74,16	2003,19
kanal2	%16,48	65,09	1193,25
kanal3	%74,73	134,62	3391,52
kanal4	%64,10	179,91	4303,52
kanal5	%56,78	109,09	2874,84
kanal6	%98,90	117,80	2627,86
kanal7	%99,27	21,64	521,27
kanal8	%99,27	6,70	157,53
kanal9	%99,63	105,78	2390,11
kanal10	%91,21	30,37	718,59
kanal11	%97,07	5,07	137,58
kanal12	%99,63	344,08	7813,55
kanal13	%98,53	6,88	179,93
kanal14	%96,34	5,54	157,83
kanal15	%96,34	35,47	889,14
kanal16	%99,27	6,74	177,83
kanal17	%98,90	5,76	156,70
kanal18	%98,17	5,72	156,03
kanal19	%99,63	7,32	205,08
kanal20	%94,51	5,41	153,72
kanal21	%99,63	8,08	212,26
kanal22	%98,90	5,99	164,35
kanal23	%96,70	5,57	156,76
kanal24	%99,63	7,08	199,49

Bulgularımızı paylaşırken öncelikle Tablo 1 ve 2'deki bilgiler üzerinden bir özet, sonrasında ise bazı kanallar için detaylı bir paylaşım yapılmıştır.

Önerilen anomali tespit yöntemine göre tespit edilen 24 kanalı dört grupta inceleyebiliriz. İlk olarak, tablolardaki ilk beş kanalın hem toplam satış adedi ve bedelinin yüksek olduğu hem de en yüksek değişkenlik katsayısının beşin üzerinde olduğu görülebilir. Bu kanallarda hem adet hem de bedel olarak ihlal sayısının yüksekliği, bununla birlikte üst üste sıfır satış yapılan günlerin yüksekliği dikkat çekmektedir. Özetle ilk beş kanal için tüm metrikler uyarı verilmesini gerekli kılmıştır.

Öte yandan ikinci gruptaki örneklerde (kanal6, kanal9 ve kanal12) ortalama satış adedi ve bedelinin yüksek olduğu ve hiç üst üste sıfır satış olmadığı ve değişim katsayısının da çok düşük seyrettiği görülmektedir. Bu kanallar için sadece günlük limitlerin dışına çıkılması bir anomali olarak değerlendirilmiştir.

Tablo 2. Anomali Tespit Edilen Kanalların İstatistikleri

Kanal	Limit İhlal Sayısı (adet)	Limit İhlal Sayısı (bedel)	Üst üste sıfır olan gün sayısı	En yüksek değişkenlik katsayısı
kanal1	20	22	25	5,48
kanal2	10	14	37	5,48
kanal3	6	5	18	2,46
kanal4	8	9	50	5,48
kanal5	15	16	32	5,48
kanal6	6	7	0	0,77
kanal7	12	14	0	2,95
kanal8	3	10	0	0,60
kanal9	5	5	0	0,72
kanal10	16	13	2	2,89
kanal11	5	10	2	0,72
kanal12	12	14	0	0,74
kanal13	6	8	0	0,66
kanal14	5	7	2	1,17
kanal15	16	17	2	3,20
kanal16	5	9	0	0,67
kanal17	1	7	0	0,64
kanal18	3	11	0	0,71
kanal19	4	8	0	0,58
kanal20	8	14	2	1,05
kanal21	6	14	0	0,83
kanal22	1	6	0	0,64
kanal23	4	7	0	1,38
kanal24	5	11	0	0,62

Önceki iki paragrafta ifade edilen kanalların ortak özelliği günlük ortalama satış adetlerinin en az 35 olmasıdır. buna benzer olarak günlük ortalama satış adedi iki basamaklı olan kanal7 ve kanal10 için de ihlal sayılarının da en yüksek değişkenlik katsayısının yüksek olduğu gözlenmiştir. Bu iki kanal üçüncü grubu ifade etmektedir.

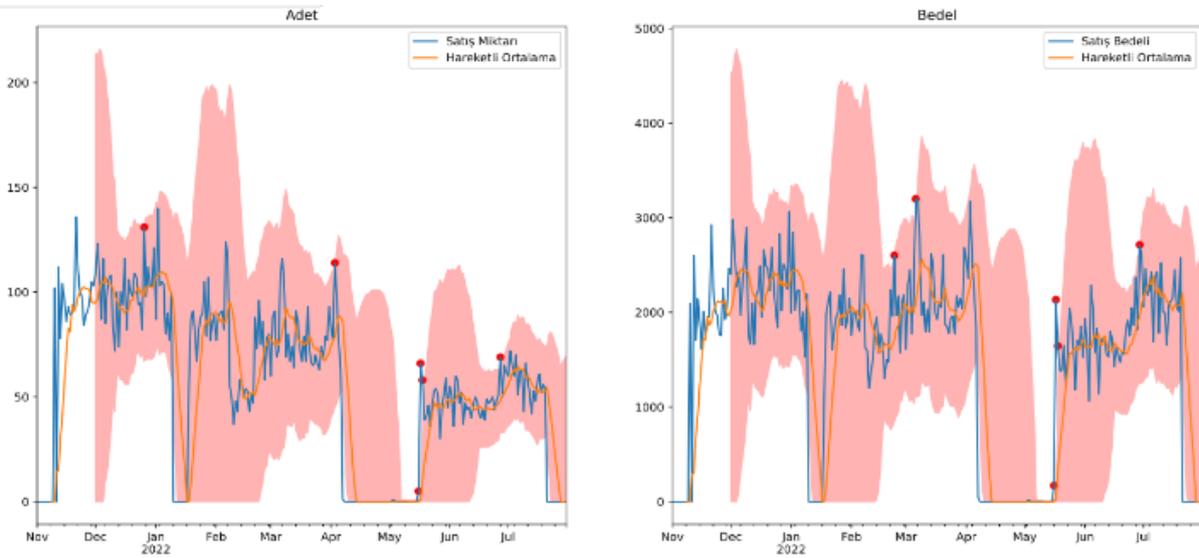
Son olarak yukarıdakiler dışında önerilen anomali tespit yönteminin radarına giren diğer 14 örneğin en büyük ortak özelliği ortalama satış adedinin 10'dan düşük olmasıdır.

Önerilen anomali tespit yöntemine göre her bir gruptan birer örnek detaylı olarak incelenmiştir. Aşağıda Şekil 1'de kanal1'e ait günlük satış adetleri sol tarafta, toplam bedel ise sağ tarafta ifade edilmiştir. Grafiklerde mavi çizgi günlük adet ve bedelleri, turuncu çizgi hareketli ortalamayı ifade etmektedir. Grafiklerdeki pembe aralık hareketli ortalamanın etrafındaki güven aralığıdır. Grafiklerdeki kırmızı noktalar güven aralığının üst limitini aşan günleri ifade etmektedir. Grafikler incelendiğinde bazı günlerde hem adet hem de bedel için anomali tespit edildiği bazı günler için ise sadece bedel veya adet için anomali uyarısı verildiği gözlenebilir. Şekil 1 için özellikle dikkat çekilmesi gereken bir nokta ise Ocak ve Mayıs aylarında üst üste

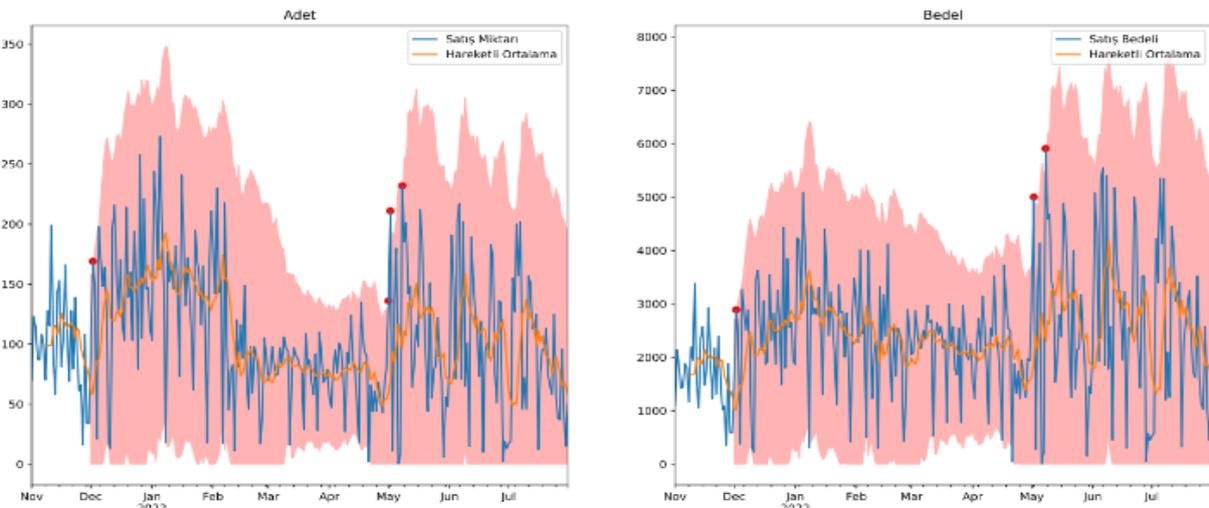
sıfır satışların olduğu iki segmenting bulunmasıdır. Bu durum adet ve bedel açısından günlük bir anomali oluşturmasa da satış düşüklüğünün sebebinin araştırılması için gerekli bir metrik olduğunu ifade eder.

Şekil 2’de ikinci gruba ait bir örnek olarak kanal9’un günlük satış adedi ve bedeline ait satış veri, hareketli ortalama ve güven aralığı ile anomali olan günlerin işaretlendiği grafik bulunmaktadır. Bu örnekte dikkat çeken nokta satış adet ve bedelinin ara ara çok düşük seviyelere indiği hatta sıklıkla sıfır satış olan tek günlerin olduğudur. Grup 3 için kanal10 örneği Şekil 3’te paylaşılmıştır. Bu örnekte bir önceki gruba göre

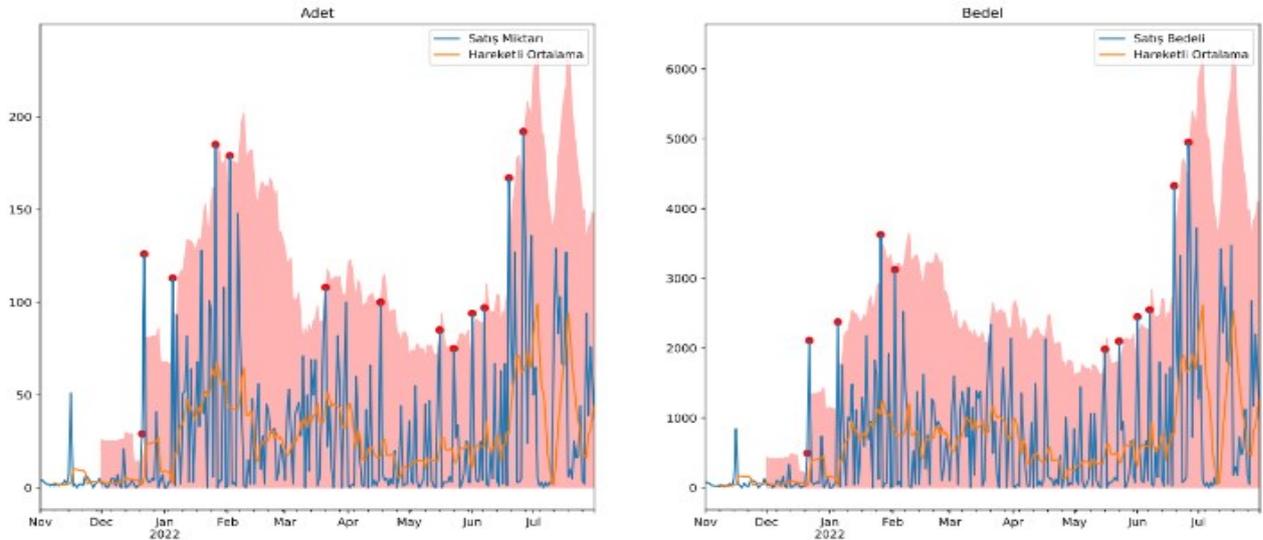
tam zıt bir durum söz konusudur. ikinci grupta sıklıkla düşük hata sıfır satış gözlenirken grup 3 için sıklıkla tek yüksek satışlar görülmektedir. Ortalamadan sıklıkla sapan bu durumun tespit edilmiş olması bir başarı olarak ifade edilebilir. Son olarak dördüncü gruba bir örnek vermek amacıyla kanal14 verisinin özeti Şekil 4’te paylaşılmıştır. Bu grupta dikkat çeken nokta ortalamaların düşük seyretmesi sebebiyle ani yükselişlerin sıklıkla gerçekleşmesidir. Ortalamanın düşük seyretmesinin diğer bir etkisi de değişim katsayısının da yüksek olmasıdır. Bu iki etkinin bir araya gelmesiyle anomali oluşturan durumların doğru tespit edilebilmesi sağlanmıştır.



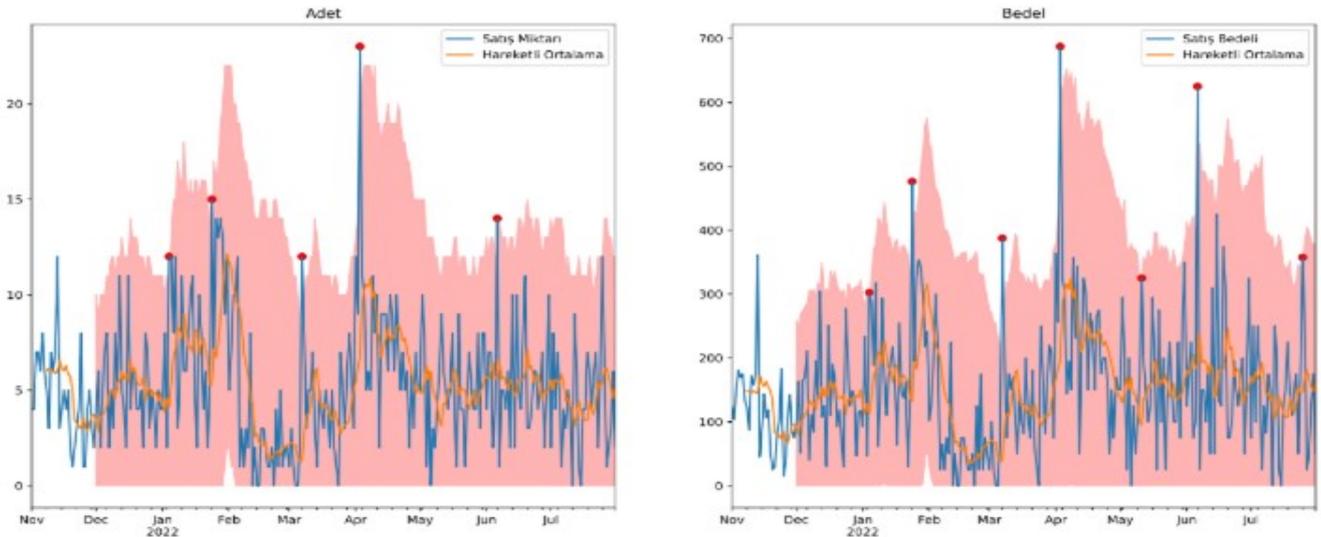
Şekil 1. Kanal1 (Grup 1) Satış Adedi ve Bedeli İçin Güven Aralığı ve Anomali Grafiği



Şekil 2. Kanal9 (Grup 2) Satış Adedi ve Bedeli İçin Güven Aralığı ve Anomali Grafiği



Şekil 3. Kanal10 (Grup 3) Satış Adedi Ve Bedeli İçin Güven Aralığı ve Anomali Grafiği



Şekil 4. Kanal14 (Grup 4) Satış Adedi Ve Bedeli İçin Güven Aralığı ve Anomali Grafiği

### 5. Tartışma ve Uygulama Detayları

Bu çalışmada telekom sektöründeki lider telekomünikasyon firmasının market kanalından gerçekleştirilen satışlarına ait gerçek veriler kullanılarak oluşturulan zaman serileri üzerinde anomali tespiti yapan bir yöntem önerilmiştir. Yapılan çalışmalar sonucunda günlük satış adedi ve günlük satış bedeli için son yedi günlük hareketli ortalama etrafında son 30 günlük standart sapma verisi kullanılarak oluşturulan bir güven aralığı hesaplanmıştır. Her gün ve her bir alt kanal için yapılan bu güven aralığının dışına çıkılması bir anomali olarak tanımlanmıştır. Bununla birlikte her bir kanal ve her

bir gün için değişim katsayısı hesaplanmış ve bu katsayının yüksek olduğu günler ve kanallar için uyarı mekanizması oluşturulmuştur. Günlük güven aralıkları aslında bir sonraki gün için bir uyarı sisteminin temelini oluşturmaktadır ve bir önleyici metrik olarak tanımlanabilir. Gün içinde güven aralığının dışına çıkılması durumunda uyarı mekanizması çalışabilir ve hatta anomalinin boyutunun çok büyük olması durumunda ilgili kanalın satışları geçici bir süre askıya alınabilir. Tespit edilen anomalinin suistimale işaret edip etmediği ilgili iş birimi tarafından incelendikten sonra kanalın satışlara devam etmesi sağlanabilir. Bu da çalışmamızın sadece anomali tespiti değil aynı zamanda suistimal önleme yöntemi olarak da

kullanılabileceğinin bir göstergesidir. Öte yandan hesaplanan değişim katsayısının yüksek olması sadece gün sonunda anlam ifade eden bir yöntemdir. Benzer şekilde üst üste sıfır satışların olması da ancak gün sonunda tespit edilebilecek bir durumdur. Bu iki yöntem de sadece gün sonunda bir anomali tespiti için kullanılabilir.

Alanyazında anomali tespitinde karşılaşılan en genel sorunlardan biri anomali uyarısı verilen noktanın gerçekten anomali oluşturup oluşturmadığının tespitinin zor olmasıdır (Blázquez-García ve diğ., 2021). Çalışmamızı alanyazından ayıran en büyük farklardan biri önerilen yöntemin anomali olarak tespit ettiği veri noktalarının iş birimi tarafından incelenip anomali olup olmadığının tespit edilebilmesidir. Çalışmamızı alanyazından ayıran diğer bir özellik ise analiz in ve yöntemin gerçek bir şirketin gerçek verileri üzerine yapılması ve sonucun uygulanmış olmasıdır. Bu noktada yapılan uygulamanın teknik detayları verilmiştir.

**Uygulama Detayları:** Çalışma uygulamaya alınırken Java 8 ve Spring Boot kullanılarak geliştirilmiş, PL/SQL tabanlı bir veritabanı ile desteklenen modern bir web uygulaması olarak kullanıma alınmıştır.

Uygulama, yüksek performans ve ölçeklenebilirlik gereksinimlerini karşılamak amacıyla, Linux işletim sistemi üzerinde faaliyet gösteren on farklı sunucuda paralel olarak dağıtılmıştır. Java 8 ve Spring Boot tercih edilmesinin nedeni, sistemin mikro servis mimarisi altında modüler ve kolay ölçeklenebilir şekilde geliştirilebilmesine olanak sağlamasıdır. Java 8, özellikle lambda ifadeleri ve akış API'si gibi yeni özellikleri sayesinde daha temiz ve okunabilir kod yazımına olanak tanırken, Spring Boot framework'ü, otomatik yapılandırma ve mikro hizmet mimarileri için sunduğu esneklik ile hızlı geliştirme süreçlerine katkıda bulunmaktadır.

Veritabanı işlemleri için PL/SQL tercih edilmiştir; bu tercih, veri bütünlüğünün korunması ve karmaşık sorguların etkin biçimde yönetilmesi amacıyla yapılmıştır. PL/SQL'in güçlü hata yönetim yetenekleri ve yerleşik prosedürel mantık desteği, veri işlemlerinin güvenilirliğini artırmaktadır. Uygulama, çoklu sunucu mimarisi sayesinde, kullanıcı taleplerini hızlı bir şekilde karşılamakta ve yük dengelemesi ile yüksek trafik altında dahi performans kaybı yaşamadan çalışabilmektedir. Sunucu yapılandırmalarında kullanılan Nginx (yük dengeleme aracı), gelen istekleri en uygun sunucuya yönlendirerek sistemin kararlılığını sağlamaktadır.

Uygulamanın kritik bir bileşeni, her akşam belirli saatlerde anomali tespiti için gerçekleştirilen otomatik e-posta bildirimleridir. Bu bildirimler, her bir satış kanalına ait günlük sapmaları, güven aralığı ihlallerini ve yüksek değişim katsayısı (CV) değerlerini

özetlemektedir. Anomali tespit süreci, istatistiksel yöntemler kullanarak otomatik kontrol gerçekleştirmekte ve sonuçları ilgili iş birimlerine raporlamaktadır. Örneğin, zaman serisi analizi ile veriler arasındaki olağan dışı sapmalar tespit edilirken, denetleyici sistemler ile anomali tespiti için belirlenen eşik değerleri kullanılmıştır. Raporlar, tespit edilen anormalliklerin ayrıntılı açıklamalarını içermekte ve iş birimlerinin güncel durum hakkında hızlıca bilgi sahibi olmasını sağlamaktadır.

İş birimleri, gelen anomali raporlarını titizlikle incelemekte ve potansiyel suistimal durumlarını değerlendirmektedir. Bu değerlendirme sonucunda, gerektiğinde anomaliye sebep olan işlemler üzerinde engelleme veya müdahale gerçekleştirilmektedir. Anomali tespiti süreçleri, alert sistemleri ile entegre edilerek anlık uyarılar sağlamak ve kritik durumların hızlı bir şekilde ele alınmasını mümkün kılmaktadır.

Bu süreç, yalnızca şirketin güvenlik standartlarını korumakla kalmayıp, aynı zamanda operasyonel riskleri en aza indirmekte ve suistimallerin önüne geçmek açısından da kritik bir rol oynamaktadır. Ek olarak, düzenli yapılan sistem güncellemeleri ve güvenlik denetimleri, yazılımın en son güvenlik açıklarına karşı korunmasını sağlamaktadır.

Sonuç olarak, geliştirilen sistem yüksek performans ve güvenilirlik sağlamanın yanı sıra, işletmenin genel risk yönetimi stratejisine doğrudan katkı sunmaktadır. Yöntemin canlı veriyle çalışabilmesi, suistimal risklerinin erken tespiti açısından sürdürülebilir bir çözüm sağlamaktadır. Bu yapı, benzer şekilde gerçek zamanlı analiz modülleriyle desteklenerek daha ileri düzeyde bir erken uyarı sistemine dönüştürülebilir.

## 6. Sonuçlar

Çalışmanın sonucunda Türkiye'nin lider telekomünikasyon şirketinin gerçek verileri ile 7 günlük hareketli ortalama etrafında 30 günlük standart sapma bilgisiyle bir güven aralığı kullanarak market kanallarından yapılan satışlar için bir anomali tespit ve suistimal önleme sistemi önerilmiştir. Bu sistemle her bir market kanalı için günlük güven aralıkları hesaplanmış, bu aralığın dışına çıkan durumlara hızlı tepki veren bir yöntem kullanılarak olası suistimallerin önüne geçilmiştir. Bu anlamda çalışmamız sadece anomali tespiti değil aynı zamanda suistimal önleme alanyazınına da katkı sağlamaktadır.

Alanyazında anomali tespiti ve suistimal önlenmesi konusundaki en büyük engel anomali olarak işaretlenen noktaların gerçekten anomali olup olmadığının tespitindeki zorluktur. Çalışmamızda önerilen yöntemin tutarlılığı, anomali tespitinde ve suistimal önlemedeki başarısı iş birimleri tarafından denetlenmiş ve teyit edilmiştir. Önerilen yöntem şirket tarafından kullanılmak üzere canlıya alınmış ve aktif

olarak kullanılmaktadır. Yöntemin uygulanıyor olması da çalışmanın farklılıklarındandır.

Bu çalışmayı sınırlandıran en büyük unsur eldeki verinin satış kanallarının arasındaki ilişkilerin incelemeye müsait olmamasıdır. Gerçekte bir coğrafi bölgedeki (örneğin mahalle) satışlar bir mağazadan diğerine kayabilir. Bu durumda bir mağaza kanalındaki artış ile diğer mağaza kanalındaki azalış bir arada daha anlamlı şekilde analiz edilebilir. Aynı coğrafi bölgedeki farklı kanalların satışlarının bir arada değerlendirilmesi olası bir araştırma konusu olarak önerilebilir.

Çalışmanın asıl unsurunu oluşturan yapı, market kanallarında yapılan telekomünikasyon satışlarıdır. Telekomünikasyon satışları marketlerin temel faaliyet alanı değildir. Bu sebeple klasik zaman serisi analizinin ötesinde volatilité üzerinde da bir kontrol mekanizması önerilmiştir. Önerilen yöntemin kapsamı, sadece telekomünikasyon sektörüyle sınırlı değildir. Yöntem özellikle düşük sinyal-gürültü oranına sahip finans, perakende, enerji ve sigorta sektörlerinde de kullanılabilir. Bu tür sektörlerde yöntemin uygulanması için aşağıdaki adımlar izlenmelidir:

1. Günlük veya saatlik işlem verilerinin toplanması,
2. İlgili performans metriklerinin (işlem adedi, işlem tutarı, aktif gün oranı vb.) tanımlanması,
- 3.7 günlük hareketli ortalama ve 30 günlük standart sapma hesaplamalarının yapılması,
4. Güven aralıkları ve CV değerlerinin otomatik olarak izlenmesi ve
5. Eşik değerlerin aşıldığı durumlarda sistemin uyarı üretmesi ve ilgili birimlerin değerlendirme sürecinin başlatılması.

Bu adımlar takip edilerek, önerilen yaklaşımın farklı sektörlerde de erken uyarı temelli risk yönetimi sistemlerine dönüştürülmesi mümkün olacaktır.

#### Araştırmacıların Katkısı

Bu çalışmada; Utku KOÇ, bilimsel yayın araştırması, makalenin yazılması, yöntemin geliştirilmesi ve test edilmesi, istatistiksel analizler, Özge ÖZALANYALI, makalenin yazılması, yöntemin geçerlik ve güvenilirliğinin iş birimleri ile teyit edilmesi, Özgür BULUT, makalenin oluşturulması, yöntemin uygulamaya alınması konularında katkı sunmuşlardır.

#### Çıkar Çatışması

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir.

#### Teşekkür

Değerli görüşleri ve yapıcı yönlendirmeleri için anonim hakemlere teşekkür ederiz.

#### Kaynaklar

- Blázquez-García, A., Conde, A., Mori, U., & Lozano, J. A. (2021). A review on outlier/anomaly detection in time series data. *ACM computing surveys (CSUR)*, 54(3), 1-33. <https://dl.acm.org/doi/abs/10.1145/3444690>
- Hawkins, D. M. (1980). A single outlier in normal samples. *Identification of Outliers*, 27-41. [https://doi.org/10.1007/978-94-015-3994-4\\_3](https://doi.org/10.1007/978-94-015-3994-4_3)
- Munir, M., Siddiqui, S. A., Dengel, A., & Ahmed, S. (2018). DeepAnT: A deep learning approach for unsupervised anomaly detection in time series. *Ieee Access*, 7, 1991-2005. <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8581424>
- Rodrigues, V. F., Policarpo, L. M., da Silveira, D. E., da Rosa Righi, R., da Costa, C. A., Barbosa, J. L. V., ... & Arcot, T. (2022). Fraud detection and prevention in e-commerce: A systematic literature review. *Electronic Commerce Research and Applications*, 56, 101207. <https://doi.org/10.1016/j.elerap.2022.101207>
- Tran, P. H., & Tran, K. P. (2016). The efficiency of CUSUM schemes for monitoring the coefficient of variation. *Applied Stochastic Models in Business and Industry*, 32(6), 870-881. <https://doi.org/10.1002/asmb.2213>
- Tran, P. H., Heuchenne, C., & Thomassey, S. (2022). Enhanced CUSUM control charts for monitoring Coefficient of Variation: A case study in Textile industry. *IFAC-PapersOnLine*, 55(10), 1195-1200. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.09.552>
- Xu, X., Liu, H., & Yao, M. (2019). Recent progress of anomaly detection. *Complexity*, 2019(1), 2686378. <https://doi.org/10.1155/2019/2686378>
- Zhou, Y., Qin, R., Xu, H., Sadiq, S., & Yu, Y. (2018). A data quality control method for seafloor observatories: The application of observed time series data in the East China Sea. *Sensors*, 18(8), 2628. <https://doi.org/10.3390/s18082628>

## EFFECT OF DIFFERENT CATALYSTS ON SYNTHESIS OF BIO-BASED POLY(PROPYLENE MALONATE)

Ersan EYİLER<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Çukurova Üniversitesi, Ceyhan Mühendislik Fakültesi, Kimya Mühendisliği Bölümü, Adana

ORCID No : <https://orcid.org/0000-0002-1754-6590>

Keywords	Abstract
Bio-based Polyesters Polycondensation Catalyst	<i>Driven by both environmental concerns and economic considerations, the demand for biomass-derived monomers in polymer development has significantly increased in recent years. Bio-based plastics, in particular, have emerged as a leading focus area and have consistently ranked among the top priorities in discussions of breakthrough technologies for advancing a circular economy. In this study, one of the goals is to assess the effectiveness of various esterification catalysts. For this purpose, different bio-based homopolyesters using 1,3-propanediol and malonic acid as raw materials and six catalysts (titanium (IV) butoxide (TBT), titanium (IV) isopropoxide (TTIP), tin (II) 2-ethylhexanoate (stannous octoate, Sn(Oct)<sub>2</sub>), antimony (III) oxide (Sb<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), stannous chloride dehydrate (SnCl<sub>2</sub>.2H<sub>2</sub>O) and aluminum chloride (AlCl<sub>3</sub>)) were synthesized. The synthesized polymers were chemically characterized by NMR and FTIR. The thermal properties were investigated by DSC and TGA. The FTIR results confirmed that the homopolyesters were successfully synthesized, and a T<sub>g</sub> of approximately -48 °C was detected by DSC. The maximum working temperatures, where loss of 50 wt % occurs, were around 365 °C.</i>

## FARKLI KATALİZÖRLERİN BİYOBAZLI POLİ(PROPİLEN MALONAT) SENTEZİ ÜZERİNDEKİ ETKİSİ

Anahtar Kelimeler	Öz
Biyobazlı Poliesterler Polikondenzasyon Katalizör	<i>Çevresel kaygılar ve ekonomik etkenler doğrultusunda, polimer üretiminde biyokütle kaynaklı yapı taşlarına olan ihtiyaç son yıllarda önemli ölçüde artmıştır. Özellikle biyobazlı plastikler, döngüsel ekonomiye geçişte çığır açan teknolojiler arasında en öncelikli konulardan biri olarak öne çıkmaktadır. Bu çalışmada, amaçlardan biri çeşitli esterleşme katalizörlerinin etkinliğini değerlendirmektir. Bu amaçla, 1,3-propandiol ve malonik asidi hammadde olarak kullanarak ve titanyum (IV) bütoksit (TBT), titanyum (IV) izopropoksit (TTIP), kalay (II) 2-etilheksanoat (stannous oktuat, Sn(Oct)<sub>2</sub>), antimon (III) oksit (Sb<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), stannous klorür dihidrat (SnCl<sub>2</sub>.2H<sub>2</sub>O) ve alüminyum klorür (AlCl<sub>3</sub>) olmak üzere altı katalizör kullanarak çeşitli tamamen biyobazlı homopoliesterler sentezlendi. Sentezlenen polimerler NMR ve FTIR ile kimyasal olarak karakterize edildi. Termal özellikler DSC ve TGA ile incelendi. FTIR sonuçları poliesterlerin başarılı bir şekilde sentezlendiğini doğruladı ve DSC tarafından yaklaşık -48 °C'lik bir T<sub>g</sub> tespit edildi. %50 ağırlık kaybının meydana geldiği maksimum çalışma sıcaklıkları yaklaşık 365 °C civarındaydı.</i>

Araştırma Makalesi

Başvuru Tarihi

Kabul Tarihi

: 04.03.2025

: 15.09.2025

Research Article

Submission Date

Accepted Date

: 04.03.2025

: 15.09.2025

\* Sorumlu yazar: [eeviler@gmail.com](mailto:eeviler@gmail.com)

<https://doi.org/10.31796/ogummf.1650522>

### 1. Introduction

Despite their advantages in terms of energy efficiency, lightweight properties, and durability, the popularity of conventional polymers has declined due to the depletion of petroleum reserves and rising environmental concerns. In response, polymers derived from renewable biomass sources have emerged as promising alternatives to those

based on fossil fuels. Over recent years, there has been a growing emphasis on utilizing biomass-derived monomers for polymer synthesis, driven by both ecological and economic factors. Among the top ten emerging technologies, bio-based plastics have consistently held a leading position, particularly in the context of advancing a circular economy (Beltran, Tjahjono, Bogush, Julião and Teixeira, 2021; Jha et al.,



Bu eser, Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>) hükümlerine göre açık erişimli bir makaledir.

This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

2024; Rosenboom, Langer and Traverso, 2022). In recent years, researchers have developed and explored various bio-based polymers, including poly(lactic acid) (PLA) (Eyiler, Chu and Walters, 2014), poly(glycolic acid) (PGA) (Fabbri et al., 2016), poly(butylene succinate) (PBS) (Tan, Bi, Emery and Sobkowicz, 2017), cellulosic plastics, poly(hydroxyalkanoates) (PHA) (Rowe, Eyiler and Walters, 2016), poly( $\epsilon$ -caprolactone) (PCL) (Przybysz, Marć, Klein, Saeb and Formela, 2018), and starch plastics (Broeren, Kuling, Worrell and Shen, 2017; Ferreira-Filipe, Paço, Duarte, Rocha-Santos and Patrício Silva, 2021). These materials have garnered increasing attention from both technical and industrial perspectives due to their potential to serve as alternatives to petroleum-derived polymers. They are being considered for a broad range of applications, including textiles, hygiene products, pharmaceutical delivery systems, food packaging, biomedical scaffolds, agricultural materials, and even children's toys (Iwata, 2015; Kakadellis and Rosetto, 2021).

To date, two principal barriers have limited the broader implementation of bio-based polymers: high production costs and the suboptimal performance characteristics of some newly developed materials. However, ongoing innovations in metabolic engineering, fermentation technologies, and process optimization have led to a significant reduction in production costs. The emergence of integrated biorefineries worldwide has played a crucial role in enabling the efficient and large-scale synthesis of bio-based monomers and polymer building blocks (Becker, Lange, Fabarius and Wittmann, 2015; Bozell and Petersen, 2010). A notable example is succinic acid (SA), a versatile platform chemical derived from renewable resources, which is now commercially manufactured by several companies, including BioAmber and Myriant. Furthermore, the bio-based polymer market is benefiting from increased governmental and industrial support aimed at reducing reliance on fossil-based resources and mitigating environmental impact. Research is also increasingly focused on improving the thermal stability, mechanical strength, and biodegradability of these materials to match or surpass the performance of conventional plastics. As a result, bio-based polymers are progressively becoming more competitive in both cost and functionality, making them viable candidates for applications in automotive parts, consumer goods, electronics, and biomedical devices.

Over the past two decades, a wide range of aliphatic polyesters synthesized from monomers such as succinic acid, sebacic acid, adipic acid, 1,4-butanediol, and glycerol have been the subject of extensive research. These materials span a spectrum of mechanical properties, from soft, flexible elastomers to stiff, rigid plastics, making them suitable for diverse applications. Both academic researchers and industrial stakeholders have shown growing interest in these bio-derived polyesters due to their versatility and sustainability. Among the various

monomers, 1,3-propanediol (PDO) stands out as a particularly promising bio-based building block. It can be efficiently produced via microbial fermentation of renewable feedstocks such as corn-derived glucose. One of the most well-known polyesters derived from PDO is poly(1,3-propylene terephthalate), which is commercially available under the trade name Sorona® by DuPont. This material has been widely studied for its desirable combination of mechanical strength, elasticity, and environmental benefits (Wang et al., 2001). The success of PDO-based polymers like Sorona® underscores the potential of bio-based monomers in replacing conventional petrochemical-derived plastics in performance-driven applications. Malonic acid (MA) is the smallest dicarboxylic acid with the lowest number of carbon derived from glycerol, which can serve as either a monomer or a crosslinker. Many researchers have demonstrated the crosslinking of polyvinyl alcohol (PVA) using dicarboxylic acids, including malonic acid (MA), to achieve esterification (Qiu and Netravali, 2013). MA has not been intensively studied in the synthesis of polymers. Dogan and Kuseföglu examined the polymerization of MA with soybean oil with some degree of success (Doğan and Küseföglu, 2008). Thus, the polymerization of MA presents an excellent opportunity for future studies in this area.

The literature includes several reports on efforts to produce bio-based polyesters using various catalysts. They include titanium(IV)butoxide (TBT, the most used catalyst) (Guo et al., 2011; Pospiech et al., 2015), titanium(IV) isopropoxide (TTIP) (Debuissy, Sangwan, Pollet and Avérous, 2017), p-toluenesulfonic acid (pTSA) (Dai et al., 2015), sulfuric acid ( $H_2SO_4$ ) (Goerz and Ritter, 2013), tin(II) 2-ethylhexanoate (stannous octoate,  $Sn(Oct)_2$ ) (Yu et al., 2019), dibutyltin(IV) oxide (DBTO) (Terzopoulou et al., 2017), CalB (enzyme) (Brännström, Finnveden, Johansson, Martinelle and Malmström, 2018), and so on. The effect of stoichiometric amount of monomers has intensively been examined. However, little attention has been given to esterification catalysts to understand their effects on the synthesis of bio-based polyesters. Brännström et al. reported the itaconate based polyesters synthesized with dimethyl succinate (DMS), dimethyl itaconate (DMI), and 1,4-butanediol (BD), and mainly investigated the selectivity and efficiency of three different catalysts (CalB, pTSA and  $Ti(OBu)_4$ ) (Brännström et al., 2018). It was found that CalB operates well at lower temperatures without discoloration of the polyesters, no radical inhibitor is required, and the energy need is lower. In a related study, the influence of various catalysts—including tin(II) 2-ethylhexanoate (TEH), titanium(IV) isopropoxide (TIS), tetrabutyl titanate(IV) (TBT), and dibutyltin(IV) oxide (DBTO)—was investigated during the two-step melt polycondensation process for synthesizing poly(ethylene furanoate) (PEF) (Terzopoulou et al., 2017). It was reported that titanate catalysts TBT and mainly TIS were the most active ones,

compared with tin catalysts like TEH and DBTO. Additionally, all catalysts influenced the color of the resulting polyesters.

In this study, one of the objectives is to investigate the activity of various esterification catalysts. Despite the extensive use of various catalysts in bio-based polyester synthesis, the potential of aluminum chloride ( $\text{AlCl}_3$ ) as a sustainable, low-cost, and environmentally benign catalyst remains underexplored. Here, the catalytic efficiency of  $\text{AlCl}_3$  was uniquely evaluated alongside other commonly used catalysts for the melt polycondensation of bio-based homopolyesters. For this purpose, various homopolyesters using 1,3-propanediol and malonic acid as raw materials and six catalysts (aluminum chloride ( $\text{AlCl}_3$ ), titanium (IV) butoxide (TBT), titanium (IV) isopropoxide (TTIP), tin (II) 2-ethylhexanoate (stannous octoate,  $\text{Sn}(\text{Oct})_2$ ), stannous chloride dehydrate ( $\text{SnCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), and antimony (III) oxide ( $\text{Sb}_2\text{O}_3$ )) were synthesized. Chemical and thermal properties of the resulting polyesters were examined by NMR/FTIR and DSC/TGA.

## 2. Material and Methods

### 2.1. Materials

1,3-Propanediol (PDO, 98%), malonic acid (MA, 99%), aluminum chloride ( $\text{AlCl}_3$ , 98%), titanium (IV) butoxide (TBT, 97%), titanium (IV) isopropoxide (TTIP, 97%), tin (II) 2-ethylhexanoate (stannous octoate,  $\text{Sn}(\text{Oct})_2$ , 92.5-100.0%), stannous chloride dihydrate ( $\text{SnCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ , 98%), antimony (III) oxide ( $\text{Sb}_2\text{O}_3$ , 99%) and all solvents were purchased from Sigma-Aldrich. All reagents and solvents were employed as received without further treatment.

### 2.2. Synthesis of PPM Polyesters

Homopolyesters with various catalysts were produced by a melt polycondensation method (Figure 1) (Debuissy, Pollet and Avérous, 2017; Guo et al., 2011; Tan et al., 2017). First stage, esterification, led to the formation of oligomers with only low molecular weight compounds. Then, increasing the temperature and reducing the reaction pressure enabled the coupling of the oligomer chains through either esterification or transesterification. The polymerization experiments were conducted in a 100 mL round-bottom flask fitted with a distillation apparatus and a nitrogen inlet, allowing for the removal of water and other by-products. Reactions between 1,3-propanediol (PDO) and malic acid (MA) were performed using a diol-to-diacid molar ratio of 1.1:1. In the initial stage, the mixture was continuously stirred under a nitrogen atmosphere to minimize oxidative degradation. The flask was then immersed in an oil bath maintained at 135 °C, and the reaction was allowed to proceed for 3 hours. Subsequently, a catalyst (0.1 mol% relative to the acid) was introduced. In the second stage—polycondensation—the temperature was increased to

210 °C while maintaining continuous stirring. A vacuum of 7 mbar was applied for an additional 3 hours to facilitate the removal of water vapor. Upon completion, the resulting polymer was dissolved in chloroform and precipitated into cold methanol (−30 °C) to eliminate residual monomers and catalyst. The precipitated polymer was filtered and dried under vacuum at room temperature for 24 hours.

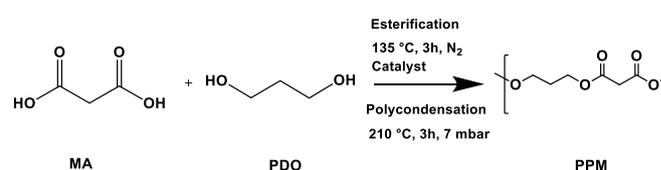


Figure1. Reaction Process for Synthesis of PPM Polyesters

### 2.3. Characterization

$^1\text{H}$  NMR spectra were collected by employing a Bruker AMX-300 nuclear magnetic resonance (NMR) instrument at 300 MHz. Samples were dissolved into deuterated chloroform and tetramethylsilane (TMS) added as an internal standard. The synthesized polymers were characterized by Fourier transform infrared spectroscopy (FTIR) with ATR using a Jasco 6700 at 400–4000  $\text{cm}^{-1}$  wavelength range with 16 scans. The molecular weights were determined using Agilent 1200 gel permeation chromatograph (GPC). Chloroform was used as eluent, and for calibration, polystyrene standards were used. The sample concentration was 1 mg/mL and eluent flow rate was 1 mL/min. Differential scanning calorimetry (DSC) and thermogravimetric analysis (TGA) were performed under nitrogen on a Mettler Toledo (DSC 3) and Mettler Toledo (TGA/DSC 3+). For DSC analysis, the samples were initially heated from ambient temperature to 160 °C at a rate of 10 °C/min and held isothermally for 3 minutes to erase prior thermal history. Following this, the samples were cooled down to −60 °C and subsequently reheated from −60 °C to 160 °C at the same heating rate. TGA was performed by heating the samples from 25 °C to 600 °C at a constant rate of 10 °C/min.

## 3. Results and Discussion

### 3.1. Chemical Structure of Synthesized Polyesters

Various biobased homopolyesters were prepared following a two-step melt polycondensation using six different catalysts (Figure 2). The reactions were initially conducted at reaction temperature of 135 °C considering the melting point of 135 °C and boiling point of 140 °C of malonic acid. After the synthesis, the  $M_n$  of polyesters reached about 2000-3000 g/mol that indicate oligomers (Table 1). This shows that the catalysts were not effective enough during the second step, transesterification. The relatively low  $M_n$  can be attributed primarily to the intrinsic reactivity of the monomers and the equilibrium limitations in the melt polycondensation process.

Specifically, malonic acid (MA), as a small dicarboxylic acid with two carboxyl groups in close proximity, can promote intramolecular cyclization or chain termination reactions that limit chain growth. Moreover, the efficiency of transesterification reactions during the melt polycondensation influences the molecular weight build-up. While the catalysts used in this study, including  $\text{AlCl}_3$ , promote esterification effectively, their transesterification activity may be limited under the applied reaction conditions, thus restricting further chain extension.



Figure 2. Images of the PPM Polyester Samples Produced Using Various Catalysts

Table 1. Molecular Weight and Thermal Properties of PPM Polyesters with Various Catalysts

Catalyst	$M_n$ (g/mol)	$M_w$ (g/mol)	PDI	$T_{5\%}$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	$T_{\max}$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	Residue at 600 $^{\circ}\text{C}$ (wt.%)	$T_g$ ( $^{\circ}\text{C}$ )
$\text{AlCl}_3$	2606.9	3360.6	1.29	285	366	7.3	-46.6
TBT	2617.7	3399.4	1.30	299	364	6.6	-45.8
TTIP	2427.1	3106.9	1.28	274	334	7.0	-46.9
$\text{Sn}(\text{Oct})_2$	2014.5	2640.9	1.31	276	341	11.3	-45.7
$\text{SnCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	2269.5	3474.2	1.53	287	352	8.5	-43.1
$\text{Sb}_2\text{O}_3$	2362.4	2994.6	1.27	290	364	9.0	-47.0

\* $T_g$  glass transition temperature,  $T_{5\%}$  temperature at 5 % weight loss,  $T_{\max}$  temperature at 50 % weight loss.

The chemical structure of the synthesized poly(propylene malonate) (PPM) polyesters was characterized by  $^1\text{H}$  NMR.  $^1\text{H}$  NMR analysis showed that the PPM polyester backbone contained a mixture of alkane, ester, and ether bonds (Figure 3). In  $^1\text{H}$  NMR spectrum, the presence of ester bonds was verified by the signal at  $\delta = 4.20$  ppm

assigned to  $\text{COO-CH}_2$ - protons from 1,3-PDO repeating units.  $^1\text{H}$  chemical shift at  $\delta = 3.3$  ppm was ascribed to  $\text{CO-CH}_2\text{-CO-}$  protons from malonate repeating units. The hydroxyl terminal group ( $\text{HO-CH}_2$ -) signal was detected at  $\delta = 3.67$  ppm, in agreement with the relatively low molar weight of the oligomeric samples.

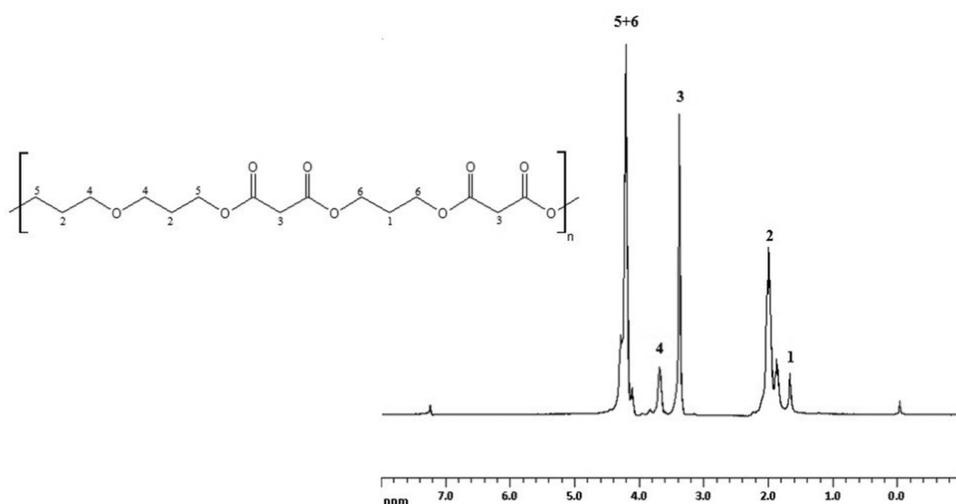


Figure 3.  $^1\text{H}$  NMR Spectrum of the PPM Polyesters

Fourier-transform infrared (FTIR) spectroscopy was employed to analyze the chemical structure of the

synthesized polyesters, and the resulting spectra are presented in Figure 4. A broad absorption band observed

near  $3450\text{ cm}^{-1}$  corresponds to O-H stretching vibrations, indicative of hydroxyl groups. The peaks around  $2900\text{ cm}^{-1}$  are associated with C-H stretching modes. A prominent absorption signal near  $1721\text{ cm}^{-1}$  is characteristic of the C=O stretching vibrations from ester

functional groups, confirming successful polyester formation. Absorption peaks at  $1460$  and  $1139\text{ cm}^{-1}$  indicates presence of C-C and C-O stretching, respectively.

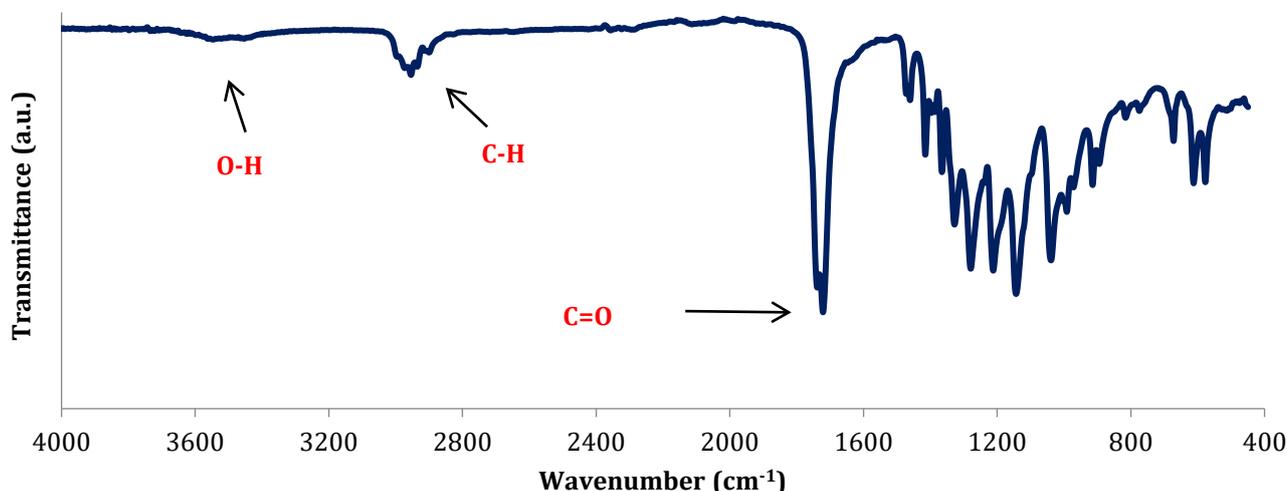


Figure 4. FTIR Spectrum of PPM Polyesters with  $\text{AlCl}_3$

### 3.2. Thermal Properties of Synthesized Polyesters

Differential scanning calorimetry (DSC) was utilized to explore the influence of catalysts used for the synthesis of PPM polyesters on the glass transition temperature ( $T_g$ ). Figure 5 illustrates the DSC curves of PPM polyesters with various catalysts, with their glass transition thermograph values summarized in Table 1. PPM, an amorphous

polyester, exhibited a glass-transition temperature of approx.  $-46\text{ }^\circ\text{C}$ , which changed slightly upon the use of different catalyst. This low  $T_g$  is consistent with the amorphous nature of PPM and may offer advantages in processing for mixing or blending, serving as an effective plasticizer.

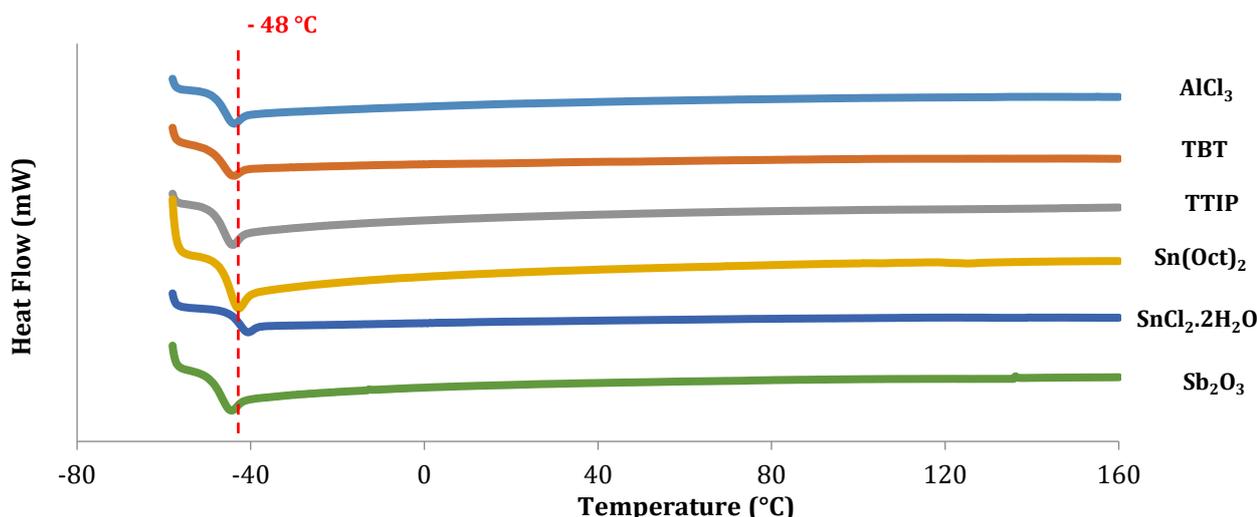


Figure 5. Second Heating DSC Curves of PPM Polyesters with Various Catalysts

Thermogravimetric analysis (TGA) was performed to assess the thermal stability of the synthesized PPM polyesters, and the data are summarized in Table 1 and Figure 6. The thermal degradation of samples occurred through single degradation step, with decomposition onset temperatures ( $T_{5\%}$ ) ranging from  $274$  to  $299\text{ }^\circ\text{C}$ . The

thermal degradation temperature and residual weight loss of polyesters were affected by catalyst type. Additionally,  $T_{50\%}$  values—approximated from the maximum degradation rate temperatures ( $T_{max}$ )—were used to compare the thermal stability across samples. The highest  $T_{50\%}$  was observed with  $\text{AlCl}_3$  at  $366\text{ }^\circ\text{C}$ , followed

closely by TBT and  $\text{Sb}_2\text{O}_3$  at 364 °C, indicating that these catalysts contribute to greater thermal resistance. On the other hand, lower  $T_{50\%}$  values for TTIP (334 °C) and  $\text{Sn}(\text{Oct})_2$  (341 °C) suggest relatively lower thermal stability under the same conditions. The differences in residual mass at 600 °C also varied with catalyst type,

potentially indicating differences in char formation or the stability of the final degradation products. These findings demonstrate that catalyst selection plays a crucial role not only in the polymerization process but also in determining the final thermal behavior of the polyester materials.

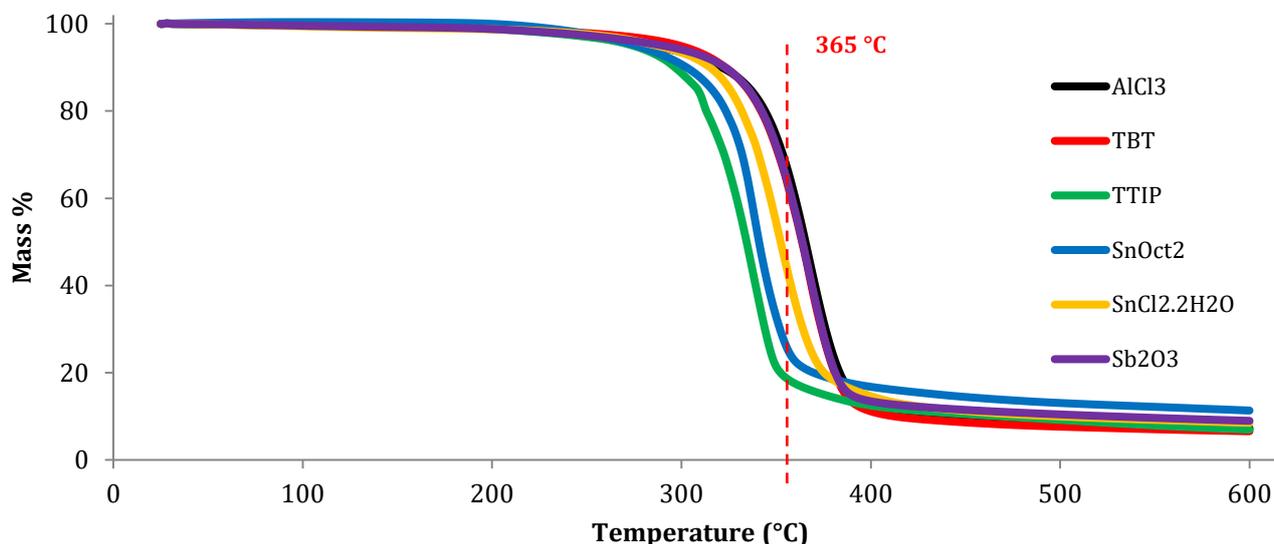


Figure 6. TGA Curves of PPM Polyesters with Various Catalysts

The comparative analysis of catalysts showed that aluminum chloride ( $\text{AlCl}_3$ ) and titanium (IV) butoxide (TBT) delivered the best performance in the synthesis of bio-based polyesters, achieving higher molecular weights ( $\sim 2600$  g/mol) and narrow polydispersity indices ( $\sim 1.29$ – $1.30$ ). These catalysts also contributed to enhanced thermal stability, with onset degradation temperatures above 280 °C and maximum degradation temperatures exceeding 360 °C. In contrast, tin- and antimony-based catalysts resulted in lower molecular weights and broader molecular weight distributions, correlating with slightly reduced thermal stability. This indicates that catalyst choice critically influences both polymer chain growth and the thermal properties of the resulting polyesters. Among the tested catalysts,  $\text{AlCl}_3$  stands out as a promising sustainable alternative

due to its balance of efficiency, cost-effectiveness, and environmental benignity.

When compared to previous studies, the thermal stability of the polyesters synthesized in this work is generally superior. For example, Testud et al. reported  $T_{5\%}$  degradation temperatures up to around 340 °C in hyperbranched polyesters catalyzed by zinc acetate (Testud, Pintori, Grau, Taton and Cramail, 2017). Similarly, in blends of polylactic acid (PLA) with poly(3-hydroxybutyrate) (P(3.4 HB)), trans-chalcone

stabilized systems exhibited 50% mass loss ( $T_{50\%}$ ) at approximately 346 °C (Olejnik, Masek and Kiersnowski, 2020). Against this backdrop, the  $\text{AlCl}_3$ -catalyzed polyesters in the present study reached  $T_{50\%} = 366$  °C, not only matching but exceeding the thermal thresholds reported in these prior works. Moreover, considering  $\text{AlCl}_3$ 's lower environmental impact and cost compared to zinc or tin catalysts, this result marks a meaningful step toward both sustainable and high-performance bio-based polyester synthesis. Thus,  $\text{AlCl}_3$  emerges as a compelling catalyst option for industrial applications seeking both economic and thermal efficiency.

#### 4. Conclusions

Bio-based homopolyesters from biomonomers, PDO and MA, which have been industrially produced via fermentation or extraction from biomass were successfully synthesized by melt-polycondensation. Six esterification catalysts have been investigated for their effects on the chemical and thermal properties of the polyesters. The PPM with TBT reached the thermal degradation temperature of 299 °C. Biobased polyesters showed an excellent thermal stability which reached to  $T_{50\%}$  of 366 °C with  $\text{AlCl}_3$ . With a low cost and environmental impact,  $\text{AlCl}_3$  is the more suitable catalyst for such synthesis of polyesters.

## Acknowledgments

This work was financially supported by the TUBITAK (Project No: 220M112).

## Contribution of Researchers

The author contributed to the conceptualization, literature review, methodology, writing -original draft, writing – review & editing, supervision, formal analysis and visualization.

## Conflict of Interest

No conflict of interest was declared by the author.

## References

- Becker, J., Lange, A., Fabarius, J., & Wittmann, C. (2015). Top value platform chemicals: bio-based production of organic acids. *Current opinion in biotechnology*, 36, 168-175. doi: <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2015.08.022>
- Beltran, M., Tjahjono, B., Bogush, A., Julião, J., & Teixeira, E. L. S. (2021). Food Plastic Packaging Transition towards Circular Bioeconomy: A Systematic Review of Literature. *Sustainability*, 13(7), 3896. doi: <https://doi.org/10.3390/su13073896>
- Bozell, J. J., & Petersen, G. R. (2010). Technology development for the production of biobased products from biorefinery carbohydrates—the US Department of Energy’s “Top 10” revisited. *Green Chemistry*, 12(4), 539-554. doi: <https://doi.org/10.1039/b922014c>
- Brännström, S., Finnveden, M., Johansson, M., Martinelle, M., & Malmström, E. (2018). Itaconate based polyesters: Selectivity and performance of esterification catalysts. *European Polymer Journal*, 103, 370-377. doi: <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2018.04.017>
- Broeren, M. L., Kuling, L., Worrell, E., & Shen, L. (2017). Environmental impact assessment of six starch plastics focusing on wastewater-derived starch and additives. *Resources, Conservation and Recycling*, 127, 246-255. doi: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.09.001>
- Dai, J., Ma, S., Wu, Y., Han, L., Zhang, L., Zhu, J., & Liu, X. (2015). Polyesters derived from itaconic acid for the properties and bio-based content enhancement of soybean oil-based thermosets. *Green Chemistry*, 17(4), 2383-2392. doi: <https://doi.org/10.1039/C4GC02057J>
- Debuissy, T., Pollet, E., & Avérous, L. (2017). Synthesis and characterization of fully biobased poly (propylene succinate-ran-propylene adipate). Analysis of the architecture-dependent physicochemical behavior. *Journal of Polymer Science Part A: Polymer Chemistry*, 55(17), 2738-2748. doi: <https://doi.org/10.1002/pola.28668>
- Debuissy, T., Sangwan, P., Pollet, E., & Avérous, L. (2017). Study on the structure-properties relationship of biodegradable and biobased aliphatic copolyesters based on 1, 3-propanediol, 1, 4-butanediol, succinic and adipic acids. *Polymer*, 122, 105-116. doi: <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2017.06.045>
- Doğan, E., & Küsefoğlu, S. (2008). Synthesis and in situ foaming of biodegradable malonic acid ESO polymers. *Journal of Applied Polymer Science*, 110(2), 1129-1135. doi:10.1002/app.28708 <https://doi.org/10.1002/app.28708>
- Eyiler, E., Chu, I. W., & Walters, K. B. (2014). Toughening of poly(lactic acid) with the renewable bioplastic poly(trimethylene malonate). *Journal of Applied Polymer Science*, 131(20). doi: <https://doi.org/10.1002/app.40888>
- Fabbri, M., Soccio, M., Costa, M., Lotti, N., Gazzano, M., Siracusa, V., . . . García-Fernández, L. (2016). New fully bio-based PLLA triblock copoly (ester urethane) s as potential candidates for soft tissue engineering. *Polymer Degradation and Stability*, 132, 169-180. doi: <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2016.02.024>
- Ferreira-Filipe, D. A., Paço, A., Duarte, A. C., Rocha-Santos, T., & Patrício Silva, A. L. (2021). Are Biobased Plastics Green Alternatives?—A Critical Review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(15), 7729. doi: <https://doi.org/10.3390/ijerph18157729>
- Goerz, O., & Ritter, H. (2013). Polymers with shape memory effect from renewable resources: crosslinking of polyesters based on isosorbide, itaconic acid and succinic acid. *Polymer International*, 62(5), 709-712. doi: <https://doi.org/10.1002/pi.4443>
- Guo, B., Chen, Y., Lei, Y., Zhang, L., Zhou, W. Y., Rabie, A. B. M., & Zhao, J. (2011). Biobased poly (propylene sebacate) as shape memory polymer with tunable switching temperature for potential biomedical applications. *Biomacromolecules*, 12(4), 1312-1321. doi: <https://doi.org/10.1021/bm2000378>

- Iwata, T. (2015). Biodegradable and bio-based polymers: future prospects of eco-friendly plastics. *Angewandte Chemie International Edition*, 54(11), 3210-3215. doi: <https://doi.org/10.1002/anie.201410770>
- Jha, S., Akula, B., Enyioma, H., Novak, M., Amin, V., & Liang, H. (2024). Biodegradable Biobased Polymers: A Review of the State of the Art, Challenges, and Future Directions. *Polymers*, 16(16), 2262. doi: <https://doi.org/10.3390/polym16162262>
- Kakadellis, S., & Rosetto, G. (2021). Achieving a circular bioeconomy for plastics. *Science*, 373(6550), 49-50. doi: <https://doi.org/10.1126/science.abj3476>
- Olejnik, O., Masek, A., & Kiersnowski, A. (2020). Thermal analysis of aliphatic polyester blends with natural antioxidants. *Polymers*, 12(1), 74. doi: <https://doi.org/10.3390/polym12010074>
- Pospiech, D., Korwitz, A., Komber, H., Jehnichen, D., Häußler, L., Scheibner, H., . . . Voit, B. (2015). Biobased aliphatic polyesters with DOPO substituents for enhanced flame retardancy. *Macromolecular Chemistry and Physics*, 216(13), 1447-1461. doi: <https://doi.org/10.1002/macp.201500121>
- Przybysz, M., Marć, M., Klein, M., Saeb, M. R., & Formela, K. (2018). Structural, mechanical and thermal behavior assessments of PCL/PHB blends reactively compatibilized with organic peroxides. *Polymer Testing*, 67, 513-521. doi: <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2018.03.014>
- Qiu, K., & Netravali, A. N. (2013). Halloysite nanotube reinforced biodegradable nanocomposites using noncrosslinked and malonic acid crosslinked polyvinyl alcohol. *Polymer composites*, 34(5), 799-809. doi: <https://doi.org/10.1002/pc.22482>
- Rosenboom, J.-G., Langer, R., & Traverso, G. (2022). Bioplastics for a circular economy. *Nature Reviews Materials*, 7(2), 117-137. doi: <https://doi.org/10.1038/s41578-021-00407-8>
- Rowe, M. D., Eyiler, E., & Walters, K. B. (2016). Bio-based plasticizer and thermoset polyesters: A green polymer chemistry approach. *Journal of Applied Polymer Science*, 133(45). doi: <https://doi.org/10.1002/app.43917>
- Tan, B., Bi, S., Emery, K., & Sobkowicz, M. J. (2017). Bio-based poly (butylene succinate-co-hexamethylene succinate) copolyesters with tunable thermal and mechanical properties. *European Polymer Journal*, 86, 162-172. doi: <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2016.11.017>
- Terzopoulou, Z., Karakatsianopoulou, E., Kasmi, N., Tsanaktsis, V., Nikolaidis, N., Kostoglou, M., . . . Bikiaris, D. N. (2017). Effect of catalyst type on molecular weight increase and coloration of poly (ethylene furanoate) biobased polyester during melt polycondensation. *Polymer Chemistry*, 8(44), 6895-6908. doi: <https://doi.org/10.1039/C7PY01171G>
- Testud, B., Pintori, D., Grau, E., Taton, D., & Cramail, H. (2017). Hyperbranched polyesters by polycondensation of fatty acid-based AB n-type monomers. *Green Chemistry*, 19(1), 259-269. doi: <https://doi.org/10.1039/C6GC02294D>
- Wang, B., Li, C. Y., Hanzlicek, J., Cheng, S. Z., Geil, P. H., Grebowicz, J., & Ho, R.-M. (2001). Poly (trimethylene teraphthalate) crystal structure and morphology in different length scales. *Polymer*, 42(16), 7171-7180. doi: [https://doi.org/10.1016/S0032-3861\(01\)00046-5](https://doi.org/10.1016/S0032-3861(01)00046-5)
- Yu, Y., Xiong, H., Xiao, J., Qian, X., Leng, X., Wei, Z., & Li, Y. (2019). High Molecular Weight Unsaturated Copolyesters Derived from Fully Biobased trans- $\beta$ -Hydromuconic Acid and Fumaric Acid with 1, 4-Butanediol: Synthesis and Thermomechanical Properties. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 7(7), 6859-6869. doi: <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.8b06334>

## SÜRDÜRÜLEBİLİRLİK AÇISINDAN DOĞA DOSTU MALZEMELERİN AKUSTİK KONFORA ETKİSİ: EDİRNE-KALEİÇİ KONUTLARI

Pınar KISA OVALI <sup>1\*</sup>, Buse SUÇEKER <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Trakya Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi, Mimarlık Bölümü, Edirne, <https://orcid.org/0000-0002-6230-219X>

<sup>2</sup> Trakya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Mimarlık ABD, Edirne,

ORCID No : <https://orcid.org/0009-0008-7430-5399>

Anahtar Kelimeler	Öz
Sürdürülebilirlik Doğa dostu malzeme Akustik konfor Edirne-Kaleiçi	<i>Tarihi kent merkezlerinin, turizm amaçlı yoğun faaliyetler (yeme-içme, alışveriş, servis desteği vb.) ve araç trafiğine açık olduklarında akustik konfor sorunlarıyla karşı karşıya kalmaları bölgedeki kullanıcıların yaşam kalitesini olumsuz etkilemektedir. Yapılan araştırmalar; doğa dostu malzemelerin yapı elemanı olarak kullanılmasıyla kullanıcı sağlık ve refahının arttığını ve akustik konforun iyileştiğini göstermektedir. Bu çalışma Edirne tarihi kent merkezinde çok sayıda tescilli bina barındıran Kaleiçi bölgesindeki konutların yapımında kullanılan doğa dostu malzemelerin akustik performans üzerindeki etkisini değerlendirmeyi amaçlamaktadır. Çalışmada akustik konfor, akustik performans değerlendirme ölçütleri ve doğa dostu malzemelerin özellikleriyle ilgili literatür taraması yapılmıştır. Alan çalışması kapsamında bölgedeki altı adet tescilli geleneksel konutun yapım teknikleri, malzeme ve duvar özellikleri ile ilgili veriler toplanmış, gözlem ve fotoğraflama çalışmaları yapılmıştır. Elde edilen verilere göre "INSUL" programı kullanılarak konutların akustik performansları hesaplanmış ve kullanılan doğa dostu malzemelerin akustik konfora etkisi saptanmıştır. Sonuç olarak, incelenen kültür mirası tarihi konutların "Binaların Gürültüye Karşı Korunması Hakkında Yönetmelik"e göre gürültüye karşı sınır değeri sağladığı, taş ve tuğla dolgu duvarların akustik performansının diğer duvar oluşumlarına göre daha etkin olduğu ve duvar en kesitinin artması durumunda akustik performansın da arttığı matematiksel olarak ortaya konmuştur.</i>

### THE EFFECT OF ECO-FRIENDLY MATERIALS ON ACOUSTIC COMFORT IN TERMS OF SUSTAINABILITY: EDİRNE- KALEİCİ HOUSES

Keywords	Abstract
Sustainability Eco-friendly material Acoustic comfort Edirne-Kaleiçi	<i>Historical city centers face acoustic comfort problems when they are open to intense tourism activities (gastronomy, trade, service support, etc.) and vehicle traffic, which negatively affects the quality of life of the users in the region. Research shows that by using environmentally friendly materials as building elements, user health and well-being increase and acoustic comfort improves. This study aims to evaluate the effect of environmentally friendly materials used in the construction of houses in the Kaleiçi district, which contains many registered buildings in the historical city center of Edirne, on the acoustic performance. In the study, a literature review was conducted on acoustic comfort, acoustic performance evaluation criteria and the properties of environmentally friendly materials. Within the scope of the field study, data on the construction techniques, materials and wall features of six registered traditional houses in the region were collected, and observation and photography studies were conducted. According to the data obtained, the acoustic performance of the houses was calculated using the "INSUL" program and the effect of the environmentally friendly materials used on acoustic comfort was determined. As a result, it has been demonstrated with mathematical that the examined cultural heritage historical houses provide the limit value against noise according to the "Regulation on the Protection of Buildings Against Noise", the acoustic performance of stone and brick infilled walls is more effective than other wall formations and the acoustic performance increases when the wall cross-section increases.</i>

Araştırma Makalesi

Başvuru Tarihi

: 18.03.2025

Kabul Tarihi

: 19.11.2025

Research Article

Submission Date

: 18.03.2025

Accepted Date

: 19.11.2025

\* Sorumlu yazar: [pinarkisaovali@trakya.edu.tr](mailto:pinarkisaovali@trakya.edu.tr)

<https://doi.org/10.31796/ogummf.1660269>



Bu eser, Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>) hükümlerine göre açık erişimli bir makaledir.

This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

## 1. Giriş

Bir yapının performansı, iç ortamda kullanıcının konfor düzeyine bağlı olarak değerlendirildiğinde yapı içerisinde hava kalitesi, ısı, aydınlatma ve akustik konfor koşulları, koku ve ortam titreşimleri gibi koşulların incelenmesi gerekmektedir (Kurtay vd., 2008; Aydın ve Mıhlıyanlar, 2017). Yapı performansının değerlendirilmesinde önemli bir ölçüt olan mimari akustik, bina ve hacim akustiği başlıklarında incelenmektedir. Bina akustiği; mekânların iç akustiğini incelerken (Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2017) hacim akustiği mekânın içerisindeki akustik konforu arttırmaya yönelik çalışmaları kapsamaktadır (Karabiber, 1991).

Her mekânın akustik kalitesi, mekânın işlevine ve bunu etkileyen faktörlere göre değişiklik göstermektedir (Ökten, 2010; Ateş, 2007). Mekânların kullanım amaçlarına uygun olmayan rahatsızlık veren sesler olarak açıklanan gürültü, düzeyi arttıkça insanların yaşam kalitelerini olumsuz yönde etkileyen çevresel bir sorundur. Kullanıcıların akustik açıdan konforsuz hissetmelerine neden olan gürültü düzeyi ISO 16283- 3 "Acoustics-Field Measurement Of Sound Insulation in Buildings and Of Building Elements" standartına göre 58 dB üzeridir (Aydın ve Mıhlıyanlar, 2017).

Akustik konfor, mekânda istenen seslerin net şekilde duyulması ve istenmeyen seslerin yani gürültülerin engellenmesi ile sağlanır. Bu nedenle, gürültünün belirlenip kontrol altına alınması, akustik performansın artırılması için çok önemlidir. Gürültü kaynakları yapıda iç ve dış gürültüler olarak iki başlıkta sınıflandırılmaktadır. Yapı içi gürültüler, yapılarda kullanılan makine sistemleri ve insan faaliyetleri kaynaklı gürültüler iken; dış gürültüler trafik ve ortam kaynaklı gürültülerdir (Kurra, 1998; Yazıcı, 2022). Bulunulan iç ortamı etkileyen dış gürültü faktörlerini kontrol altına almak için yapı kabuğunu oluşturan bileşenler doğru seçilmelidir (Hacı ve Şenkal Sezer, 2015). Gürültü etkilerinin azaltılması için bina tasarımında, yapı kabuğu kesitinin artırılması ve ses yutucu malzemelerin kullanılması gerekmektedir (Aydın ve Mıhlıyanlar, 2017).

Çalışmada Türkiye'de geçerli olan yönetmelikler ve uluslararası akustik standartlar incelenerek akustik performansın değerlendirilmesine yönelik temel ölçütler ele alınmaktadır.

## 2. Yöntem

Bu çalışmada yapı kabuğunda kullanılan doğa dostu malzemelerin akustik performans üzerindeki etkisini değerlendirmek amacıyla, Edirne Kaleiçi bölgesinden seçilen altı adet tescilli konut için "INSUL" programı kullanılarak hesaplamalar yapılmıştır. Bu kapsamda öncelikle literatürde akustik konfor, akustik performans değerlendirme ölçütleri ve doğa dostu malzemelerin

özellikleri araştırılmıştır. Akustik performansın saptanmasında kullanılan ulusal/uluslararası ölçütler incelenmiş ve "Binaların Gürültüye Karşı Korunması Hakkında Yönetmelik" dikkate alınarak bina akustiği kapsamına giren sınır değerler belirlenmiştir. Bu yönetmelikte, akustik performans altı sınıfta değerlendirilmekte ve mevcut binalarda yapılacak çalışmalarda en az "D sınıfı" ölçütlerin karşılanması gerektiği belirtilmektedir (Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2017).

Araştırmada, ele alınan örnek konutlar için Tablo 1'de belirtilen hassasiyet ve gürültülülük derecelerinden hassasiyet derecesi II olan yaşam alanları üzerinden hesaplamalar yapılmaktadır.

Tablo 1. Çeşitli Bina Ve Mekân İşlevlerine Bağlı Gürültüye Hassasiyet/Gürültülülük Dereceleri (Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2017)

Bina Ölçeği		Mekân Ölçeği		
Kaynak Olması Durumu	Alıcı Olması Durumu	Mekân Adı	Kaynak Olması Durumu	Alıcı Olması Durumu
Gürültülülük Derecesi	Hassasiyet Derecesi		Gürültülülük Derecesi	Hassasiyet Derecesi
OG	I	Yatak Odaları	OG	I
		Yaşam Alanları	OG	II
		Mutfak/Banyo	OG	III
		Sirkülayon Alanları	OG	III
		Teknik Merkezler	YG	III
I-Gürültüye karşı çok hassas bina ve kullanım/ YG-Yüksek düzeyli gürültü üretimi				
II-Gürültüye karşı hassas bina ve kullanım/ OG-Orta düzeyli gürültü üretimi				

Deveci ve Yorulmaz (2022) yaptıkları çalışmada, Edirne Merkez ilçe Cumhuriyet ve Darülhadis caddelerinin gürültü düzeyi ölçümleri ortalamasını 59 dB olduğu belirlemişlerdir. Bu çalışmanın da aynı mahallelerdeki konutları içermesi dolayısıyla Lgag değeri olarak 59 dB değeri kullanılmaktadır. Ayrıca Yönetmeliğe göre "D sınıfı" akustik performans sağlanması için dış duvarlarda en az 30 dB sınır değerinin sağlanması gerekmektedir (Tablo 2 en düşük ses yalıtım değerleri).

Çalışmada yapılan karşılaştırmalarda bu değer kabul edilmektedir.

Tablo 2. Dış Gürültü Düzeyleri Ve Alıcı Odası Hassasiyet Derecesine Göre Sağlanacak En Düşük Ses Yalıtım Değerleri ( $D_{nT,A,tr}$  dB), (Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2017)

Akustik Performans Sınıfı	Alıcı Odası Hassasiyet Derecesi		
	I	II	III
A	Lgag-14	Lgag-17	Lgag-20
B	Lgag-18	Lgag-21	Lgag-24
C	Lgag-22	Lgag-25	Lgag-28
D	Lgag-26	Lgag-29	Lgag-32
E	Lgag-30	Lgag-33	Lgag-36
F	Lgag-34	Lgag-37	Lgag-40

(Lgag değerleri binanın en az 2 m uzağında ölçülen, cephe yansımaları hariç düzeylerdir)

Nitel araştırmanın saha araştırması ile desteklendiği bu çalışmada, literatür araştırmasıyla çalışmanın temel kabulleri araştırılmış, akustik performansı hesaplanacak konutların mimari ve teknik özellikleriyle ilgili bilgilere ulaşılmıştır. Alan çalışması ile fotoğraflamalar yapılmış, teorik bilgiler gözlem ve fotoğraflama ile netleştirilmiştir. Elde edilen veriler kapsamında "INSUL" programı ile konutların spektrum uyarlamalı ağırlıklı ses azaltma iyileştirme indeksleri hesaplanmıştır (Şekil 1).

Ulaşılan  $R'_w$  ve  $R'_{w,tr}$  değerleri;

$$DnT,w = R'_w + 10 \log (0,16 \cdot V / T_0 \cdot S_s) \quad (1)$$

$S_s$ : Bölme duvar alanı,  $m^2$

$T_0$ : Referans yankılanma süresi (konutlar için 0,5 sn)

$V$ : Alıcı odası hacmi,  $m^3$

$$R'_w = R_w + CF \quad (2)$$

$CF$ : Düzeltme değeri(a), bölme elemanının birim ağırlığının ( $X$ )/ yanal iletim hatlarına neden olan tüm elemanların ortalama birim ağırlığı ( $Y$ );

$$a \leq 1 \quad CF = 0 \quad (3)$$

$$1 < a \leq 2 \quad CF = 2 \quad (4)$$

$$2 < a \leq 3 \quad CF = 4 \quad (5)$$

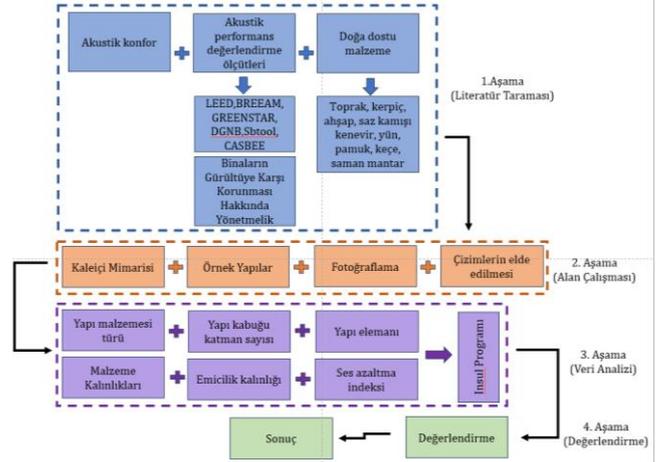
$$3 < a \quad CF = 6 \quad (6)$$

(Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2017; Binaların Gürültüye Karşı Korunması Yönetmeliği Açıklama ve Uygulama Klavuzu, 2018).

$$DnT,A = DnT,w + C, DnT,A,tr = DnT,w + Ctr \quad (7)$$

C: Yaşam gürültüleri için spektrum adaptasyon terimi

Ctr: Trafik gürültüleri için spektrum adaptasyon terimi (Şan Özbilen ve Tamer Bayazıt, 2021; Şan Özbilen, 2021) formülleri kullanılarak  $D_{nT,A,tr}$  birimine çevrilmiş, yapıların akustik performans düzeyleri Yönetmelik'teki sınır değerler ile karşılaştırılarak sonuca ulaşılmıştır.



Şekil 1. Yöntem Akış Diyagramı

Etik kurul raporu gerektirmeyen bu çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

### 3. Uluslararası ve Ulusal Akustik Performans Değerlendirme Sistemleri

Bir mekânın akustik performansı, mekânın fonksiyonuna ve ortam koşullara uygun olarak değerlendirilmelidir. Akustik performans değerlendirme sistemleri, yapı elemanlarının ve malzemelerin ses yalıtımı ve ses yutma kapasitelerini analiz ederek, iç mekândaki gürültü kontrolünü sağlamak ve akustik konforu artırmak amacıyla geliştirilmiştir. Bu kapsamda BREEAM, LEED, GREENSTAR, DGNB, CASBEE, SBtool gibi uluslararası sertifika sistemleri içinde akustik performansla ilişkin ölçütler geliştirilmiştir. Ülkemizde ise binalardaki akustik konfora ilişkin olarak "Binaların Gürültüye Korunmasına Hakkında Yönetmelik" kullanılmaktadır.

BREEAM (Building Research Establishment's Environmental Assessment Method), 1990 yılında İngiltere'de Yapı Araştırma Kurumu (BRE) tarafından sürdürülebilir binalar için tasarlanmış bir sertifikasyon sistemi olup, farklı bina türlerinin çevresel etkilerini en aza indirmeyi hedefleyen değerlendirme ölçütleri sunmaktadır. BREEAM In-Use sertifikasyonu mevcut binaların işletme ve bakım süreçlerinin çevresel sürdürülebilirlik ilkelerine ne kadar uygun olduğunu değerlendirmektedir. Bu sistem, özellikle enerji verimliliği, su yönetimi ve iç mekân hava kalitesi gibi unsurlara odaklanmaktadır. BREEAM sertifika sistemi

genel olarak binaları; yönetim, sağlık ve memnuniyet, enerji, ulaşım, su, malzeme, atıklar, kirlilik, arazi kullanımı ve ekoloji olmak üzere dokuz grupta değerlendirmektedir. Ayrıca akustik konforun, kullanıcıların sağlığına ve konforuna olan etkisini göz önünde bulundurarak bina içindeki ses yalıtımı, gürültü seviyelerinin kontrolü ve iç mekân akustiği gibi faktörlere dayanan akustik performansı sağlık ve memnuniyet başlığı altında da değerlendirmektedir (Baştanoğlu,2017).

LEED (Leadership in Energy and Environmental Design), 1998 yılında Birleşik Devletler Yeşil Bina Konseyi tarafından oluşturulan ve çevresel sürdürülebilirlik konusunda tanınırlığı yüksek bir sertifikasyon sistemidir. LEED-EB O+M sertifikasyonu, mevcut binaların işletme ve bakım süreçlerinin sürdürülebilirliğini belgelemek üzere tasarlanmıştır. LEED-EB O+M “yeşil bina” performanslarını sürdürülebilir arsalar, su etkinliği, enerji ve malzemeler, tasarım ve yenilik ile iç mekân hava kalitesi alt başlıklarında değerlendirmektedir. LEED-EB O+M, mevcut binaların enerji verimliliğini ve çevresel etkilerini değerlendirirken, iç mekân ses yalıtımı ve gürültü düzeylerinin kontrol edilmesi gibi iç mekân akustiğine dayalı faktörlere de dikkat etmektedir. Akustik performans, iç mekân hava kalitesi başlığı altında incelenmektedir (Yenidoğan,2019).

GREEN STAR, Avustralya Yeşil Bina Konseyi (GBCA) tarafından 2003 yılında oluşturulmuş binaların çevresel performansını değerlendiren bir sertifikasyon sistemidir. GREENSTAR değerlendirme sistemi yönetim, enerji, su, ulaşım, malzemeler, iç mekan ortam kalitesi, alan kullanımı ve ekoloji, kirlilik ve yenilikler gibi ölçütleri baz almaktadır. İç mekânın gürültü düzeyleri ve ses yalıtımı vb. faktörlerin gürültü kirliliği ve akustik konforsuzluk gibi kullanıcı sağlığını ve verimliliğini olumsuz yönde etkilediği konusuna yoğunlaşan GREENSTAR akustik performansı, iç mekân ortam kalitesi altında değerlendirmektedir (Tamer Bayazıt, vd., 2011).

Almanya merkezli DGNB sisteminin (Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen) kategorileri ise; ekolojik, ekonomik, teknik, fonksiyonel, süreç, sosyo-

kültürel ve arazi kaliteleri olmak üzere altıya ayrılmıştır. DGNB, binaların tüm yaşam döngüsünü göz önünde bulundurarak kullanıcıların akustik konforunu, iç ve dış mekân kalitesi, ses yalıtımı gibi unsurları sosyo-kültürel ve fonksiyonel kalite ile teknik kalite alt başlıklarında incelemektedir (Perker, 2023).

Japonya merkezli değerlendirme sistemi CASBEE (Comprehensive Assessment System for Built Environment Efficiency) yapıları; iç mekân, servis kalitesi, arsada dış mekân çevresi, enerji, kaynaklar ve malzemeler, arsa dışındaki çevre olmak üzere toplam altı kategoride değerlendirilmektedir. CASBEE, bina sakinlerinin sağlık ve yaşam kalitesini artırmayı hedeflerken, iç mekân gürültü seviyeleri, ses izolasyonu ve arka plan gürültüsünün kontrolü gibi faktörlerden dolayı akustik performansı da iç mekân kategorisinde değerlendirilmektedir (Tamer Bayazıt vd., 2011).

Sürdürülebilir bina tasarımı ve çevresel etkilerin değerlendirilmesine yönelik SBTool (Sustainable Building Tool) sistemi yapıları; arsa seçimi, proje planlama/geliştirme, enerji/kaynak tüketimi, çevresel yükler, iç mekân ortam kalitesi, sosyo-ekonomik ve kültürel-algısal kabuller çerçevesinde altı başlıkta incelenmektedir. Akustik değerlendirme, iç mekân ortam kalitesi başlığı altında incelenmektedir (Köse-Mutlu vd., 2019).

Görüldüğü üzere uluslararası sertifika sistemlerinin tümünde kategori veya başlıklar kısmen değişiklik gösterse de sürdürülebilir bina tasarımlarında iç mekân konforunu etkileyen gürültü düzeyinin belirlenmesinde akustik performans önemli yere sahiptir (Tablo 3).

Bu kapsamda ulusal ölçekte Türkiye'nin yerel yeşil bina sertifikasyon sistemi olan “YeS-TR” de de akustik konfor iç ortam kalitesi modülü içinde ele alınmaktadır (Çevre ve Şehircilik Bakanlığı, 2022). Aynı zamanda “Binaların Gürültüye Karşı Korunması Hakkında Yönetmelik (2022)” ile hem yeni tasarlanacak binalarda hem de mevcut binalarda akustik konforun önemli bir bileşen olarak ele alındığı görülmektedir. Yönetmelik bu konuda dış duvarlarda akustik konfor için sağlanması gereken sınır değeri 30 dB olarak belirlemiştir (Çevre ve Şehircilik Bakanlığı,2017).

Tablo 3. Uluslararası Sertifikasyon Sistemlerinde Akustik Performans Değerlendirme Ölçütleri (Tamer Bayazıt vd., 2011'den yararlanılarak hazırlanmıştır)

Değerlendirme Sistemi	Akustik Performans Kategorisi	Değerlendirme Ölçütleri
BREEAM	Sağlık ve Memnuniyet	Ses yalıtımı, gürültü seviyeleri, iç mekân akustiği
LEED	İç Mekân Hava Kalitesi	İç mekân ses yalıtımı, gürültü kontrolü
GREENSTAR	İç Mekân Ortam Kalitesi	İç ortam gürültü düzeyi
	Sosyo-kültürel ve Fonksiyonel Kalite /Teknik kalite	Ses yalıtımı, donanım gürültüsü, ses yutuculuğu
	İç Mekân Çevresi	Arka plan gürültü seviyesi, donanım gürültüsü, ses izolasyonu, ses yutuculuğu
SBTool	İç Mekân Çevre Kalitesi	Gürültü kontrolü ve akustik değerlendirme

#### 4. Doğa Dostu Malzeme Seçiminin Akustik Performansa Etkisi

Yapı biyolojisine göre, iç mekân hava kalitesini olumsuz etkileyen ve sağlık sorunlarına yol açan birçok faktör bulunmaktadır (Yazıcı, 2022). Bu faktörlerin başında sentetik yapı malzemelerinin yaygın kullanımı gelmektedir. Sentetik malzemeler kullanılarak oluşturulan iç mekânlar, yapı malzemelerinden salınan zararlı kimyasallar nedeniyle "nefes almayan" bir ortam oluşturmaktadır. Bu durum, iç mekândaki hava kalitesinin kötüleşmesine dolayısıyla konforun ve sağlığın olumsuz etkilenmesine sebep olmaktadır.

"Canlı bir organizma gibi çalışan" yapılar tasarlamak için malzemelerin belirli özelliklere sahip olması önemlidir (Zorlu ve Tikansak Karadayı, 2020). Bu bağlamda doğal malzemeler, iç mekân konforunu sağlamak için gerekli olan ısı depolama, ısı yalıtımı ve nem geçirgenliği gibi fonksiyonları yerine getirebilirler. Ayrıca, güneş enerjisi gibi doğal kaynaklardan elde edilen enerjiyi kullanarak yapıların enerji tüketimini minimum düzeye indirmeye yardımcı olabilirler.

Doğal yapı malzemeleri genellikle bitki bazlı veya hayvansal kaynaklardan elde edilmekte veya doğal oluşumların yüzeylerinden toplanmaktadır. Toprak sıvalar, kerpiç bloklar, ahşap yapı elemanları, saz kamışı yalıtım panelleri, saman panelleri, mantar döşemeler, selüloz, kenevir, yün, pamuk ve keçe yalıtım levhaları bunlara örnek gösterilebilir. Bu malzemelerin üretim süreçleri doğal ve çevre dostu olmakla beraber, hem insan sağlığına hem de çevresel sürdürülebilirliğe katkı sağlamaktadır (Titiz, 2022), (Tablo 4).

Ses ve ışık konuları, yapı biyolojisi açısından önemlidir. İç mekânın akustik özellikleri ve aydınlatma düzenlemeleri içinde yaşayan/çalışan insanların

sağlığını ve konforunu doğrudan etkilemektedir. İyi bir iç mekân konforu için ses seviyesi, yankı süresi, darbe sesi ve titreşim gibi faktörler göz önünde bulundurulmalıdır (Arenas ve Sakagami, 2020; Öztürk, 2020). Doğru malzeme seçimi ile bu faktörler optimize edilerek iç mekân kalitesi artırılabilir (Korur, 2024).

Doğa dostu malzemeler akustik konfor açısından, iç mekânların ses yalıtımı ve ses yutma performansını önemli ölçüde iyileştirdikleri için öncelikli tercih edilmelidir. Bu malzemeler genellikle bitki bazlı veya doğal kaynaklardan elde edilen hammaddeler olup, doğal yapıları gereği ses dalgalarını yutma ve dağıtma özelliklerine sahiptirler.

Örneğin, ahşap yapı elemanları, ses yalıtımında etkili olan doğal bir malzemedir. Ahşap, ses dalgalarını sönümleyerek yankılanmayı azaltmakta ve iç mekânın akustik kalitesini iyileştirmektedir. Ayrıca, ahşabın yoğunluğu ve dokusu, iç mekânda daha dengeli bir ses ortamı oluşturulmasına da katkı sağlamaktadır. Bunun yanı sıra, kenevir gibi doğal lifler de yüksek ses yutucu özelliklere sahiptir. Kenevir yalıtım panelleri, ses dalgalarını iyi bir şekilde yutar ve dağıtır, böylece iç mekânın akustik performansını artırır (Malabadi vd., 2023).

Ses yalıtımı ve akustik performans açısından doğa dostu malzemelerin kullanımı, iç mekânların kullanıcıları için daha konforlu bir çalışma veya yaşam ortamı oluşturur. Bu malzemelerin tercih edilmesi, sadece akustik konforu arttırmakla kalmamakta, aynı zamanda çevresel sürdürülebilirlik ilkelerine uygun bir tasarım yaklaşımını desteklemektedir. Doğal malzemelerin düşük karbon ayak izi ve çevresel etkilerinin azlığı, uzun vadeli çevresel sürdürülebilirlik açısından da önemli avantajlar sunmaktadır (Yılmaz, 2022).

Tablo 4. Doğal yapı malzemeleri ve özellikleri (Titiz, 2022; Malabadi vd., 2023; Aiduang vd., 2022; Süleymanoğlu, 2023; Yılmaz, 2022'den yararlanılarak hazırlanmıştır)

Malzeme Türü	Genel Özellikler	Kullanım Alanları
Ahşap	Doğal lif yapısına sahip ahşap, ses yutucu özelliği sayesinde iç mekân akustik performansını iyileştirirken, ısı yalıtımı da sağlayarak enerji tasarrufuna katkıda bulunur.	Konutlar, ofisler, kültürel yapılar
Kenevir	Kenevir lifleri, yüksek ses yutucu özelliklere sahiptir ve termal olarak yalıtım sağlar.	Yalıtım panelleri, iç duvar kaplamaları, çatı kaplamaları
Yün	Ses yutucu özelliği yanı sıra termal yalıtım sağlayan yün nem dengeleme özelliği ile iç mekân konforunu artırır.	Yalıtım levhaları, döşemeler, tekstil uygulamaları
Pamuk	Geri dönüşümlü bir malzeme olan pamuk, yüksek ses yutucu özelliklere sahiptir. Aynı zamanda ısı yalıtımı sağlar ve iç mekân hava kalitesini iyileştirir.	Yalıtım panelleri, döşemeler, tekstil uygulamaları
Toprak	Doğal bir yapı malzemesi olan toprak, termal stabilite sağlar ve yüksek ısı depolama kapasitesine sahiptir.	Sıva ve kaplama malzemesi olarak kullanımı, toprak evler
Mantar	Ses yutucu özelliklere sahip mantar, hafif doğal bir malzeme olup, ısı yalıtımı sağlar.	Zemin kaplamaları, mekân kaplamaları
Saz Kamışı	Yüksek ses yutucu özelliklere sahip saz kamışı doğal bir yalıtım malzemesidir.	Yalıtım panelleri, iç duvar kaplamaları, döşemeler
Selüloz	Geri dönüşümlü ve çevre dostu bir malzeme olan selüloz, ses yutucu özelliklere sahiptir.	Yalıtım panelleri, tekstil uygulamaları
Saman	Yüksek ses yutucu özelliklere sahip saman, yerel mimari için önemli bir malzemedir.	Çatı kaplamaları, duvar yalıtımları
Doğal Taşlar	Doğal taşlar, ses ve ısı yalıtımı sağlamları yanında dayanıklı yapı malzemeleridir.	Dış cephe kaplamaları, iç mekân kaplamaları

### 5. Edirne Kaleiçi Konutlarında Doğa Dostu Malzeme Seçiminin Akustik Konfora Etkisi

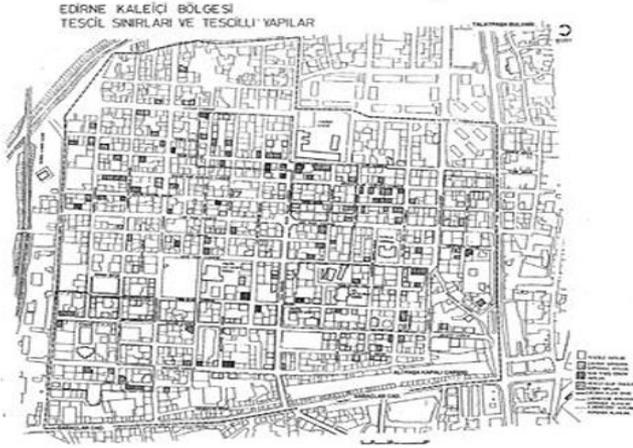
Edirne Kaleiçi, 19. yüzyılın başlarında tamamen ahşap konutlardan oluşan bir yerleşim yeri olarak kurulmuştur (Şekil 2, Şekil 3). Kaleiçi'ndeki geleneksel evler genellikle sade görünümleri ve özgün planlarıyla dikkat çekmektedir. Rum, Bulgar ve Yahudi ustalar tarafından inşa edilen Kaleiçi konutları, azınlıkların yaşam alanları olarak tasarlanmış olmakla birlikte, geleneksel Türk konut mimarisine de benzerlik göstermektedirler (Akansel, 2004). Genellikle bitişik düzende inşa edilmiş konutlardan oluşan Kaleiçi, gridal düzendedir.

Geleneksel Kaleiçi evlerinde iç sofa ve dış sofa plan tipleri yaygındır. Odalar geniş tutulmuş, yüksek tavanlar ve geniş pencereler ile ferah bir görünüm tercih edilmiştir. Sokağa bakan cephelerde balkonlar, çıkımlar ve cihannüma tarzında çeşitli çatı düzenlemeleri estetik ve işlevsel açıdan önemli unsurlar oluşturmaktadır (Akansel, 1990). Bina cepheleri genellikle bağdadi sıvalı veya ahşap kaplamalıdır. Çatılar ise kırma çatı veya beşik çatı şeklindedir (Yılmaz, 2021). Döşemelerde ve çatılarda ahşap malzeme tercih edilmiştir. Bazı üst

katlarda ahşap dikme ve çatılar bağdadi çıtalarla kaplanarak sıvanmıştır. Yiğma yapı tekniği kullanılan konutlarda bodrumlarda taş, ahşap üst katlarda ise ahşap arası kerpiç veya tuğla dolgu tercih edilmiştir (Dullinja, 2024).



Şekil 2. Edirne Kaleiçi Bölgesi (Google Earth, 2025, Erişim adresi: <https://earth.google.com>)



Şekil 3. Edirne Kaleiçi Bölgesi Izgara Yerleşim Morfolojisi (Akansel, 1990)

Kaleiçi evlerinin akustik konforu, konutların genel yapısal özellikleri ile kullanılan malzemelerin akustik özellikleriyle yakından ilişkilidir. Geleneksel olarak taş ve ahşap gibi doğal malzemelerin kullanıldığı bu evlerde akustik konfor, yapı malzemelerinin sağladığı ses yalıtımı ve ses emilim özelliklerine bağlı olarak şekillenmektedir.

Kaleiçi evlerinde yaygın olarak taş ve ahşap malzemeler kullanılmaktadır. Taş, ses geçirgenliği düşük olan doğal bir malzemedir ve dış ortamdan gelen sesleri sönmüleyerek iç mekânda daha sessiz bir ortam oluşumuna katkı sağlamaktadır. Ahşap ise hem ses yutucu özelliklere sahiptir hem de iç ortamda sıcak ve doğal bir akustik ortam yaratmaktadır (Küçüktüvek ve Amirov, 2025).

Izgara yerleşim morfolojisinde genellikle bitişik nizamda inşa edilen Kaleiçi konutlarında bitişik duvarlar, komşu evlerden gelen seslerin geçişini artırmaktadır. Buna karşın evlerin genellikle büyük odaları, yüksek tavanları ve geniş pencereleri vardır ve bu özellikler, sesin iç mekânda daha homojen bir şekilde yayılmasını sağlarken yankılanmayı minimize etmektedir. Evlerin büyük pencereleri, iç mekânda doğal aydınlatma sağlarken aynı zamanda sesin dışarıdan içeriye girmesini de kolaylaştırmaktadır.

Doğa dostu malzemelerle inşa edilmiş bu geleneksel konutlar hem barındırdıkları kültürel değerler hem de tasarımları ve yapılaşmaları ile sürdürülebilir örneklerdir ve farklı duvar oluşumları ile kullanıcıları için farklı akustik konfor seviyeleri sunmaktadırlar. Bu noktada özgün değerler barındıran bu geleneksel binaların nitelikli öğreticiler olması nedeniyle

incelenmesi (Rapoport, 1999; Foruzanmehr ve Vellinga, 2011; Correria vd., 2014) ve akustik konfor için malzeme odaklı temel saptamalar yapılarak elde edilen bilginin günümüz sürdürülebilir binalarının akustik konforunun oluşturulması açısından önemlidir.

### 5.1. Kaleiçi Bölgesindeki Konutlar Üzerinden Akustik Performansın Değerlendirilmesi

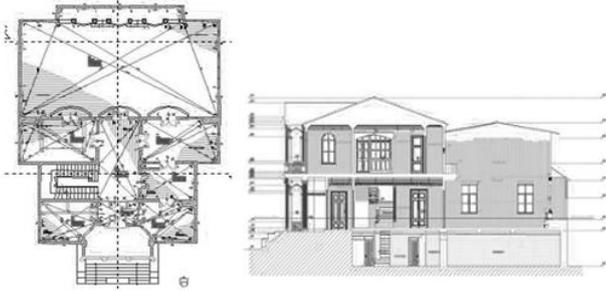
Osmanlı Dönemi'nde doğa dostu taş, ahşap ve kerpiç malzemeler inşa edilmiş, yaşam süresince pek çok nedene bağlı olarak hasar görmüş, ancak barındırdığı kültür mirası değerleri nedeni ile özgün haline uygun olarak restore edilmiş, tescilli altı konut çalışmanın vakasını oluşturmaktadır (Şekil 4). Bu nedenle bölüm içinde her binanın plan ve teknik özellikleri kısaca tanımlanmaktadır.



Şekil 4. İncelenen Konutların Kaleiçi'ndeki Konumları

#### Türk Ocağı Binası

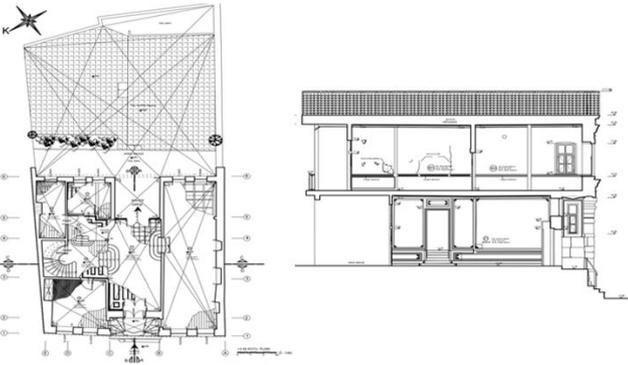
Kaleiçi'nde Türk Ocağı Caddesi üzerinde 1905 yılında inşa edilen Tarihi Türk Ocağı binası, Rum kökenli bir aile tarafından onarılmıştır. İki katlı bina, zemin ve birinci kattan oluşmaktadır (Şekil 5). Karniyarık (orta sofalı) plan tipinde organize edilmiş binanın salon kısmının sonradan yapıldığı ön görülmektedir. Ahşap karkas sistemde inşa edilen binanın zemin ve birinci kat duvarları tuğla dolgulu ahşap çıtalı iken salon kısmının yığma yapım tekniğinde çözümlendiği görülmektedir. Döşemeler ve tavan kaplamaları ahşap malzemeden yapılmıştır (20 cm) (Bozdağ, 2013).



Şekil 5. Türk Ocağı Binası Plan, Kesit (Bozdağ, 2013) ve Cephesi (Yazar fotoğraf arşivi, 2025)

#### Duyuni Umumiye Binası

Envanter numarası 174 (EKVKBK, 2024) olan tescilli Duyun-i Umumiye Binası, Maarif Caddesi üzerinde, 76 ada 29 parselde yer almakta olup günümüzde otel olarak hizmet vermektedir (Şekil 6).



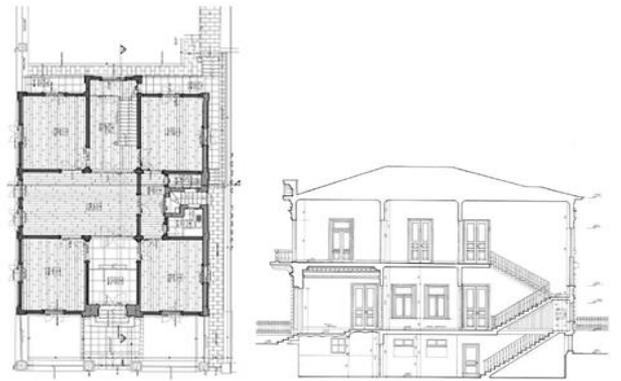
Şekil 6. Duyuni Umumiye Binası Plan, Kesit (T. Ü. Mim. Fak. Restorasyon Anabil. Dal. Arşivi, 2024) ve Cephesi (Yazar fotoğraf arşivi, 2025)

İki katlı olan yapı, orta sofalı plan tipinde olup yığma sistemle inşa edilmiştir. Beden duvarları doğal taş üzeri

melez sıvalı olan binanın aktif kullanılan bir bahçesi bulunmaktadır. Ahşap malzemeden oluşturulan döşeme ve tavan kaplamaları 30 cm kalınlığındadır (T. Ü. Mim. Fak. Restorasyon Anabil. Dal. Arşivi, 2024).

#### İlhan Koman Evi

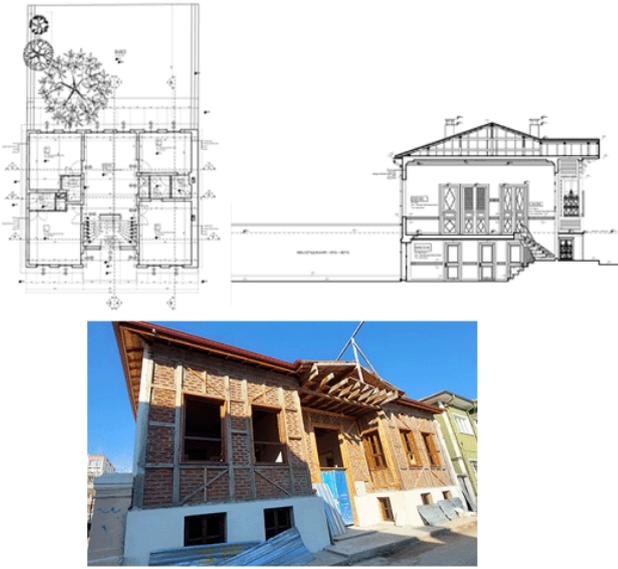
Maarif Caddesi üzerinde, 65 ada 1 parselde yer alan İlhan Koman Evi, günümüzde Anıtlar Kurulu binası olarak kullanılmaktadır. İç sofalı plan tipine sahip bina, kâgir bodrum üzeri ahşap karkas olarak inşa edilmiştir (Dündar, 2024). Yapının bodrum katı dış duvarları moloz taş ve tuğla dizgileri ile almaşık olarak örülmüştür (Aygül, 2022). Zemin kat ve üst katta yer alan duvarlarda herhangi bir dolguya yer verilmeyip dıştan lambalı tahta, içten bağdadi sıva ile kaplanmıştır (Şekil 7) Yapı içerisinde bodrumdaki depo ve giriş holünün üzeri volta döşemeye sahipken diğer mekanlar laminant kaplamalı ahşap döşeme (25 cm) ile örtülüdür (Dündar, 2024; Aygül, 2022).



Şekil 7. İlhan Koman Evi Plan, Kesit (Dündar, 2024) ve Cephesi (Yazar fotoğraf arşivi, 2025)

#### İdris Bey Evi

Envanter numarası 125 (EKVKBK, 2024) olan tescilli İdris Bey evi, Türk Ocağı Caddesi üzerinde 59 ada 4 parselde yer almakta olup bodrum ve zemin kattan oluşmaktadır. Orta sofa plan tipine sahip yapı ahşap karkas sistemde inşa edilmiştir (Şekil 8). Ahşap taşıyıcıların arası tuğla dolguludur. Bodrum kat duvarları ise moloz taş ile örülmüştür. Döşemeler ve tavan kaplamaları ahşap malzemeden yapılmıştır (20 cm) (Tekin, 2024).



Şekil 8. İdris Bey Evi Plan, Kesit (Tekin, 2024) ve Cephesi (Yazar fotoğraf arşivi, 2025)

#### Atatürkçü Düşünce Derneği

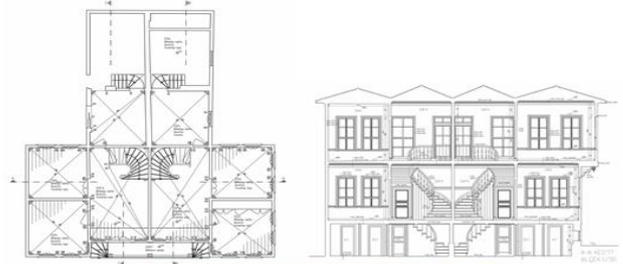
Envanter numarası 315 (EKVKBK, 2024) olan tescilli Atatürkçü Düşünce Derneği, Orta Kapı Caddesi üzerinde, 135 ada 6 parselde yer almakta olup orta sofa plan tipindedir (Şekil 9). Bodrum üzeri iki katlı olan yapının bodrum katı tuğla örgülü, zemin ve birinci katları ahşap çatki arası kerpiç dolgudur. Kalınlığı 25 cm olan döşeme ve tavan kaplamalarında ahşap malzeme tercih edilmiştir (Edirne Taşınmaz Kültür Varlıkları Envanteri II, 2013; Özyakalı ve Kısa Ovalı, 2022).



Şekil 9. Atatürkçü Düşünce Derneği Plan, Kesit (Edirne Taşınmaz Kültür Varlıkları Envanteri II, 2013) ve Cephesi (Yazar fotoğraf arşivi, 2025)

#### İkiz Evler

Envanter numarası 132 (EKVKBK, 2024) olan tescilli İkiz evler, Maarif Caddesi üzerinde, 62 ada 2-3 parselde yer almakta olup dış sofalı iki yapıdan oluşmaktadır. Bodrum kat kesme taş üzeri sıvalı iken zemin kat ve birinci kat tamamen kerpiç dolgulı ahşap kaplamadır (Tekin, 2024). Zemin kat girişi cepheden içeri çekilmiştir. Birinci kat üç cephede de çıkma yapılarak zemin kat üzerine konumlandırılmıştır (Şekil 10). Ahşap malzemenen oluşturulan döşeme ve tavan kaplamaları 17 cm kalınlığındadır (Edirne Taşınmaz Kültür Varlıkları Envanteri II, 2013).



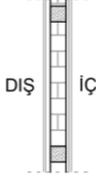
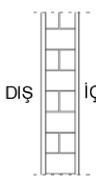
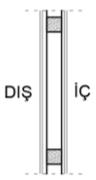
Şekil 10. İkiz Evler Plan, Kesit (Edirne Taşınmaz Kültür Varlıkları Envanteri II, 2013) ve Cephesi (Yazar fotoğraf arşivi, 2025)

#### 6. Bulgular

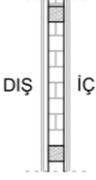
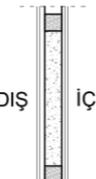
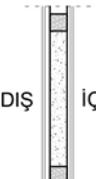
Mimari özellikleri ve yapılaşma durumları kısaca özetlenen konutların akustik performans analizleri "INSUL" akustik programı kullanılarak yapılmıştır. Çalışma, örnekler üzerinden matematiksel veriler ile binaların akustik konfor seviyelerini ölçmeye odaklanırken, aynı zamanda doğal malzemeler ve duvar katmanları açısından da karşılaştırma olanağı sunmaktadır.

Bu bağlamda Edirne Kaleiçi Bölgesi'nde tarihi değerlerini koruması nedeni ile restore edilerek aynı veya farklı işlevlerle aktif biçimde kullanılan kültür mirası altı bina özelinde yapılan akustik konfor değerlendirmesi Tablo 5a ve Tablo 5b'de "INSUL" program verilerini kapsamak üzere detaylı sunulmaktadır.

Tablo 5a. Örnek Konutların INSUL Programında Elde Edilen Akustik Performans Değerleri

Konut Adı	Duvar Kesiti (Dıştan İçe Doğru)	Ağırlıklı ses azaltma indeksleri $R_w$ (C,Ctr) dB (100-3150 Hz)	Hesaplama Sonucu $D_{nT,A,tr}$ (dB) Değerleri (100-3150 Hz)
Türk Ocağı Binası	 <p>Sönmüş Kireç Harçlı Sıva (2 cm, 1800 kg/m<sup>3</sup>) Bağdadî Çıta(2cm, 600 kg/m<sup>3</sup>) Ahşap Dikme Arası Tuğla Dolgu (10 cm, 1800 kg/m<sup>3</sup>) Bağdadî Çıta(2cm, 600 kg/m<sup>3</sup>) Sönmüş Kireç Harçlı Sıva (2 cm,1800 kg/m<sup>3</sup>)</p>	42(-4,-12)	40.4 dB
Duyuni Umumiye Binası	 <p>Sönmüş Kireç Harçlı Sıva (2 cm, 1800 kg/m<sup>3</sup>) Taş Duvar (60 cm, 1600 kg/m<sup>3</sup>) Sönmüş Kireç Harçlı Sıva (2 cm, 1800 kg/m<sup>3</sup>)</p>	55(-2,-4)	51.9 dB
İlhan Koman Evi	 <p>Lambalı Tahta(2cm,700 kg/m<sup>3</sup>) Ahşap Dikme (10 cm, 600 kg/m<sup>3</sup>) Bağdadî Çıta(2cm, 600 kg/m<sup>3</sup>) Sönmüş Kireç Harçlı Sıva (2 cm, 1800 kg/m<sup>3</sup>)</p>	38(-1,-4)	36.7 dB

Tablo 5b. Örnek Konutların INSUL Programında Elde Edilen Akustik Performans Değerleri

Konut Adı	Duvar Kesiti (Dıştan İçe Doğru)	Ağırlıklı ses azaltma indeksleri $R_w$ (C,Ctr) dB (100-3150 Hz)	Hesaplama Sonucu $D_{nT,A,tr}$ (dB) Değerleri (100-3150 Hz)
İdris Bey Evi	 <p>Sönmüş Kireç Harçlı Sıva (2 cm, 1800 kg/m<sup>3</sup>) Bağdadi Çıta(2cm, 600 kg/m<sup>3</sup>) Ahşap Dikme Arası Tuğla Dolgu (10 cm,1800 kg/m<sup>3</sup>) Bağdadi Çıta(2cm, 600 kg/m<sup>3</sup>) Sönmüş Kireç Harçlı Sıva (2 cm, 1800 kg/m<sup>3</sup>)</p>	48(-1,-3)	50.9 dB
Atatürkçü Düşünce Derneği	 <p>Bağdadi Çıta(2cm, 600 kg/m<sup>3</sup>) Ahşap Dikme Arası Kerpiç Dolgu (10cm,1550 kg/m<sup>3</sup>) Bağdadi Çıta(2cm, 600 kg/m<sup>3</sup>) Sönmüş Kireç Harçlı Sıva (2 cm, 1800 kg/m<sup>3</sup>)</p>	36(-4,-10)	29.5 dB
İkiz Evler	 <p>Bağdadi Çıta(2cm, 600 kg/m<sup>3</sup>) Ahşap Dikme Arası Kerpiç Dolgu (10cm,1550 kg/m<sup>3</sup>) Bağdadi Çıta(2cm, 600 kg/m<sup>3</sup>) Sönmüş Kireç Harçlı Sıva (2 cm, 1800 kg/m<sup>3</sup>)</p>	37(-4,-10)	29.7 dB

Veriler kapsamında incelenen örneklerin dört tanesi yönetmelikte belirtilen sınır değer 30 desibeli aşarak akustik konfor koşullarını sağlamıştır. Ancak ahşap karkas arası kerpiç dolgulu duvarlara sahip iki bina sınır değeri sağlamamaktadır. Özellikle taş ve ahşap karkas arası tuğla dolgulu örnekler duvar en kesitlerinin fazla

olması sebebiyle daha yüksek akustik performans göstermiştir (51-40 dB aralığı). Ahşap karkas yapıların duvar kesitlerinde kerpiç dolgulu veya dolgusuz örnekler (29-36 dB aralığı) hacim büyüklükleri ve duvar en kesitlerine göre yönetmelik sınır değerine yakın veya sınır değerinin altında performans göstermiştir.

## 7. Tartışma

Bu çalışma, Edirne-Kaleiçi'ndeki tescilli yapıların akustik performansını analiz ederek, geleneksel doğa dostu yapı malzemelerinin ses yalıtımı üzerindeki etkisini ortaya koymuştur. Sonuçlar, bölgedeki tarihi yapıların mevcut yönetmeliklere uygun şekilde gürültüye karşı etkin bir koruma sağladığını ve malzeme kalınlığındaki artışın ses yalıtım katsayısını doğrudan iyileştirdiğini göstermektedir.

Benzer şekilde geleneksel yapı malzemelerinin akustik performans üzerindeki etkisini ele alan araştırmalar incelendiğinde; taş, kerpiç ve ahşap gibi doğal malzemelerin ses yalıtımında yüksek performans sunduğu görülmektedir. Avrupa'daki tarihi kent merkezlerinde yapılan çalışmalar, masif taş ve tuğla yapıların sahip olduğu yüksek yoğunluk nedeniyle dış gürültüye karşı etkili bir bariyer oluşturduğunu, ancak iç mekân akustiği açısından ek elemanlara ihtiyaç duyduğunu ortaya koymaktadır.

Teorik modelleme ve saha gözlemine dayanan bu çalışma doğal yapı malzemelerinin akustik konfora olan etkisini vurgulayarak, kültürel mirasın korunmasını desteklemektedir. Farklı bina türleri ve malzeme alternatifleri üzerinden yapılacak karşılaştırmalı analizler, kültürel mirasın akustik performans açısından daha kapsamlı değerlendirilmesine katkı sağlayacaktır. Ayrıca gelecek araştırmalarda deneysel saha ölçümleri ile ileri düzey akustik simülasyon tekniklerinin entegre kullanımı tarihi kent dokusunun akustik performansının bütüncül bakışla ortaya konulmasını sağlayacaktır.

## 8. Sonuç

Sürdürülebilirlik bakışı içinde mevcut yerel örneklerin ve kültür mirası binaların korunarak geleceğe aktarılması önceliklidir. Bu binaların inşa ve imal süreçlerinin ya da yapı kabuğu ve yapı malzemelerinin günümüz simülasyon programları aracılığı ile analizi, yerel yapılaşmadan gelen bilginin geleceğe yön verme potansiyelinin ortaya konması bakımından önemlidir.

Aynı zamanda bu yöntem kültür mirası binaların restorasyon veya renovasyonlarında günümüz konfor koşulları için desteklenmesi gerekli noktaların saptanması açısından da gereklidir. Bu gerekliliğe odaklanarak, Edirne Kaleiçi'ndeki altı tescilli binayı akustik konfor açısından analiz eden bu çalışma özelinde aşağıda belirtilen şu sonuçlara ulaşılmıştır.

Hesaplamalar kapsamında Türk Ocağı, Duyuni Umumiye Binası, İdris Bey evi ve İlhan Koman evinde (dört bina) "Binaların Gürültüye Karşı Korunması Hakkında Yönetmelik'te belirtilen (dış gürültü düzeylerine ve alıcı odası hassasiyet derecesine göre sağlanacak en düşük ses yalıtım değeri) 30 dB sınır değerinin sağlandığı ve bu kapsamda gürültüye karşı etkin bir koruma olduğu belirlenmiştir. Kerpiç

dolguya sahip Atatürkçü Düşünce Derneği ve İkiz Evler de ise sınır değere çok yakın olmakla birlikte istenen sınır değer sağlanamadığı ve bu nedenle bu iki binada akustik açıdan iyileştirme yapılması gerektiği belirlenmiştir. Ayrıca altı örnek genelinde duvarlarda kullanılan malzemelerin en kesitin artmasıyla yalıtım değerlerinin de arttığı görülmüştür.

Bu çalışma, bölgenin kültürel ve çevresel değerlerini koruma ve sürdürülebilirliği artırma amacı taşımaktadır. Geleneksel yapı tekniklerinin ve doğal malzemelerin kullanımının, yapıların enerji verimliliği ve çevresel uyum açısından kritik öneme sahip olduğu görülmüştür. Binaların akustik performansının taş, tuğla, kerpiç ve ahşap gibi doğal malzemelerin ses yutuculuk ve yalıtım özelliklerine bağlı olarak şekillendiği saptanmıştır. Bu da iç mekân konforunu önemli ölçüde arttırmaktadır.

Akustik performans ölçümleri, aslına uygun biçimde restore edilmiş konutların günümüz standartlarına çoğunlukla uygun olduğunu göstermiştir. "INSUL" gibi akustik hesaplama programlarının kullanımı, yapı malzemelerinin ve tasarım özelliklerinin ses yalıtım ve ses yutma üzerindeki etkilerini değerlendirme konusunda etkili araçlar olduğunu ortaya koymuştur. Bu simülasyon araçlarının binaların restorasyon veya renovasyonu öncesi kullanımının olası iyileştirme gereksinimlerinin önceden belirlenmesi ve restorasyon veya renovasyon süreçlerinin bu kapsamda geliştirilmesi bakımından çok değerlidir.

Çalışma kapsamında gerçekleştirilen analizler, bölgedeki yapıların gürültüye karşı etkin bir bariyer oluşturduğunu ve yaşam kalitesine katkı sağladığını da göstermektedir.

Günümüz sürdürülebilir bina ve yerleşimlerinde iç mekân konforunu etkileyen gürültü düzeyinin belirlenerek akustik konforun sağlanması yoluyla yaşam kalitesinin artırılması bir gereklilik olarak ortaya çıkmaktadır. Bu noktada "BREEAM, LEED, GREENSTAR, DGNB, CASBEE, SBtool" gibi uluslararası ve "YeS-TR" gibi ulusal sertifikasyonların binaların akustik performanslarını belirleyecek standartlar getirmesi ve bunları sağlayan bina ve çevreleri desteklemesi, sürdürülebilir kalkınma hedefleri açısından da önemsenmektedir.

Sonuç olarak, Edirne-Kaleiçi konutları, sosyo-kültürel mirasın korunmasında ve çevresel sürdürülebilirlik ilkelerinin uygulanmasında hem bölge hem de geleneksel konut yapılaşmasının ekoloji kökenli nitel ve nicel değerlerinin anlaşılması ve gelecek nesillere aktarılması için kilit bir rol oynamaktadır. Bu çalışma, doğa dostu malzemeler ile inşa edilmiş geleneksel binaların modern yaşamın akustik gereksinimlerine uyum sağlayabileceğini göstermektedir. Kullanılan yöntem itibarıyla çalışma, akustik performans hesaplamalarında kullanılan diğer programlar veya

başka örneklem alanlarda tekrarlanabilme potansiyeline sahiptir.

### Araştırmacıların Katkısı

Bu araştırmada; Yazar1, makale çatkısının oluşturulması, binalara ilişkin resmi bilgi edinme, makale kritiği ve yazım; Yazar2, literatür araştırması, alan çalışması, makale yazım ve program verisi oluşturma konularında katkı sağlamışlardır.

### Çıkar Çatışması

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir.

### Kaynaklar

Aiduang, W., Chanthaluck, A., Kumla, J., Jatuwong, K., Srinuanpan, S., Waroonkun, T., Oranratmanee, R., Lumyong, S., & Suwannarach, N. (2022). Amazing fungi for eco-friendly composite materials: A comprehensive review. *Journal of Fungi (Basel)*, 8(8), 842.

Akansel, S. (1990). *Edirne-Kaleiçi geleneksel konutlarında plan ve cephe tipolojisi* (Yüksek Lisans Tezi). Trakya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Edirne.

Akansel, S. (2004). Edirne Kaleiçi geleneksel konutları ve Kaleiçi'nin günümüzdeki görünümü. *Trakya Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 5(2), 199-207.

Arenas, J. P. & Sakagami, K. (2020). Sürdürülebilir akustik malzemeler. *Sürdürülebilirlik*, 12(16), 6540. <https://doi.org/10.3390/su12166540>

Ateş, E. G. (2007). *Kültürel mirasımız olan Yerebatan Sarnıcı'nın akustik sorunlarının incelenmesi* (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Aydın, D. & Mıhlayanlar, E. (2017). Yüksek konut yapılarında iç ortam kalitesinin incelenmesi. *Megaron*, 12(2), 213-227. <https://doi.org/10.5505/megaron.2017.07830>

Aygül, F. (2022). *Edirne Kaleiçi'ndeki sivil mimarlık örnekleri ve İlhan Koman Evi restorasyon önerisi* (Yüksek Lisans Tezi). Fatih Sultan Mehmet Vakıf Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İstanbul.

Baştaoğlu, E. (2017). *Leed yeşil bina sertifika sistemi uygulamalarının değerlendirilmesi: Avrupa ve Türkiye* (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

Binaların Gürültüye Karşı Korunması Yönetmeliği Açıklama ve Uygulama Klavuzu. (2018). Erişim tarihi: 16 Ekim 2025, Erişim adresi:

<https://www.izoder.org.tr/dosyalar/binalarin-gurultuye-karsi-korunmasi-yonetmeliği-aciklama-ve-uygulama-klavuzu.pdf>

Çevre ve Şehircilik Bakanlığı. (2017, Mayıs 31). *Binaların gürültüye karşı korunması hakkında yönetmelik*. Resmî Gazete, Sayı:30082.

Çevre ve Şehircilik Bakanlığı. (2022, Mayıs 12). *Binalar ile yerleşmeler için yeşil sertifika yönetmeliği*. Resmî Gazete, Sayı: 31864.

Correia, M.; Dipasquale, L.; Mecca, S. (2014), VERSUS: Heritage for Tomorrow. Vernacular Knowledge for Sustainable Architecture; Firenze University Press: Florence, Italy

Deveci, S., & Yorulmaz, F. (2022). Edirne il merkezinde çevresel gürültünün değerlendirilmesi. *Mersin Üniversitesi Sağlık Bilimleri Dergisi*, 15(2), 234-244. <https://doi.org/10.26559/mersinsbd.1070709>

Dundar, M. (2024). Edirne Kaleiçi'nde neoklasik bir sivil mimarlık örneği: İlhan Koman Evi. *Art-Sanat*, 21, 261-288. <https://doi.org/10.26650/artsanat.2024.21.1353253>

Edirne Kültür Varlıklarını Koruma Bölge Kurulu (EKVKBK) Arşivi.(2024).

Edirne Taşınmaz Kültür Varlıkları Envanteri II (2013). *Edirne Valiliği İl Kültür ve Turizm Müdürlüğü Yayınları*, Edirne, Erişim tarihi: 15 Nisan 2025, Erişim adresi: <http://www.edirne.gov.tr/edirne-yayinlari>

Foruzanmehr A. & Vellinga, M., (2011) Vernacular architecture: questions of comfort and practicability, *Building Research & Information*, 39(3); 274-285, <https://doi.org/10.1080/09613218.2011.562368>

Google Earth, Erişim tarihi: 20.01.2025, Erişim adresi: <https://earth.google.com>,

Hacı, İ. & Şenkal Sezer, F. (2015). Yapı kabuğunda işitsel konforun sağlanması üzerine bir araştırma. *Artium*, 3(2), 1-9.

ISO 16283-3. (2016). *Acoustics – Field measurement of sound insulation in buildings and of building elements*.

Karabiber, F. Z. (1991). *Mimari akustikle ilgili başlıca terim tanım formül ve büyüklükler*. Yıldız Teknik Üniversitesi Yayın No:210, İstanbul

Köse-Mutlu, B., Arslanoğlu, Z. O., Günaçtı, B., Say, B., Şahin, F., Yılmaz, C. & Yardımcı-Tiryakioğlu, N. (2019). Uluslararası yeşil bina sertifika sistemlerinin incelenmesi ve tasarlanan ulusal sertifika sisteminin

- kullanımı: Bir kampüs binası ile vaka çalışması. *İklim Değişikliği ve Çevre*, 4(2), 32-41.
- Kurtay, C., Irklı Eryıldız, D., & Ulukavak Harputlugil, G. (2008). Mimar Kemaleddin Salonu akustik performans değerlendirmesi ve performans iyileştirme önerileri. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 23(3).
- Kurra, S. (2020). *Environmental noise and management: Overview from past to present*. John Wiley & Sons Ltd. <https://doi.org/10.1002/9781118887417>
- Küçüktüvek, M., & Amirov, N. (2024). Ahşap yapıların biyofilik tasarımla entegrasyonu: Doğaya dönüş ve sürdürülebilirlik. *Kent Akademisi Dergisi*, 18(1), 520-539. <https://doi.org/10.35674/kent.1559949>
- Malabadi, R. B., Kolkar, K. P. & Chalannavar, R. K. (2023). Industrial *Cannabis sativa* (Hemp fiber): Hempcrete – A plant-based and eco-friendly building construction material. *International Journal of Research and Innovation in Applied Science*, 8(3), 67-78.
- Ökten, G. (2010). *Çevre kontrolü ve yapı teknolojisi* (Yüksek Lisans Tezi). İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Öztürk, P. (2020). *Yapı biyolojisi açısından kerpiç kullanımının etkileri* (Yüksek Lisans Tezi). Hasan Kalyoncu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gaziantep.
- Özyakalı, N.N. & Kısa Ovalı, P. (2022), Modern ve Tarihi İki Binanın Sürdürülebilir Mimari Kapsamında Isı Kayıplarının Analizi: Edirne Kaleiçi Bölgesi, Kitapta: Mimarlık Bilimlerinde Güncel Konular, Ed.: Murat Dal, 1. Baskı, Aralık 2022, Livre de Lyon, France, s:27-42
- Perker, Z. S. (2023). The concept of "adaptability in building" in green building certification: DGNB certificate example. *4th International Istanbul Current Scientific Research Congress*, May 1-2 2023, (pp. 149-155). İstanbul, Türkiye.
- Rapoport, A. (1999), A Framework For Studying Vernacular Design, *Journal of Architectural and Planning Research*, 16(1); 52-64
- Süleymanoğlu, B. (2023). Doğal hammaddeli yapı elemanı kesitlerinin gürültü denetimi açısından değerlendirilmeleri üzerine bir araştırma. *Mesleki ve Sosyal Bilimler Dergisi (MSBD)*, 4(1).
- Şan Özbilen, B. (2021). *Ses yalıtım ve maliyet performansına bağlı duvar tipi seçimi için bir yaklaşım* (Doktora tezi), İstanbul Teknik Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, İstanbul.
- Şan Özbilen, B., & Tamer Bayazıt, N. (2021). Decision-making method for choosing best alternatives for internal walls based on cost and sound insulation performance. *ITU A/Z*, 18(3), 735-751. <https://doi.org/10.5505/ituifa.2021.59847>
- Tamer Bayazıt, N., Şan, B. & Ökten, G. (2011). Yeşil bina sertifikasyonunda akustik performansın değerlendirilmesi. *X. Ulusal Tesisat Mühendisliği Kongresi*, 13-16 Nisan 2011, (pp. 1567-1577), İzmir, Türkiye.
- Tekin, E. (2025), Ercüment Tekin Mimarlık Bürosu Proje Arşivi, Edirne.
- Titiz, M. (2022). Konutta karbonu sıfırlamanın yolu doğal yapı malzemeleri ve yöntemlerinden geçer. *BAU Teknolojileri – Ekolojik ve Sürdürülebilir Yapı Teknolojileri Dergisi*, 1(1), 71.
- Trakya Üniversitesi Mimarlık Fakültesi Restorasyon Anabilim Dalı Arşivi. (2024).
- Yazar fotoğraf arşivi. (2025).
- Yazıcı, A. B. (2022). *Sağlıklı yapı tasarımı: Konut yapıları üzerine bir inceleme* (Yüksek Lisans Tezi). Bursa Uludağ Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Bursa.
- Yenidoğan, E. S. (2019). *Yeşil bina sertifika sistemlerinin akustik açıdan değerlendirilmesi: Açık planlı ofis örneği* (Yüksek Lisans Tezi). Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Yılmaz, F. D. (2021). *Tarihi dokuda yenileme sürecinde yeşil çatılar: Edirne Kaleiçi örneği* (Yüksek lisans tezi). Trakya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Edirne.
- Yılmaz, K. (2022). İç mekânda geçicilik kavramının karbon ayak izine etkilerini biyomalzeme kullanımı ile azaltma. *Modular Journal*, 6(1), 66-87. <https://doi.org/10.59389/modular.1136468>

## TESCİLLİ YIĞMA YAPILARIN DEPREM HASAR GÖREBİLİRLİK DEĞERLENDİRMESİ: FOÇA ÖRNEĞİ

Bahar DURMAZ DRINKWATER <sup>1\*</sup>, Hayriye Oya SAF <sup>2</sup>

<sup>1</sup> University College London, Planlama Bölümü, Londra-İngiltere, ORCID No : <https://orcid.org/0000-0002-4720-2529>

<sup>2</sup> Mersin Üniversitesi Mimarlık Fakültesi Mimarlık Bölümü, Mersin,  
ORCID No : <https://orcid.org/0000-0002-7281-0358>

Anahtar Kelimeler	Öz
Kültürel Miras Depreme Dirençli Kentler Hasar görebilirlik Analizi Sokak Taraması Yöntemi Foça	<p><i>Kültür mirasının bir parçası olan tescilli yapıların, deprem risklerinin belirlenmesi kapsamında hasar görebilirlik analizlerinin yapılması, tarihi mirasın sürdürülebilirliğinin ve kentlerin depreme dirençliliğinin sağlanması açısından çok önemlidir. Bu bağlamda, çalışma kapsamında, İzmir'in Foça ilçesinde kentsel sit alanında bulunan, tescilli yığma yapıların depreme karşı göreceli hasar görebilirlikleri analiz edilmiştir.</i></p> <p><i>Bu çalışma, parsel-bazında bir alan çalışması olup, analizler risk değerlendirme süreçlerinin ilk aşaması olarak kabul edilen hızlı tarama yöntemlerinden biri olan, gözleme dayalı "Sokak Taraması Yöntemi"yle gerçekleştirilmiştir. 2023 yazında, Foça ilçesi İsmetpaşa, Fevzipaşa ve Atatürk Mahallelerini kapsayan kentsel sit alanında gerçekleştirilen çalışmada toplam 208 tescilli yığma yapı bu yöntemle analiz edilmiştir. Bina Deprem Puanları hesaplanmış ve yapıların göreceli hasar görebilirlik seviyeleri belirlenmiştir. Analiz kapsamında gözle görünen kalite, bitişik yapılardaki çarpışma etkisi, cephelerdeki dolu-boş oranı, dolu-boş düzeni gibi analiz parametreleri değerlendirilmiştir. Tescilli 259 yapı içerisinde analiz edilen 208 yapının, 156 tanesinin (%75) göreceli riski düşük, 52 tanesinin ise (%25) göreceli riski yüksek olarak tespit edilmiştir. Elde edilen veriler doğrultusunda, yapılar göreceli hasar görebilirlik seviyelerine göre sınıflandırılmış ve kentsel doku içindeki konumlarına bağlı olarak kentsel riskleri değerlendirilmiştir. Öncelikli belirlenen yapıların bina içlerine girilerek, detaylı ve hesaplamalara dayalı mühendislik analizlerinin yapılması önerilmiştir. Bu kapsamda, çalışma, tescilli yığma yapıların deprem güvenliğini artırmak için öncelikli olarak hangi yapıların detaylı incelemeye tabi tutulması gerektiğini belirlemektedir.</i></p> <p><i>Sonuç olarak, çalışma, deprem risk azaltımı kapsamında kültürel mirasın risk yönetimi ve korunması konusunda önemli bir veri sağlamaktadır. Ayrıca çalışma kapsamında, yapıların restorasyon süreçlerinde, kültürel mirası koruma stratejileriyle deprem güvenliği önlemlerinin bütünlük bir şekilde ele alınması gerektiği vurgulanmaktadır.</i></p>

## EARTHQUAKE VULNERABILITY ASSESSMENT OF REGISTERED MASONRY BUILDINGS: THE CASE OF FOÇA

Keywords	Abstract
Cultural Heritage Earthquake- Resilient Cities Vulnerability Assessment Sidewalk Survey Method Foça	<p><i>Assessing the earthquake vulnerability of registered buildings in urban conservation sites is, essential for identifying earthquake risks, ensuring the sustainability of cultural heritage, and enhancing urban resilience.</i></p> <p><i>This study analyzes the relative earthquake vulnerability of registered masonry buildings in Foça using the "Sidewalk Survey Method", a rapid observational assessment technique recognized as the initial stage of earthquake risk evaluation processes. Conducted in the summer of 2023, the analysis covered buildings in the İsmetpaşa, Fevzipaşa, and Atatürk Neighborhoods, located in the urban conservation area.</i></p> <p><i>Building Earthquake Scores were calculated based on the parameters such as apparent building quality, the impact of adjacent buildings (pounding effects), elevation solid-to-void ratios, and irregularities in facade openings. Findings indicate that 156 buildings (75%) exhibit low relative earthquake vulnerability, while 52 (25%) have high relative vulnerability. Their vulnerability was also evaluated in relation to their spatial distribution within the urban fabric. The study identifies registered masonry buildings that require prioritization for in-depth investigation using detailed, analytical methods, including on-site interior evaluations, to enhance earthquake safety.</i></p>



Bu eser, Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>) hükümlerine göre açık erişimli bir makaledir.

This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

*In conclusion, this study provides significant data for the risk management and conservation of cultural heritage within the framework of earthquake risk mitigation. Furthermore, this study underscores the importance of integrating earthquake safety with heritage conservation in historical building restoration, ensuring both structural resilience and cultural sustainability.*

Araştırma Makalesi	Research Article
Başvuru Tarihi : 18.03.2025	Submission Date : 18.03.2025
Kabul Tarihi : 23.09.2025	Accepted Date : 23.09.2025

\* Sorumlu yazar: [bahardurmaz@gmail.com](mailto:bahardurmaz@gmail.com)  
<https://doi.org/10.31796/ogummf.1660709>

## 1. Giriş

Depremselliği yüksek olan bir bölgede yer alan Türkiye, Kuzey Anadolu Fay Kuşağı başta olmak üzere tektonik bir aktivite alanı üzerinde yer almakta, yıllık santimetreler hızında doğrultu atımlı kayma hareketleri ile sürekli olarak deprem gerçekliğiyle karşı karşıya kalmaktadır. Depremleri önlemek mümkün olmasa da, bilinçli ve etkili yöntemler sayesinde, deprem hasarlarını azaltmak mümkündür (Işık, 1992, 102-109). Deprem konusunda Türkiye açısından en önemli problemlerden biri yapı stokunu oluşturan yapıların depreme dayanıklı olmaması ve bu konuda duyulan endişelerdir. Özellikle 2007 yılında yayınlanan Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik öncesinde inşa edilen yapıların, yetersiz donatı miktarı nedeniyle olası bir depremde daha yüksek hasar riski taşıdığı vurgulanmaktadır (Sucuoğlu, 2007; Tokgöz ve Bayraktar, 2015).

Olası depremlerde can ve mal kayıplarını en aza indirmek için “depreme dirençli kentler” inşa etme sürecinin bir aşaması olan, risk değerlendirmesi çok önemlidir (Görür, 2024). Ancak, incelenecek yapıların fazlalığı nedeniyle, her bir yapının detaylı mühendislik hesaplarına dayalı yapısal analizinin yapılması, zaman, maliyet ve işgücü açısından her durumda uygulanabilir değildir. Bu nedenle, mevcut yapıların ve kentsel dokunun deprem riskinin, etkili, pratik, sistematik ve hızlı uygulanabilir yöntemlerle belirlenmesi kritik bir gerekliliktir. Bu süreçte, kademeli risk değerlendirme yöntemlerinin kullanımı, etkili bir çözüm olarak öne çıkmaktadır (Sucuoğlu, 2007; Sucuoğlu ve Yazgan 2003; Karaşin ve diğerleri, 2016; Akbulut ve Aytuğ, 2005; Güler ve Canbaz, 2020; Tokgöz ve Bayraktar, 2015; Işık, 2013; Okuyucu ve diğerleri, 2018).

Mevcut yapı stokunun önemli bir parçası olan tarihi yapılar ve kent dokuları, kültürel mirasın sürdürülebilirliği açısından özel bir değere sahip olup, bu yapıların risk değerlendirmesi ayrı bir gereklilik taşımaktadır. Bir sonraki bölümde detaylı açıklanacağı gibi, tarihi yapıların risk değerlendirmesi konusunda çeşitli zorluklar da vardır. Bu zorluklar, yapıların strüktürel hassasiyetleri, geleneksel inşaat teknikleriyle inşa edilmiş olmaları, güncel deprem

yönetmeliklerinden önce yapılmış olmaları, belgeleme ve veri eksiklikleri, malzeme sınırlamaları ve koruma ile güvenlik arasındaki dengeyi sağlama zorlukları gibi birçok faktörü kapsamaktadır. Bu hususlar, İstanbul Valiliği ve T.C. Başbakanlık Vakıflar Genel Müdürlüğü tarafından hazırlanan “Tarihi Yapılar için Deprem Risklerinin Yönetimi Kılavuzu”nda detaylı bir şekilde ele alınmıştır (T.C. Vakıflar Genel Müdürlüğü, 2017). Bir diğer önemli konu da, kentsel sit alanlarında yürütülen koruma çalışmaları ile risk azaltımı çalışmalarının bütünleşik bir şekilde yürütülmesinin gerekliliğidir (Uzer ve Gülersoy, 2011). Bu kapsamda, ICOMOS’un 1996’daki “1st National Summit on Heritage & Risk Preparedness” adlı toplantısında tarihi çevrelerde afet riski yöntemi konusu gündeme getirilmiştir (ICOMOS, 1996). 2005’ten itibaren bu konu Türkiye’de de akademik çalışmalar kapsamında incelenmeye başlanmıştır (Zıvrallı ve Cabbar, 2015).

Bu çalışma “koruma odaklı risk yönetim süreçleri” (Zıvrallı ve Cabbar, 2015) kavramından hareketle, deprem riski altındaki kültürel mirası oluşturan tescilli yığma yapıların göreceli hasar görebilirliklerini belirleyip haritalamayı amaçlamaktadır. Elde edilen harita ile risk, kentsel doku bağlamında bütünsel bir şekilde değerlendirilmiştir. Çalışma, İzmir’in Foça ilçesinin, kent merkezinde, İsmetpaşa, Fevzipaşa ve Atatürk Mahalleleri’ni kapsayan kentsel sit alanında yapılmıştır.

Yapıların analizinde, Sucuoğlu (2007) ve Sucuoğlu & Yazgan (2003) tarafından geliştirilen, kademeli değerlendirme yöntemlerinin ilk aşamasında yer alan ve hızlı tarama yöntemlerinden biri olarak tanımlanan, “sokak taraması yöntemi” kullanılmıştır. 208 adet tescilli yığma yapının risk değerlendirmesi yapılmış ve göreceli hasar görebilirliğe dayalı bir risk dağılım haritası oluşturulmuştur. Bu sayede, kapsamlı risk analizleri için hangi yapıların öncelikli olarak detaylı incelemeye alınması gerektiği belirlenmiştir.

Yeni interaktif Deprem Tehlike Haritası’na göre, Foça ilçesi yüksek tehlike olarak belirlenen bölgede yer almaktadır (JMO 2025). Daha önce yaşamış olduğu depremlerdeki ciddi yıkımlar, zemin sorunları, sit alanı olmasından dolayı karşılaşılan inşaat/uygulama kısıtları ve özellikle 30 Ekim 2020 Sisam Depremi’nde

tescilli yapılarda meydana gelen kısmi hasar ve yıkımlar, kentin çalışma alanı olarak seçilmesinde etken olmuştur.

Çalışma kapsamında, öncelikli olarak deprem hasar görebilirlik analizleri için kullanılan yöntemlere ilişkin yapılmış çalışmalar incelenmiş ve çalışmanın yöntemi açıklanmıştır. Çalışma alanı olan Foça'nın tarihi dokusu ve depremselliğine ilişkin bilgilerin anlatımını takiben, kentsel sit alanı içerisinde yer alan tescilli yığma yapıların hasar görebilirlik analizine ilişkin sonuçlar açıklandıktan sonra, her bir parametrenin dağılımı ve hasar görebilirlik üzerine olan etkileri tartışılmış, yapıların belirlenen göreceli hasar görebilirliklerine göre risk dağılım haritası oluşturulmuştur. Sonuç bölümünde çalışmanın önemi, kullanılan yöntemle ilişkin değerlendirmeler ile yöntemin sınırlılıkları ve geliştirme önerileri tartışılmıştır. Ayrıca bu çalışmanın veri ve sonuçlarının koruma amaçlı imar planı, kültür mirasının alan yönetim planları ve deprem hasar risk haritaları gibi deprem risk azaltımı kapsamında nasıl kullanılabileceği konusunda öneriler yapılmıştır. Koruma çalışmalarının risk azaltımı çalışmaları ile birlikte yürütülmesinin önemi vurgulanmıştır.

## 2. Bilimsel Yazın Taraması

### 2.1. Tescilli Yığma Yapıların Deprem Risk Değerlendirmesi ve Önceliklendirilmesi

Depremlerin kültür mirası alanlarına vermiş oldukları hasarların boyutu oldukça fazladır. Kültür mirası olarak tanımlanan arkeolojik alanlar, kentsel sit alanları, anıtsal yapılar, saray, köşk, yalı gibi büyük ölçekli konutlar, geleneksel konutlar, uzun tarihsel süreçler boyunca günümüze ulaşmayı başarmış yapılarıdır. Ancak bu süreçte; fonksiyonel değişiklikler, izinsiz mimari müdahaleler, değişen iklim koşulları (ısı farklılıkları, nem oranı, yağmur, kar, rüzgâr gibi), zamanla meydana gelen strüktürel ve kimyasal bozulmalar, afetler, bakımsızlık, kullanıcı kaynaklı tahribatlar ve vandalizm gibi pek çok olumsuz etken nedeniyle fiziksel olarak yıpranmaktadır. Oluşan bu değişimler, malzemenin, strüktürün ve mekânsal tasarımın özgün niteliklerini değiştirerek dayanıklılığını azaltabilmekte ve yapıların depremlere karşı zayıf hale gelmelerine neden olmaktadır (Vatan, 2015). Dolayısıyla, kültür mirasının özgün niteliklerinin bozulmadan korunmasının sağlanmasının yanı sıra, bu özelliklere zarar vermeden dayanıklılığının artırılması da önemlidir. Bu bağlamda koruma ve deprem risk azaltımı çalışmalarının, Uzer ve Gülersoy (2011)'un da belirttiği gibi bütünleştirilmesi gerekmektedir.

Tarihi dokunun korunması ve sürdürülebilirliği açısından, tescilli yapıların deprem güvenliğinin sağlanması büyük önem taşımaktadır. Özellikle yığma yapı tekniğiyle inşa edilen tarihi yapıların, rijit olmaları ve düşük süneklikleri nedeniyle yüksek hasar görebilirlik riskine sahip olduğu bilinmektedir (Bayülke,

2011). Bu nedenle, tarihi yapı stokunun deprem riskinin belirlenmesi, bu sürecin hızlı tarama ve ön değerlendirme yöntemleriyle desteklenmesi, güçlendirme gerektiren binaların belirlenmesi ve detaylı bina performans analizleri ile gerekli müdahalelerin planlanması tarihi yapıların güvenliğinin sağlanmasında temel bir gerekliliktir (Özbay ve Karapınar, 2021; Koç, 2016).

Deprem riski taşıyan yapıların kentsel alandaki mekânsal dağılımının belirlenmesi ve haritalanması, depremlere karşı etkili koruma stratejileri geliştirmek için önemlidir. Deprem öncesinde, kültürel mirasa sahip yapıların risklerinin değerlendirilmesi, gerekli restorasyon, yenileme ve güçlendirme gibi müdahale kararlarının alınması için bilimsel bir temel oluşturur. Kentsel sit alanlarındaki risklerin belirlenmesi, yalnızca tekil bina ölçeğinde değil, bütüncül bir yaklaşımla ele alınmalı ve koruma amaçlı imar planları ile entegrasyonu sağlanmalıdır (Uzer ve Gülersoy, 2011; Zıvrallı ve Cabbar, 2015). Tarihi yapıların deprem güvenliği yalnızca mühendislik alanında yürütülen yapısal analizlerle değil, kentsel doku ve yapı ilişkisini de içeren bütüncül bir yaklaşımla ele alınmalıdır. Bu doğrultuda, kentsel sit alanları için hasar görebilirlik haritaları oluşturulması, risk yönetim planlarının geliştirilmesi ve alan yönetim planlarına entegre edilmesi gerekmektedir. Özellikle, disiplinler arası işbirliği, tarihi yığma yapıların deprem davranışlarının belirlenmesi için çok önemlidir (Can ve Ünay, 2012). Bu bağlamda, mimarlık ve kentsel tasarım disiplinlerinin perspektifinden yapılan bu çalışma, tekil yapı bazında gerçekleştirilen risk değerlendirmelerine yeni bir boyut ekleyerek, göreceli olarak riskli bulunan yapıları kent dokusu bütününde ele almayı hedeflemekte ve çok disiplinli bir yaklaşımın (mühendislik, mimarlık, restorasyon, kentsel tasarım ve planlama) önemini vurgulamaktadır.

### 2.2. Hasar Görebilirlik Analiz Yöntemleri

Güvenli yapı çevreler için depremin etkilerinin, sakınım planları ile azaltılması (Bal Amir, 2007) ve deprem zararlarının azaltılması için de öncelikle risklerin tanımlanması gerekmektedir (Balyemez ve Berköz, 2005). Deprem olmadan, depreme hazırlık süreci çerçevesinde yapılması gereken riskin tanımlanmasıdır ve bu değerlendirmeyi destekleyen hasar görebilirlik analizleri, afet yöntemi döngüsünün önemli bir aşamasıdır (Bal Amir, 2022).

Coburn ve Spence (2002), hasar görebilirliği kentsel alanlarda, binalarda, nüfusta, kritik altyapı ve sosyo-ekonomik faaliyetlerde belirli bir tehlike seviyesinden kaynaklanan risk altındaki belirli bir unsur veya bu tür unsurlar kümesindeki kayıp derecesi olarak tanımlamışlardır. Akbulut ve Aytuğ'un (2005) da aktardıkları gibi, hasar görebilirlik, depremin şiddeti ve özelliklerine, zemin ve yerleşim yeri özelliklerine,

yapısal ve biçimsel özelliklerine (mimari), uygun malzeme seçimi ve uygulama kalitesine ve korunma düzeyine göre değişebilir. Yapı ölçeğinde bakılırsa, detaylı olarak da, taşıyıcı sistem seçimine, yapının biçimsel özelliklerine, kat adedine, uygun malzeme seçimi yapılıp yapılmaması ve işçilik ve yapım kalitesine, yapının yönetmeliklere uygun olup olmadığına, yapının yaşına, yapının daha önce gördüğü hasarlara, yapının geçirdiği tadilat, onarım ve restorasyon çalışmalarına, yapıdaki donatı korozyonuna ve yapıya ilave yüklerin durumuna göre değişiklik gösterebilmektedir (Akbulut ve Aytuğ, 2005).

Yapı stokunun deprem hasar görebilirliğini belirlemek için çeşitli yöntemler mevcuttur. Bu yöntemler hızlı değerlendirme olarak da bilinen "sokaktan değerlendirme yöntemleri" ile detaylı, "hesaplamalı değerlendirme yöntemleri" olarak gruplanmaktadır. Bu yöntemler yapının betonarme veya yığma olup olmasına göre de farklılık göstermektedir (Erberik, 2010; Özdemir, 2015; Efehan, 2019). Tek tek yapılara odaklanan yöntemler olduğu gibi, bütün yapı stokunu ve/veya yapı gruplarını analiz etmeyi amaçlayan yöntemler de bulunmaktadır. Bu çalışmanın da yöntemi olan, sokak taraması yöntemi ilk kademe değerlendirmeleri olarak tanımlanmakta olup, gözleme dayanmaktadır. Buna karşın, ikinci ve üçüncü kademe değerlendirmeleri olarak tanımlanan hesaplamalı yöntemler, detaylı mühendislik hesaplamalarına ve strüktür analizlerine dayanmaktadır.

### 2.2.1. Hızlı Tarama Yöntemleri

Deprem hasar görebilirliğini belirlemek amacıyla kullanılan hızlı tarama yöntemleri, yapı stokunun tamamını detaylı mühendislik hesaplarıyla analiz etmenin zaman, maliyet ve pratiklik açısından mümkün olmaması nedeniyle geliştirilmiştir (Güler ve Canbaz, 2020). Her bir yapı özelinde yönetmeliklere uygun hesaplar, modeller yapmak zaman alacağı için, ilk kademe kullanılan daha pratik ve gözleme dayalı olan hızlı tarama yöntemlerine ihtiyaç duyulmaktadır (Efehan, 2019). Özdemir (2015), hızlı değerlendirme yöntemlerini inceleyerek, özellikle 1990'ların sonlarından itibaren bu yöntemlerin deprem literatüründe yer almaya başladığını vurgulamaktadır.

Bu yöntemlerle, göreceli riskli belirlenen yapılar, ikinci ve üçüncü kademe değerlendirme yöntemlerine tabi tutulmakta ve böylece deprem riski açısından daha kapsamlı bir inceleme yapılmaktadır. Bu birinci kademe değerlendirmesinden elde edilen sonuçlarla, göreceli hasar görebilirliği yüksek olarak belirlenen binaların deprem yönetmeliğine uygun olup olmadığının kesin olarak belirlenmesi mümkün değildir. Kesin sonuçlar ancak daha kapsamlı analiz yöntemleriyle elde edilebilmektedir (Yakut ve diğerleri, 2013; Kardeş ve diğerleri, 2016).

Yurtdışında kullanılan hızlı tarama yöntemleri incelendiğinde, en çok kullanılan yöntemlerin Kanada Sismik Tarama Yöntemi, Japon Sismik Index Yöntemi ve FEMA-154 sokak tarama yöntemi gibi yöntemler olduğu görülmektedir. ABD'de uygulanan FEMA yöntemi, bu konuda ilk yapılan çalışmalardan biridir. Bu yöntemler genellikle betonarme binalar için geliştirilmiş ve uygulanmıştır (Özdemir, 2015; Efehan, 2019). Durak (2018) yurtdışında geliştirilen tarama yöntemlerinin Türkiye'deki yapı stokunun özelliklerine uygun olmadığı için doğrudan uygulanmaması gerektiğini belirtmektedir. Efehan (2019) yurtdışında kullanılan yöntemler üzerine yaptığı değerlendirmelerinde bu yöntemlerden en güvenli, hızlı ve pratik olanının FEMA-154 olduğu sonucuna varmıştır; fakat bu yöntemin tarihi yığma yapılarda kullanılmamakta olduğunu belirtmektedir. Ayrıca, Türkiye'de betonarme binaların değerlendirilmesinde kullanılan DURTES, P24, P25 gibi diğer hızlı tarama yöntemleri de bulunmaktadır (Efehan, 2019). Fakat bunlar da sadece betonarme yapılar için geliştirildiği için bu araştırma kapsamında uygun değildir.

Sonuç olarak yer, yapı stoku ve kentsel dokunun özellikleri, kullanılan yöntemlerin seçiminde öne çıkmaktadır ve yere özgü özelliklerin, yöntemlerin evrilmesinde büyük etkisi bulunmaktadır. Bu bağlamda Sucuoğlu (2007) ve Sucuoğlu & Yazgan (2003) tarafından geliştirilen sokak taraması yönteminin, FEMA-154'ün Türkiye şartlarında uygulanabilen bir başka örneği olduğu söylenebilir.

Bir diğer hızlı tarama yöntemi de, Çevre Şehircilik Bakanlığı (ÇŞB)'nin yöntemidir. 2012'de çıkarılan, 6306 sayılı Afet Riski Altındaki Alanların Dönüştürülmesi Hakkında Kanun'un Uygulama Yönetmeliği'nde, birinci kademe değerlendirme yönteminin uygulama esasları ayrıntılı olarak açıklanmış ve bu yöntemin binaların bölgesel deprem risk dağılımını belirlemede kullanılabileceği belirtilmiştir (RBTE, 2013). Okuyucu ve diğerleri (2018) Erzurum-Yenisehir ilçesinde yer alan 1177 betonarme binayı kapsayan çalışmalarında, 6306 sayılı kanunun uygulama yönetmeliğinde yer alan birinci kademe değerlendirme yöntemini kullanmışlardır. Standard sapma ve ortalama değer kullanarak bina performans puanını belirlemişler ve yapıları yüksek riskli, orta derece riskli, düşük riskli, güvenli ve çok güvenli olacak şekilde 5 ayrı risk grubuna ayırmışlardır.

Özbay ve Karapınar (2021), İstanbul, Galata'da, toplam 213 yığma yapıyı analiz ettikleri çalışmalarında, hızlı tarama yöntemlerinden Çevre Şehircilik Bakanlığı'nın yöntemini kullanarak yapıların göreceli risklerini belirlemiş ve bölgesel risk dağılım haritasını oluşturmuşlardır. RBTE (2013) yöntemi kapsamında analiz edilen birinci kademe değerlendirme sonuçları, Galata bölgesindeki yığma yapıların öncelikli risk düzeyini belirleyen ilk çalışmalardan biri olması

açısından önemlidir. Çalışmanın ikinci bölümünde ise, bölgedeki üç yığma bina örnek olarak seçilmiş ve ikinci kademe değerlendirme yöntemi temel alınarak, uygulamalı bir karşılaştırma yapılmıştır. Özbay ve Karapınar (2021), hızlı tarama yöntemlerinin tarihi yapılar için de uygulanabilir olduğunu ortaya koymuşlardır.

Karaşin ve diğerleri (2016) hızlı tarama yöntemlerinin uygulanabilirliğini ve doğruluğunu test etmek amacıyla Kanada Sismik Tarama Yöntemi ile Çevre ve Şehircilik Bakanlığı tarafından yığma yapılar için önerilen sokak taraması yöntemini tek bir bina üzerinde uygulamıştır. Diyarbakır Sur içindeki tarihi bir yığma yapının iki farklı hızlı değerlendirme yöntemiyle analiz edilmesi sonucunda, her iki yöntemin benzer sonuçlar verdiği tespit edilmiştir.

Türkiye’de, kentsel ve kırsal alanlardaki betonarme, yığma ve karma binaların deprem güvenliğini değerlendirmek amacıyla uygulanan hızlı görsel tarama yöntemlerinden biri olan sokak taraması yöntemi, Haluk Sucuoğlu tarafından başlangıçta betonarme yapılar için önerilmiş, daha sonra İstanbul Deprem Master Planı (IDMP) kapsamında yığma yapılar için de uyarlanmıştır (İstanbul Büyükşehir Belediyesi, 2003). Deprem riski taşıyan bölgelerin belirlenmesi, sismik riskin azaltılması ve acil durum ile restorasyon planlarının hazırlanması amacıyla geliştirilen bu yöntem, 1992 Erzincan ve 1995 Dinar depremlerinde yığma binalarda gözlemlenen hasarlar doğrultusunda genişletilmiş ve yığma ile karma yapıları kapsayacak şekilde değerlendirme kriterleri oluşturulmuştur. Yöntemin İstanbul’un farklı ilçelerine uygulanışı ve metodolojisi, çeşitli akademik çalışmalarda detaylı bir şekilde ele alınmıştır (Erberik, 2008, 2010; Yakut ve diğerleri, 2013; Sucuoğlu ve Yazgan, 2003).

Sucuoğlu yönteminin betonarme yapılara yönelik uygulanmasına dair çeşitli örnek çalışmalar bulunmaktadır. Örneğin, Işık (2013) bu yöntemi kullanarak, Bitlis ili Merkez ilçesinde bulunan toplam 324 adet (1-7 katlı) betonarme binanın risk değerlendirmesini yapmıştır. Çalışma kapsamında birinci kademe değerlendirmesi gerçekleştirilerek toplam 324 betonarme yapı incelenmiş ve belirlenen sınır değerine göre yapılar 3 farklı öncelik grubuna ayrılmıştır.

İstanbul Deprem Master Planı (IDMP) kapsamında betonarme, yığma ve karma yapıların ilk kademe değerlendirilmesi için sokak taraması yöntemi kullanılmıştır (İstanbul Büyükşehir Belediyesi, 2003). Sucuoğlu’nun yöntemiyle değerlendirme prensibi aynı olmakla birlikte, betonarme veya yığma olmasına göre, yani yapı tekniklerine uygun olacak şekilde farklı parametreler kullanıldığı için Sucuoğlu’nun yönteminden ayrılmaktadır. İstanbul Deprem Master Planı (IDMP) kapsamında önerilen yöntemin de farklı çalışmalar kapsamında kullanıldığı, bazı çalışmaların

yöntemi aynen kullanmayı tercih ettikleri, bazılarının ise bu yöntemi temel alarak, bazı değişiklikler yaparak yöntemi uyguladıkları görülmektedir. Tokgöz ve Bayraktar (2015), Düzce’deki yığma ve betonarme yapıların incelendiği çalışmalarında, yöntemi İstanbul Deprem Master Planı (İstanbul Büyükşehir Belediyesi, 2003) kapsamında uygulandığı şekliyle kullanmışlardır. Bu yöntemin tescilli yığma yapılara uygulanamayacağına dair bir sınırlama getirilmemiştir ve yığma yapılar üzerinde de uygulandığı örnekler bulunmaktadır.

Tablo 1: Literatürde Yer Alan Hızlı Tarama Yöntemlerinin Değerlendirilmesi

Yöntem	Değerlendirme	
<b>FEMA-154 Sokak Taraması</b>	Ülke Yapı Türü Potansiyelleri Limitleri	ABD Betonarme Pratik, hızlı, güvenilir Tarihi yığma yapılar için uygun değil
<b>Kanada Sismik Tarama Yöntemi</b>	Kaynaklar Ülke Yapı Türü Potansiyelleri Limitleri	Efekan, 2019; Özdemir, 2015 Kanada Betonarme, çelik Hızlı değerlendirme sağlar Türkiye yapı stokuna tam uyumlu değil
<b>Japon Sismik İndeks Yöntemi</b>	Kaynaklar Ülke Yapı Türü Potansiyelleri Limitleri	Karaşin ve diğerleri, 2016 Japonya Betonarme, çelik Japon yapı yönetmeliklerine uygun Türkiye’ye doğrudan uygulanamaz Özdemir, 2015
<b>DURTES, P24, P25</b>	Ülke Yapı Türü Potansiyelleri Limitleri Kaynaklar	Türkiye Betonarme Betonarme yapıların deprem riskini belirler Yığma yapılar için uygun değildir Efekan, 2019
<b>Sokak Taraması</b>	Ülke Yapı Türü Potansiyelleri Limitleri Kaynaklar	Türkiye Betonarme Türkiye şartlarına uygun, hızlı değerlendirme, doğruluk testleri yapılmıştır Sadece öncelik sırası belirler. Deprem riski belirlenmesi için analizler gerekir. Sucuoğlu, 2007; Sucuoğlu & Yazgan, 2003
<b>Çevre ve Şehircilik Bakanlığı Yöntemi</b>	Ülke Yapı Türü Potansiyelleri Limitleri Kaynaklar	Türkiye Yığma, betonarme Farklı yapı türlerine uygulanabilir Sadece öncelik sırası belirler. Deprem riski belirlenmesi için analizler gerekir. RBTE, 2013; Okuyucu ve diğerleri, 2018
<b>İstanbul Deprem Master Planı (IDMP) Yöntemi</b>	Ülke Yapı Türü Potansiyelleri Limitleri Kaynaklar	Türkiye Betonarme, yığma, karma Farklı yapı türlerine uygulanabilir Kentsel doku bağlamında analizler yapmaz. İstanbul Büyükşehir Belediyesi, 2003; Işık, 2013; Tokgöz ve Bayraktar, 2015

Güler ve Canbaz (2020), Eskişehir'in Sivrihisar ilçesinde bulunan 170 yığma ve karma yapının deprem riski değerlendirmesinde bu yöntemi kullanmış ve riskli yapıların ikinci kademe değerlendirme aşamasına tabi tutulması gerektiğini önermişlerdir. Çalışmalarında, mevcut yöntemde olmayan "tür" ve "yapı yaşı" gibi ek parametreleri değerlendirmeye dahil etmişlerdir. Ayrıca, çatı ve bodrum katlarının da kat sayısına eklendiği görülmektedir. Bu yöntem kapsamında elde edilen değer ise "Bina Güvenirlik İndeksi" olarak tanımlanmıştır.

Şimdiye kadar anlatılan yöntemler Tablo 1'de özetlenmiştir. Bu çalışmada kullanılan sokak taraması yöntemi, yöntem bölümünde ayrıntılı bir şekilde açıklanmıştır. Söz konusu yöntem, İstanbul Deprem Master Planında (IDMP) uygulandığı şekilde uygulanmış olup, bina deprem puanının hesaplanması, kullanılan parametreler ve ceza puanları, zemin hızlarına bağlı başlangıç puanı hesaplaması ve risk önceliklendirmesi aşamalarını içermektedir. Ayrıca, yöntem, yığma yapılar için önerildiği biçimde uygulanmıştır. Bir sonraki bölümde de detaylı şekilde açıklandığı üzere, yığma yapılara uygulanabilirliği ve pratikliği gibi nedenlerden dolayı, bu çalışma kapsamında en uygun yöntem olarak değerlendirilmiş ve yazarlar tarafından uygulanabilir olması da tercih edilmesinde etkili olmuştur.

### 2.2.2. Detaylı, Hesaplamalı Diğer Analiz Yöntemleri

Yukarıda açıklanan hızlı tarama yöntemlerinin yanı sıra, yığma yapıların kapsamlı ve detaylı yapısal analizleri de birçok araştırmacı tarafından incelenmiştir (Genes ve diğerleri, 2017; Dabanlı, 2008; Asteris, 2014).

Bu yapısal incelemeler genellikle tekil yapı ölçeğinde olup, bütün yapı stokunun, kentsel dokunun analizini içermez. Bu analizlerde kat sayısı, duvar alanının yapının plan alanına oranı, destek duvarlarının uzunluğu, hatların kalınlığı, derinliği ve uzunluğu, duvar ve harç malzemesi, düşey-yatay hatlar gibi teknik özellikler incelenmektedir (Bayülke, 2011). Ayrıca, Dabanlı (2008)'ya göre; zemin özelliklerinin saptanması, duvarların kayma etkileri altında güç tükenmesi oluşması gibi özelliklerinin değerlendirilmesi, malzemelerin mukavemet özelliklerinin analizi, çekme, kayma ve basınç deneyleri, sertlik, elastiklik özellikleri gibi tüm parametreler, ayrıntılı analiz çalışmaları yapılırken dikkate alınmalıdır. Can ve Ünay (2012) yapı bazında yapılan "matematiksel hesap modeli", "sayısal çözümleme" ve "yapısal analiz" tekniklerinden bahsetmektedir. Bununla ilişkili olarak Can ve Yıldızoğlu (2018) tek yapı özelinde StatiCAD yığma yapı analiz programını kullanarak Bayburt'ta bir okulun detaylı deprem performansı analizini yapmışlardır.

Bu kapsamda tarihi yapıların detaylı hesaplamalı analiz yöntemleriyle incelenmesi, hassas, yere özgü, yapıya özgü müdahalelerin gerçekleştirilerek korunması ve

deprem riskinin azaltılması çok önemli ve gereklidir. Fakat yine de bütün yapı stokuna bu detaylı analizleri uygulamak yerine, birinci kademe riskli belirlenen yapılardan başlanarak, detaylı analizler için bir öncelik sırası belirlenmesi, işgücü, zaman, ekonomiklik ve pratiklik açısından daha uzun vadeli bir çözüm sunmaktadır. Bunların yanı sıra, tarihi yapıların deprem riskini belirlemeye yönelik çalışmalar, genellikle inşaat mühendislerince yapılmaktadır. Can ve Ünay (2012)'in da vurguladığı gibi, farklı disiplinler tarafından kolayca anlaşılabilir ve yapı stokunun deprem hasar görebilirlik seviyeleri hakkında genel bir perspektif sunabilecek çalışmalara ihtiyaç duyulmaktadır. Bu çalışma da bu ihtiyacı karşılamayı amaçlayan disiplinler arası bir yaklaşıma sahiptir.

## 3. Çalışmanın Yöntemi

### 3.1. Sokak Taraması Yöntemi

Bu yöntemin seçilme nedeni Sucuoğlu tarafından yöntemin doğruluk testlerinin yapılmış olması nedeniyle, güvenilirliğinin kanıtlanmış olmasıdır. Bu yöntemde, bina kat sayıları ve yerel zemin özelliklerine bağlı olarak hız bölgelerine göre puanlandırma yapılmakta, yapısal zayıflıklar ise ceza puanları ile değerlendirilip, başlangıç puanından düşülerek "Bina Deprem Puanı" belirlenmektedir. Buradaki işlemi özetleyen formül aşağıda gösterilmiştir.

$$\text{Bina Deprem Puanı} = (\text{Hız Bölgesi Puanı}) - \sum_1^4 (\text{olumsuzluk parametresi}) \times (\text{olumsuzluk puanı}) \quad (1)$$

*Sokak taraması yöntemi*, binaların dışarıdan gözlemlenerek riskli yapıların belirlenmesi amacını taşımaktadır. Bu yöntemin uygulanması esnasında kullanılan binaların yapısal parametreleri, bina içine girilmeden ve kısa süre içinde sokaktan yapılan gözlemlerle elde edilebilecek şekilde belirlenmiştir.

Yöntem, göreceli olarak riskli binaları önceden belirleyerek, detaylı inceleme gerektiren bina sayısını azaltmakta ve böylece zaman ve maliyet açısından verimlilik sağlamaktadır. Bu kademeli değerlendirme süreçleri, tekil binaların sismik zayıflıklarının belirlenmesinde değil, gruplandırma yaparak binaların göreceli zayıflıklarının sıralanması amacıyla kullanılmaktadır (Yakut ve diğerleri, 2013). Önerilen değerlendirme yöntemi, Türkiye'deki yönetmelikler, standartlar ve mevcut betonarme yapı stokuna uygun olarak geliştirilmiş birinci kademe görsel değerlendirme yöntemidir. Bu yöntem, mühendislik temelli, teknik hesaplamalar içermediğinden, özellikle mimarlar için büyük bir kolaylık sağlar. Ayrıca, ikinci kademe detaylı inceleme gerektiğinde, bina ile ilgili verilerin aktarılması mümkündür. Bu yöntemle, mevcut yapı stokunun hasar görebilirlik düzeyi hızlı bir şekilde değerlendirilerek, en yüksek risk taşıyan binalar

önceliklendirilir (Akbulut ve Aytuğ, 2005). Değerlendirme, yer hızı ve zemin bilgileri, kat sayısı, görünen yapı kalitesi, duvar boşluk oranı ve düzeni, çarpışma etkisi ile yerel zemin koşulları gibi parametrelere dayanmaktadır. Yapısal olumsuzluklar ceza puanlarıyla değerlendirilerek her binanın, "Bina Deprem Puanı" hesaplanmakta ve binalar, sınır değere göre sınıflandırılarak, göreceli hasar görülebilirlik seviyelerine göre önceliklendirilmektedir.

Kullanılan parametreler, ceza puanları ve katsayılar Tablo 2'de gösterilmiştir.

Tablo 2: Parametreler, ceza puanları ve katsayılar (IDMP, 2003)'dan düzenlenerek hazırlanmıştır

Kat Adedi	1,2	3	4	5
Hız Bölgesi I PGV>60	100	85	70	50
Hız Bölgesi II 40<PGV<60	130	110	90	60
Hız Bölgesi III PGV<40	150	125	110	70
Görünen Kalite	-10	-10	-10	-10
Duvar Boşluk Oranı	-5	-5	-5	-5
Duvar Boşluk Düzeni	-2	-2	-2	-2
Çarpışma Etkisi	0	-3	-5	-5
Olumsuzluk Parametreleri				
Görünen Kalite	İyi(0)	Orta (1)	Kötü (3)	
Duvar Boşluk Oranı	Az (0)	Orta (1)	Çok (2)	
Duvar Boşluk Düzeni	Düzenli (0)	Az Düzenli (1)	Düzensiz (2)	
Çarpışma Etkisi	Yok (0)	Var (1)		

### Bina Deprem Puanı Hesabı

$$\text{Bina Deprem Puanı} = (\text{Hız Bölgesi Puanı}) - \sum_{i=1}^n (\text{Ceza Puanları})$$

### 3.2. Yöntemin Foça'da uygulanması

Foça ilçesi sınırlarında bulunan 3 mahalleyi (İsmetpaşa, Atatürk ve Fevzipaşa Mahalleleri) içine alan kentsel sit alanında yer alan tescilli yığma yapıların göreceli hasar görülebilirliklerinin tespitinde sokak taraması yöntemi kullanılmıştır. Binalara girilmeden, sokaktan gözlem yapılarak ilgili bina bilgileri, formlara (Tablo 3) işlenmiştir.

Bir bina, sokak taraması yöntemi kullanılarak ortalama 10 dakikada değerlendirilmiştir. Her bina iki farklı uzman (yazarlar) tarafından değerlendirilerek sonuçlar karşılaştırılmıştır. Farklı değerlendirilen binalar, tekrar değerlendirilip sonuçlar tartışılarak ortak bir karara varılmıştır. Günde ortalama 30 bina incelemiş, alan

çalışması yaklaşık bir haftada tamamlanmıştır. Alan çalışması Temmuz 2023'de yürütülmüştür.

Tablo 3. Örnek Analiz Föyü

TESCİLLİ YAPI HASARGÖREBİLİRLİK ANALİZİ	
Envanter No:	183
Ada Parsel No:	130-28
Kat Sayısı:	2
Görünen bina kalitesi:	İyi (0), Orta (1), İyi (0) Kötü (2)
Bitişik binalarda çarpışma etkisi:	Yok (0), Var (1) Var (1)
Dolu-Boş Oranı:	Az(0), Orta (1), Çok (2) Çok (2)
Dolu-Boş Düzeni:	Düzenli (0), Orta (1), Düzensiz (2) (0)
Değişmişlik durumu:	Restorasyon Var (1), Var (1) Yok (0)



Fotoğraflar (2023)

### 3.3. Zemin hız grubunun ve PGV Değerinin belirlenmesi

Maksimum yer hızı PGV (Peak Ground Velocity), depremin meydana geldiği fayın kırılması ile birlikte, yerel zemin özelliklerine bağlı olarak zeminde yayılma hızını ifade etmektedir. Zemin sınıfının düşük olduğu bölgelerde, PGV değeri yüksek olurken, sağlam zemin sınıfına sahip bölgelerde ise PGV düşük çıkmaktadır. PGV değeri yüksek olan zeminlerde bulunan yapılar, deprem sırasında daha büyük hasar riski taşımaktadır.

Sucuoğlu (2007)'nin çalışmasında zemin sınıflarına göre PGV değerleri aşağıdaki gibi belirlenmiştir:

Z4 zemin sınıfında Hız Bölgesi I: PGV > 60 cm/s,

Z3 zemin sınıfında Hız Bölgesi II: PGV 40 < PGV < 60 cm/s,

Z1 ve Z2 zemin sınıfında Hız Bölgesi III: PGV < 40 cm/s olarak alınmıştır.

Foça'nın depremsellik raporunda, zemin bilgisi, Z2 ve Z3 olarak sınıflandırılmıştır. Bu durumda Hız Bölgesi II veya Hız Bölgesi III'e denk gelmektedir. Bunu doğrulamak için, Foça için PGV değerinin belirlenmesinde, bir diğer çalışma daha kullanılmıştır.

Foça ilçesi için PGV değerleri AFAD'ın geliştirdiği, Türkiye Deprem Tehlike Haritaları İnteraktif Web Uygulaması'ndan elde edilmiştir (AFAD, 2025).

Deprem yer Hareket Düzeyi (DD2)<sup>1</sup> olarak seçilmiş olup, yerel zemin sınıfı (ZD) ve (ZE)<sup>2</sup> olarak seçildiğinde çıkan PGV değerleri karşılaştırıldığında değerlerin 26-27 cm/s aralığında olduğu görülmüştür. Bu nedenle Foça için Hız Bölgesi III: PGV < 40 cm/s olarak belirlenmiştir. Foça için hız bölgesi değeri Sucuoğlu'nun (2007) tanımladığı hız bölgesi tanımlamalarından 3. bölgeye denk gelmekte olup, binaların başlangıç puanlarının hesabı bu bilgiye göre yapılmıştır (Tablo 2).

### 3.4. Öncelik Sıralaması

Yapılar "Düşük Riskli" ve "Yüksek Riskli" olarak sınıflandırılıp bir öncelik sırası belirlenmiştir. Tablo 2'de belirtilen formüle göre hesaplanan Bina Deprem Puanı (BDP) bir binanın hangi risk sınıfına gireceğini bulmak için kullanılmıştır. Bunun için "Düşük Riskli" ve "Yüksek Riskli" bina sınıflarını ayıracak bir sınır değeri belirlenmiştir. Hangi binaların göreceli olarak riskli olduğu, belirlenen bu sınır değerine göre yapılmaktadır. Sucuoğlu'nun (2007) belirttiği gibi, sınır değer çalışmayı alanda yürüten araştırmacılar tarafından tespit edilebilir. Eğer bir binanın deprem puanı, belirlenen sınır değer altındaysa, o bina "Yüksek Riskli" olarak değerlendirilir; benzer şekilde bina deprem puanı, sınır değerinin üstündeyse, bina gözlenen hasar durumuna göre "Düşük Riskli" olarak önceliklendirilir. "Yüksek Riskli" olarak belirlenen yapılar için, ikinci kademe değerlendirme yöntemleri kapsamında ayrıntılı yapısal analiz yapılması önerilir. Tokgöz ve Bayraktar (2015) da sınır değerini bu kapsamda kendileri belirlemişlerdir. Bu çalışma kapsamında hesaplanan sınır değer, en yüksek bina deprem puanı (150) ve en düşük bina deprem puanının (116) ortalama değeri olan 133 olarak belirlenmiştir.

BDP >133: Düşük Riskli

BDP <133: Yüksek Riskli

### 3.5. Hasar Görebilirlik Parametreleri

İstanbul Deprem Master Planı (IDMP) kapsamında kullanılan parametreler, literatürde yığma yapıların deprem davranış ve dayanımlarını (Koç, 2016), depreme dayanıklı yığma yapı tasarım ilkelerini (Bayülke, 2011) inceleyen birçok kaynakta da açıklanan yapısal özelliklerdir. Bu özellikler aşağıda detaylı olarak açıklanmıştır.

Görünen Bina Kalitesi [İyi (0), Orta (1), Kötü (2)]

<sup>1</sup> Deprem yer Hareket Düzeyi (DD2): 50 yılda aşılma olasılığı %10 (tekrarlanma periyodu 475 yıl) olan deprem yer hareketi düzeyi

<sup>2</sup> Zemin Sınıfı ZE: Gevşek kum, çakıl veya yumuşak - katı kil tabakaları veya PI > 20 ve w > % 40 koşullarını

Malzeme, işçilik, nemden korunma durumu, strüktürel elemanların bağlantıları ile restorasyon, iyileştirme ve bakım çalışmaları, boya ve sıva kalitesi gibi sokak cephesinden gözlenebilen unsurlar, binanın görünen kalitesini oluşturmaktadır. Görünen kalitesi düşük bir binanın malzeme dayanıklılığının da düşük olması beklenir (Özgen ve Coza, 2005). Türkiye'de yakın zaman aralığında yapılan binaların gözle görünen kalitesi ve binaların hasar durumları arasında benzerlikler gözlenmektedir. Ancak yukarıda belirtilen ölçütler bağlamında bakım ve onarımlar, içinde yaşanıp yaşanmaması gibi ölçütler dikkate alındığında görünen bina kalitesinde farklılıkların olması da muhtemeldir.

Bitişik Binalarda Çarpışma Etkisi [Yok (0), Var (1)]

Bitişik parsellerde konumlanan yapılardaki kat yüksekliklerinin farklı olmasından dolayı, döşeme hizaları da farklı kotlarda yer alabilmektedir (Genes ve diğerleri, 2017). Deprem sırasında meydana gelen yatay salınım esnasında, bu döşemeler bitişik parseldeki yapının duvarlarına zarar vermektedirler. Eşit olmayan döşeme hizaları çarpışma etkisi yaratarak binada hasar meydana getirmektedir. Kat yüksekliklerinin döşeme hizalarını tutması ve dolayısıyla bitişik yapıların depreme karşı birbirlerini desteklemesi açısından da önemlidir. Şunu da belirtmekte fayda vardır ki; çok katmanlı kentsel sit alanlarında yapıların farklı tarihlerde yapıldığı düşünülürse, döşeme hizalarının da farklı olma olasılığı yüksektir. Bu bağlamda çarpışma etkisi, hasar görülebilirlik analizi adına önemli parametrelerden biridir. Bitişik nizam olup döşeme hizaları farklı olan yapılar (Var: 1) olarak, döşeme hizaları aynı olan yapılar da çarpışma etkisi olmayacağından, (Yok: 0) olarak değerlendirilmiştir.

Dolu-Boş Oranı [Az (0), Orta (1), Çok (2)]

Bu parametre değerlendirilirken kapı ve pencere açıklıklarının tüm cephede kapladıkları oran dikkate alınmaktadır. Açıklık oranları Bayülke (2011)'in de belirttiği gibi depremde etkiyen kesme kuvvetlerinin taşınması açısından önemlidir ve cephenin toplam yüzey alanının %40'ından büyük (2/5'inden çok) olursa risk artar denilebilir. Aksi takdirde, depremde gördükleri zararların çok olduğu geçmiş depremlerde de gözlenmiştir (Bayülke, 2011; Koç, 2016; İstanbul Büyükşehir Belediyesi, 2003). Kapı ve pencere açıklıklarının, bütün cephe alanına oranı 1/3'ten küçük ise "Az", 1/3-2/3 arasındaysa "Orta", 2/3'ten çok ise "Çok" olarak değerlendirilmiştir.

Dolu-Boş Düzeni [Düzenli (0), Orta (1), Düzensiz (2)]

sağlayan toplamda 3 metreden daha kalın yumuşak kil tabakası ( Cu < 25 kPa ) içeren profiller  
Zemin Sınıfı ZD: Orta sıkı - sıkı kum, çakıl veya çok katı kil tabakaları

İki ya da daha fazla katlı yapılarda, cephe boyunca yatayda ve düşeyde devam eden dolu-boş düzeni hasar görebilirlik adına dikkat edilmesi gereken bir parametredir. Açıklıkların sürekliliği bu bağlamda önem taşımaktadır. Eğer boşluklar düzenli değil ise, yükler duvar boyunca eşit olarak dağılmamakta ve risk yaratmaktadır. Bu parametre kapsamında açıklıkların sürekliliği durumu "Düzenli", kısmi düzensizlikler "Orta" ve tamamen düzensiz konumlanmalar "Düzensiz" olarak değerlendirilmiştir.

#### 4. Foça Kent Dokusu ve Tescilli Yapılar

Foça, İzmir iline bağlı, köklü tarihi ve kültürel zenginlikleri ile bilinen bir ilçedir. İzmir kent merkezinin kuzeyinde, yaklaşık 70 km mesafede konumlanan ilçe, balıkçılık ve turizm alanında gelişmiştir.

Antik Çağ'dan Osmanlı Dönemi'ne kadar uzanan geniş bir tarihsel geçmişe sahip olan Foça, Klasik, Roma, Bizans ve Ceneviz dönemlerine ait kalıntılarla çok katmanlı bir yerleşim alanıdır. Tescilli kültür varlıkları, doğal, arkeolojik ve kentsel sit alanlarıyla dikkat çeken ilçe; anıtsal yapılar, sivil mimarlık örnekleri ve arkeolojik kalıntıları içeren zengin bir mirasa sahiptir (Taşçı, 2015).

Foça'daki kültürel miras, tapınaklar, tiyatro, kent duvarları, kaleler, liman kutsal alanları, megaron evler, mezar anıtları, camiler, hamamlar, konaklar, seramik atölyeleri, antik kent merkezi, yel değirmenleri ve yöreye özgü konut dokusu gibi geniş bir yelpazeye yayılmaktadır. Yapılan arkeolojik kazılar, kentin çok katmanlı kimliğini ortaya koymakta olup, farklı dönemlere ait yapıların bir arada varlığını sürdürdüğünü göstermektedir (Taşçı ve Akyüz Levi, 2016; Özyiğit, 2017).

Tarihi taş evlerin geleneksel konut dokusunu oluşturduğu kentte, çoğunluğu 19. ve 20. yüzyıla tarihlenen tescilli yapılar bir veya iki katlı, bahçelerinde müstemilatları ve hizmet mekânları bulunan, yığma taş duvarları, sıvasız dış cepheleri, ahşap malzemeden yapılmış kat döşemeleri ve çatıları ile dikkat çeken yapılardır. Zemin kat ara duvarlar çoğunlukla hımsız, üst kat ara duvarları ise bağdadi teknikte yapılmıştır. Dikdörtgen formda ahşap cephe pencereleri ve kapı kenarları taş sövelerle çerçevelenmiştir. Pencerelerde genellikle zemin katta metal, üst katlarda ise ahşap kanat kullanılmıştır. Balkon ve cumba kullanımına nadir olarak rastlanmaktadır. Tarihi dokuya, plan tipolojisi açısından bakıldığında kent merkezi dışında kalan alanlarda kare planlı kule evler görülürken, merkezde ise bir veya iki katlı tek evler ve bitişik evlerin yoğunlaştığı görülmektedir (Bozkır ve diğerleri, 2015).

İsmetpaşa, Fevzipaşa ve Atatürk Mahallelerini kapsayan kentsel sit alanında, geleneksel dokuyu oluşturan mimari özellikler arasında en önemlileri sivil mimari

örneklerinin niteliği ve bozulmamış bir tarihi dokunun varlığıdır. Foça merkezde tescilli, yığma ve betonarme yapılar ile tescilli olmayan yapılar bir arada yer almaktadır. Kentin gelişim bölgelerinde betonarme ikincil konut uygulamaları öne çıkmaktadır. Kent merkezinde, tescilli yapıların farklı mahallelerde bazen tek, bazen de bir sokak boyunca devamlılık göstererek korunduğu görülmektedir. Bu yapılar Küçük Deniz çevresindeki dar sokaklarda yoğunlaşmakta ve bozulmamış bir tarihi dokunun varlığı bu bölgede daha fazla hissedilmektedir.

Tescillenen 208 yığma yapı arasından 151 tanesi restore edilmiştir (%73). Foça'nın büyük bir bölümünün antik kent üzerinde konumlanması sebebiyle zemine müdahale edilememesi, restorasyon ve uygulama sürecinde zorluklar yaratmaktadır (Bozkır ve diğerleri, 2015). Çoklu, parçalı ve karma mülkiyet yapısı, yapıların yüksek düzeyde yıpranmış olması, restorasyon maliyetlerinin yüksekliği, yeterli hibe ve desteklerin bulunmaması, restorasyon ve bakım-onarım çalışmaları için güçlükler oluşturan diğer konulardır. Bu nedenlerle yapılar el değiştirmektedir. Bunun yanı sıra, banyo ve tuvaletin bulunmaması, mutfak alanlarının yetersiz koşulları gibi yapıların bazı mekânsal özelliklerinin günümüzün konfor şartlarına uymaması ve bu problemlere küçük müdahalelerle çözüm bulunamaması da yapıların terk edilme ve el değiştirme nedenleri arasında sayılabilir (Bozkır ve diğerleri, 2015). Bozkır ve diğerleri (2015)'inde belirttiği gibi yapılarda malzeme dayanımlarının azalması, strüktürel hasarlar, hatalı eklemeler ve müdahaleler ile oluşan bozulmalar görülmektedir. Derzlerin ve cephelerin çimentolu sıva ile kaplanması, pencerelerdeki kepenk menteşelerinin paslanması ve genişerek taş sövelere zarar vermesi, sac kepenklerinin ve bazı demir aksamın hurda malzeme toplayıcılar tarafından sökülmesi, yapılarda özellikle malzeme bozulmalarına yol açmışlardır. Yapılarda, özgün kapı ve pencerelerin pvc, alüminyum ve demir malzemelerle değiştirilmiş olması, ahşap elemanların çürümesi, ahşap çatıların zarar görmüş olması, tavan ve döşemelerde su kaynaklı bozulmalar oluşması, tavanların sökülerek, daha ekonomik malzemeler ile kaplanması, zemin kaplama malzemelerinin seramik ve karo plaka gibi malzemelerle kaplanması, yeni mekânların eklenmesi gibi değişiklikler de görülmektedir. Basit onarım adı altında gerçekleştirilen bu tür değişiklikler hem yapının özgün niteliğini bozmakta, hem de strüktürel bozulmalara yol açarak, deprem durumunda daha büyük hasarların oluşmasına sebebiyet verebilmektedir.

Bozkır ve diğerleri (2015), cephelerdeki boşluk oranlarının çok ve açıklıkların bina köşelerine çok yakın konumlandırılmış olmasının da deprem zararlarını artıracak önemli tasarım problemleri olduğunu belirtmişlerdir. Alanda yapılan gözlemler sonucunda boşluk oranlarının çokluğu, hem özgün cephelerde hem

de fonksiyon değişikliklerinden dolayı müdahale gören cephelerde gözlemlenmiştir. Örneğin zemin katları ticari kullanım olarak yeniden işlevlendirilen yapıların zemin katlarında boşluklar artmıştır. Bu müdahalelerin olası bir deprem tehlikesinde Foça'nın deprem zararlarını arttırma olasılıkları yüksektir.

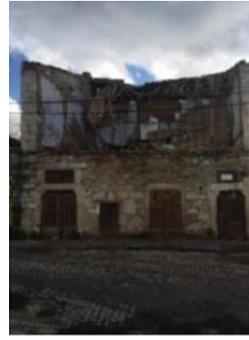
30 Ekim 2020 Sisam Depremi'nin hem arkeolojik hem de sivil mimarlık örneklerinin üzerinde etkisi gözlenmiştir. Zaten, büyük ölçüde harap olan Dış Kale'nin (Şekil 1) bir bölümü yıkılarak sular altında kalmıştır.

Ayrıca, sivil mimari miras bağlamında, Eski Foça merkezde yer alan 5 yapı (Tablo 4), Yeni Foça'daki 1 yapı ve Bağarası'nda yer alan eski belediye binası ağır hasar görmüştür (Star, 2021).



Şekil 1. Dış Kale konum ve deprem öncesi fotoğrafı

Tablo 4. Çalışma alanında 2020 Sisam Depremi'nde hasar gören tescilli yapılardan örnekler



Depremden önce  
(Haziran 2020)

Depremden sonra  
(Ocak 2021)

## 5. Analiz ve Bulgular

Foça Belediyesi'nin hazırladığı Koruma Amaçlı İmar Planı kapsamında 259 yapı, sivil mimari örneği olarak tescillenmiştir. Bu yapıların 208 tanesi (%80) yığma yapı olup, bu çalışma kapsamında analiz edilmiştir. Yapıların 29 tanesi (%11) betonarme olduğu için, 22 tanesi (%8) de çeşitli sebeplerden dolayı değerlendirme dışında bırakılmıştır (Harabe, yıkık, çeşme, fener gibi mekânlar olması ve yeterli görsel veri olmaması).

Tablo 5. Parametrelere göre tescilli yapı sayıları

Kat Sayısı	1	58
	2	149
	3	1
Görünen Yapı Kalitesi	İyi	136
	Orta	50
	Kötü	22
Bitişik Yapıdaki Çarpışma Etkisi	Yok	108
	Var	100
Dolu Boş Oranı	Az	26
	Orta	141
	Çok	41
Dolu Boş Düzeni	Düzenli	103
	Orta	32
	Düzensiz	73

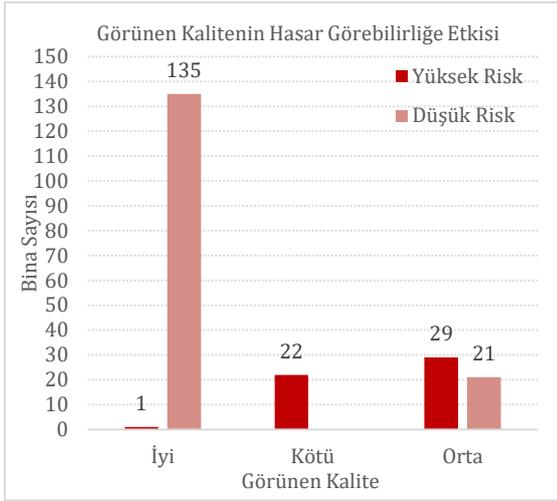
Hasar görebilirlik parametrelerine göre, her yapının analiz değerlendirmeleri sonucunda aldığı toplam puan hesaplanarak "Bina Deprem Puanı" saptanmış ve belirlenen sınır değerine göre yapıların 52 tanesinin göreceli riski (%25) yüksek, 156 tanesinin ise göreceli riski (%75) düşük olarak belirlenmiştir. Analiz kapsamında değerlendirilen binaların parametrelere göre değerlendirilmesi Tablo 5'de gösterilmiş ve aşağıda detaylı olarak açıklanmıştır. Tablo 6'da parametrelere örnekler verilmiştir.

### Görünen Yapı Kalitesi [İyi (0), Orta (1), Kötü (2)]

Gözleme dayalı analiz çalışmaları sonucunda, görünen yapı kalitesi bağlamında yapıların 136 tanesinin (%65) görünen kalitesinin iyi, 50 tanesinin (%24) orta seviyede ve 22 tanesinin (%11) ise kötü seviyede olduğu tespit edilmiştir (Tablo 5). Bu analiz yapılırken, yapıların cephelerinde görülen çatlaklar, cephe malzemelerinde gözlenen korozyon ve bozulmalar, boyaların eskimiş olması gibi gözle görünen özellikler dikkate alınmıştır. Bozkır vd (2015)'in belirttiği, bir önceki bölümde bahsedilen bozulmalar da görünen kaliteyi düşüren faktörler arasındadırlar.

Tablo 6. Parametrelerden örnekler

Görünen Yapı Kalitesi		
İyi (0)	Orta (1)	Kötü (2)
		
ENV No: 191 133 Ada/13 Parsel	ENV No: 130 85 Ada/41 Parsel	ENV No: 172 101 Ada/56 Parsel
Bitişik Yapılardaki Çarpışma Etkisi		
Yok (0)	Var (1)	
		
ENV No: 171 101 Ada/55 Parsel	ENV No: 183 130 Ada/28 Parsel	
Dolu-Boş Oranı		
Az(0)	Orta (1)	Çok (2)
		
ENV No: 198 135 Ada/7 Parsel	ENV No: 162 99 Ada/2 Parsel	ENV No: 192 133 Ada/16 Parsel
Dolu-Boş Düzeni		
Düzenli (0)	Orta (1)	Düzensiz (2)
		
ENV no: 137-138 89 Ada/4-5 Parsel	ENV No: 93 78 Ada/6 Parsel	ENV No: 109 81 Ada/23 Parsel



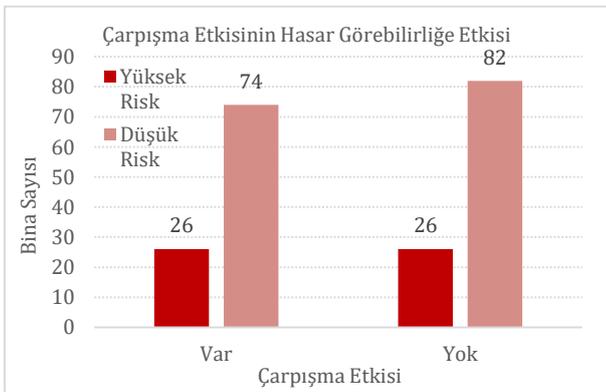
Şekil 2. Görünen kalitenin hasar görebilirliğe etkisi

Şekil 2'de de gösterildiği gibi, görünen kalitenin hasargörebilirliğe etkisi incelendiğinde, 52 tane yüksek riskli yapının 22 tanesinin (%42) görünümünün kötü olduğu, 29 tanesinin (%56) orta kalitede ve 1 tanesinin (%2) de iyi olduğu saptanmıştır. 135 düşük riskli yapının %87'si iyi kalitededir. Riskli yapıların neredeyse yarısının görünen yapı kalitesinin kötü olması, bu parametrenin risk üzerindeki etkisini vurgulamaktadır.

#### Bitişik Yapılardaki Çarpışma Etkisi [Yok (0), Var (1)]

Yapıların döşeme seviyelerinin ve kat yüksekliklerinin aynı olmamasından kaynaklanan olası çarpışma etkilerine bakıldığında, 108 tanesinde (%52) çarpışma etkisine yol açacak döşeme farklarının olmadığı, 100 tanesinde (%48) ise çarpışma etkisini oluşturacak döşeme hizası ve kat yüksekliği farklarının mevcut olduğu tespit edilmiştir (Tablo 5).

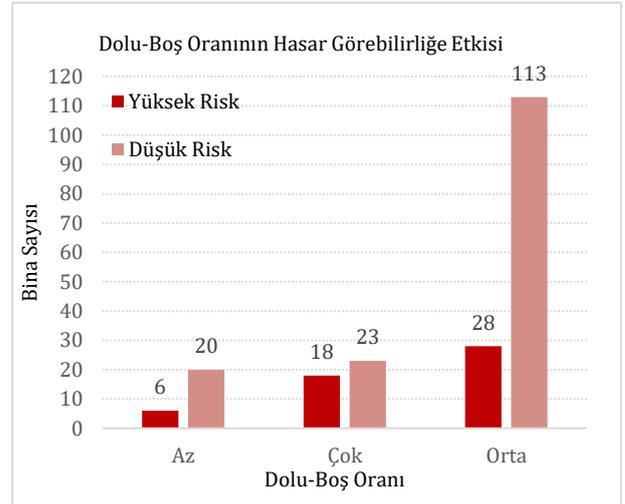
Çarpışma etkisinin hasar görebilirliğe etkisi dikkate alındığında, Şekil 3'te de gösterildiği gibi 52 tane yüksek riskli yapının 26 tanesinde (%50), 156 tane düşük riskli yapının da 74 tanesinde (%47) çarpışma etkisi bulunduğu görülmüştür.



Şekil 3. Çarpışma etkisinin hasar görebilirliğe etkisi

#### Dolu-Boş Oranı [Az(0), Orta (1), Çok (2)]

Yapıların cephelerindeki açıklıklarının tüm cepheye oranı analiz edildiğinde 26 tanesinin (%13) açıklık oranının az, 141 tanesinin (%68) açıklık oranının orta derecede, 41 tanesinin (%20) açıklık oranının ise çok olduğu tespit edilmiştir (Tablo 5).

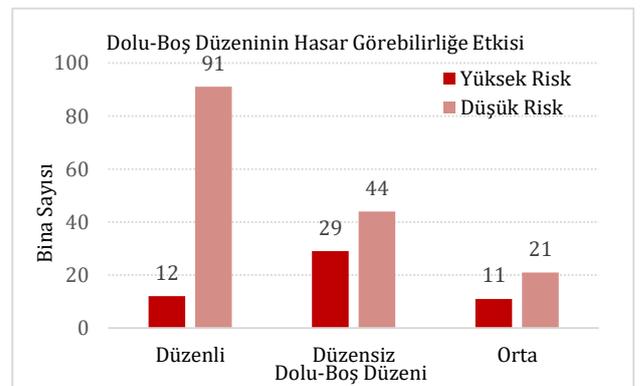


Şekil 4. Dolu-boş oranının hasar görebilirliğe etkisi

Şekil 4'te de gösterildiği gibi, dolu-boş oranının hasar görebilirliğe etkisi incelendiğinde, 52 tane yüksek riskli yapının, 18 tanesinin (%35) dolu-boş oranının çok, 28 tanesinin (%54) orta düzeyde, 6 tanesinin (%12) ise az olduğu saptanmıştır. 156 adet düşük riskli yapının ise, 23 tanesinin (%15) dolu-boş oranının çok, 113 tanesinin (%72) orta ve 20 tanesinin (%13) de az olduğu saptanmıştır.

#### Dolu-Boş Düzeni [Düzenli (0), Orta (1), Düzensiz (2)]

Yapıların cephelerindeki açıklıkların yataydaki ve düşeydeki sürekliliği incelendiğinde, 103 tanesinin (%50) düzenli, 32 tanesinin (%15) orta seviyede düzenli ve 73 tanesinin (%35) de düzensiz olduğu tespit edilmiştir (Tablo 5).



Şekil 5. Dolu-boş düzeninin hasar görebilirliğe etkisi

Şekil 5'te de gösterildiği gibi, dolu-boş düzeninin hasar görebilirliğe etkisi dikkate alındığında, 52 tane riskli yapının 29 tanesinin (%56) cephesinin düzensiz, 11 tanesinin (%21) orta düzeyde düzenli ve 12 tanesinin (23) de düzenli olduğu saptanmıştır. 156 adet düşük riskli yapının ise, 91 tanesi (%58) düzenli, 21 tanesi (%13) orta seviyede düzenli ve 44 tanesi (%28) de düzensiz olarak saptanmıştır.

### 5.1.Göreceli Hasar Görebilirliğin Derecelendirilmesi, Haritalanması ve Kentsel Doku Bağlamında Analizi

Yapıların göreceli hasar görebilirlik durumuna göre kent içindeki konumları, Şekil 6'daki haritada gösterilmiştir. Burada yüksek riskli olarak belirlenen yapılar, ikinci ve üçüncü kademe çalışmaları kapsamında incelenmesi için birinci öncelikli olarak belirlenmiştir<sup>3</sup>. Bunların kent merkezindeki dağılımına baktığımızda, 11 tanesinin (%21) İsmetpaşa Mahallesi'nde, 30 tanesinin (%58) Fevzipaşa Mahallesi'nde ve 11 tanesinin (%21) de Atatürk Mahallesi'nde yer aldığı tespit edilmiştir.

Sokak taraması yöntemiyle öncelikli belirlenen bu yapılar, kent dokusu içindeki konumları (bitişik nizam-tek cephe, bitişik nizam-iki cephe, müstakil), yapının restorasyon geçirip geçirmemesi, yapıların kullanılıp kullanılmaması, fonksiyonlarına göre (otel, konut, turizm, dini, sağlık, vb. gibi) aşağıda değerlendirilmiştir.

Kent içindeki konum: Tespit edilen riskli yapıların 50 tanesi (%96) bitişik nizamdır, sadece 2 tanesi (%4) müstakil yapıdır. Bitişik nizam olarak tespit edilen 50 adet riskli yapının 25 tanesi iki taraftan bitişik, 25 tanesi de tek taraftan bitişiktir. Bitişik nizamda bulunan riskli yapıların, olası bir deprem durumunda yanlarındaki binalara zarar verme potansiyeli göz önünde bulundurulmalıdır. Ayrıca, bu yapı düzeninde bulunan riskli yapıların yıkılması, deprem sonrası müdahale ve erişimi zorlaştırarak arama-kurtarma çalışmalarını geciktirebilir; bu durum da deprem kaynaklı hasarların artmasına yol açabilir. Sonuç olarak, yüksek risk taşıyan bitişik nizam yapılar, kentsel doku içinde genel risk seviyesini yükselten bir faktördür.

Restorasyon Durumu: Göreceli riski yüksek olan yapılar kullanılıp kullanılmaması ve fonksiyonlarına göre, bu bölümde ayrıca incelenmiştir. Analiz sonucunda tespit edilen 52 yüksek riskli yapının, 12 tanesi (%23) restore edilmiş, 40 tanesi ise (%77) restore edilmemiştir.

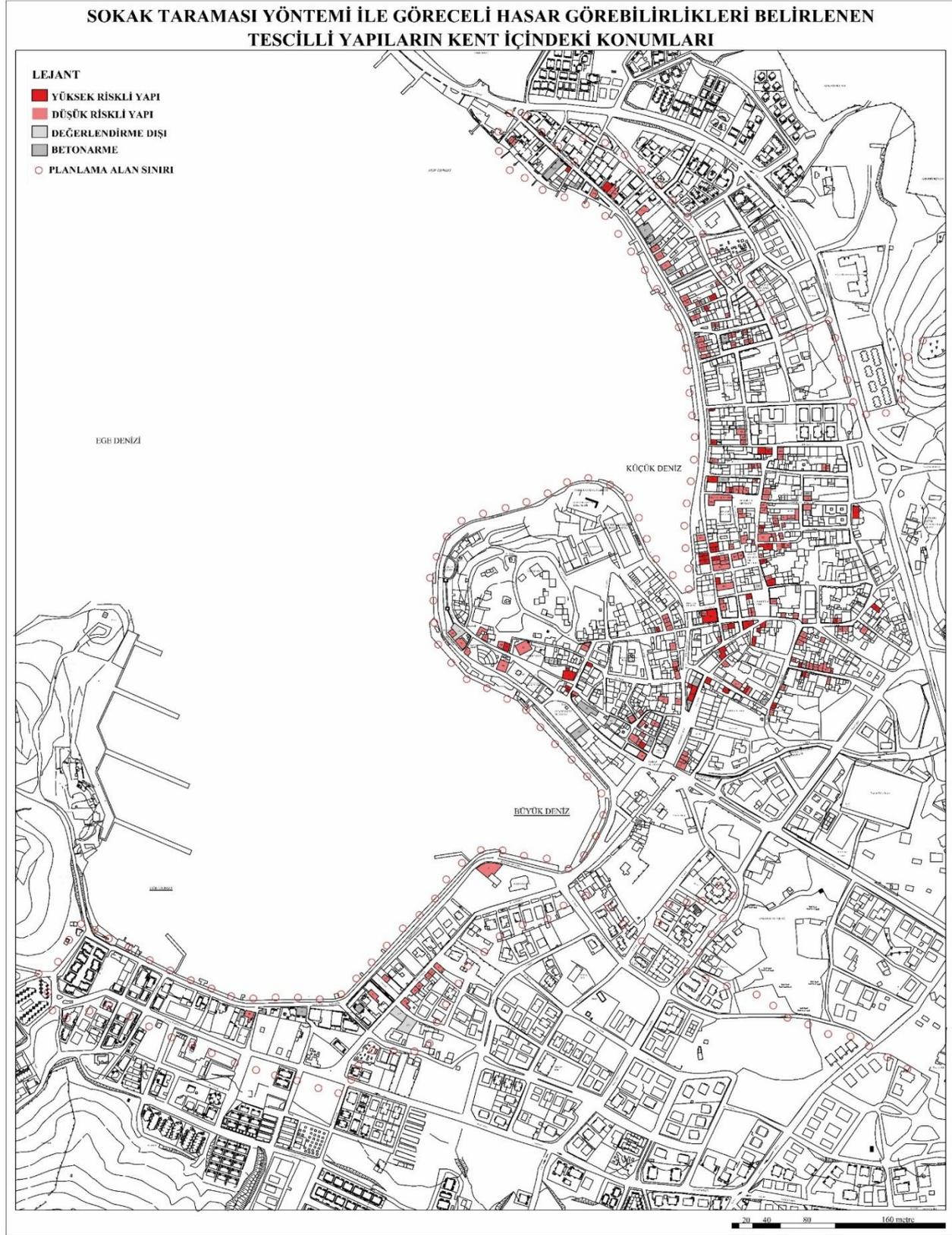
Restore edilen ve riskli bulunan bu 12 yapının komşu yapılarla kat sayısı ve döşeme hizası uyumsuzluğundan kaynaklanan çarpışma etkisinin %50 oranında olduğu saptanmıştır. 11 tanesinin görünen kalitesi orta, yalnızca 1 tanesinin iyi kalitededir. Restore edilmiş olan,

riskli yapıların cephe düzeni açısından 3 tanesinin düzenli, 2 tanesinin orta seviyede düzenli ve 7 tanesinin düzensiz oldukları, cephedeki dolu-boş oranlarının da 4 yapıda orta seviyede, 8 yapıda ise çok olduğu gözlenmiştir. Bu yapıların 10 tanesi kullanılmakta 2 tanesi de kullanılmamaktadır.

Tablo 6. Riskli yapılardan örnekler

	
ENV No: 61 53 Ada/1 Parsel	ENV No: 80 76 Ada/9 Parsel
	
ENV No: 130 85 Ada/41 Parsel	ENV No: 133 87 Ada/2 Parsel
	
ENV No: 169 100 Ada/40 Parsel	ENV No: 217 139 Ada/3 Parsel

<sup>3</sup> Burada belirtildiği gibi, belirlenen risk görecelidir. Ancak, sonraki bölümlerde pratiklik sağlamak amacıyla "Düşük Riskli" veya "Yüksek Riskli" olarak kodlanmıştır.



Şekil 6. Sokak taraması yöntemi ile göreceli hasar görülebilirlikleri belirlenen tescilli yapıların kent içindeki konumları  
(Bu harita, 2. ve 3. kademe hesaplamalı değerlendirmeler için öncelikleri göstermektedir)

Restore edilen, risk önceliği yüksek olan bu yapıların, 3 tanesi konut; 4 tanesi ticari yapı, 4 tanesi restoran ve 1 tanesi otel olarak kullanılmaktadır. Konut dışındaki 9 yapının, kamusal kullanımının da olması nedeniyle can ve mal kayıplarını artıracakları öngörülmektedir. Göreceli hasar görebilirlikleri yüksek olarak belirlenen ve restorasyon geçirmiş bu yapıların, geçirdikleri müdahaleler ışığında ayrıntılı değerlendirmelere tabi tutulmaları gerekmektedir. Restorasyon süreci kapsamında belirli müdahaleler yapılan bu yapıların, özellikle zemin katlarında ticari kullanımlar nedeniyle açıklıkları artırılmış, dolayısıyla da dolu-boş oranlarında önemli değişiklikler gözlenmiştir. Restorasyonları sırasında betonarme lentolar vb. tekniklerle güçlendirme çalışmaları da uygulanmış olabilir. Bu müdahaleler, özellikle analiz kapsamında cephe dolu-boş oranlarının “çok” olarak tespit edildiği yapıları güçlendirmek adına olumlu bir etki yapmış olabilir ve hasar görebilirliklerini azaltabilir. Bunlar restorasyon uzmanları ve mühendisler tarafından detaylı olarak değerlendirilmelidir.

Restore edilmeyen 40 adet yapının da rölövelerinin bulunup bulunmadığı kontrol edilmeli, herhangi bir deprem durumunda en azından belgelenmiş olmalarının sağlanması için bu çalışmaların derhal başlatılması sağlanmalıdır. Riskli yapıların restorasyonu ve güçlendirme çalışmaları için hibeler çıkarılması ve sürecin ilgili kurumlarca dikkatli bir şekilde yönetilmesi, mülk sahiplerine bilgilendirme ve yol gösterme çalışmalarının yapılması önem taşımaktadır.

Yapı Kullanımları: 52 adet riskli yapının, fonksiyonuna bakıldığında, 32 tanesinin (%62) konut, 11 tanesinin (%21) ticari amaçlı, 7 tanesinin (%13) restoran, 1 tanesinin (%2) kafe ve 1 tanesinin (%2) de otel olarak kullanıldığı görülmektedir.

Yapıların içinde yaşanıp yaşanmaması/kullanılıp kullanılmaması ve yapılara eklenen ticari kullanımlar, bir deprem sonrasında hasar ve kayıpları etkileyecektir. Riskli yapılar bu açıdan değerlendirildiğinde, 28 tanesinin (%54) kullanılmakta olduğu 20 tanesinin (%38) kullanılmadığı ve 4 adet (%8) yapının da mevsimsel kullanıma bağlı olarak, kısmi olarak kullanıldığı saptanmıştır. 2. ve 3. kademe ayrıntılı değerlendirmeler için, kullanılan yapılara öncelik verilmelidir.

Riskli yapılar içerisinde kullanılan 28 yapıya bakıldığında, 10 tanesi (%36) konut, 9 tanesi (%32) ticaret, 7 tanesi restoran (%25), 1 tanesi kafe (%3,5) ve 1 tanesi de otel (%3,5) olarak kullanılmaktadır. Zemin katları ticari kullanıma sahip olan bazı yapıların, üst katları depo veya konut olarak kullanılmakta, bazılarının da boş olduğu görülmektedir. Burada dikkat çeken nokta, kullanılan riskli yapıların %64'ünün kamusal kullanımlar barındırması ve insan

sirkülasyonunun yoğun olduğu yapılar olmasıdır. Bu bağlamda da analizler yapılarak riskli yapılarda yaşamın aktif olduğu dönemler belirlenmelidir. Mevsimsel nüfus yoğunluklarına ilişkin veriler de incelenerek, farklı eylem planları oluşturulmalıdır. Sonuç olarak, yöntemin belirlediği riskli yapılar içerisinde halen faaliyet gösteren ve özellikle turistik/ticari amaçlı işlevlerle kullanılan; yeme içme, konaklama gibi insan sirkülasyonunun yoğun olduğu toplu kullanım alanlarına sahip yapılar öncelikli olmalıdır.

Parametrelerin hasar görebilirlik üzerine etkileri ve çözüm önerileri konusunda da kısa bir değerlendirme yapılabilir. Tarihi yapılar için deprem risklerinin yönetimi kılavuzu, bu yapıların onarım ve güçlendirilmesi için alınacak kararlar için doğru yaklaşımları açıklamaktadır (Vakıflar Genel Müdürlüğü, 2017). Bu kılavuzda da belirtildiği gibi, yapıların tescilli olmasından dolayı, yapılabilecek müdahaleler yapının orijinalliğini bozmayacak nitelikte olmalıdır. Müdahalelerin, koruma-deprem güvenliği dengesini sağlaması ayrı bir uzmanlık alanıdır. Bu değerlendirmeler, gerekli müdahale kararları, 2. ve 3. kademe risk değerlendirmelerinin sonucunda, disiplinler arası uzmanlardan oluşan bir ekip çalışması ile uygun müdahale yöntemlerinin belirlenmesi gerekmektedir (Binaların içine girilerek, gerekli ölçümlerin yapılması, detaylı malzeme ve yapı sistemi analizleri, yapı özelinde tek tek sayısal modellemelerinin yapılması, rölövelerin alınması).

Bu çalışma kapsamında, cephedeki açıklıkların dolu-boş düzeninin hasar görebilirlik üzerine etkisinin çok olduğu saptanmıştır. Bu parametreler cephe tasarımıyla ilgili olup, restorasyon sırasında açıklıkların deprem güvenliğini sağlayacak biçimde strüktürel elemanlarla desteklenmesi gerekebilir. Çarpışma etkisi için döşemeler ve döşemelerin değiştiği duvarlar güçlendirilebilir. Görünen bina kalitesini iyileştirmek için malzeme korozyonları giderilebilir, malzeme bozulmalarını önleyici müdahaleler gerçekleştirilebilir.

## 6. Sokak Taraması Yöntemine Yönelik Değerlendirme ve Geliştirme Önerileri

Bu çalışmada mevcut parametreleri değiştirilmeden farklı bir alanda uygulanan *sokak taraması yöntemi*, tescilli yığma yapıların hızlı, ekonomik ve pratik biçimde değerlendirilmesine olanak tanıyan etkili bir araç sunmaktadır. Yöntem, risk durumu açısından yapıların önceliklendirilmesini sağlayarak, daha detaylı mühendislik analizlerine yönlendirme açısından önemli bir ön adım oluşturmaktadır. Ancak, yöntemin bazı sınırlılıkları olduğu da göz önünde bulundurulmalıdır. Bu kapsamda, çalışmada özellikle gözlemlerin yalnızca sokağa bakan cepheye dayanması, kentsel doku bağlamında bütüncül değerlendirme eksikliği ve cephedeki açıklıklarının konumuna ilişkin bazı

kriterlerin dışarıda bırakılması gibi konular eleştirel bir bakışla değerlendirilmektedir.

Öncelikle, yöntemin temel dayanağını oluşturan dış cepheye yönelik gözlemler, taşınmaz kültür varlığı olan tescilli yapının bütünsel durumu hakkında yeterli bilgi sunmamaktadır. Yapıların iç mekânlarında ya da arka cephelerinde yer alan strüktürel bozulmalar bu tür analizlerde gözden kaçabilmekte; özellikle bakım ve onarım geçirmiş binalar, görsel olarak iyi durumda görünmelerine rağmen taşıyıcı sistem açısından önemli yetersizlikler barındırabilmektedir. Özellikle, sokak sağlıklaştırma uygulamalarında mevzuat, binaların sokağa bakı veren cephe ve çatılarının basit bakım/onarımı ve/veya esaslı onarımını öncelikli kılmaktadır. Uygulayıcı idareler tekil, kapsamlı ve strüktürel müdahaleleri de içeren koruma uygulamalarının yerine, daha hızlı ve ekonomik olan bu tür uygulamaları tercih etmekte ve birçok tarihi kentte öncelikli olarak bu çalışmalar yapılmaktadır. Bu durum, yalnızca dış cepheden yapılan değerlendirmelerin, yapının gerçek risk düzeyini yansıtmama ihtimalini artırmaktadır. Çalışma alanı olan Foça kentinde daha önce herhangi bir sokak sağlıklaştırma çalışması yapılmamış olması yöntemin alana uygulanması açısından hata payını azaltmıştır. Ancak cephe müdahalesi görmüş diğer tarihi dokularda uygulanması sırasında bu durum değerlendirilmeli, bu tür alanlarda daha ayrıntılı analizler tercih edilmelidir.

Diğer yandan, *sokak taraması yöntemi*, yapıları büyük ölçüde tekil birimler olarak ele almakta (çarpışma etkisi dışında), yöntem kapsamında kentsel doku içindeki konumları, mekânsal ilişkileri ve birbirleriyle olan yapısal etkileşimleri gibi konularda yapılar üzerine sınırlı düzeyde inceleme yapılmaktadır. Bu çalışmanın önemli katkılarından biri, hızlı değerlendirme yöntemiyle elde edilen verilerin yalnızca bina ölçeğinde değil, aynı zamanda kentsel bağlam içinde yorumlanarak riskin mekânsal dağılımına ilişkin daha bütüncül bir analiz sunmasıdır. Bu doğrultuda, bina puanlaması yapılırken yalnızca hasar görülebilirlik parametreleri kullanılarak risk durumları belirleniyor olmasına rağmen; yapıların kent içindeki konumu, restorasyon durumu ve kullanım durumları gibi bağlamsal faktörlerin de riskli yapılar için değerlendirme sürecine entegre edilmesi önerilmiştir.

Ayrıca, *sokak taraması yöntemi* kapsamında kullanılan parametrelere ek olarak, yığma yapıların dayanımını doğrudan etkileyen ve mevcut yöntemde yer almayan bazı teknik ölçütlerin de dahil edilmesi yöntemin geliştirilmesi açısından dikkate alınmalıdır. Örneğin, kapı ve pencere gibi boşlukların duvar köşelerine olan mesafesi, yığma yapı yapım yönetmeliklerinde de vurgulandığı üzere yapı güvenliği açısından kritik bir unsurdur. Geçmişteki depremlerde gözlenen yığma yapı davranışları incelendiğinde, açıklıklar arasındaki ve bina köşeleri ile açıklıklar arasındaki dolgu duvarların

yeterince geniş olmaması, deprem davranışı bağlamında yapılar için olumsuzluk yaratmaktadır. Bu dolgu duvarlar hem düşey, hem yatay yüklerin taşınması için gereken alanları sağladıkları için önemlidir. Ayrıca geniş olmaları düşey ve kayma gerilmelerinin dengelenmesi açısından da önem taşımaktadır (Bayülke, 2011). Yığma yapı tasarım prensiplerinden gözlenebilir olanlar da yöntemle entegre edilebilir. Bunlardan biri, açıklıkların bina köşesinden uzaklığının 1,5 metreden az, açıklıklar arasındaki mesafenin ise 1 metreden az olmaması gibi tasarım prensipleridir. Betonarme, ahşap veya taş lento ile desteklenmediği durumlarda açıklıkların boyunun 1.10 metreden fazla olmaması da dikkat edilecek bir diğer kriterdir. Bu nedenle, açıklıkların cephedeki konumlarının yığma yapı tasarım prensiplerine uygunluğunu değerlendiren yeni bir parametrenin ("Uygun (0) / Uygun Değil (1)") analize dahil edilmesi, yöntemin doğruluğunu ve bağlamsal geçerliliğini artıracaktır.

Sonuç olarak, sokak taraması yöntemi, özellikle kültürel miras alanlarında hızlı değerlendirme ve önceliklendirme açısından değerli bir araçtır. Ancak, yöntemin yerel yapım teknikleri, mevcut koruma uygulamaları, kullanım biçimleri ve kentsel bağlamla bütünlük biçimde yeniden ele alınması gerekmektedir. Gelecekteki çalışmalarda yöntemin hem içerik açısından hem de analitik olarak geliştirilmesi ve disiplinler arası yaklaşımlarla desteklenmesi, daha kapsamlı ve güvenilir analizlerin önünü açacaktır.

## 7. Sonuç

Çalışma kapsamında *sokak taraması yöntemi*, Foça kent merkezinde, tescilli yığma yapılara uygulanmış ve elde edilen veriler, hızlı tarama sürecinin sağladığı ilk gözlemsel bulgular olarak değerlendirilmiştir. Foça'daki tescilli yığma yapıların göreceli hasar görülebilirlik durumları belirlenmiş, haritalandırılmış ve kentsel doku ile ilişkisi analiz edilmiştir. Analiz sonuçlarına göre, incelenen yapıların %25'inin, göreceli hasar görülebilirliklerinin yüksek olduğu ve kentsel doku içerisindeki konumları itibarıyla bu riski artırdığı belirlenmiştir. Bu yapılar için detaylı hesaplamalara ve laboratuvar testlerine dayalı analizlerin gerçekleştirilmesi, ilgili sayısal modellemelerin yapılması ve özgünlüklerini koruyacak şekilde uygun müdahale yöntemlerinin (basit onarım, güçlendirme, restorasyon vb.) bir an önce başlatılması gerekmektedir.

Bu çalışma, mevcut bir yöntemi yeni bir alan çalışmasına uyarlayarak kentsel bağlamda değerlendirmeler yapmakta ve bu yönüyle yöntem araştırmalarına katkı sağlamaktadır. Ayrıca, kültürel mirasın sürdürülebilirliğini destekleyerek, bölgede risk azaltımı ve koruma çalışmalarına disiplinler arası bir bilimsel altyapı oluşturmaktadır. Tarihi kentlerde yığma yapıların deprem risk önceliklerini belirleyen bu

araştırma, Foça özelinde sunduğu bulgularla kentsel mirasın korunmasına yönelik stratejilere yön vermektedir.

Bu çalışma, *sokak taraması yönteminin* tescilli yapıların hızlı değerlendirilmesi amacıyla da kullanılabileceğini ortaya koymuştur. Bu doğrultuda, yöntem, hiç değiştirilmeden uygulanmış olup, metodolojik açıdan yeni bir katkı sunulmamış olsa da, tescilli yapıların değerlendirilmesine uyarlanarak farklı bir bağlamda ele alınmıştır. Yöntemin sınırlılıkları ve geliştirme önerileri 6. bölümde tartışılmıştır. Söz konusu yöntem binaları tekil yapılar olarak ele almaktadır. Bu çalışma kapsamında elde edilen bulgular doğrultusunda öncelikli olarak belirlenen yapılar, kentsel doku bağlamında analiz edilmiş ve riskin kentsel mekânla ilişkisi bütüncül bir yaklaşımla incelenmiştir.

Kültürel miras alanlarında hızlı değerlendirme yöntemlerinin risk yönetim çalışmalarıyla entegre olarak koruma süreçlerine dahil edilmesi gerekmektedir. Koruma Amaçlı İmar Planları çerçevesinde, tarihi kentlerin yalnızca koruma odaklı planlanması yerine, deprem güvenliğini de içeren risk yönetimi stratejilerinin geliştirilmesi gerekmektedir. Bu kapsamda, tescilli yapılar için risk yönetim planları hazırlanmalı, riskli yapıların onarımına yönelik hedefler ve stratejiler belirlenerek plan uygulama raporları ile yönetmeliklerde açıkça tanımlanmalıdır. Bu çalışmalar, çalışma alanını depremlere karşı daha dayanıklı ve güvenli hale getirmek için önemli bir fırsat sunmaktadır. Bu sürecin, risk odaklı koruma stratejileri ile bütünleştirilerek yürütülmesi hem tarihi mirasın korunmasını hem de bölgenin deprem dirençliliğinin artırılmasını sağlayacaktır.

### Teşekkür

Çalışmamızı geliştirmemize katkı sağlayan öneri ve yorumlarıyla Prof. Dr. Haluk Sucuoğlu, Prof. Dr. Murat Altuğ Erberik ve Doç. Dr. Özgür Özçelik'e teşekkür ederiz.

### Araştırmacıların Katkısı

Bu çalışmada; Yazar 1 ve Yazar 2, makalenin tüm süreçlerine ortak katkı sağlamışlardır.

### Çıkar Çatışması

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir.

### Kaynaklar

AFAD (2025). Türkiye Deprem Tehlike Haritaları İnteraktif Web Uygulaması <https://tdth.afad.gov.tr/TDTH/main.xhtml>

Akbulut, M. T. ve Aytuğ, A. (2005). Deprem hasargörebilirlik riskinin gözleme dayalı

belirlenmesine yönelik öneri değerlendirme yaklaşımı. *Megaron*, 1(1), 88-98.

Asteris, P.G., Chronopoulos, M.P., Chrysostomou, C.Z., Varum, H., Plevris, V., Kyriakides, N. ve Silva, V. (2014). Seismic vulnerability assessment of historical masonry structural systems. *Engineering Structures*, 62, 118-134.

Balamir, M. (2007). Sakınım Planlaması. *Şehir Plancıları Odası Haber Bülteni*, 87, 21-31.

Balamir, M. (2022) 'The Disaster Cycle and Actors in Disaster Management', *International Journal of Disaster Resilience in the Built Environment*, (yayın kararı alınmış makale).

Balyemez, S. ve Berköz, L. (2005). Hasargörebilirlik ve kentsel deprem davranışı. *İTÜ Dergisi/a mimarlık, planlama, tasarım*, 4(1), 3-14.

Bayülke, N. (2011). Yığma yapıların deprem davranışı ve güvenliği, 1. Türkiye Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı (ODTÜ), Ankara, Türkiye. *Bildiriler Kitabı*, 1-14.

Bozkır, F., Bozkır, N. S. ve Kuyumcu, E. (2015). Foça (İzmir) sivil mimari örnekleri ve restorasyon. 5.Tarihi Eserlerin Güçlendirilmesi ve Geleceğe Güvenle Devredilmesi Sempozyumu, Erzurum, Türkiye. *Kongre Sempozyum Bildiriler Kitabı*, 2, 445-463.

Can, H. ve Ünay, A. İ. (2012). Tarihi yapıların deprem davranışını belirlemek için sayısal analiz yöntemleri. *Journal of the Faculty of Engineering & Architecture of Gazi University*, 27(1) 211-217.

Can, Ö. ve Yıldızoğlu H. (2018). Yığma binalarda deprem performansının belirlenmesi (Bayburt Korkut Ata Lisesi örneği). *Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 8(2), 372-380.

Coburn, A. ve Spence, R. (2002). *Earthquake protection (2nd Edition)*. John Wiley & Sons Ltd., West Sussex-England.

Özgen, K. ve Coza, H. 2005. Binalarda Deprem Hasarları ve Nedenleri, *Yapı Dergisi*, Aralık, No.289, s; 86-94. İstanbul.

Dabanlı, Ö. (2008). Tarihi yığma yapıların deprem performansının belirlenmesi. [Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, İnşaat Mühendisliği Ana Bilim Dalı, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.]

Durak, S. (2018). Ege bölgesinde yaygın olarak kullanılan yığma yapılar ve bu yapıların deprem

- güvenliği (Master Tezi, Pamukkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü).
- Efekan, S. (2019). Yapıların deprem performansının hızlı değerlendirme yöntemleri ile belirlenmesi ve sonuçların karşılaştırılması. [Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Yapı Deprem Mühendisliği Anabilim Dalı, Sosyal Bilimler Enstitüsü, Maltepe Üniversitesi, İstanbul.]
- Erberik, M. A. (2008). Generation of fragility curves for Turkish masonry buildings considering in-plane failure modes. *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, 37(3), 387-405.
- Erberik, M. A. (2010). Seismic risk assessment of masonry buildings in Istanbul for effective risk mitigation. *Earthquake Spectra*, 26(4), 967-982.
- Genes, M. C., Abrahamczyk, L., Kacin, S. ve Erberik, A. M. (2017). Yığma yapıların deprem etkisi altında gözleme ve hesaba bağlı değerlendirilmesi için yöntem, 4. Uluslararası Deprem Mühendisliği ve Sismoloji Konferansı (Anadolu Üniversitesi), Eskişehir, Türkiye.
- Görür, N. (Ed.). (2024). Deprem Dirençli Kentler: Bir Yol Haritası. Bilim Akademisi.
- Güler, E. ve Canbaz, M. (2020). Yapıların deprem riskinin sokak tarama yöntemi ile belirlenmesi; Sivrihisar örneği. *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 28(3), 227-234.
- ICOMOS (1996). 1st National summit on heritage & risk preparedness, Quebec Declaration. Quebec, Canada.
- Işık B. C. (1992). Depremler ve Türkiye, Yıldız Teknik Üniversitesi-İstanbul.  
[https://obs.hkmo.org.tr/show-media/resimler/ekler/TD92\\_54dda4b1ba34c6f\\_ek.pdf](https://obs.hkmo.org.tr/show-media/resimler/ekler/TD92_54dda4b1ba34c6f_ek.pdf)
- Işık E. (2013). Bitlis ili yapı stoğunun birinci kademe (sokak tarama yöntemi ile) değerlendirilmesi. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 17(1), 173-178.
- İstanbul Büyük Şehir Belediyesi (2003). İstanbul Deprem Master Planı.  
<https://depremezemin.ibb.istanbul/tr/istanbul-deprem-master-plani-2003/> (11.03.2025)
- Karaşin, İ. B., Eren B. ve Işık, E. (2016). Mevcut bir yığma yapının farklı hızlı değerlendirme yöntemleri ile değerlendirilmesi. *Dicle Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 5(2), 70-76.
- Koç, V. (2016). Depreme maruz kalmış yığma ve kırsal yapı davranışlarının incelenerek yığma yapı yapımında dikkat edilmesi gereken kuralların derlenmesi. *Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 2(1), 36-57.
- JMO, 2025. Türkiye Deprem Tehlike Haritası, [https://www.jmo.org.tr/genel/jeoloji\\_harita.php?kod=9004](https://www.jmo.org.tr/genel/jeoloji_harita.php?kod=9004) (11.03.2025)
- Okuyucu, D., Savaş, G. K., Gedik, B., Şuşarlıoğlu, M. F. ve Kara, T. (2018). Sokaktan tarama yöntemiyle binaların bölgesel deprem risk dağılımının belirlenmesi: Erzurum-Yenişehir örneği. *Fırat Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 30(1), 219-231.
- Özbay, A. Ö. ve Karapınar, I. S. (2021). Tarihi bölgelerdeki yığma yapıların deprem güvenliği ön değerlendirmesi. *Karaelmas Fen ve Mühendislik Dergisi*, 11(1), 1-11.
- Özdemir, M. B. (2015). Binaların deprem risklerinin birinci kademe değerlendirme yöntemiyle belirlenmesi üzerine bir saha çalışması: Giresun ili Şebinkarahisar ilçesi örneği. [Yayınlanmamış Doktora tezi, İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, Fen Bilimleri Enstitüsü, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon.]
- Özyiğit, Ö. (2017). Phokaia kazı ve araştırmaları, Phokaia I, Kent duvarları ve restorasyonu (ISBN: 978-605-9680-44-8). Ege Yayınları, İstanbul.
- Sucuoğlu, H., (2007) (16-20 Ekim). Kentsel yapı stoklarında deprem risklerinin sokaktan tarama yöntemi ile belirlenmesi. 6. Ulusal Deprem Mühendisliği Konferansı, İstanbul, 267-284.
- Sucuoğlu, H. ve Yazgan, U. (2003). Simple Survey Procedures for Seismic Risk Assessment in Urban Building Stocks, Nato Science Series, Kluwer Academic Publishers, 29, 97-118.
- Star (2021). Foça'da hasar gören 6 binadan 3'ü tehlike oluşturduğu gerekçesiyle ekiplerce yıkıldı.  
<https://www.star.com.tr/guncel/focada-hasar-goren-6-binadan-3u-tehlike-olusturdugu-gerekcesiyle-ekiplerce-yikildi-haber-1583972/> (08.03.2021)
- Taşçı, B. (2015). Çok katmanlı yerleşimlerin koruma sorunlarının Foça örneği üzerinden irdelenmesi. [Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi, Mimarlık Anabilim Dalı, Restorasyon Programı, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.]
- Taşçı B. ve Akyüz Levi E. (2016). Kent içi arkeolojik alanlarda kalıntıların sunumuna ilişkin yaklaşımlar:

Foça örneği. İdealkent, 19(7), 588-627. ISSN: 1307-9905

Turkish Building Stock. In Seismic Evaluation and Rehabilitation of Structures (pp. 15-35). Cham: Springer International Publishing.

Tokgöz, H. ve Bayraktar, H. (2015). Düzce ili Kaynaşlı ilçesinde riskli binaların tespitinde sokak taraması yönteminin uygulanması. Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi, 3(1), 107-116.

Zıvrallı, İ. ve Cabbar, Ü. N. (2015). Kültür varlıklarında risk yönetimi; gelişimi, güncel durum ve öneriler. 5. Tarihi Eserlerin Güçlendirilmesi ve Geleceğe Güvenle Devredilmesi Sempozyumu (TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası, Erzurum Şubesi-İzmir Şubesi), Erzurum, Türkiye. Bildiriler Kitabı, Cilt 2-B Oturumları, 155-169.

Uzer, E. ve Gülersoy, N. Z. (2011). Kentsel kültür mirası için risk analizi, Büyükada örneği. İTÜDERGİSİ/a, 10(1).

[http://www.imo.org.tr/Şekiller/ekutuphane/pdf/17506\\_59\\_16.pdf](http://www.imo.org.tr/Şekiller/ekutuphane/pdf/17506_59_16.pdf)

Vatan, M. (2015). Nepal depremi sonrası kültür mirasının korunması. Mimarlık Dergisi, 385, 30-33.

T.C. Vakıflar Genel Müdürlüğü (2017). Tarihi yapılar için deprem risklerinin yönetim kılavuzu. Sözcü Yayıncılık, Ankara.

Riskli Bina Tespit Esasları (RBTE, 2013). "16/5/2012 tarihli ve 6306 sayılı Afet Riski Altındaki Alanların Dönüştürülmesi Hakkında Kanunun Uygulama Yönetmeliğinde Değişiklik Yapılmasına Dair Yönetmelik", Çevre ve Şehircilik Bakanlığı

[https://cdn.vgm.gov.tr/organizasyon/organizasyon12\\_030619/kilavuz.pdf](https://cdn.vgm.gov.tr/organizasyon/organizasyon12_030619/kilavuz.pdf) (05.03.2025)

Yakut, A., Erberik, M. A., Ilki, A., Sucuoğlu, H. ve Akkar, S. (2013). Rapid seismic assessment procedures for the

## INVESTIGATION OF TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF POLYMER COMPOSITES PRODUCED WITH NANO CERAMIC REINFORCEMENT UNDER DRY AND ALKYL BASED OIL CONDITIONS

Gökçe Mehmet AY<sup>1\*</sup>, Esad KAYA<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Eskişehir

ORCID No : <https://orcid.org/0000-0001-8354-5070>

<sup>2</sup> Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü, Eskişehir

ORCID No : <https://orcid.org/0000-0002-7332-6154>

### Keywords

UHMWPE  
Tribology  
Composites

### Abstract

*This study investigates the influence of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanoparticles on the tribological performance of ultra-high molecular weight polyethylene (UHMWPE) composites under dry and polyalphaolefin (PAO)-lubricated conditions. Experimental evaluations included measurements of friction coefficient, wear rate, and hardness, complemented by optical microscopy of wear tracks. Results indicated that incorporating Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> cut  $\mu$  from **0.12 to 0.07** and  $\dot{V}$  from  $4.3 \times 10^{-6}$  to  $1.6 \times 10^{-6} \text{ mm}^3 \text{ N}^{-1} \text{ m}^{-1}$  under dry sliding (4 wt % filler). With PAO, an optimum 2 wt % loading yielded  $\mu \approx 0.05$  and  $\dot{V} \approx 1.1 \times 10^{-6} \text{ mm}^3 \text{ N}^{-1} \text{ m}^{-1}$ . Hardness rose by  $\approx 22$  %, confirming the reinforcing effect of the nanoparticles. Optical microscopy confirmed ploughing wear mechanisms and highlighted issues of particle segregation at elevated filler loadings. Optimizing filler dispersion and maintaining appropriate nanoparticle concentrations are essential for maximizing the tribological advantages of UHMWPE-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composites. Potential applications include bearing components, biomedical implants, and industrial sliding interfaces, while challenges remain in managing nanoparticle agglomeration.*

## NANO SERAMİK TAKVİYELİ ÜRETİLEN POLİMER KOMPOZİTLERİN KURU VE ALKİL BAZLI YAĞLI KOŞULLAR ALTINDAKİ TRIBOLOJİK ÖZELLİKLERİNİN ARAŞTIRILMASI

### Anahtar Kelimeler

UHMWPE  
Triboloji  
Kompozit

### Öz

*Bu çalışma, kuru ve polyalphaolefin (PAO) yağlanmış koşullar altında ultra yüksek moleküler ağırlıklı polietilen (UHMWPE) kompozitlerinin tribolojik performansı üzerindeki Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanopartiküllerin etkisini araştırmaktadır. Deneysel değerlendirmeler, sürtünme katsayısı, aşınma oranı ve sertlik ölçümlerini içerirken, aşınma izlerinin optik mikroskopisi ile desteklenmiştir. Sonuçlar, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanopartiküllerin eklenmesinin kuru koşullar altında sürtünme ve aşınma oranlarını önemli ölçüde azalttığını, özellikle daha yüksek dolgu oranlarında (4 wt%) gösterdiğini ortaya koymuştur. PAO ile yağlama sürtünmeyi daha da azaltırken, yüksek dolgu içeriği (4 wt%) ise hafif bir şekilde sürtünmeyi artırmış ve partikül aglomerasyonu nedeniyle periyodik osilasyonlara yol açmıştır. Sertlik, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> içeriği arttıkça düzenli bir şekilde artarak nanopartiküllerin güçlendirici etkisini göstermiştir. Optik mikroskopi, aşınma mekanizmalarını doğrulamış ve yüksek dolgu yüklemelerinde partikül ayrışması sorunlarını vurgulamıştır. UHMWPE-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> kompozitlerinin tribolojik avantajlarını maksimize etmek için dolgu dağılımının optimize edilmesi ve uygun nanoparçacık konsantrasyonlarının korunması gerekmektedir. Potansiyel uygulamalar arasında rulman bileşenleri, biyomedikal implantlar ve endüstriyel sürtünmeli arayüzler yer almakta olup, nanopartikül aglomerasyonunun yönetilmesinde zorluklar devam etmektedir.*

Araştırma Makalesi

Başvuru Tarihi

: 10.04.2025

Kabul Tarihi

: 24.06.2025

Research Article

Submission Date

: 10.04.2025

Accepted Date

: 24.06.2025

\* Sorumlu yazar: [gma@ogu.edu.tr](mailto:gma@ogu.edu.tr)

<https://doi.org/10.31796/ogummf.1672479>



Bu eser, Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>) hükümlerine göre açık erişimli bir makaledir.

This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

## 1. Introduction

Ultra-high molecular weight polyethylene (UHMWPE) is a highly versatile thermoplastic renowned for its low friction coefficient, superior wear resistance, and excellent biocompatibility, rendering it indispensable for applications such as orthopedic implants, bearings, and water-lubricated systems. Nonetheless, pure UHMWPE often exhibits inadequate mechanical and tribological performance under stringent service conditions, necessitating the incorporation of suitable reinforcements. Recent advances in nanotechnology have facilitated property modifications through the inclusion of nano-scale fillers such as aluminum oxide ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), carbon nanotubes (CNTs), glass fibers, and emerging reinforcements like nanodiamonds.

$\text{Al}_2\text{O}_3$  nanoparticles have shown particular promise for enhancing UHMWPE's wear resistance and mitigating its friction coefficient. Their high surface energy and robust interaction with the polymer matrix promote strong interfacial bonding, thus improving both mechanical strength and tribological behavior. Studies examining UHMWPE sliding against  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ceramic surfaces report lower friction coefficients and superior wear resistance compared with metallic alternatives such as TiAl6V4 alloy and stainless steel, owing to  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 's propensity to form a stable transfer film that reduces direct material contact (Ruggiero, D'Amato, Gómez, and Merola 2016). Furthermore, incorporating nanoparticles like  $\text{Al}_2\text{O}_3$  significantly augments mechanical stability and lowers wear rates under lubricated conditions, particularly in artificial lubrication media (Xu et al. 2023). However, nanoparticle agglomeration remains a notable challenge, as uneven dispersion can create stress concentrations that undermine these benefits. Similar observations in other polymer matrices highlight the importance of effective dispersion strategies (Sun, Yang, and Li 2008).

The addition of CNTs to UHMWPE has also received considerable attention due to the outstanding mechanical and thermal properties of CNTs. Reinforcing UHMWPE with CNTs can yield increased hardness and elastic modulus, contingent on the aspect ratio and degree of CNT dispersion. While CNTs boost load-bearing capacity, their high aspect ratios can sometimes raise the friction coefficient, emphasizing the necessity for balancing reinforcement efficacy with tribological performance (Manoj Kumar, Sharma, Manoj Kumar, and Lahiri 2015; Samad and Sinha 2011).

Incorporating fibers, such as glass and carbon, into UHMWPE has proved advantageous in improving its tribological response under both dry and lubricated conditions. Wang et al. demonstrated that hybrid composites enhanced with glass and carbon fibers exhibit notably reduced wear rates and friction coefficients under water-lubricated environments

compared with pure UHMWPE (Wang, Yin, Li, Gao, and Zhang 2017). Such composite systems are particularly useful for water-lubricated journal bearings, where a combination of mechanical strength and tribological robustness is critical.

Blending UHMWPE with polytetrafluoroethylene (PTFE) offers another route to expanding its tribological applications. Since PTFE acts as a solid lubricant, it can markedly reduce wear and friction while maintaining the structural integrity of UHMWPE. Panin et al. found that UHMWPE-PTFE blends showed wear rates more than twofold lower than those of pure UHMWPE, rendering them suitable for high-load, dry-sliding scenarios (Panin et al. 2015).

Emerging reinforcements like nanodiamonds have also demonstrated exceptional capabilities in enhancing UHMWPE's tribological properties. Golchin et al. reported a 72% decrease in the wear rate by incorporating only 1 wt% nanodiamonds, attributing these gains to a boundary lubrication effect and the ability of nanodiamonds to polish the counter surfaces during sliding (Golchin, Villain, and Emami 2017). Under lubricated conditions, UHMWPE composites generally outperform their dry counterparts.  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 's high hardness and low friction characteristics significantly aid in reducing wear, especially in aqueous or saline lubricants that provide ancillary lubrication (Ruggiero et al. 2016). Notably, nanodiamonds exhibit exceptional efficacy in water-lubricated systems, owing to their unique capability to improve friction and wear performance.

Such progress underscores the transformative role of nanotechnology in advancing UHMWPE's tribological behavior. By leveraging nano-scale reinforcements, researchers have achieved remarkable enhancements in wear resistance, frictional properties, and mechanical strength. Nevertheless, issues related to filler dispersion, optimal loading, and nanoparticle agglomeration remain vital subjects for further exploration. The development of hybrid composites and innovative reinforcements holds significant potential for balancing mechanical performance with tribological efficiency, broadening UHMWPE's scope in both industrial and biomedical settings.

Polyalphaolefins (PAOs) are synthetic lubricants widely acknowledged for their outstanding thermal stability, low volatility, and superior lubrication characteristics, making these lubricants invaluable in the industrial and automotive sectors. They have gained prominence due to their aptitude for enduring extreme conditions and their compatibility with cutting-edge additive technologies. Current research on PAOs seeks to refine their tribological performance, ecological sustainability, and functionality through inventive modifications.

The performance of PAOs has been markedly improved by functional additives. For example, functionalized carbon nanotubes (MWCNTs) have been demonstrated to effectively diminish friction and wear, thereby highlighting the potential for refined boundary lubrication (Kumar and Harsha 2021). Additionally, efforts to incorporate environmentally responsible options—such as lubricants derived from plastic waste—offer parallel efficacy while addressing ecological imperatives (Hackler et al. 2021).

Progress in thermoresponsive polymers within PAOs facilitates precise control over lubrication properties across variable temperatures, advancing applications requiring dynamic viscosity management (Fu, Bai, Jiang, Seymour, and Zhao 2018). Moreover, the use of nanoparticle additives to bolster load-carrying capacity and wear resistance further broadens the functional scope of PAOs (Peña-Parás et al. 2015).

In tribological research, UHMWPE and PAOs command considerable interest owing to their exceptional properties and broad application potential. UHMWPE, prized for its robust wear resistance, low friction coefficient, and biocompatibility, is extensively employed in biomedical implants and industrial environments. Although UHMWPE alone possesses favorable tribological attributes, reinforcement, and lubrication strategies are necessary to meet ever-increasing performance requirements (Hussain et al. 2020).

Conversely, PAOs are lauded for their dependable thermal stability, low volatility, and excellent lubricative characteristics under challenging operational conditions. Such attributes position PAOs as prime candidates for enhancing UHMWPE's tribological performance in both dry and lubricated scenarios (Ruggiero et al. 2016). Combining these two materials has demonstrated a reduction in friction, bolstered wear resistance, and extended service life.

Further improvements can be achieved by reinforcing UHMWPE with fillers such as graphene oxide (GO), which can further boost wear resistance and lubrication efficacy, particularly under aqueous or simulated body-fluid lubrication (Pang, Ni, Wu, and Zhao 2018). In biomedical contexts, the integration of these composite materials with PAO-based lubricants has proven successful in improving tribological performance and biocompatibility in artificial joint systems (Xu et al. 2023).

This paper thus examines the synergistic effects of PAOs and UHMWPE across various applications, with particular attention to their combined tribological properties. By reviewing recent progress in hybrid systems and their relevance to industrial and biomedical fields, the discussion underscores the importance of additive technologies and surface

modifications in maximizing their functional performance (Macuvele et al. 2017). Accordingly, this study aims to investigate the tribological properties of UHMWPE composite containing  $\text{Al}_2\text{O}_3$  under both dry and PAO-lubricated conditions.

## 2. Materials and method

In this study, UHMWPE (43951 Alfa Aesar) in powder form was used. The average grain diameter was 150 microns. The average molecular weight was 36 million. The density was defined as  $0.945 \text{ g/cm}^3$ .  $\text{Al}_2\text{O}_3$  powder was supplied by US Research Nanomaterials. The average grain diameter was 20 nm. The specific surface area was approximately  $25 \text{ m}^2/\text{g}$ . The samples had a total mass of 2 grams. UHMWPE and  $\text{Al}_2\text{O}_3$  particles were mixed at 50 rpm for 30 minutes. Then, the mixtures were hot pressed. The process was carried out on the Struers CitoPress-1 device. At the end of the process, samples with a diameter of 30 mm were produced. The production process consisted of 5-minute cycles. The first three minutes of this cycle were heating and the last two minutes were cooling. Pressure was actively applied throughout the cycle. The pressure used in the process was selected as 250 bar. The heating temperature was selected as  $150^\circ\text{C}$ .

Ultra-high molecular weight polyethylene (UHMWPE) was reinforced with aluminum oxide ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) at varying ratios at 0,1,2 and 4wt% to produce composite samples. The raw materials were thoroughly mixed and then processed into 30mm diameter test specimens, ensuring uniform dispersion of the filler. Each composite was shaped and finished to the required dimensions for tribological evaluation. The microstructures of the produced samples were characterized at equal magnification for all samples on a Nikon Clemex brand optical microstructure analyzer.

Vickers micro-hardness measurements were conducted in accordance with **ASTM E384-23**. A nominal test load of **25 gf** (0.245 N) was selected after preliminary trials at 10–100 gf revealed that loads  $\geq 50$  gf produced pronounced radial flow and “pile-up” around the indents—an artefact commonly observed in semicrystalline polymers whose yield strength is markedly lower than that of metals. By restricting the applied force to 25 gf, the projected diagonal length remained  $< 40 \mu\text{m}$ , thereby keeping the plastic zone well inside the bulk material and minimising elastic recovery during the 15 s dwell time. This approach is consistent with previous recommendations for ultra-high molecular-weight polyethylene (UHMWPE) and other low-modulus polymers, where micro-indentation loads between 10 gf and 30 gf have been shown to yield reproducible hardness values while avoiding excessive surface deformation (Hardiman, Vaughan, and McCarthy 2016; Movva, Burrell, Garmestani, and Jacob 2023). In order to ensure the accuracy of the

measurements, 3 measurements were made on each sample and the standard deviation was calculated. The measurements were made on a Future Tech FM-800 type device. A 25 gf load was used in the measurements. 30 seconds was selected as the load application time.

Table 1. Nomenclature of Sample Codes and Compositions

Code	Test condition	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> content (wt %)	Meaning
K00	Dry sliding	0	Unfilled UHMWPE reference
K01	Dry sliding	1	UHMWPE + 1 wt % Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
K02	Dry sliding	2	UHMWPE + 2 wt % Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
K04	Dry sliding	4	UHMWPE + 4 wt % Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
O00	PAO-lubricated	0	Unfilled UHMWPE reference in PAO
O01	PAO-lubricated	1	UHMWPE + 1 wt % Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
O02	PAO-lubricated	2	UHMWPE + 2 wt % Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
O04	PAO-lubricated	4	UHMWPE + 4 wt % Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>

The specimens prepared for this study are identified by the alphanumeric codes listed in Table 1. The capital letter denotes the testing environment: **K** (dry sliding) refers to unlubricated runs conducted in ambient air, while **O** (*oil*) designates otherwise identical tests performed under a poly- $\alpha$ -olefin (PAO) lubricant. The two-digit numeral that follows specifies the nominal aluminium-oxide content in weight per cent (00, 01, 02, 04 wt % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). All samples share the same UHMWPE matrix and were compounded by melt blending and compression moulding under the conditions detailed previously.

Table 2. Wear-test Parameters and Calculated Hertzian Contact Stress

Parameter	Value
Tribometer	CSM pin-on-disk
Counter-face (pin)	100Cr6 steel ball, 3 mm diameter
Specimen (disk)	UHMWPE + Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> composite, 30 mm $\emptyset$
Track radius	10 mm (fixed)
Normal load, $F$	5 N
Linear sliding speed	0.03 m s <sup>-1</sup> (3 cm s <sup>-1</sup> )
Total sliding distance	50 m
Environment	(i) Dry, ambient laboratory air (ii) PAO-lubricated (poly-alpha-olefin, drop-wise application)
Data-acquisition rate	10 Hz
<b>Hertzian maximum contact stress, <math>p_0</math></b>	<b><math>\approx 85</math> MPa</b>

Tribological tests were conducted on a CSM pin-on-disk tribometer under both dry and PAO-lubricated conditions parameters are given at The specimens prepared for this study are identified by the alphanumeric codes listed in Table 1. The capital letter denotes the testing environment: **K** (dry sliding) refers to unlubricated runs conducted in ambient air, while **O** (*oil*) designates otherwise identical tests performed under a poly- $\alpha$ -olefin (PAO) lubricant. The two-digit numeral that follows specifies the nominal aluminium-oxide content in weight per cent (00, 01, 02, 04 wt % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). All samples share the same UHMWPE matrix and were compounded by melt blending and compression moulding under the conditions detailed previously.

Table 2. A 100Cr6 steel ball of 3 mm diameter served as the counterface (pin), sliding against the UHMWPE+AlO<sub>2</sub> composite disk. The contact radius on the disk was fixed at 10 mm from the center. All tests were performed at a linear speed of 3 cm/s, with a normal load of 5 N, for a total sliding distance of 50 m. Data were recorded at an acquisition rate of 10 Hz. Throughout testing, the operating environment was maintained at ambient laboratory conditions, with PAO lubricant introduced at the contact zone for the lubricated trials. After the tests, the worn surfaces were scanned with the Mitutoyo SJ-400 profilometer and surface damage was characterized in two dimensions. Gauss filtering technique was used in the surface scanning process. R profile was activated in the ISO 97 standard.

This study complies with the ethical standards of research and publication.

**3. Results**

**3.1 Friction Coefficient**

The coefficient of friction (CoF) exhibited distinct trends under dry and PAO-lubricated conditions as shown in Figure 1. There is distinct lower friction for lubricated samples. To discern the effect of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> content in dry (K) and lubricated (O) samples coefficient of friction versus distance plots were observed in Figure 2 and Figure 3. The effect of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> content is relatively low for 1 and 2 wt%. However, when Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> content increases to 4 wt% the effect is more pronounced. For dry samples, CoF decreases below 0.2 with non-periodic increases when Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> content increases to 4 wt%. For lubricated samples, the effect of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> addition is the opposite. Increasing Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> content to 4 wt% increases CoF and adds periodic oscillations. Average CoF values are given in Figure 4. Under dry sliding, pure UHMWPE demonstrated a relatively high CoF of 0.2737 ± 0.0454. Incorporating Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> resulted in a significant reduction in friction, with the lowest CoF value of 0.1606 ± 0.0214 observed at 4 wt% filler content. Conversely, under lubricated conditions, all samples showed considerably lower friction values compared to the dry counterparts, generally remaining below 0.06. The lowest CoF under lubricated conditions was observed at 1 wt% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (0.0414 ± 0.0074), with a slight increase at higher filler loadings (0.0606 ± 0.0099 for 4 wt%).

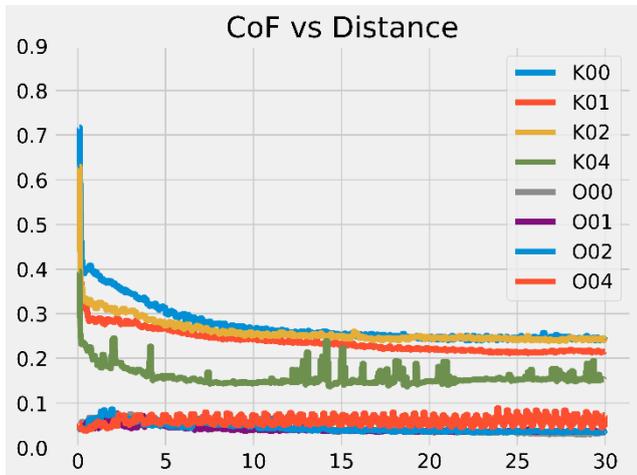


Figure 1 Coefficient of Friction Values of The Dry (K) and Lubricated (O) Conditions

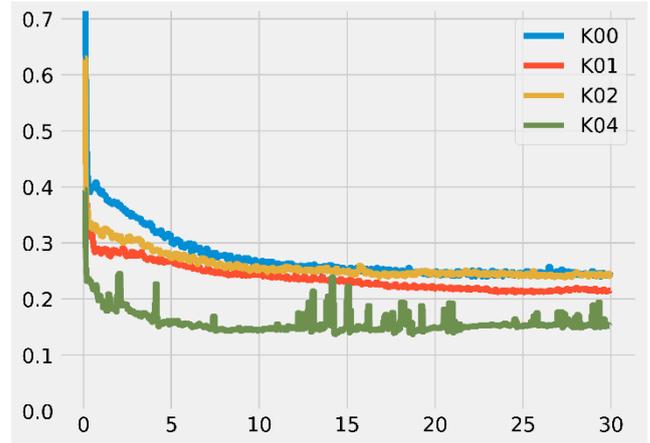


Figure 2 Coefficient of Friction Values of The Dry (K) Samples

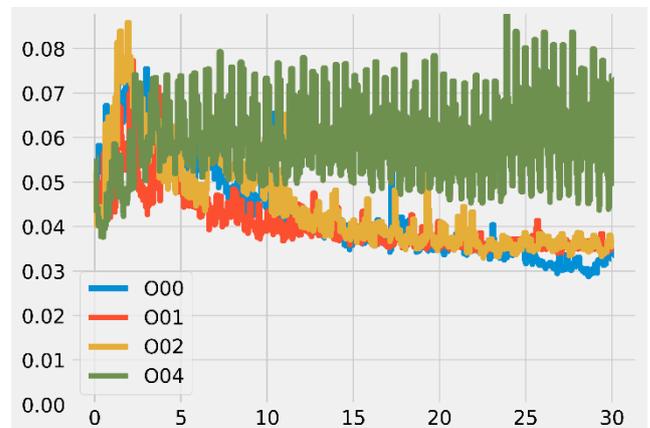


Figure 3 Coefficient of Friction Values of The Lubricated (O) Samples

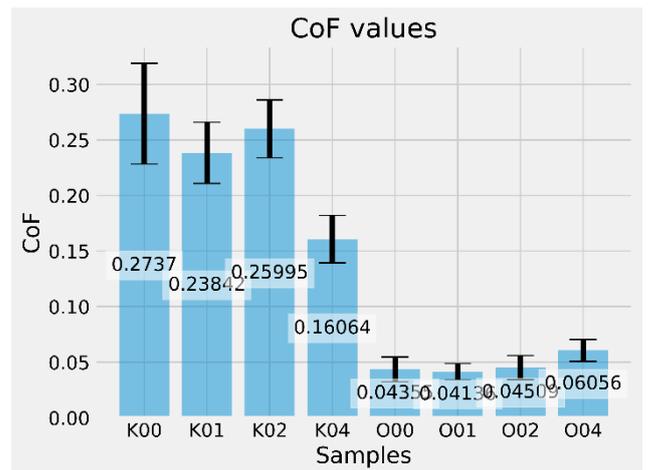


Figure 4 Average Coefficient of Friction Values of The Samples

**3.2 Wear Rate**

Wear rate measurements revealed substantial improvements with the addition of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, particularly under dry conditions Figure 5. The specific wear rate for pure UHMWPE under dry conditions was markedly high

(540 mm<sup>3</sup>/Nmm) but drastically reduced to 6.46 mm<sup>2</sup>/Nmm at 4 wt% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. In lubricated conditions, pure UHMWPE exhibited a significantly lower wear rate (12.08 mm<sup>3</sup>/Nmm), which further decreased with increasing filler content to a minimum of 4.22 mm<sup>3</sup>/Nmm at 4 wt%.

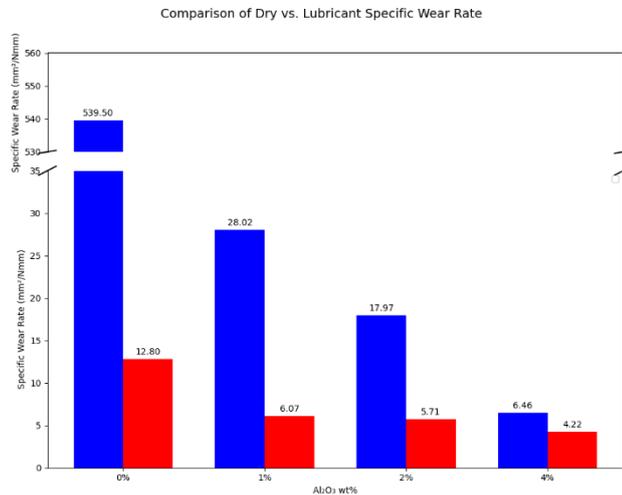


Figure 5 Wear Rate of The Dry and Lubricated Conditions

### 3.3 Hardness

The hardness of the UHMWPE composites increased consistently with Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> content, ranging from 10.75 HV for pure UHMWPE to 17.11 HV for the 4 wt% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composite Figure 6. This hardness enhancement correlates strongly with the filler content, emphasizing the reinforcing capability of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particles within the polymer matrix.

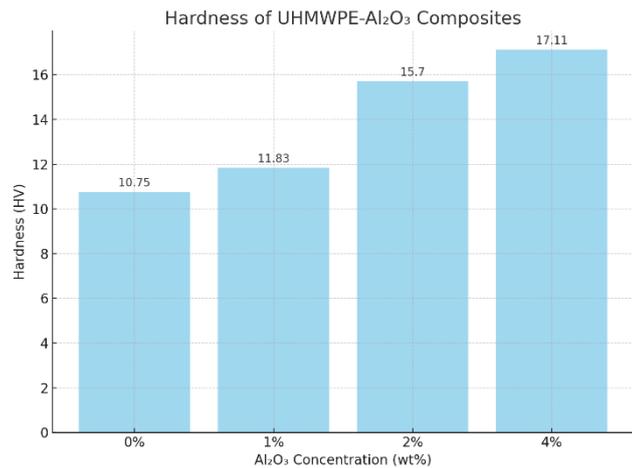


Figure 6 Hardness of The Samples

### 3.4 Optical Observations

Optical microscopy of the wear tracks indicated clear evidence of ploughing mechanisms in all cases. Under dry conditions, pronounced ploughing and surface damage were evident across all compositions. Under

lubricated conditions, ploughing was significantly reduced, with notably shallow wear tracks observed for the 4 wt% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composite Figure 7. Additionally, segregation and agglomeration of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particles were visible in the optical images, particularly at higher filler contents (4 wt%), suggesting potential dispersion challenges Figure 8.

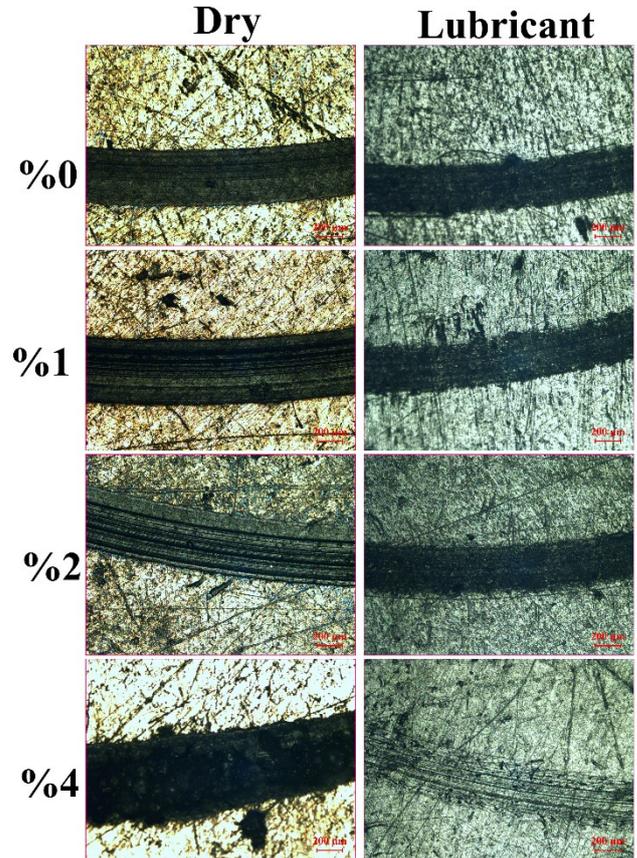


Figure 7 Wear Track Optical Observations of The Samples

Figure 8 shows the optical microstructure analyses of the produced samples. As can be seen, mechanical interlocks are observed in all sample groups. This is an indication that the parameters selected in the production processes are optimal. The nano ceramic additive added to the structure at different rates is partially seen in the optical microstructure analyses. These mostly seen structures are segregated parts. It triggers anisotropy in the structure. When examined from a microstructural perspective, it is seen that there is a critical limit in terms of segregation in the nano ceramic additive rate. This situation is clearly seen in the 4% added sample. Agglomerations have occurred at the micro level.

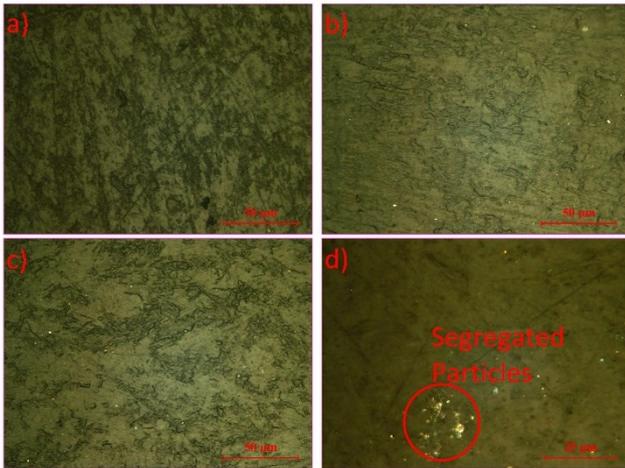


Figure 8 Microstructure of The Samples at Varying Ratios at 0,1,2 and 4wt%

#### 4. Discussion

The experimental findings indicate that  $\text{Al}_2\text{O}_3$  nanoparticles significantly influence the tribological behavior of UHMWPE, particularly under dry sliding conditions. The marked reduction in friction and wear rates observed with increasing  $\text{Al}_2\text{O}_3$  content under dry conditions is attributed to the formation of stable transfer films that minimize direct material contact, corroborating mechanisms identified by previous studies (Ruggiero et al. 2016).

Under lubricated conditions, although friction values are inherently lower due to the effective boundary lubrication provided by PAO, increasing the  $\text{Al}_2\text{O}_3$  content to 4 wt% introduced periodic oscillations and slightly increased the friction. These periodic variations suggest intermittent disruptions in lubricant film uniformity, likely caused by agglomerated nanoparticles, consistent with prior reports highlighting dispersion issues (Sun et al. 2008).

A pronounced reduction in wear rates is observed as  $\text{Al}_2\text{O}_3$  content increases from 1 wt% to 4 wt%. Under dry conditions, the wear rate decreases dramatically from  $539.5 \text{ mm}^3/\text{Nmm}$  for pure UHMWPE to just  $6.46 \text{ mm}^2/\text{Nmm}$  at 4 wt% filler loading, illustrating a robust reinforcement effect. A similar trend is evident under lubricated conditions, where the wear rate drops from  $12.8 \text{ mm}^3/\text{Nmm}$  (unfilled) to  $4.22 \text{ mm}^3/\text{Nmm}$  at 4 wt%  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . These results indicate that higher  $\text{Al}_2\text{O}_3$  concentrations can deliver substantial improvements in wear resistance if dispersion is well controlled. Thus, rather than peaking at moderate loadings, the performance continues to improve with increased filler content—underscoring the synergistic benefits of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  reinforcement and PAO lubrication at elevated nanoparticle concentrations.

Hardness consistently improved with increasing filler concentration, confirming the mechanical reinforcement provided by  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Nonetheless, optical

images revealed particle segregation at higher concentrations, reinforcing the need for optimized dispersion strategies to mitigate adverse tribological outcomes associated with agglomeration.

#### 5. Conclusion

PAO lubrication markedly reduces friction across all compositions, yet the reinforcement effects of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  are particularly evident under dry conditions. Under dry sliding, the addition of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  drastically reduces wear—dropping from  $539.5 \text{ mm}^3/\text{Nmm}$  for unfilled UHMWPE to just  $6.46 \text{ mm}^3/\text{Nmm}$  at 4 wt%—while lubricated tests also show improvement, with wear rates decreasing from  $12.8 \text{ mm}^3/\text{Nmm}$  to  $4.22 \text{ mm}^3/\text{Nmm}$ . These results underscore the synergistic benefits of  $\text{Al}_2\text{O}_3$  reinforcement and PAO lubrication in enhancing tribological performance. To fully capitalize on these advantages, it is essential to optimize filler dispersion and mitigate particle agglomeration.

The improved performance of UHMWPE- $\text{Al}_2\text{O}_3$  composites makes them promising candidates for applications such as bearing components, biomedical implants, and sliding interfaces in industrial equipment—areas where low friction and high wear resistance are critical. However, challenges remain in achieving uniform nanoparticle dispersion during processing, which must be addressed through advanced material handling and fabrication techniques.

#### Contributions of the Researchers

In this research: Gökçe Mehmet AY contributed to the tribology test, wear measurements and the preparation of the article; Esad KAYA contributed to sample production, optical imaging and the conducting of hardness tests.

#### Conflict of Interest

No conflict of interest has been declared by the authors.

#### References

- Fu, Wenxin, Wei Bai, Sisi Jiang, Bryan T. Seymour, and Bin Zhao. 2018. "UCST-Type Thermoresponsive Polymers in Synthetic Lubricating Oil Polyalphaolefin (PAO)." *Macromolecules* 51(5):1674–80. doi:10.1021/acs.macromol.7b02755.
- Golchin, Arash, Alexis Villain, and Nazanin Emami. 2017. "Tribological Behaviour of Nanodiamond Reinforced UHMWPE in Water-Lubricated Contacts." *Tribology International* 110:195–200. doi:10.1016/j.triboint.2017.01.016.
- Hackler, Ryan A., Philip J. Griffin, Amgad Elgowainy, Uddhav Kanbur, Kimaya Vyavhare, Robert M. Kennedy, Ali Erdemir, Guiyan Zang, Pingping Sun, Kenneth R. Poepfelmeier, Massimiliano Delferro, Gokhan Celik, and Aaron D. Sadow. 2021. "Synthetic Lubricants Derived from

- Plastic Waste and Their Tribological Performance.” *ChemSusChem* 14. doi:10.1002/cssc.202100912.
- Hardiman, M., T. J. Vaughan, and C. T. McCarthy. 2016. “The Effects of Pile-up, Viscoelasticity and Hydrostatic Stress on Polymer Matrix Nanoindentation.” *Polymer Testing* 52:157–66. doi:10.1016/j.polymertesting.2016.04.003.
- Hussain, Muzamil, Naseem Abbas, Muhammad Waqas Khalid, Rizwan Ali Naqvi, Nida Zahra, Shahzad Masood Khan, Saad Nawaz, and Arif Hussain. 2020. “Ultra-High-Molecular-Weight-Polyethylene (UHMWPE) as a Promising Polymer Material for Biomedical Applications: A Concise Review.” *Polymers* 12. doi:10.3390/polym12020323.
- Kumar, Homender, and A. P. Harsha. 2021. “Augmentation in Tribological Performance of Polyalphaolefins by COOH-Functionalized Multiwalled Carbon Nanotubes as an Additive in Boundary Lubrication Conditions.” *Journal of Tribology* 143(102202). doi:10.1115/1.4051392.
- Macuvele, Domingos Lusitâneo Pier, Janaína Nones, Jonas V. Matsinhe, Marla M. Lima, Cíntia Soares, Márcio A. Fiori, and Humberto G. Riella. 2017. “Advances in Ultra High Molecular Weight Polyethylene/Hydroxyapatite Composites for Biomedical Applications: A Brief Review.” *Materials Science and Engineering: C* 76:1248–62. doi:10.1016/j.msec.2017.02.070.
- Manoj Kumar, R., Sandan Kumar Sharma, B. V. Manoj Kumar, and Debrupa Lahiri. 2015. “Effects of Carbon Nanotube Aspect Ratio on Strengthening and Tribological Behavior of Ultra High Molecular Weight Polyethylene Composite.” *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 76:62–72. doi:10.1016/j.compositesa.2015.05.007.
- Movva, Sahitya, Reeshemah K. Burrell, Hamid Garmestani, and Karl I. Jacob. 2023. “Characterization of Hardness and Elastic Modulus Using Nanoindentation and Correlation with Wear Behavior of UHMWPE during Uniaxial Tension.” *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials* 147:106142. doi:10.1016/j.jmbbm.2023.106142.
- Pang, Wenchao, Zifeng Ni, JiaLiang Wu, and Yongwu Zhao. 2018. “Investigation of Tribological Properties of Graphene Oxide Reinforced Ultrahigh Molecular Weight Polyethylene under Artificial Seawater Lubricating Condition.” *Applied Surface Science* 434:273–82. doi:10.1016/j.apsusc.2017.10.115.
- Panin, S. V., L. A. Kornienko, T. Nguen Suan, L. R. Ivanova, M. A. Korchagin, S. V. Shil’ko, and Yu. M. Pleskachevskii. 2015. “Wear Resistance of Composites Based on Hybrid UHMWPE–PTFE Matrix: Mechanical and Tribotechnical Properties of the Matrix.” *Journal of Friction and Wear* 36(3):249–56. doi:10.3103/S1068366615030113.
- Peña-Parás, Laura, Jaime Taha-Tijerina, Lorena Garza, Demófilo Maldonado-Cortés, Remigiusz Michalczewski, and Carolina Lapray. 2015. “Effect of CuO and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Nanoparticle Additives on the Tribological Behavior of Fully Formulated Oils.” *Wear* 332–333:1256–61. doi:10.1016/j.wear.2015.02.038.
- Ruggiero, Alessandro, Roberto D’Amato, Emilio Gómez, and Massimiliano Merola. 2016. “Experimental Comparison on Tribological Pairs UHMWPE/TIAL6V4 Alloy, UHMWPE/AISI316L Austenitic Stainless and UHMWPE/AL203 Ceramic, under Dry and Lubricated Conditions.” *Tribology International* 96:349–60. doi:10.1016/j.triboint.2015.12.041.
- Samad, M. Abdul, and Sujeet K. Sinha. 2011. “Dry Sliding and Boundary Lubrication Performance of a UHMWPE/CNTs Nanocomposite Coating on Steel Substrates at Elevated Temperatures.” *Wear* 270(5–6):395–402. doi:10.1016/j.wear.2010.11.011.
- Sun, Lan-Hui, Zhen-Guo Yang, and Xiao-Hui Li. 2008. “Study on the Friction and Wear Behavior of POM/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Nanocomposites.” *Wear* 264(7):693–700. doi:10.1016/j.wear.2007.06.005.
- Wang, Yanzhen, Zhongwei Yin, Hulin Li, Gengyuan Gao, and Xiuli Zhang. 2017. “Friction and Wear Characteristics of Ultrahigh Molecular Weight Polyethylene (UHMWPE) Composites Containing Glass Fibers and Carbon Fibers under Dry and Water-Lubricated Conditions.” *Wear* 380–381:42–51. doi:10.1016/j.wear.2017.03.006.
- Xu, Jimin, Xing Gao, Hang Dou, Cuiping Zhang, Wei Wang, and Kun Liu. 2023. “Improved Cryogenic Frictional Properties of Thrust Ball Bearings in Liquid Nitrogen through PTFE Cages and Dimple-Type Textures.” *Cryogenics* 135:103748. doi:10.1016/j.cryogenics.2023.103748.

**MODELLING OF SOME EFFECTIVE PARAMETERS IN FINE COAL FLOTATION**Derya Öz AKSOY<sup>1\*</sup>, Sabiha KOCA<sup>2</sup>, Hüseyin KOCA<sup>3</sup><sup>1,2</sup>Mining Engineering Department, Eskisehir Osmangazi University, Turkey<sup>3</sup>Porsuk Technical College, Eskisehir Technical University, Turkey

Anahtar Kelimeler	Öz
Flotasyon, Merkezi Kompozit Tasarım, Flotasyon Parametrelerinin Modellenmesi, Düşük Ranklı Linyit	<i>Türkiye'nin ham petrol ithalatına %90, doğal gaz ithalatına %99 ve kömür ithalatına %95 oranında bağımlı olduğu bilinmektedir. Türkiye'nin en önemli enerji kaynağı yaklaşık 20 milyar ton olan linyitlerdir. Enerjide dışa bağımlılığın yüksek olmasına rağmen, Türkiye'nin elektrik üretiminin yalnızca %14,21'i yerli linyit kaynaklarından elde edilmektedir. Yerli linyitlerden çok düşük miktarda elektrik elde edilmesinin başlıca nedenlerinden biri, bu rezervlerin önemli bir kısmının düşük ranklı olması, yüksek kül ve yüksek kükürt içeriğine sahip olması ve arıtmadan kullanıldığında ciddi çevre sorunlarına yol açmasıdır.</i> <i>Bu çalışmada, düşük ranklı linyitlerin kül içeriğini azaltarak santrallerde kullanımını artırmak için bir dizi flotasyon deneyi gerçekleştirilmiştir. Deneylerin tasarımı, deneysel sonuçların analizi ve matematiksel modellerin oluşturulması Merkezi Kompozit Tasarım Yöntemi kullanılarak yapılmıştır. Deneysel sonuçlar, numunelerin kül içeriğinin %52,47'den %29,37'ye düştüğünü ve yanıcı geri kazanımının %32,50 olduğunu ortaya koymuştur.</i>

Keywords	Abstract
Froth Flotation, Central Composite Design, Modelling of Flotation Variables, Low-Rank Lignite.	<i>The most important energy resource of Turkey is lignites which counts for about 20 billion tones. Despite the high external dependency on energy, only 14.21% of Turkey's electricity production is obtained from domestic lignite resources. One of the main reasons why very low amounts of electricity are received from domestic lignites is that a significant portion of these reserves are low-rank, have high ash and sulfur content, and cause severe environmental problems if utilized without purification.</i> <i>In this work, to reduce the ash content of these lignite's thus increasing their utilization in power plants, a series of flotation experiments were carried out. Designing experiments, analysing experimental results, and creating the mathematical models were performed using the Central Composite Design Method. The experimental results revealed that the ash content of the samples was reduced from 52.47% to 29.37% with a combustible recovery of 32.50%.</i>

Araştırma Makalesi

Research Article

Başvuru Tarihi : 21.05.2025

Submission Date : 21.05.2025

Kabul Tarihi : 15.09.2025

Accepted Date : 15.09.2025

\* Sorumlu yazar: [deryaoz@gmail.com](mailto:deryaoz@gmail.com)<https://doi.org/ogummf.1693410>Bu eser, Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>) hükümlerine göre açık erişimli bir makaledir.This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

## 1. INTRODUCTION

Turkey has insufficient reserves of crude oil, hard coal and natural gas and is dependent on foreign countries by 90%, 95% and 99%, respectively (<https://enerji.gov.tr/info-bank-energy>).

Lignite reserves, the most important fossil fuel source in Turkey, are approximately 20 billion tons. 79.1 million tons of lignite were produced in Turkey in 2022. All of these were excavated from domestic sources, and 83.5% of this amount was utilized in electricity generation in thermal power plants (<https://enerji.gov.tr/info-bank-energy>).

Only 14.21% of Turkey's electricity production is obtained from domestically produced coal (TEİAŞ, 2023). The main reason why domestic energy resources are used at such a low rate in Turkey is that a significant portion of these resources have low-rank, high ash and sulfur content and cause serious environmental problems if used without enrichment (TMMOB, 2024). Approximately 80% of Turkey's lignite reserves have a calorific value

below 2500 Kcal/kg, with minimum and maximum values ranging from 1000 to 4200 Kcal/kg. The average sulfur content is above 2%, and the average calorific value is around 1250 Kcal/kg. Therefore, the use of these lignites in energy production without cleaning causes serious

negative effects on the environment. This leads to restrictions on their utilization.

In countries such as China, Australia and the USA, froth flotation is widely used on an industrial scale for fine lignite (<0.5 mm) cleaning (Lynch, Watt, Finch and Harbort, 2007; Dube, 2012). There are many studies in the literature on reducing the ash content of lignite (Jia, Harris and Fuerstenau, 2000; Xia, Yang and Zhu, 2012; Oh-Hyung, Min-Kyu, Byoung-Gon, Nimal and Chul-Hyun., 2014) and removing sulfur (Yoon, Lagno, Lutrell and Mielczarski, 1991; Aksoy, Aytar, Toptas, Çabuk, Koca and Koca, 2014; Aksoy, Ozdemir, Aytar, Koca, Çabuk, Koca and Brito-Prada, 2022) by froth flotation.

In this work, to reduce the ash content of these lignites, the enrichment studies are carried out by the flotation method. The effects of process variables such as collector type and amount, solid ratio, pH and flotation time on weight yield, ash content and combustible recovery were optimized. This study was planned using the Central Composite Design (CCD) method which is one of the principal response surface methodologies. CCD is a widely used experimental design method, because of it can give more data with lower number of experiments (Öz Aksoy and Sağol, 2016). One of the most important advantages of the statistical method chosen in this study is the generation of model equations for the selected response

variables. Furthermore, the interactions between the investigated parameters and the effects of these interactions on the response variable during the flotation process are interpreted.

## 2. MATERIALS AND METHOD

### 2.1. Sample

Samples taken from the preparation plant of Eskisehir region lignites were dried in the open air and separated into size fractions. The fractions larger than +0.053 mm were cleaned by physical methods in another project and the results were published elsewhere (Aksoy, Koca and Koca, 2012). In this project, it was determined that the fraction finer than -0.053 mm could not be enriched by physical methods. In the preliminary experiments, it was shown that the fine fraction could be cleaned by physicochemical methods. Therefore, this project was initiated to clean the fine fraction by froth flotation. The ash content of the studied sample was analyzed as 52.47%, the lower calorific value (LCV) as 2678 Kcal/kg and the sulfur content as 4.76%.

Analytical grade reagents were used in the flotation studies. Fuel oil (FO), Philflo (PF) and a mixture of Philflo+kerosene (PF+K) were used as collectors. Sodium silicate was utilized as a dispersant to prevent agglomeration of fines. Pine oil was used as a frother. A tailor-made reagent, Philflo, was manufactured and supplied by Chevron Philips Chemical Company, LP.

### 2.2. Method

Flotation experiments were carried out by using laboratory type Denver flotation machine with a volume of 1.5 liters cell at the Mineral Processing Laboratory of Eskisehir Osmangazi University. Before systematic experiments, a series of preliminary experiments were carried out to select the collector and to determine the constant and varied parameters and levels of varied parameters. Some parameters were kept constant. These are: Particle size, depressant type, frother type, agitation speed and flotation time.

Particle size: -0.053 mm,  
Depressant: Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>,  
Frother: Pine oil,  
Agitation speed: 1200 rpm  
Flotation time: 90 s.

In the preliminary experiments, it was determined that the sulfur content of fine size lignite's could not be reduced sufficiently. It was stated in the literature that the sulfur reduction in fine size lignite's by froth flotation was not achieved sufficiently due to slime coating (Andrews and Maczuga 1982; Lizama and Suziki 1987). For this reason,

sulfur removal was not studied in this project and it was decided to use biological methods in another study.

In the systematic experiments, CCD, one of the statistical experimental design methods, was used to set up the experimental design and the analysis of the obtained results. The  $\alpha$  factor was selected as 1 in CCD. Design Expert 10.0.6 Software was used for achieving the design matrix of the response variables. The levels of the varied parameters are given in Table 1.

Table 1. Parameters and Levels.

Parametre	Level		
	-1	0	1
A-Collector Amount (g/t)	1200	1700	2200
B-Solid Ratio (%)	8	13	18
C-pH	6	7,5	9
D-Depressant Amount (g/t)	500	1000	1500

The products obtained after the experiments, concentrate and waste, were dried and weighed. The ash and sulfur contents of the products and their combustible recovery (CR) were determined. The combustible recovery was calculated using Equation 1.

$$CR \% = \frac{wt\% \text{ concentrate} \times (100 - \text{Ash content of concentrate})}{(100 - \text{Ash content of feed})} \quad (1)$$

where wt% is the amount of concentrate (%). In this study, ash content and combustible recovery in the concentrate fraction are presented.

Varied parameters were evaluated according to 3 response variables:

1. Weight yield (amount of concentrate) (WY %),
2. Ash content of concentrate (Ash %)
3. Combustible recovery (CR %)

After the variance analysis of the results (according to a 95% confidence interval), statistically insignificant terms for each response variable were eliminated, and reduced variance analysis tables were prepared, and mathematical models were created.

### 3. RESULTS AND DISCUSSION

#### 3.1. Determination of Collector Type

Fuel oil and kerosene are generally used in coal and lignite flotation. (Xia, Xie and Peng, 2015; Jia et al., 2000) In recent years, as suggested by some publications, a tailor-made synthetic collector, PhilFlo, was also used (Aksoy et al., 2014).

Before systematic experiments, a series of experiments were conducted to determine the type of collector. In these experiments, FO, PF and PF+K (2:1 w/w) were tested and the most effective collector was determined. The effect of the collector type on the ash content and combustible recovery of the concentrate is shown in Figure 1.

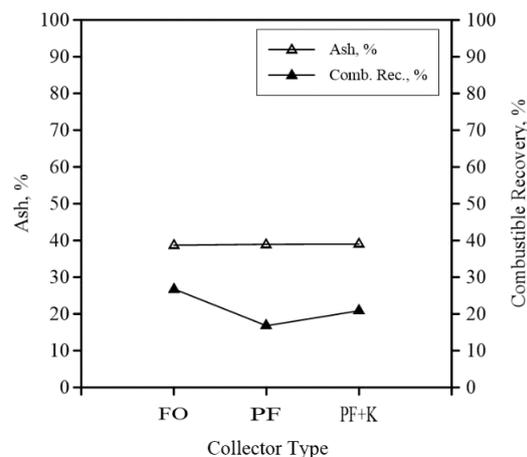


Figure 1. The Effects of Collector Type on Flotation Results

All three collectors used had the same effect on the ash content of the concentrate, reducing the ash content to less than 40%. The best result was obtained with fuel oil with an ash content of 38.69%. This corresponds to a reduction of more than 26%. When the results were examined in terms of combustible recovery, it was found that fuel oil gave the best result with 27.79%. Therefore, fuel oil was used as the collector in the following studies.

After the determination of the collector type, systematic experiments were planned according to Design Expert Software. The design matrix and the results of experimental studies are given in Table 2.

In the variance analysis of the results for the parameters whose effects were examined, the software suggested a quadratic model for all three models.

Reduced variance analysis, p values indicating the significance levels of the terms are given in Table 3, along with  $R^2$ ,  $AR^2$  and  $PR^2$  values showing the model strength for the three response variables.

Mathematical models of response variables are given in Eqs. 2-4 according to the actual values of the factors.

$$WY (\%) = -26.10588 - 0.005882x_A - 0.679808x_B + 9.55950x_C + 0.022818x_D + 0.000807x_{AB} + 0.001059x_{AC} - 0.722796x_C^2 - 0.000011x_D^2 \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \text{Ash (\%)} = & 128.19264 + 0.064383xA - 5.59407xB - \\ & 28.58840xC + 0.000895xD + 0.000310xAB + \\ & 2.42 \times 10^{-6}xAD + 0.222833xBC - 0.000782xCD - \\ & 0.00019xA^2 + 0.115173xB^2 + 1.68859xC^2 \end{aligned} \quad (3)$$

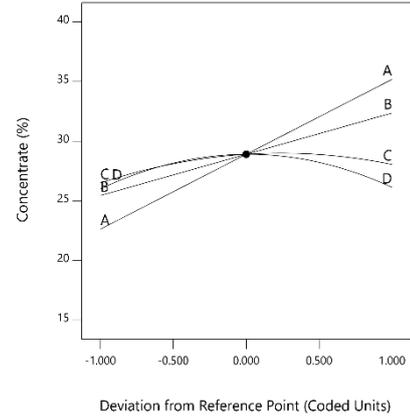
$$\begin{aligned} \text{CR (\%)} = & -93.75336 + 0.001945xA - 0.483092xB + \\ & 25.46876xC + 0.030533xD + 0.000900xAB - \\ & 1.62100xC^2 - 0.000015D^2 \end{aligned} \quad (4)$$

When the summary table of reduced variance analysis is examined, the models obtained for all three response variables are found to be statistically significant since their p-values are <0.05. The models are also statistically quite strong with R<sup>2</sup> values well above 90% and PR<sup>2</sup> values above 85%.

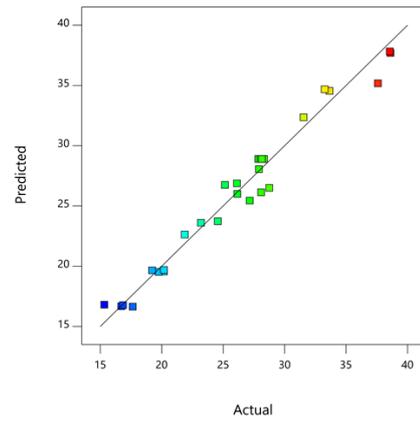
Interpretation of the results and graphical representations is given below one by one for each response variable.

**3.2. The Response of Weight Yield**

As can be seen from the reduced ANOVA Table (Table 3) and Figure 2a, the most effective parameters for weight yield are collector amount and solid ratio, and they are in interactions with each other. pH also significantly affects the weight yield and interacts with the collector amount. But no interaction was observed between pH and solid ratio. Figure 2a graphically illustrates the main effects of parameters for weight yield. The compatibility between the experimental data and the values estimated from the model is also given in Figure 2-b. As seen from this figure, predicted weight yield values represent over 97% of actual weight yield values (R<sup>2</sup>=0.9701), indicating the consistency of the model. Apart from this, high values of P-R<sup>2</sup> (0.9370) and A-R<sup>2</sup> (0.9587) show the high power of prediction of this model.



(a)



(b)

Figure 2. a) Parameter Main Effect Graphs, B) Experimental Data-Model Prediction Fit Graph for the WY (R<sup>2</sup>=0,9701).

As seen in Figure 2 a, the collector amount and the solid ratio increased the weight yield and this increase continues linearly in the studied range. The increase in pH increased the floating product rate up to a certain level, but it caused a decrease above this level. The depressant amount showed a parabolic effect in the studied range, but this parameter was not significant in the variance analysis.

Table 2. Design matrix and results of the experiments for the three response variables.

No	A	B	C	D	WY (%)	Ash (%)	CR (%)
1	2200	18	6	500	33.65	39.60	42.76
2	1200	18	9	500	19.75	34.55	27.20
3	1200	18	6	500	20.18	34.76	27.70
4	1700	13	7.5	1000	28.24	37.81	36.95
5	1200	8	6	500	16.71	42.57	20.19
6	2200	18	9	500	38.61	40.93	47.98
7	1700	13	7.5	1000	28.16	36.92	37.37
8	2200	18	9	1500	38.56	41.08	47.80
9	2200	8	6	500	23.19	46.00	26.35
10	2200	8	9	1500	26.12	39.47	33.26
11	1200	18	6	1500	20.18	33.02	27.80
12	1200	8	6	1500	15.33	42.98	18.39
13	1700	13	7.5	1500	28.09	37.95	36.67
14	1700	13	7.5	1000	28.32	38.03	36.92
15	1200	18	9	1500	19.22	32.14	27.44
16	1700	13	7.5	1000	28.04	37.90	36.64
17	2200	13	7.5	1000	37.59	33.29	52.76
18	1700	13	6	1000	28.75	41.77	35.22
19	1700	8	7.5	1000	27.16	41.86	33.22
20	1700	18	7.5	1000	31.54	36.18	42.35
21	1700	13	7.5	500	26.15	37.05	34.63
22	1700	13	9	1000	27.91	38.11	36.34
23	1200	13	7.5	1000	21.87	29.37	32.50
24	1200	8	9	1500	16.85	32.56	23.91
25	2200	18	6	1500	33.26	41.57	40.89
26	1200	8	9	500	17.64	37.78	23.09
27	1700	13	7.5	1000	27.86	37.70	36.52
28	2200	8	9	500	25.14	40.74	31.34
29	2200	8	6	1500	24.56	45.99	27.91
30	1700	13	7.5	1000	28.15	37.50	37.02

Table 3. Reduced variance analysis summary (ANOVA)

	WY %	Ash %	CR %
	P Value	P Value	P-Value
Model	<0.0001	<0.0001	<0.0001
A	<0.0001	<0.0001	<0.0001
B	<0.0001	<0.0001	<0.0001
C	0.0184	<0.0001	0.0043
D	0.8356	0.1275	0.7751
AB	<0.0001	0.0093	0.0008
AC	0.0225	-	-
AD	-	0.0336	-
BC	-	<0.0001	-
BD	-	-	-
CD	-	0.0410	-
A2	-	<0.0001	-
B2	-	0.0002	-
C2	0.0293	<0.0001	0.0077
D2	0.0005	-	0.0060
R <sup>2</sup>	0.9701	0.9554	0.9393
AR <sup>2</sup>	0.9587	0.9281	0.9199
PR <sup>2</sup>	0.9370	0.8520	0.8963

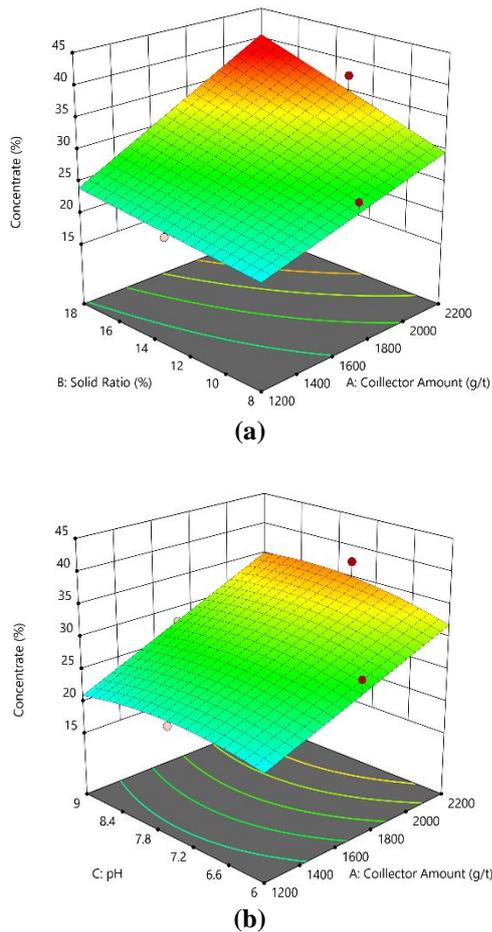


Figure 3. Interaction Graphs For The Amount Of Concentrate. a) Collector Amount/Solid Ratio (A/B), b) Collector Amount/pH (A/C).

Interaction graphs for collector amount/solid ratio and collector amount/pH in three dimensions are given in Figure 3a and 3b, respectively. When the interaction graphs are examined, it is seen that the increase in the collector amount increases the weight yield, but this increase is much faster at high solid ratios. In parallel with this, the collector amount/pH interaction, the increase in the collector amount increases the weight yield at all pH values, but this increase is faster at high pH values.

**3.3. The Response of Ash Content**

Model equality and variance analysis were given in Table 3. The main effect graphs of the studied parameters are given in Figure 4-a. The graph showing the compatibility between the experimental data and the values estimated from the model is given in Figure 4-b. This figure shows that the predicted ash content of concentrate values represents over 95% of actual ash content values

( $R^2=0.9554$ ), indicating high consistency of the model. The values of P- $R^2$  (0.8520) and A- $R^2$  (0.9281) are also quite high and show the high power of prediction of this model.

As can be seen from the reduced variance analysis, all the studied parameters except the depressant amount and the interactions between collector amount/solid ratio, collector amount/depressant amount, solid ratio/pH and pH/depressant amount are statistically significant. Interaction graphs for all 4 interactions in three dimensions are given in Figure 5 a, b, c and d, respectively.

As seen in Figure 4a, the three parameters (A, B and C) showed a parabolic effect. Among these, the solid ratio and pH first decreased and then increased the ash; the other parameter, the collector amount first increased and then decreased the ash. When the interaction graphs were examined (Figure 5), similar to the first response variable, all the parameters affect the ash content significantly.

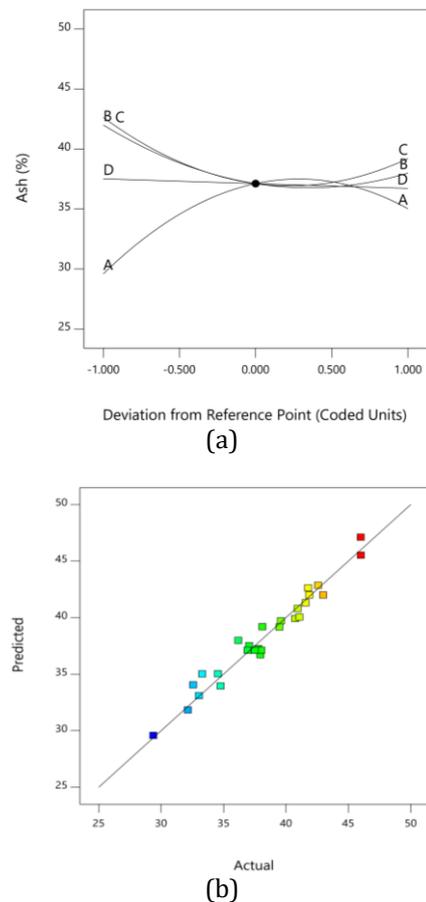


Figure 4. a) Parameter main effect graphs, b) Experimental data-model prediction fit graph for the ash ( $R^2=0,9554$ )

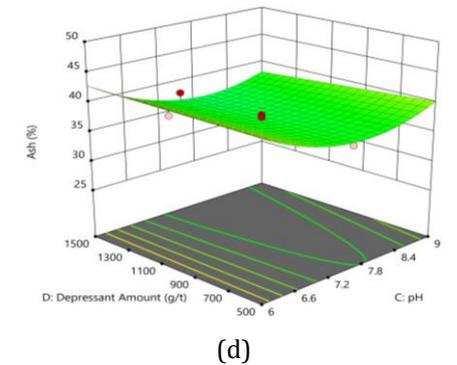
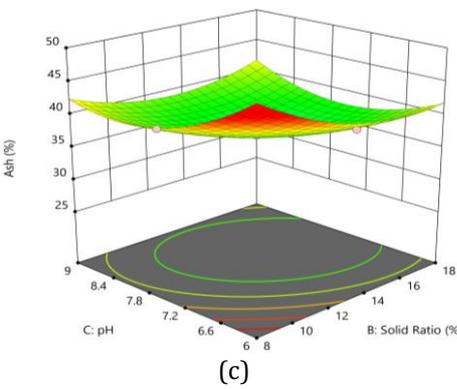
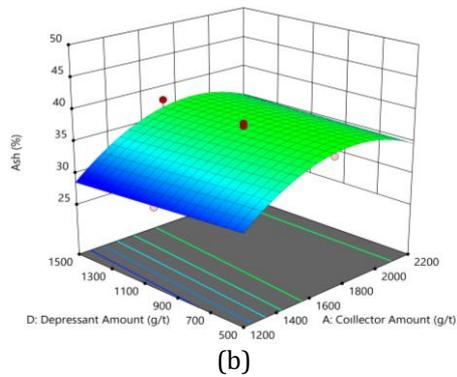
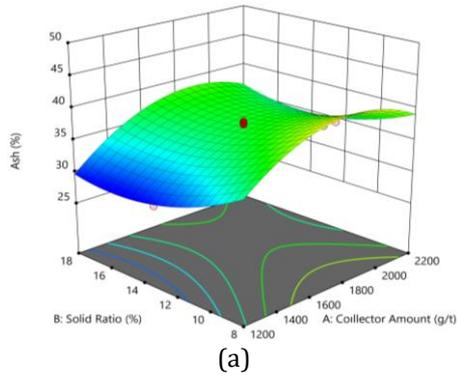


Figure 5. Interaction graphs for the ash. a) collector amount/solid ratio (A/B), b) collector amount/depressant amount (A/D), c) solid ratio/pH(B/C), d) pH/depressant amount (C/D)

### 3.4. The Response of Combustible Recovery

As can be seen from the reduced ANOVA Table (Table 3) and Figure 6a, the most effective parameters for combustible recovery are collector amount and solid ratio, and they are in interactions with each other. pH also affects the combustible recovery, significantly. But no interaction was observed between pH and other parameters. Depressant amount and its interactions with other parameters are found to be insignificant. Figure 6a graphically illustrates the main effects of parameters for combustible recovery. The compatibility between the experimental data and the values estimated from the model is also given in Figure 6b. As can be seen from this figure, predicted combustible recovery values represent nearly 94% of actual combustible recovery values ( $R^2=0.9393$ ), indicating the consistency of the model. Apart from this, high values of P- $R^2$  (0.8963) and A- $R^2$  (0.9199) show the high power of prediction of this model.

As can be understood from Figure 6a, while the collector amount and solid ratio showed a linear effect on the combustible recovery in the studied range, pH and depressant amount caused a parabolic effect.

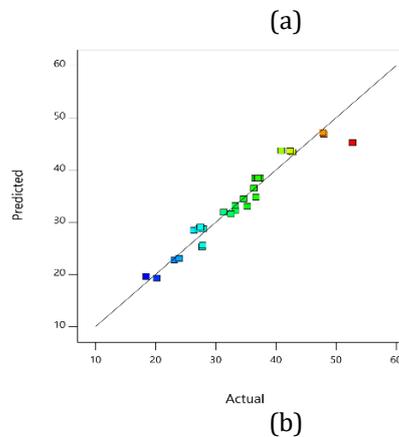
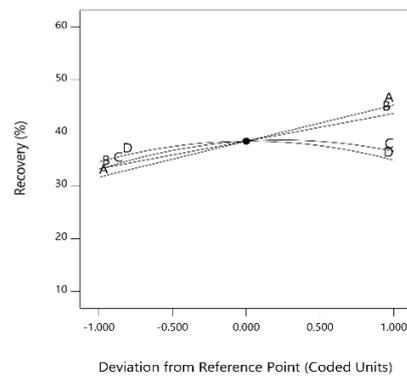


Figure 6. a) Parameter Main Effect Graphs, B) Experimental Data-Model Prediction Fit Graph for Combustible Recovery. ( $R^2=0,9393$ ).

Interaction graphs for collector amount/solid ratio interaction in three dimensions are given in Figure 7. When the interaction graph was examined, an increase in collector amount at high solid ratio increased the combustible recovery rapidly; however, the increase remained at a very low level at low solid ratio.

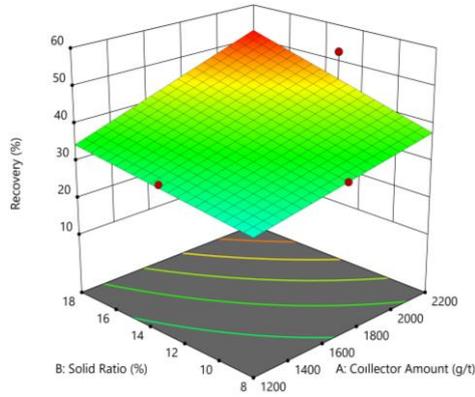


Figure 7. A-B Interaction Graphs (A-B) for the Combustible Recovery.

#### 4. CONCLUSIONS

Firstly, fuel oil, PhilFlo and the mixture of Philflo+kerosene were tested as collectors, and fuel oil produced the best results among them. Afterwards, modelling studies were carried out by using fuel oil as a collector.

According to the results of experimental design and their variance analysis presented in Tables 2 and 3, regression models for weight yield, ash content of concentrate and combustible recovery were created. The created models, given in Eqs 1-3, are found to be statistically significant as their p values are <0.05. The models are also statistically quite strong since  $R^2$  values are well above 90% and  $PR^2$  values are above 85%.

The  $R^2$  value of the model for weight yield is 0.9701, indicating nearly 97% of the data deviation can be explained by the model, created. As can be seen from variance analysis, collector amount and solid ratio were found to be the most significant variables for weight yield, followed by pH. Linear and quadratic effects of pH were found to be significant on weight yield, while only the linear effect of collector amount and solid ratio were found to be significant. On the other hand, linear effects of depressant amount were found to be insignificant while quadratic effects of depressant amount were significant. The dual interaction effects between collector amount and solid ratio and collector amount and pH were significant.

The  $R^2$  value of the model for ash content of concentrate is 0.9554 that indicates over 95% of the data deviation can be explained by the model. Variance analysis showed that

collector amount, solid ratio and pH were found to be the most significant variables for ash content while depressant amount was insignificant. Linear and quadratic effects of collector amount, solid ratio and pH were found to be significant on ash content, while the linear or quadratic effects of depressant amount were found to be insignificant. The dual interaction effects between collector amount and solid ratio, collector amount and depressant amount, solid ratio and pH and pH and depressant amount were significant.

The  $R^2$  value of the model for combustible recovery is 0.9393, indicating nearly 94% of the data deviation can be explained by the model, created. As can be seen from variance analysis, collector amount, solid ratio and pH were found to be the most significant variables for combustible recovery. Linear and quadratic effects of pH were found to be significant on combustible recovery, while only the linear effect of collector amount and solid ratio were found to be significant. Besides, linear effects of depressant amount were found to be insignificant while quadratic effects of depressant amount were significant. The dual interaction effects between collector amount and solid ratio were significant.

After modelling studies, the ash content of the samples was reduced from 52.47% to 29.37% with a 32.50% combustible recovery. Calorific value of the studied sample is increased from 1250 Kcal/kg to 2645 Kcal/kg.

#### Author Contributions

Derya Öz Aksoy and Sabiha Koca are responsible for the implementation of the planned experimental study. All three authors contributed equally to the planning of the experiments, interpretation of the results, and writing of the article.

#### Conflict of Interest

No conflict of interest was declared by the authors.

#### References

- Andrews, G.F., Maczuga, J. (1982). The bacterial coal desulfurization. In: Fourth symposium for biotechnology in energy production and conservation, Gatlinburg, TN.
- Aksoy, D. O., Koca, S., Koca, H. (2012). The Utilization of Unsaleable Lignite Fines at Eskisehir Koyunagili Region Lignite Deposits, Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects ;34:9, 820-6.
- Aksoy, D.O., Aytar, P, Toptas, Y., Çabuk, A., Koca, S., Koca, H (2014). Physical and physico chemical cleaning of

- lignite and the effect of cleaning on biodesulfurization. *Fuel*, 132:158–64.
- Aksoy, D.O., Ozdemir, S., Aytar, P., Koca, S., Çabuk, A., Koca, H., Brito-Prada, P. (2022). Fusion of the Microbial World into the Flotation Process. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review* ;43:1068-82.
- Dube, R.M. (2012). Collectors for enabling flotation of oxidized coal. University of Kentucky, Msc Thesis.
- Jia, R. Harris and G, Fuerstenau W (2000). An improved class of universal collectors for the flotation of oxidized and/or low-rank coal. *International Journal of Mineral Processing* ; 58: 99–118.
- Lizama, H.M. and Suzuki, I. (1987). Bacterial leaching of a sulphide ore by *Thiobacillus ferrooxidans* and *Thiobacillus thiooxidans*: I. Shake flask studies. *Biotechnology and Bioengineering* ; 32: 110–6.
- Lynch A.J., Watt, J.S., Finch, J.A., Harbort, G.E. (2007) History of Flotation Technology. In: Fuerstenau MC, Jameson G, Yoon RH, editors. *Froth Flotation A Century of Innovation*. Colorado, USA. Society for Mining Metallurgy & Exploration. p. 71.
- Oh-Hyung, H., Min-Kyu, K., Byoung-Gon, K., Nimal, S. and Chul-Hyun, P. (2014). Fine coal beneficiation by column flotation. *Fuel Processing Technology* ; 126: 49–59.
- <https://enerji.gov.tr/info-bank-energy>, (accessed April 30, 2025).
- Aksoy D. O., Sagol, E. (2016). Application of central composite design method to coal flotation: Modelling, optimization and verification, *Fuel* ; 183, 609-616.
- TEİAŞ, (Türkiye Elektrik İletim A.Ş.), Türkiye Elektrik İstatistikleri (2023). Available at: <http://www.teias.gov.tr> (accessed April 30, 2025).
- TMMOB, Türkiye'nin Enerji Görünümü (2024). Makina Mühendisleri Odası Yayını, Yayın No: MMO/758, E-ISBN: 978-605-01-1645-8.
- Xia W, Yang J, Zhu B. (2012). Flotation of oxidized coal dry-ground with collector. *Powder Technol* ;228:324–6.
- Xia W, Xie G, Peng Y. (2015). Recent advances in beneficiation for low rank coals. *Powder Technol.*; 277: 206–21.
- Yoon, R.H, Lagno, M.L., Lutrell, G.H., Mielczarski, J.A. (1991). On the hydrophobicity of coal pyrite. In: Dugan PR, Quigley DR, Attia Y, editors. *Processing and utilization of high-sulphur coals IV*. Amsterdam: Elsevier Science Publishers.

## COMPARISON OF THERMAL COMFORT PARAMETERS USING DIFFERENT FEATURE SELECTION ALGORITHMS

Resul ÖZLÜK<sup>1\*</sup>, Türkan GÖKSAL ÖZBALTA<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Balıkesir University Faculty of Architecture Department of Architecture, Balıkesir,

ORCID No : <https://orcid.org/0000-0001-8309-2980>

<sup>2</sup> Ege University, Faculty of Civil Engineering, İzmir, ORCID No : <https://orcid.org/0000-0001-5195-0741>

Keywords	Abstract
<p><i>Thermal Comfort</i>  <i>AI Algorithms</i>  <i>Educational Building</i>  <i>Environmental Parameters</i>  <i>Feature Selection</i></p>	<p><i>This study aims to examine the environmental parameters affecting user thermal comfort in an amphitheater belonging to an educational building and to compare the effects of these parameters using different feature selection algorithms. Thermal comfort indicators PPD and environmental parameters were calculated using measurements from the Testo 480 device. Subjective data were obtained through surveys measuring users' thermal acceptability and thermal comfort perception. The RandomForestRegressor, SHAP, and CorrelationAttributeEval algorithms were used to compare the order of influence of environmental parameters affecting students' thermal comfort. The results showed that surface temperature and indoor air temperature are the most influential parameters on user comfort. In the SHAP and CorrelationAttributeEval algorithms, surface temperature was identified as the most influential parameter, while in the RandomForestRegressor algorithm, indoor temperature was identified as the most significant parameter. Additionally, when compared with survey results, the environmental parameter with the least effect on user comfort was found to yield the same result as the CorrelationAttributeEval algorithm. These findings provide important insights into better interpreting the factors affecting user comfort and optimizing thermal comfort in similar spaces.</i></p>

## FARKLI ÖZELLİK SEÇİMİ ALGORİTMALARI KULLANILARAK ISIL KONFOR PARAMETRELERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

Anahtar Kelimeler	ÖZ
<p><i>Isıl konfor</i>  <i>Yapay zekâ algoritmaları</i>  <i>Eğitim binası</i>  <i>Çevresel parametreler</i>  <i>Özellik seçimi</i></p>	<p><i>Bu çalışma, bir eğitim binasına ait amfi mekânında kullanıcı ısı konforunu etkileyen çevresel parametreleri incelemek ve bu parametrelerin etkilerini farklı özellik seçimi algoritmalarıyla karşılaştırmayı amaçlamaktadır. Isıl konfor göstergelerinden PPD ve onu etkileyen çevresel parametreler, Testo 480 cihazının ölçümleriyle hesaplanmıştır. Öznel veriler, kullanıcıların ısı kabul edilebilirlik ve ısı konfor algısını ölçen anketlerle elde edilmiştir. Öğrencilerin ısı konforunu etkileyen çevresel parametrelerin etki sırasının karşılaştırılmasında Random Forest Regressor, SHAP ve Correlation Attribute Eval algoritmaları kullanılmıştır. Sonuçlar, yüzey sıcaklığı ve iç ortam sıcaklığının kullanıcı konforu üzerinde en etkili parametreler olduğunu göstermiştir. SHAP ve Correlation Attribute Eval algoritmalarında yüzey sıcaklığı, Random Forest Regressor algoritmasında ise iç ortam sıcaklığı en etkili parametre olarak belirlenmiştir. Ayrıca anket sonuçları ile karşılaştırıldığında kullanıcı konforu üzerinde en az etkili çevresel parametrenin Correlation Attribute Eval algoritması ile aynı sonucu verdiği görülmüştür. Bu bulgular, kullanıcı konforunu etkileyen faktörlerin daha iyi yorumlanmasına ve benzer mekanların ısı konfor açısından optimize edilmesine yönelik önemli sonuçlar sağlamaktadır.</i></p>

Araştırma Makalesi

Research Article

Başvuru Tarihi : 11.06.2025

Submission Date : 11.06.2025

Kabul Tarihi : 19.11.2025

Accepted Date : 19.11.2025

\* Sorumlu yazar: [resulozluk7@gmail.com](mailto:resulozluk7@gmail.com)

<https://doi.org/10.31796/ogummf.1717391>



Bu eser, Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>) hükümlerine göre açık erişimli bir makaledir.

This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

## 1. Introduction

In recent years, advanced Heating, Ventilating and Air Conditioning (HVAC) systems have become widely used in buildings thanks to technological developments. The purpose of HVAC systems is to provide users with a comfortable and clean indoor environment. Especially with the impact of the pandemic, improving indoor air quality has become even more important for user comfort (Medved et al., 2019). Indoor comfort is related to user satisfaction in terms of thermal and visual conditions within a building (Zeiler and Boxem, 2009). Therefore, examining the thermal comfort perceptions of users who spend most of their time in educational buildings is an important research area.

Thermal comfort depends on many parameters, such as human dimensions, gender, and age. However, in general, the parameters affecting thermal comfort can be classified as personal and environmental parameters. Environmental factors are categorized as air temperature, air movement, air humidity, and mean radiant temperature, while personal factors can be categorized as clothing condition (Clo) and metabolic rate (Szokolay, 2004). There are two main approaches commonly used to evaluate user thermal comfort influenced by environmental and personal parameters. The first of these approaches, the Heat Balance Model, was developed by Fanger. The Heat Balance Model approach is suitable for evaluating users in air-conditioned buildings where they have no control over the environment. In this model developed by Fanger, the comfort level of users can be measured using the Predicted Mean Vote (PMV) and Percentage of Dissatisfied People (PPD) metrics (Fanger, 1970). PMV has been the most widely used index for estimating thermal comfort (Park and Woo, 2023). The Adaptive Thermal Comfort Model can be used as an evaluation method in spaces that are naturally ventilated and interact with the environment (Liang et al., 2012). In ASHRAE 55-2017, this model defines acceptable thermal environments for naturally ventilated spaces that do not require any system. (ANSI/ASHRAE Standard 55, 2017). Since the space examined in the study has a mechanical cooling and heating system, the heat balance model was used to evaluate user comfort.

In recent years, researchers have conducted various studies on thermal comfort in educational buildings. (De Giuli et al., 2012) studied indoor air quality in educational buildings, (Aparicio-Ruiz et al., 2021) investigated the effects and comparisons of different thermal comfort models on user comfort, Heracleous and Michael (2020), examined the effects of natural ventilation on user comfort, Katafygiotou and Serghides (2014), assessed the adequacy of different environmental parameters affecting indoor thermal comfort and (Li et al., 2021) investigated the balance between a building's energy use and thermal comfort.

Thermal comfort prediction is important for building energy efficiency and user comfort. Different AI methods are commonly used to predict user comfort. (Bai et al., 2025) proposed hybrid feature selection methods based on a thermal preference prediction model. Rahmanparast et al. (2025) used different machine learning algorithms to predict PMV, one of the indicators of the Fanger method, and different feature selection methods to determine which parameters are effective on PMV. The results of the study showed that the different machine learning algorithm models used had higher accuracy than traditional models. Gao et al. (2025) used deep transfer learning to reduce the impact of insufficient data in thermal comfort modeling. Pearson correlation coefficients and deep reinforcement learning (DRL) were used to identify parameters affecting user comfort. The results indicate that accuracy exceeding 55% can be achieved with limited data in target buildings. Liu et al. (2025) applied the K-means algorithm to create a thermal comfort clustering analysis model and feature selection to improve data quality. The results show that a model with over 90% accuracy can be created using only effective factors and that the proposed model can reliably predict thermal comfort. Park and Woo (2023), applied machine learning methods to provide faster PMV calculations than traditional methods. In the study, comparisons were made between different models using Principal Component Analysis (PCA), Best Subset, and Gini Importance as the most effective features for PMV. The results show that PCA and Artificial Neural Network (ANN) have the highest accuracy. When reviewing studies conducted on this topic in general, it is clear that the importance of feature selection prior to modeling in terms of the accuracy and reliability of models has not been fully understood, and there are very few studies on this topic in the literature (Bai et al., 2025). In particular, there are limited studies comparing subjective and objective data in the studies.

The aim of this study is to compare the effects of environmental parameters affecting the thermal comfort conditions of students studying in an amphitheater space of a university building using different feature selection algorithms. The study examined the effects of parameters affecting students' thermal comfort using both objective and subjective approaches. While experimental measurements provide an objective approach based on standards, the use of questionnaires provides a subjective approach to thermal comfort.

## 2. Method

This study used both objective and subjective methods to evaluate the environmental parameters affecting students' thermal comfort conditions in an amphitheater belonging to a university building. First, subjective data related to thermal comfort were

collected through questionnaires administered to students. Objective data were collected using the Testo-480 measurement device. The measured environmental parameters included temperature, relative humidity (Bnem), air velocity (Va), carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) concentration in the environment, and surface temperatures. The collected datasets were analyzed using different feature selection algorithms (Random Forest Regressor, SHAP and Correlation Attribute Eval), and the effects of environmental parameters affecting user comfort were compared. The results were analyzed together to evaluate the consistency between subjective and objective approaches and to identify the most effective environmental parameters affecting thermal comfort.

## 2.1. Surveys and Measurements

Table 1 shows the devices used to measure environmental parameters and their characteristics. Measurement equipment was appropriately prepared in the working environment to continuously measure indoor air temperature, relative humidity, CO<sub>2</sub> concentration, air velocity, and globe temperature.

The amphitheater where measurements and surveys were conducted for this study is located on the ground floor of the education building (Figure 1). The amphitheater has a trapezoidal plan. A conventional air conditioning unit, added later, is used for heating and cooling. The seating arrangement consists of 300 seats arranged on a sloping platform. The seating is arranged in a semicircular shape, oriented toward the stage. This arrangement provides optimal viewing angles and sound distribution. Participants in the survey were university students aged 19-27. A total of 192 surveys were administered to 50 different students across multiple course sessions. The same students attending the course participated in surveys administered at different times. Measurements were taken 5 minutes after the device was placed in the room, taking into account the time it took for the device to enter the regimen. Measurements were recorded for 15 minutes during the 90-minute class period, extending until the end of the lesson. Furthermore, these measurements were taken using a device placed in the middle of the classroom and 1.1 meters above the floor, as required by thermal comfort standards. To increase the reliability of the data, measurements and surveys were conducted simultaneously during the class period. Before the survey was administered, the necessary explanations were provided to ensure that the students could easily understand the questions.

Table 1. Equipment used in a field study

Parameters	Equipment
Indoor air temperature, CO <sub>2</sub> concentration and humidity	IAQ probe (Testo 480)
Outdoor air temperature	HOBO external temp/rh data logger
Air velocity	Turbulence probe (Testo 480)
Globe thermometer	Black-ball thermometer (Testo 480)

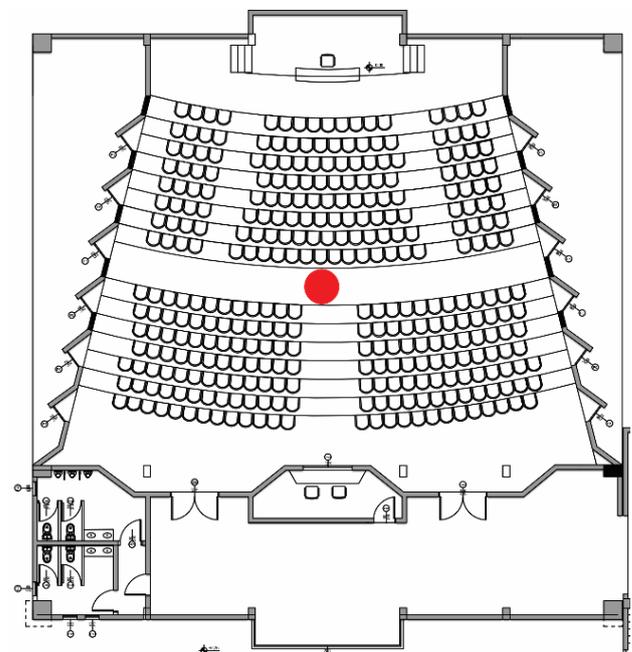


Figure 1. Study area and location of measurement equipment.

The first survey questions consisted of personal questions (gender, age). The next section asked students how they felt thermally, how they would like their environment to change thermally, and the ambient temperature, air velocity, and humidity (Appendix 1). The surveys consisted of five questions to assess occupants' perceptions of thermal comfort. The survey questions included 7- and 3-point Likert-type scales (ranging from -3 to +3, or "unacceptable" to "acceptable") to measure subjective assessments of environmental parameters such as temperature, air velocity, and relative humidity. Finally, a question asked which factor most influenced occupants' thermal comfort (Caner & Ilten, 2020). For participants'

metabolic rates and clothing conditions, values specified in ASHRAE 55 (ANSI/ASHRAE Standard 55, 2017) and ISO 7730 (Olesen and Parsons, 2002) were utilized. The ASHRAE standardized scale levels for evaluating survey

questions are listed in Table 2. This research was conducted in accordance with academic research and publication ethics rules.

Table 2. Scales used in the questionnaire survey.

Parameter	Scale						
Thermal sensation vote (TSV)	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
	cold	cool	A bit cool	neutral	A bit warm	warm	hot
Thermal acceptability (TA)		1		2		3	
		Acceptable		neutral		Unacceptable	
Air velocity sensation (AVS)	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
	Very still	Moderately still	Slightly still	Neutral	Slightly moving	Moderately moving	Much moving
Humidity sensation (HS)	-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
	Very dry	Moderately dry	Slightly dry	Neutral	Slightly humid	Moderately humid	Very humid

Within the scope of the study, the Predicted Mean Vote (PMV) and Percentage of Dissatisfied People (PPD) models were used as thermal comfort indicators. PMV can be determined by the equation (Fanger, 1970).

$$PMV = (0.303e^{-0.036M} + 0.028)\{(M - W) - 3.96 \times 10^{-8} f_{cl} [(t_{cl} + 273)^4 - (\bar{t}_r + 273)^4] - f_{cl} h_c (t_{cl} - t_a)\} - 3.05 [5.733 - 0.007(M - W) - P_a] - 0.42 [(M - W) - 58.15] - 0.0173M(5.867 - P_a) - 0.0014M(34 - t_a) \} \tag{1}$$

$$t_{cl} = 35.7 - 0.028 \times (M - W) - I_{cl} \times \{3.96 \times 10^{-8} \times f_{cl} \times [(t_{cl} + 273)^4 - (\bar{t}_r + 273)^4] + f_{cl} \times h_c \times (t_{cl} - t_a)\} \tag{2}$$

Where, M is Metabolic rate of occupant, W is mechanical power by occupant,  $f_{cl}$ ; (surface area of body with clothes),  $t_{cl}$ ; is Clothing surface temperature (°C),  $T_a$  is temperature of air (°C),  $t_r$ ; is Mean radiant temperature (°C),  $P_a$  is partial pressure of water vapor.

The PPD equation is calculated as follows:

$$PPD = 100 - 95e^{(-0.03353PMV^4 - 0.2179PMV^2)} \tag{3}$$

## 2.2. Feature Selection Algorithms

**Random Forest Regressor:** Random Forest Regression is widely used in statistical learning and machine learning applications. It is a powerful learning algorithm based on the principles of random feature selection. This method provides high accuracy and reliability rates,

especially in classification and regression analyses. In classification problems, the model's output is determined based on the majority vote of individual trees (Z. Wang et al., 2018). In regression problems, the model's output is obtained by taking the simple arithmetic mean or weighted average of the predictions produced by all decision trees in the forest for the continuous target variable. Each tree independently produces its own prediction, and the model's final prediction is calculated as the arithmetic mean or weighted average of these predictions. This approach contributes to reducing overfitting and producing more robust predictions (Smith et al., 2013).

**SHAP Algorithm:** It is a method used to interpret the output of machine learning models. SHAP is based on cooperative game theory and the concept of Shapley values (Cui et al., 2024). Current machine learning models often create difficulties for researchers in interpreting model predictions and function as black box models. Unlike other methods, SHAP provides us with a detailed explanatory model of how each feature contributes to the predictions (Meddage et al., 2022). SHAP shows the importance of each feature in the predictions and helps us understand how the input features affect the predictions (Huang et al., 2020).

**Correlation Attribute Eval:** It evaluates the value of a trait by measuring the correlation between the trait and the class. The correlation coefficient indicates the direction and strength of the linear relationship between two random traits. This coefficient takes a value between -1 and +1 (Colgan et al., 2019).

**3. Results and Discussion**

**3.1. Measurement and Survey Results**

HOBO data loggers were used for outdoor environmental data affecting user comfort, and Testo 480 instruments were used for indoor environmental data. In this study, the relationship between the environmental parameters collected for the amphitheater and the thermal comfort indicators is presented in Figure 2.

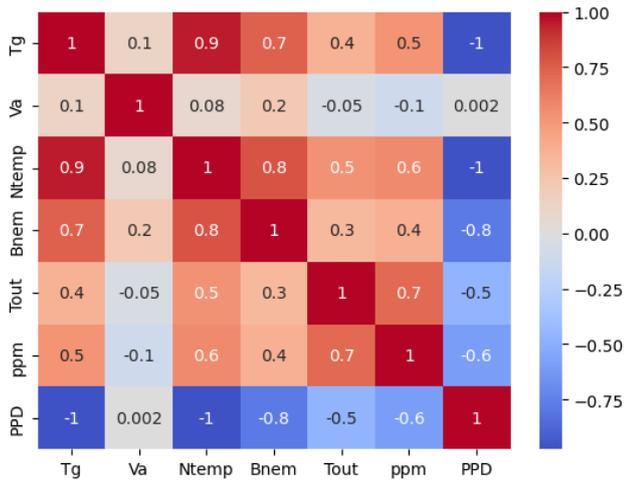


Figure 2. The relationship between PPD and other environmental parameters.

Data collected from the education building during the winter period shows the relationship between PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied), a thermal comfort indicator, and various environmental parameters. Limit values for PPD are defined in the ISO 7730 (Olesen and Parsons, 2002) and EN 15251 (CEN, 2007) standards. According to these standards, a PPD value of 10% or less indicates that occupants are satisfied with their environment. However, this study found an average PPD value of 25%, which is insufficient for occupants' thermal comfort. However, according to the ISO 7730 standard, it corresponds approximately to Category C comfort and represents a borderline acceptable indoor environment. There is a high negative correlation between indoor globe temperature (Tg) and PPD. The high correlation indicates that an increase in surface temperature significantly reduces PPD (improves thermal comfort). An increase in surface temperature during the winter months may contribute to the environment feeling more comfortable. The correlation between Va and PPD is negligible at 0.002, indicating that airflow velocity has almost no effect on thermal comfort in this space. This can be explained by the limited air circulation during winter months (windows and doors kept closed). The high level of correlation between indoor air temperature (Ntemp) and PPD indicates that an increase in indoor

temperature improves thermal comfort. This result confirms that a higher indoor temperature during winter months reduces discomfort. The high negative correlation between Bnem and PPD indicates that as humidity increases, dissatisfaction decreases. Low humidity during winter months can make the environment feel colder; therefore, increased humidity can be considered a factor that improves comfort. These results are consistent with the findings of studies on the relationship between environmental factors and thermal comfort. The negative correlation between ppm and PPD indicates that an increase in CO<sub>2</sub> concentration reduces discomfort. However, high CO<sub>2</sub> levels typically lead to reduced air quality and decreased comfort. This result may be influenced by interactions with other environmental parameters affecting this relationship.

**3.1.1. Subjective evaluation**

The analysis of thermal sensation ratings (TSVs) is shown in Figure 3. TSVs were calculated by asking students, "How do you feel the temperature of your environment?" using the ASHRAE seven-point scale. Of the 192 surveys conducted, 121 (62%) were within the comfort range (between -1 and +1). Approximately 35% of users felt the environment was cold, while the remaining users felt it was warm.

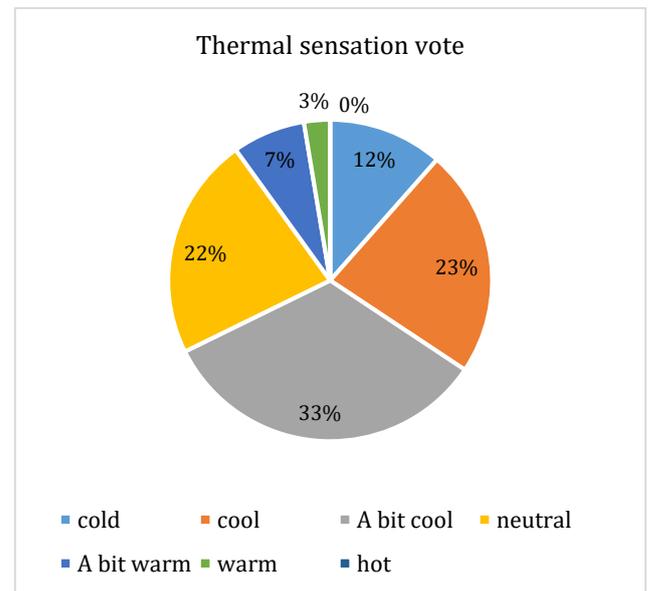


Figure 3. Distribution of thermal sensation responses during measurement.

This study focuses on the question of which factor most affects the space where users are located. Statistical information for this question is provided in Table 3. The mean value of 1.55 represents the average of students' responses regarding the factor that most impacts the environment. Temperature was the first option in this question. This value indicates that temperature is the

factor that most significantly impacts users' thermal comfort. The 95% confidence interval for the mean lies between 1.42 and 1.70. This range provides a statistically reliable estimate (Morgan et al., 2004). In addition, it is observed that the average ratings of Air velocity sensation (AVS) and Humidity sensation (HS) in

the study area are close to neutral and the students feel comfortable in terms of humidity and air exchange in the area.

Table 3. Descriptive statistics of sensation variables.

		Statistic	Std.Error	Bias	Std.Error	95% Confidence Interval	
						Lower	Upper
TSV	Mean	-1.01	.08	.00	.08	-1.17	-.84
	Std. Deviation	1.20		-.01	.05	1.08	1.30
	Variance	1.44		-.01	.13	1.18	1.70
Factor	Mean	1.55	.07	-.00	.07	1.41	1.70
	Std. Deviation	1.05		-.00	.06	.91	1.16
	Variance	1.10		-.00	.13	.84	1.36
AVS	Mean	-.09	.07	.00	.07	-.23	.05
	Std. Deviation	.99		-.01	.07	.82	1.13
	Variance	.99		-.01	.15	.68	1.29
HS	Mean	-.26	.06	.00	.06	-.38	-.13
	Std. Deviation	.87		-.00	.05	.75	.98
	Variance	.77		-.00	.10	.57	.97
Valid N (listwise)	N	192		0	0	192	192

The factor affecting thermal comfort was measured based on the answers to the question, "What is the most influential factor in your environment?". It has been found that the temperature factor has the greatest effect on thermal comfort (75%). This result shows that temperature is the most effective parameter among environmental parameters in determining thermal comfort perception (Figure 4). This result shows that people's thermal perception is more sensitive to temperature changes than to other parameters.

Additionally, factors such as humidity, air speed, and lighting are seen to be less effective compared to temperature. The low selection of air speed suggests that participants did not perceive air movement as a critical factor as temperature. These results are consistent with the low correlation between air speed and PPD observed in Figure 2. These findings suggest that more focus should be placed on the temperature factor in the design of heavily used spaces in educational buildings.

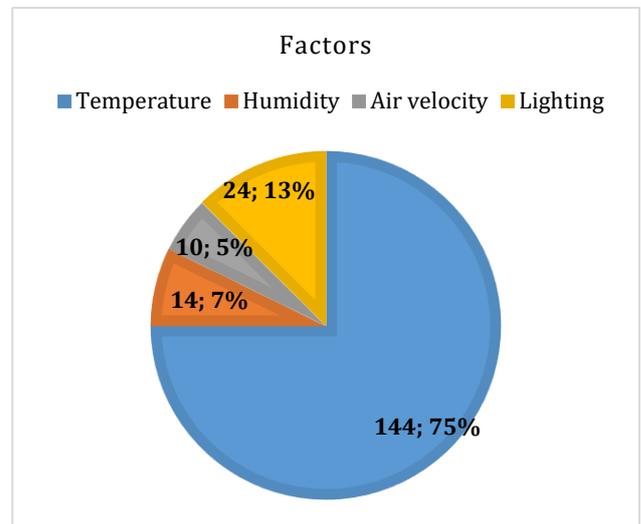


Figure 4. Distribution of factors affecting user comfort during measurements.

**3.2. Feature Selection Algorithm Results and Comparison**

Within the scope of the study, the effects of environmental parameters affecting user comfort were compared and analyzed using different feature selection algorithms such as Random Forest Regressor, SHAP, and Correlation Attribute Eval.

Table 4 shows the effect of each environmental parameter on each algorithm and its importance coefficient. The comparison between different feature selection algorithms is based on the relative importance rankings of the variables, not on the absolute magnitudes of the coefficients. In the SHAP and Correlation Attribute Eval algorithms, the most effective parameter was found to be surface temperature, while in the Random Forest Regressor algorithm, it was indoor temperature. In the SHAP and Random Forest

Regressor algorithms, the least effective parameter was outdoor temperature, while in the Correlation Attribute Eval algorithm, it was air velocity.

A general examination of the algorithm results reveals that the most influential environmental parameters are indoor temperature and surface temperature. The result obtained for the most influential parameter was found to be identical to the subjective (survey) results (Temperature: 75%). This result suggests that the algorithms selected for the most influential parameter performed successfully.

Furthermore, when compared with the survey results, it was observed that the environmental parameter with the least impact on user comfort (Air velocity: 5%) yielded the same ranking as the Correlation Attribute Eval algorithm.

Table 4. Comparison of results from different algorithms.

Random Forest Regressor	SHAP	Correlation Attribute Eval
Ntemp 0.22	Tg 17.59	Tg -0.97
Tg 0.21	Ntemp 1.66	Ntemp -0.95
Bnem 0.18	Va 0.92	Bnem -0.78
ppm 0.02	Bnem 0.21	ppm -0.57
Va 0.00	ppm 0.11	Tout -0.46
Tout 0.00	Tout 0.05	Va 0.01

Note: Tg: Indoor globe temperature, ppm: CO<sub>2</sub> concentration, Tout: Outdoor air temperature, Ntemp: Indoor air temperature, Bnem:Relative humidity, Va: Air velocity.

An examination of Figure 5 reveals that the Tg variable has the greatest impact on the model output. This demonstrates that ambient temperature is a determining factor in occupants' thermal sensation. While the Ntemp parameter has a moderate impact, the other parameters, Va, Bnem, ppm, and Tout, have a more limited impact on the model output.

Furthermore, the SHAP algorithm observed that the ranking according to the most influential parameter differed when compared to the subjective results. While air velocity (5%) was the parameter that least affected user comfort in the subjective results, the SHAP algorithm found relative humidity to be less influential than this parameter.

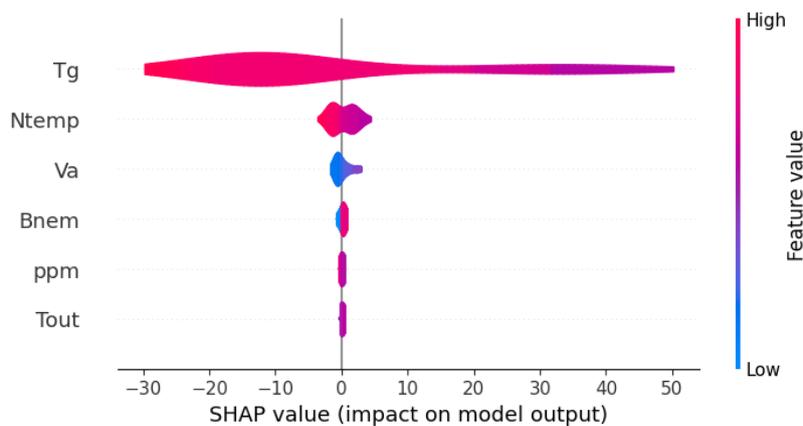


Figure 5. Effect of environmental parameters of the SHAP algorithm on user comfort.

The spread of points on the x-axis for each feature shows the range and distribution of SHAP values across different parameters (Figure 6).

The wide spread between parameter values indicates varying levels of importance for that feature across the dataset. According to Figure 6, the most significant factor is Tg and the least significant factor is Tout. In conclusion, different feature selection methods have

their advantages and limitations. Rather than evaluating the findings based on a single algorithm, this study presents comparative findings on thermal comfort parameters using different feature selection methods. SHAP is a powerful tool for explaining the contributions of features to a model.

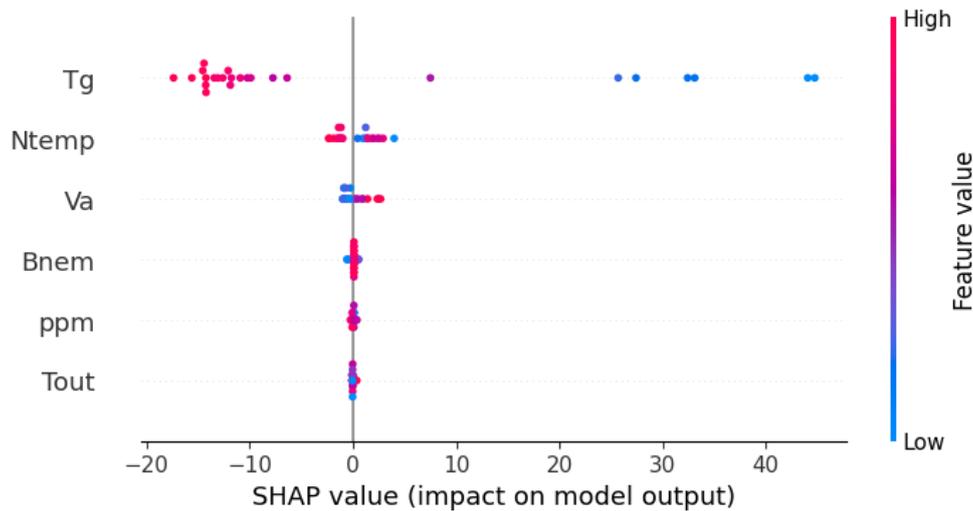


Figure 6. Effect of environmental parameters on user comfort based on SHAP algorithm results.

However, most machine learning models are difficult to interpret and understand due to their black-box (unexplainable) nature (M. Wang et al., 2023). To ensure interpretability, the SHAP algorithm, which incorporates model complexity and feature interactions, is frequently used in the literature (Meddage et al., 2022). Therefore, the SHAP algorithm was used in this study to interpret and visualize the effects of features. CorrelationAttributeEval quickly and effectively analyzed linear relationships. Random Forest Regressor is a powerful machine learning algorithm that can be used in both classification and regression problems. It combines multiple decision trees to increase the accuracy of predictions and handle missing data (Alsahaf et al., 2022). This study demonstrates that different feature selection algorithms can lead to different interpretations of the same dataset. For example, the air velocity parameter was ranked among the top three variables in the SHAP analysis, while it was ranked lowest in the CorrelationAttributeEval algorithm. This suggests that SHAP better captures nonlinear effects and that the algorithm used in thermal comfort analysis can create significant differences in interpretation. Similarly, the most influential factors differ in the importance rankings of the SHAP algorithm and the Random Forest Regressor algorithm. The differences in importance rankings across studies

provide practical insights into the impact of the feature selection method on the thermal comfort prediction model results.

#### 4. Conclusion

This study presents findings on thermal comfort parameters using different feature selection algorithms rather than a single feature selection algorithm. The effects of environmental parameters affecting occupant comfort were analyzed in detail. The analysis compared the performance of different algorithms based on both objective and subjective data. The results obtained from all algorithms indicate that indoor temperature and surface temperature are the most important parameters affecting occupant comfort. This parallelism between subjective comfort perceptions and the importance rankings based on feature selection algorithms reinforces the consistency of the findings. These results demonstrate that the selected algorithms are effective in determining the importance rankings of environmental parameters affecting occupant comfort. However, they show that the SHAP algorithm's approach to evaluating the parameter effects offers a different perspective from other methods. While the findings of this study contribute to the studies in the literature, it also has some limitations. The study focuses on a single space of an educational building using only data from the winter season. The limited number of surveys used for data

analysis may limit generalizations for the results of different algorithms. Furthermore, this study focuses on three different feature selection algorithms, while other feature selection methods are also available in the literature. These limitations may change the order of importance of the parameters. Another limitation of this study is that the measurements were conducted at 15-minute intervals. This timeframe may not fully reflect long-term thermal changes, especially in winter

conditions. Future research could; It is recommended that studies focus on spaces with different orientations, different types of buildings (such as offices, hospitals, etc.), long-term studies involving different climatic conditions, and spaces using different air-conditioning systems. Thus, it will be important to understand how parameter importance rankings vary depending on these differences.

Appendix 1. Survey questions asked to students within the scope of the study.

Florr/Class:	Date :
Gender: Female <input type="checkbox"/> Male <input type="checkbox"/>	Age :
Please select the option that comes closest to your answer in the questions.	
1-How do you perceive the ambient temperature while you are in the environment? Very Hot (+3) <input type="checkbox"/> Hot (+2) <input type="checkbox"/> Slightly Warm (+1) <input type="checkbox"/> Neutral (0) <input type="checkbox"/> Slightly Cool (-1) <input type="checkbox"/> Cool (-2) <input type="checkbox"/> Very Cool (-3) <input type="checkbox"/>	
2- What is the temperature of your environment, as per your personal preference? Unacceptable <input type="checkbox"/> Just as I prefer <input type="checkbox"/> Acceptable <input type="checkbox"/>	
3- How do you evaluate the air speed in your environment? Much moving (+3) <input type="checkbox"/> Moderately moving (+2) <input type="checkbox"/> Slightly moving (+1) <input type="checkbox"/> Neutral (0) <input type="checkbox"/> Slightly Gentle (-1) <input type="checkbox"/> Moderately still (-2) <input type="checkbox"/> Very still (-3) <input type="checkbox"/>	
4- How would you rate the humidity of your environment? Very Humid (+3) <input type="checkbox"/> Humid (+2) <input type="checkbox"/> Slightly Humid (+1) <input type="checkbox"/> Neutral (0) <input type="checkbox"/> Slightly Dry (-1) <input type="checkbox"/> Dry (-2) <input type="checkbox"/> Very Dry (-3) <input type="checkbox"/>	
5- Which factor do you think most affects your comfort in your environment? Temperature <input type="checkbox"/> Humidity <input type="checkbox"/> Air Velocity <input type="checkbox"/> Lighting <input type="checkbox"/>	

**Thanks...**

**References**

Alsahaf, A., Petkov, N., Shenoy, V., & Azzopardi, G. (2022). A framework for feature selection through boosting. *Expert Systems with Applications*, 187. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2021.115895>

ANSI/ASHRAE Standard 55-2017. (2017). *Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*. Available at: [www.ashrae.org/technology](http://www.ashrae.org/technology)

Aparicio-Ruiz, P., Barbadilla-Martín, E., Guadix, J., & Muñuzuri, J. (2021). A field study on adaptive

thermal comfort in Spanish primary classrooms during summer season. *Building and Environment*, 203. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108089>

Bai, Y., Dong, Z., & Liu, L. (2025). Hybrid feature selection-based machine learning methods for thermal preference prediction in diverse seasons and building environments. *Building and Environment*, 269. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2024.112450>

- Caner, I., & Ilten, N. (2020). Evaluation of occupants' thermal perception in a university hospital in Turkey. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Engineering Sustainability*, 173(8), 414–428. <https://doi.org/10.1680/jensu.19.00059>
- CEN, E. 15251:2007. (2007). *Indoor Environmental Input Parameters for Design and Assessment of Energy Performance of Buildings Addressing Indoor Air Quality, Thermal Environment, Lighting and Acoustics*.
- Colgan, S., Quille, K., Mchugh, S., & Vasic, J. (2019). *Predicting Student Success. Early for a VTOS Student*. Paper presented at the International Conference on Engaging Pedagogy (ICEP), University of Limerick, Ireland.
- Cui, X., Lee, M., Koo, C., & Hong, T. (2024). Energy consumption prediction and household feature analysis for different residential building types using machine learning and SHAP: Toward energy-efficient buildings. *Energy and Buildings*, 309. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.113997>
- De Giuli, V., Da Pos, O., & De Carli, M. (2012). Indoor environmental quality and pupil perception in Italian primary schools. *Building and Environment*, 56, 335–345. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.03.024>
- Fanger, P. O. (1970). *Thermal Comfort: Analysis and Applications in Environmental Engineering*. Danish Technical Press.
- Gao, Y., Fu, Q., Chen, J., & Liu, K. (2025). Deep transfer learning-based hybrid modelling method for individual thermal comfort prediction. *Indoor and Built Environment*. <https://doi.org/10.1177/1420326X251317447>
- Heracleous, C., & Michael, A. (2020). Thermal comfort models and perception of users in free-running school buildings of East-Mediterranean region. *Energy and Buildings*, 215. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.109912>
- Huang, X., Kroening, D., Ruan, W., Sharp, J., Sun, Y., Thamo, E., Wu, M. and Yi, X. (2020). A survey of safety and trustworthiness of deep neural networks: Verification, testing, adversarial attack and defence, and interpretability. In *Computer Science Review*, 37. <https://doi.org/10.1016/j.cosrev.2020.100270>
- Katafygiotou, M. C., & Serghides, D. K. (2014). Thermal comfort of a typical secondary school building in Cyprus. *Sustainable Cities and Society*, 13, 303–312. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2014.03.004>
- Li, Q., Zhang, L., Zhang, L., & Wu, X. (2021). Optimizing energy efficiency and thermal comfort in building green retrofit. *Energy*, 237. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.121509>
- Liang, H. H., Lin, T. P., & Hwang, R. L. (2012). Linking occupants' thermal perception and building thermal performance in naturally ventilated school buildings. *Applied Energy*, 94, 355–363. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.02.004>
- Liu, Y., Li, X., Sun, C., Dong, Q., Yin, Q., & Yan, B. (2025). An indoor thermal comfort model for group thermal comfort prediction based on K-means++ algorithm. *Energy and Buildings*, 327. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.115000>
- Meddage, P., Ekanayake, I., Perera, U. S., Azamathulla, H. M., Said, M. A. M., & Rathnayake, U. (2022). Interpretation of Machine-Learning-Based (Black-box) Wind Pressure Predictions for Low-Rise Gable-Roofed Buildings Using Shapley Additive Explanations (SHAP). *Buildings*, 12(6). <https://doi.org/10.3390/buildings12060734>
- Medved, S., Domjan, S., & Arkar, C. (2019). *Springer Tracts in Civil Engineering Sustainable Technologies for Nearly Zero Energy Buildings Design and Evaluation Methods*. Springer Nature Switzerland AG. <https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-3-030-02822-0>
- Morgan, G. A., Leech, N. L., Gloeckner, G. W., & Barrett, K. C. (2004). *SPSS for Introductory Statistics* (Second edition). Psychology Press. <https://doi.org/10.4324/9781410610539>
- Olesen, B. W., & Parsons, K. C. (2002). Introduction to thermal comfort standards and to the proposed new version of EN ISO 7730. *Energy and Buildings*, 34(6), 537–548. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(02\)00004-X](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(02)00004-X)
- Park, K. Y., & Woo, D. O. (2023). PMV Dimension Reduction Utilizing Feature Selection Method: Comparison Study on Machine Learning Models. *Energies*, 16(5). <https://doi.org/10.3390/en16052419>
- Rahmanparast, A., Milani, M., Camci, M., Karakoyun, Y., Acikgoz, O., & Dalkilic, A. S. (2025). A comprehensive method for exploratory data analysis and preprocessing the ASHRAE database for machine learning. *Applied Thermal Engineering*, 273. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2025.126556>
- Smith, P. F., Ganesh, S., & Liu, P. (2013). A comparison of random forest regression and multiple linear

- regression for prediction in neuroscience. *Journal of Neuroscience Methods*, 220(1), 85–91. <https://doi.org/10.1016/j.jneumeth.2013.08.024>
- Szokolay, S. V. (2004). *Introduction to architectural science the basis of sustainable design*. Architectural Press.
- Wang, M., Li, Y., Yuan, H., Zhou, S., Wang, Y., Adnan Ikram, R. M., & Li, J. (2023). An XGBoost-SHAP approach to quantifying morphological impact on urban flooding susceptibility. *Ecological Indicators*, 156. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.111137>
- Wang, Z., Wang, Y., Zeng, R., Srinivasan, R. S., & Ahrentzen, S. (2018). Random Forest based hourly building energy prediction. *Energy and Buildings*, 171,11–25. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2018.04.008>
- Zeiler, W., & Boxem, G. (2009). Effects of thermal activated building systems in schools on thermal comfort in winter. *Building and Environment*, 44(11), 2308–2317. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.05.005>

## GENİŞ-DAR VE DİK-EĞİK AÇIDAN ÇEKİLEN FOTOĞRAFLARIN PARÇA BOYUT ANALİZİNE ETKİSİ: BİR UYGULAMA ÇALIŞMASI

Hakan AK<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Maden Mühendisliği Bölümü, Eskişehir

ORCID No : <https://orcid.org/0000-0002-5010-1382>

Anahtar Kelimeler	Öz
<p>Patlatma Yığını Parça Boyut Analizi Görüntü Analiz Yöntemi Havadan Çekilmiş Fotoğraf Yerden Çekilmiş Fotoğraf Yakından Çekilmiş Fotoğraf</p>	<p>Açık ocak madenciliğindeki özellikle üretim patlatmalarında parça boyut dağılımının oldukça önemli olduğu bilinmektedir. Patlatılmış bir kaya kütlesi içindeki parçaların boyut dağılımı; yükleme, taşıma, kırma ve öğütme gibi diğer ardışık işlemlerin maliyetlerini etkilemektedir. Patlatılmış kaya kütlesinin parça boyut dağılımını belirlemede en yaygın kullanılan yöntem, görüntü işleme tekniği kullanılarak yapılan parça boyut dağılım analizidir. Parça boyut analizinde kullanılan fotoğrafın patlatma sonrası oluşan yığını temsil etmesi, analizin doğru sonuçlar vermesinde büyük önem taşımaktadır. Görüntü Analiz Yöntemi kullanılarak yapılan birçok çalışmada, yığını tam olarak temsil etmeyen, yerden veya yakından (dar açıdan) çekilmiş fotoğraflar kullanılarak analizler yapılmaktadır. Bu da yığının parça boyut dağılımının doğru olarak belirlenememesine neden olabilmektedir. Bu çalışmada, bir manyezit açık ocağında yapılan bir patlatmanın parça boyut dağılımı analizleri, İnsansız Hava Aracı (İHA) yardımıyla yığına dik olarak ve basamağın yanından eğik çekilmiş ölçekli fotoğraflar kullanılarak yapılmıştır. Ayrıca aynı fotoğraflar üzerinden dar açıdan (yakından) seçilen ikişer adet bölge de analize tabi tutulmuştur. Toplam altı fotoğraf kullanılarak WipFrag yazılımı yardımıyla yapılan parça boyut analizi sonuçları arasındaki farklar karşılaştırılmış ve tartışılmıştır.</p>

## EFFECT OF WIDE-NARROW AND VERTICAL-OBLIQUE PHOTOGRAPHS ON PARTICLE SIZE ANALYSIS: AN APPLICATION STUDY

Keywords	Abstract
<p>Muckpile Particle Size Analysis Image Analysis Method Aerial Photograph Ground Photograph Close-up Photograph</p>	<p>It is known that particle size distribution is very important in open pit mining, especially in production blasting. The size distribution of fragments in a blasted rock mass affects the costs of other sequential operations such as loading, transportation, crushing and grinding. The most widely used method to determine the fragment size distribution of a muckpile is fragment size distribution analysis using image processing techniques. The fact that the photograph used in the fragment size analysis represents the muckpile is of great importance for the analysis to give accurate results. In many studies using the Image Analysis Method, analysis is performed using photographs taken from the ground or close-up (narrow angle), which do not fully represent the muckpile. This can lead to inaccurate determination of the particle size distribution of the muckpile. In this study, the fragment size distribution of a blast in a magnesite open pit was analyzed using Unmanned Aerial Vehicle (UAV) scale photographs taken vertical to the muckpile and oblique photo from the side of the bench. In addition, two regions selected from the same photographs from a narrow angle (close-up) were also analyzed. The differences between the particle size analysis results using WipFrag software using a total of six photographs were compared and discussed.</p>

Araştırma Makalesi

Başvuru Tarihi

: 08.07.2025

Kabul Tarihi

: 22.08.2025

Research Article

Submission Date

: 08.07.2025

Accepted Date

: 22.08.2025

\* Sorumlu yazar: [hak@ogu.edu.tr](mailto:hak@ogu.edu.tr)

<https://doi.org/10.31796/ogummf.1737621>



Bu eser, Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>) hükümlerine göre açık erişimli bir makaledir.

This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

## 1. Giriş

Madencilik çalışmalarında patlatma ile kayaçların parçalanması, gerek zaman kazanımı gerekse ekonomiklik açısından kaçınılmazdır. Patlatma ile kayaçların parçalanması ile oluşan boyut dağılımı, patlatma sonrası teknolojik işlemlerin maliyetini ve dolayısıyla madencilik endüstrisinin ekonomisini önemli oranda etkilemektedir. Delme-patlatma operasyonları sonrası olan yükleme, nakliye, kırma ve öğütme gibi teknolojik işlemlerin verimliliği büyük oranda patlatma sonrası kayaç parçalanma boyut dağılımına bağlı olmaktadır. En uygun parçalanma sağlandığında işletmenin üretim maliyetleri düşmekte olup bu da doğru patlatma ve gecikme tasarımı uygulanması ile elde edilmektedir (Nanda and Pal, 2020). Parçalanma boyut dağılımı gereğinden büyük olduğunda yükleme ve nakliye verimliliğini ve dolayısıyla maliyetlerini olumsuz yönde etkilemektedir. İkincil patlatma ihtiyacı ortaya çıkmaktadır. Ayrıca diğer teknolojik işlemlerden kırma ve öğütme maliyetleri de olumsuz olarak etkilenmektedir. Benzer şekilde, gereğinden fazla patlayıcı tüketimi kullanıldığı durumda gereğinden fazla ufanma meydana gelmesine ve aşırı patlayıcı tüketimi ile işletmenin toplam maliyetlerinde artışa sebep olmaktadır. Bu nedenlerle, patlatma operasyonlarında optimum parçalanma boyutunun elde edilmesi gerekmektedir. Optimum parçalanma boyutu maden işletmesinde kullanılan kazı ve yükleme makinalarının boyutu ve cevher zenginleştirme tesisindeki birincil kırıcının çene büyüklüğüne göre değişkenlik göstermektedir. Bu nedenle işletmenin toplam maliyetlerini optimize eden ortalama parçalanma boyutunun belirlenmesi önem kazanmaktadır.

Kayanın parçalanması, patlatma işlemlerinin bir sonucudur ve yığının büyük bir yüzdesi istenen boyut aralığında ise parçalanmanın optimum olduğu söylenir. Kaya parçalanmasını doğrudan veya dolaylı olarak etkileyen birçok kontrol edilebilir ve kontrol edilemez parametre vardır. Optimum kaya parçalanması, kontrol edilebilir parametrelerin optimize edilmesiyle elde edilmektedir. Kaya parçalanmasını optimize etmek için maden işletmesinde kontrol edilebilir basamak patlatma parametreleri deneme patlatmaları yapılarak değiştirilebilir. Sonrasında maden işletmesi yetkilileri optimize edilmiş parametreleri kullanarak ortalama parça boyutunu istenen değerde tutabilmektedir (Nanda and Pal, 2020).

Büyük ölçekli malzemelerin parça boyut dağılımının belirlenmesine yönelik olarak farklı ölçüm araçları ve yöntemleri vardır. Parçalanmış malzeme dağılımının belirlenmesi için geleneksel yöntemler arasında Eleme, İri Kaya Sayımı ve Kepçe Yükleme Oranı yöntemleri bulunurken, modern teknikler olarak ise Görsel Analiz Yöntemi, Fotogrametrik Yöntem ve Görüntü Analiz Yöntemi sayılabilir. Birçok araştırmacı bu yöntem ve

araçların birini veya birkaçını çalışmalarında kullanmıştır.

Görsel Analiz Yöntem 'inde (Visual Analysis Method) patlatma sonrası ortaya çıkan yığın hemen patlatma sonrasında görsel olarak incelenmekte ve ikincil patlatma yapmaya ya da patlatma geometrisi parametrelerinin güncellenmesine ihtiyaç olup olmadığına karar verilmektedir. Parçalanmanın yüzeysel görünen kısmı hakkında veri verdiğinden tam anlamıyla güvenli sonuçlar vermeyebilmektedir (Maerz, Palangio, and Franklin, 2018). Fotogrametrik Yöntem parçalanma hacmini hesaplamak için üç boyutlu ölçümler sağlayabildiğinden Görsel Analiz Yöntemi 'ne göre daha güvenilir ve doğru sonuçlar ortaya koyabilmektedir. Dijital Görüntü Analiz Yöntemi (Image Analysis Method) endüstriyel alanda giderek artan şekilde kullanılmaktadır. Bu yöntem, görüntü işleme teknikleri ve algoritmaları kullanan yazılımlar yardımıyla, özellikle taşınabilir ve yüksek çözünürlüklü kameralardan alınan görüntülerin analiz edilmesine dayanmaktadır. Yöntem ile malzeme parça boyut dağılım işlemi oldukça kolay hale gelmiştir. Yöntemde patlatma yığını üzerinden ölçeklendirilmiş görüntü alınmakta ve bu görüntüler çeşitli yazılımlar yardımıyla analiz edilmektedir. Bu yöntemin daha doğru sonuçlar vermesi, kısa zamanda görüntü analizinin yapılabilmesi, üretim sürecini etkilememesi, ucuz olması ve yapılan hataların daha az önemli olması geleneksel yöntemlere göre avantajlarıdır.

Parçalanma boyut dağılımının hesaplanmasında kullanılan farklı ampirik yaklaşım modelleri de bulunmaktadır. Cunningham (Cunningham, 1983) tarafından geliştirilen Kuz-Ram modeli en yaygın kullanılan ampirik modeldir (Eşitlik 1).

$$X_{50} = A \cdot \left[ \frac{V}{Q} \right]^{0.8} \cdot [Q]^{1/6} \cdot \left[ \frac{E}{115} \right]^{-19/30} \quad (1)$$

Burada;

$X_{50}$ : Ortalama parça boyutu, cm

V: Parçalanmış kayaç hacmi, m<sup>3</sup>

Q: Delik başına kullanılan patlayıcı madde miktarı, kg

E: Patlayıcı maddenin gücü, ANFO=100

A: Kayaç faktörü (Sertlik ve yapısına bağlı olarak 0.8-2.2 arasında değişir)

## 2. Materyal ve Yöntem

Patlatma sonrası oluşan yığının parça boyut dağılımı belirlenirken yığının sadece bir bölümünden dar açıdan çekilmiş ölçekli fotoğraf üzerinden görüntü analizi yapılmış olan birçok akademik çalışma vardır (Akyıldız, 2015; Ceviz and Akçakoca, 2011; Derman, 2019; Fredj, Boukarm, Saadoun, Menacer, and Nakache, 2024; Idowu, Olaleye, and Saliu, 2021; Kahraman and Kılıç,

2021; Karadoğan and Yılmaz, 2010; Nanda and Pal, 2020; Nefis and Talhi, 2016; Özdemir, 2004, 2009; Pekin and Bayırlı, 2015; Saadoun, Fredj, Boukarm, and Hadji, 2022; Tosun, 2013). Ayrıca yine basamak yanından eğik açıdan çekilmiş fotoğraflar üzerinden yapılan birçok çalışma da söz konusudur (Akyıldız, 2015; Bedri, Bachar Assed, Taib, Hadji, Defafia, and Filali, 2024; Ceviz and Akçakoca, 2011; Derman, 2019; Elahi and Hosseini, 2017; Figueiredo, Torres, Cruz, and Moreira, 2023; Hüdaverdi and Akyıldız, 2020; Kahraman and Kılıç, 2021; Kahraman and Kılıç, 2013; Karadoğan and Yılmaz, 2010; Kılıç, 2015; Menacer, Saadoun, Hafsaoui, Fredj, Tabet, Boudjellal, Boukarm, and Nakache, 2025; Nanda and Pal, 2020; Tosun, Konak, Öngen, Karakuş, and Onur, 2012; Yang, Gao, Jia, Zhou, Gao, Jiang, and Ma, 2025). Belirtilen tarzlarda çekilen ve yığının tamamını temsil etmeyen fotoğraflar kullanılarak yapılan parça boyut analizlerinde, yığının gerçek parça boyut dağılımının doğru olarak belirlenememesi ve optimizasyon hatalarının meydana gelmesi nedeniyle gerek zaman gerekse ekonomik açıdan kayıpların oluşması söz konusu olabilmektedir. Görüntü Analiz Yöntem 'inde ve özellikle üretim patlatmalarında, ölçekli olarak çekilen fotoğrafın yığını temsil etmesi önemlidir. Yani yığının sadece bir kısmından alınan bir görüntü ile analiz yapılması elek analizinin hatalı olmasına ve daha önce belirtilen ekonomik kayıpların oluşmasına neden olabilmektedir. Ayrıca yığına yatay yönden (eğik) çekilen fotoğraflarda da görüntü kaybından dolayı parçaların birbirleri arkasında kalması nedeniyle gerçek parça boyut dağılımlarının belirlenmesinde hatalar söz konusu olabilmektedir.

Bu çalışmada, bir manyezit açık ocağında yapılan bir patlatma uygulamasının parça boyut dağılımı gerek yığına eğik olarak geniş ve dar açıdan çekilmiş ölçekli fotoğraflar üzerinde gerekse bir insansız hava aracı (İHA) yardımıyla yığına dik olarak geniş ve dar açıdan çekilmiş ölçekli fotoğraflar üzerinden görüntü analizleri yapılmıştır. Uygulama çalışması RHI Magnesita firmasının Eskişehir Nemli bölgesi açık ocağında yapılmış olup yapılan patlatmaya ait patlatma ve basamak geometrisi parametreleri Tablo 1'de verilmiştir.

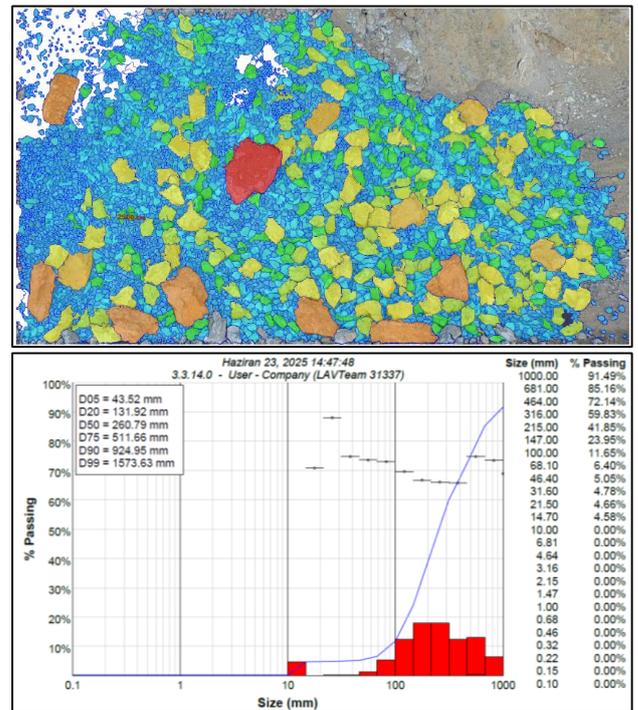
Tablo 1. Uygulama Patlatmasına Ait Parametreler

Patlatma Parametreleri	Miktar / Tanım
Delik sayısı	3
Delik çapı	165 mm
Dilim (yük) mesafesi	4 m
Delikler arası mesafe	7 m
Sıkılama uzunluğu	3 m
Basamak yüksekliği	9 m
Delik boyu	9.5
Patlayıcı türü	ANFO
Delik başına şarj miktarı	110 kg
Toplam şarj miktarı	330 kg
Özgül şarj	0.44 kg/m <sup>3</sup>

Toplam üç deliğin kullanıldığı patlatma uygulama çalışmasında, yerinde parçalanmış kayaç hacmi yaklaşık olarak 756 m<sup>3</sup> civarında olmuştur. Parçalanmış kayaç malzemesi üzerine öncelikle ölçek yerleştirilerek bir insansız hava aracı (İHA) yardımı ile yığına dik açıdan ve yığının tamamını temsil eden bir fotoğraf çekilmiştir. Daha sonra ise yer seviyesinden yığını yatay (eğik) yönden gören ölçekli başka bir fotoğraf çekilmiştir. Ayrıca daha önce de belirtilen ve parça boyut analizleri kullanılarak dar açıdan yığını gören fotoğraflar üzerinden yapılan çalışmalarda olduğu gibi; uygulama çalışmasında kullanılan her iki fotoğrafın bir kısmını temsil eden örnek bölgeler (ikişer tane) fotoğraflar üzerinden seçilmiştir. Fotoğraflar üzerinden parça boyut analizlerinin yapılacağı bölgelerin seçimi yapılırken, yığının ortalama parça boyutunu yaklaşık olarak temsil edebileceği düşünülen bölgeler olmasına özen gösterilmiştir. Dolayısıyla yığına dik ve geniş açıdan çekilen (tüm yığını gören) fotoğraf üzerinden iki, yığına yatay ve geniş açıdan (tüm yığın gören) çekilen fotoğraf üzerinden iki olmak üzere toplam dört adet dar bölge ile birlikte toplamda 6 adet görseldeki yığın, parça boyut analizine tabi tutulmuştur. Görüntü analizleri WipFrag yazılımı yardımıyla yapılmıştır.

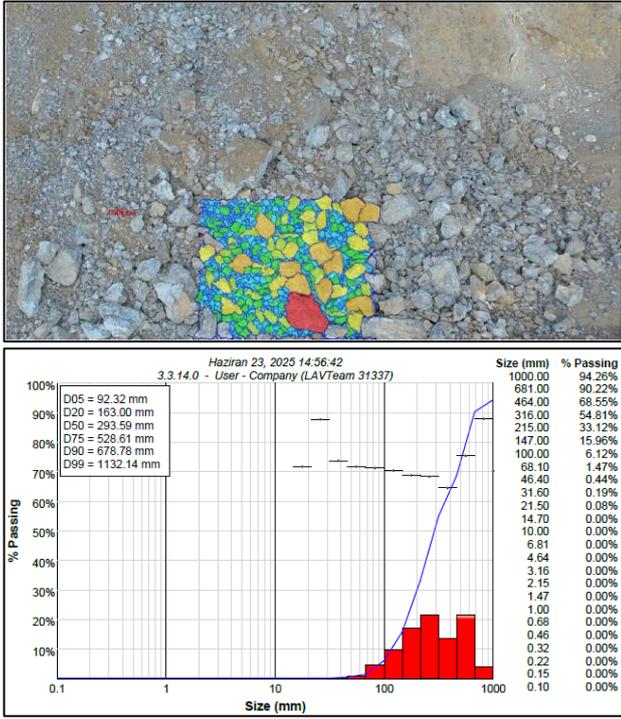
### 3. Uygulama Çalışması

Yığına dik yönden ve geniş açıdan çekilen (DG) fotoğraf üzerinde yapılan elek analizi sonuçları Şekil 1'de verilmiştir. Aynı fotoğrafta dar açıdan yığın üzerinde seçilen bölgeler (DD1 ve DD2) ve onlara ait elek analiz sonuçları ise sırasıyla Şekil 2 ve 3'de verilmiştir.

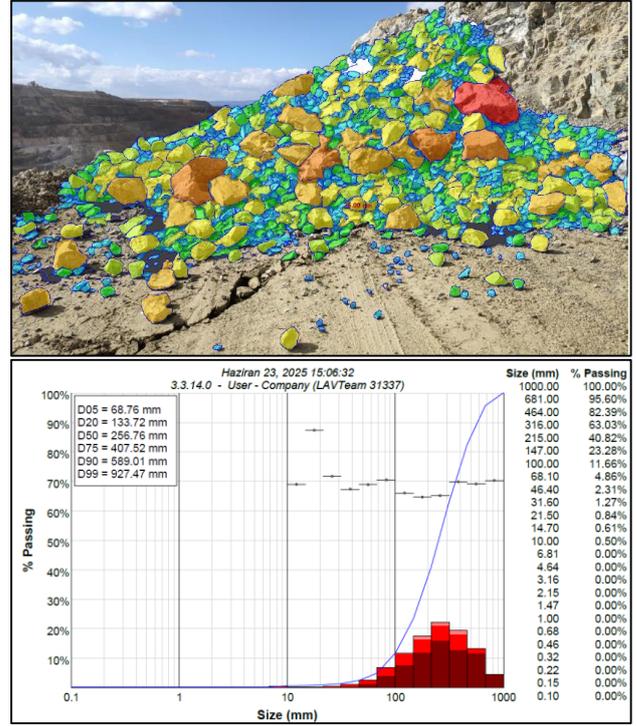


Şekil 1. Dik Fotoğraf-Geniş Açıdan (DG) Yığın ve Elek Analizi Sonuçları

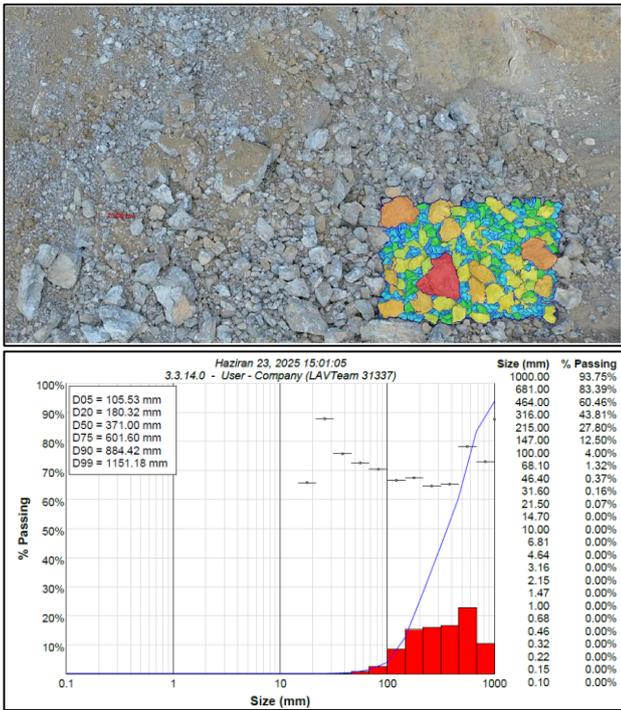
üzerinde seçilen bölgeler (YD1 ve YD2) ve onlara ait elek analizi sonuçları ise sırasıyla Şekil 5 ve 6'da verilmiştir.



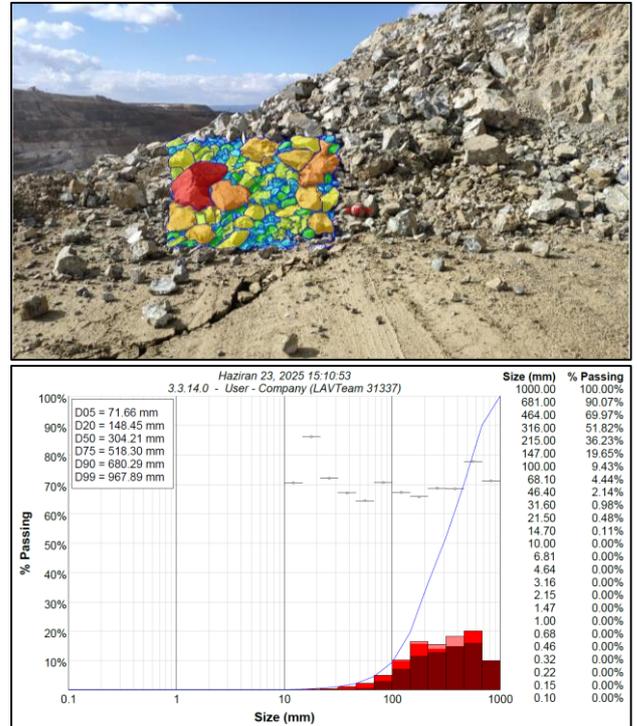
Şekil 2. Dik Fotoğraf-Dar Açık 1 (DD1) İçin Yığında Seçilen Bölge ve Elek Analizi Sonuçları



Şekil 4. Yatay Fotoğraf-Geniş Açıkdan (YG) Yığın ve Elek Analizi Sonuçları

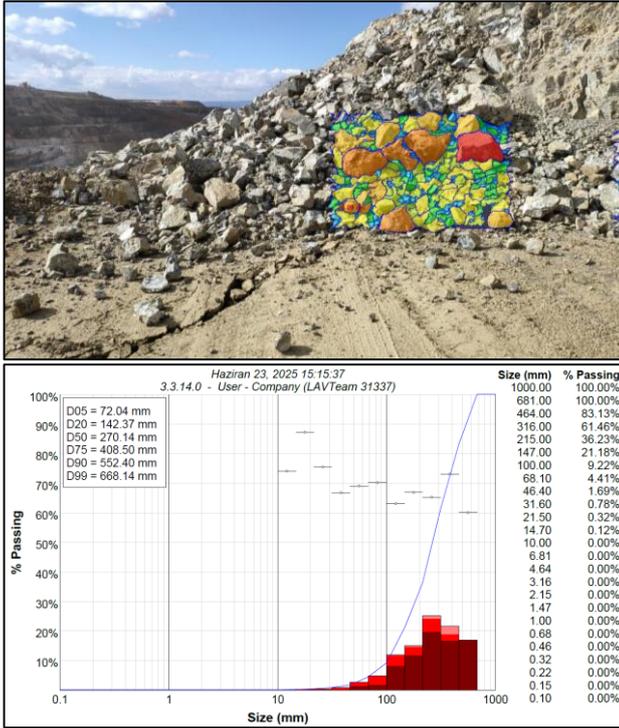


Şekil 3. Dik Fotoğraf-Dar Açık 2 (DD2) İçin Yığında Seçilen Bölge ve Elek Analizi Sonuçları



Şekil 5. Yatay Fotoğraf-Dar Açık 1 (YD1) İçin Yığında Seçilen Bölge ve Elek Analizi Sonuçları

Ayrıca yığını yatay yönden ve geniş açıdan gören (YG) fotoğraf üzerinde yapılan elek analizi sonuçları Şekil 4'de verilmiştir. Aynı fotoğrafta dar açıdan yığın



Şekil 6. Yatay Fotoğraf-Dar Aç 2 (YD2) İçin Yiğinda Seçilen Bölge ve Elek Analizi Sonuçları

Parça boyut analizlerinde; malzemenin gerçek parça boyut dağılımına en yakın dağılımı elde edebilmek için yazılımın parçalar etrafından en iyi çizgileri çizebilmesini sağlayan ve işlem süresinin uzun olduğu ileri özellikleri kullanılmıştır. Yazılımın parçalar etrafından çizmiş olduğu çizgilerde gölge ve ışık gibi nedenlerle oluşan hataları düzenleyerek görsellerin gerçek parça boyut dağılımlarını en doğru şekilde belirlemek için ayrıca yazılım ile uzun bir zaman çalışılmıştır.

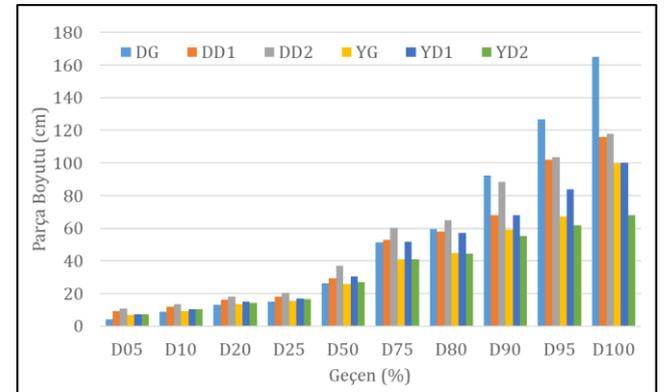
Görüntü işleme tekniğini kullanarak yapılan parça boyut analizlerinde gerek fotoğrafın çekildiği açı gerekse fotoğraflar üzerinde seçilen bölgelerin büyüklüğü ve gerekse o bölgelerdeki parça boyutlarındaki değişkenlikler nedeniyle görseldeki kayaç malzemesi sayıları doğal olarak farklılıklar göstermektedir. Bu uygulama çalışmasına göre; yığını dik ve geniş açıdan (DG) gören fotoğraf ile yapılan analizde (Şekil 1) toplam parça sayısı 6381 iken aynı fotoğraftan seçilen DD1 ve DD2 bölgelerindeki (Şekil 2 ve 3) parça sayıları sırasıyla 774 ve 586 olmuştur. Aynı şekilde; yığını yatay ve geniş açıdan (YG) gören fotoğraf ile yapılan analizde (Şekil 4) toplam parça sayısı 1796 iken aynı fotoğraftan seçilen YD1 ve YD2 bölgelerindeki (Şekil 5 ve 6) parça sayıları sırasıyla 370 ve 377 olmuştur. Kısacası DG fotoğraftaki parça sayısı DD1 ve DD2 bölgelerinden yaklaşık 8-10 kat fazla iken, YG fotoğraftaki parça sayısı YD1 ve YD2 bölgelerinden yaklaşık 5 kat fazladır. Ayrıca DG fotoğraftaki parça sayısı YG fotoğraftaki parça sayısından 3.5 kat daha fazladır. Bu rakamlara bakarak

yazılımlar ile yapılan parça boyut analizlerinde harcanan düzenleme sürelerinin de değişeceğini ve en fazla parça bulunan fotoğrafta daha fazla zaman harcanacağını ifade etmek mümkündür.

Her bir görsel üzerinde görüntü işleme yazılımı WipFrag yardımıyla yapılan analizler sonucunda; geçen % malzemeye karşılık gelen parça boyut dağılım oranlarını gösteren değerler Tablo 2'de, dağılımı gösteren grafik ise Şekil 7'de verilmiştir.

Tablo 2. Dik ve Yatay Çekilen Geniş ve Dar Açılı Fotoğrafların Parça Boyut Dağılımları

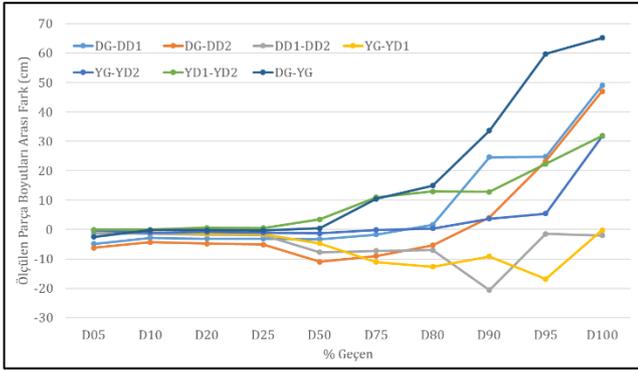
Geçen (%)	Boyut (cm)					
	DG	DD1	DD2	YG	YD1	YD2
D05	4.4	9.2	10.6	6.9	7.2	7.2
D10	9.0	11.9	13.3	9.2	10.3	10.3
D20	13.2	16.3	18.0	13.4	14.8	14.2
D25	15.1	18.3	20.3	15.4	16.9	16.4
D50	26.1	29.4	37.1	25.7	30.4	27.0
D75	51.2	52.9	60.2	40.8	51.8	40.9
D80	59.5	57.9	64.9	44.6	57.2	44.3
D90	92.5	67.9	88.4	58.9	68.0	55.2
D95	126.8	102.1	103.6	67.1	83.9	61.7
D100	165.0	116.0	118.0	99.8	100.0	68.1



Şekil 7. Dik ve Yatay Çekilen Geniş ve Dar Açılı Fotoğraflar İle Belirlenen Parça Boyut Dağılımlarının Görünümü

Tablo 2'deki yüzde (%) geçen malzemeye karşılık gelen parça boyutları incelendiğinde; malzemenin %50'sinin geçtiği parça boyutu DG, DD1 ve DD2 için sırasıyla 26.1 cm, 29.4 cm ve 37.1 cm olarak belirlenmiştir. Aynı şekilde YG, YD1 ve YD2 için ise sırasıyla, 25.7 cm, 30.4 cm ve 27 cm olarak belirlenmiştir. Yine Tablo 2'de malzemenin maksimum parça boyutunun DG, DD1 ve DD2 için sırasıyla, 165 cm, 116 cm ve 118 cm olarak belirlenirken, YG, YD1 ve YD2 için ise sırasıyla, 99.8 cm, 100 cm ve 68.1 cm olarak belirlenmiş olduğu görülmektedir. Tablo 2 ve Şekil 7 incelendiğinde geçen malzemenin %50'den daha büyük olduğu yüzdelerde

WipFrag yazılımı ile DG, DD1, DD2, YG, YD1 ve YD2 için belirlenen parça boyutları arasındaki farkların giderek arttığı görülmektedir. DG, DD1, DD2, YG, YD1 ve YD2 görüntülerinin parça boyut analizlerinden elde edilen her bir geçen malzeme yüzdesine karşılık gelen parça boyutlarının arasındaki farkları daha anlaşılır olarak gösteren grafik Şekil 8'de gösterilmiştir.

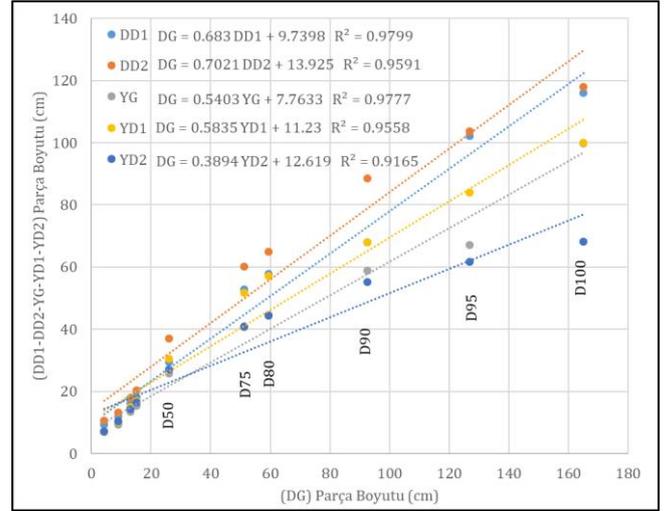


Şekil 8. Geçen Malzeme Yüzdesine Karşılık Gelen Parça Boyutları Arasındaki Farklar

Şekil 8 incelendiğinde geçen malzeme yüzdesinin 25 olduğu parça boyutuna kadar farklar fazla değilken %50'den itibaren artmaya başlamakta %90'dan sonra da 65 cm'ye ulaşan farklar oluştuğu görülmektedir.

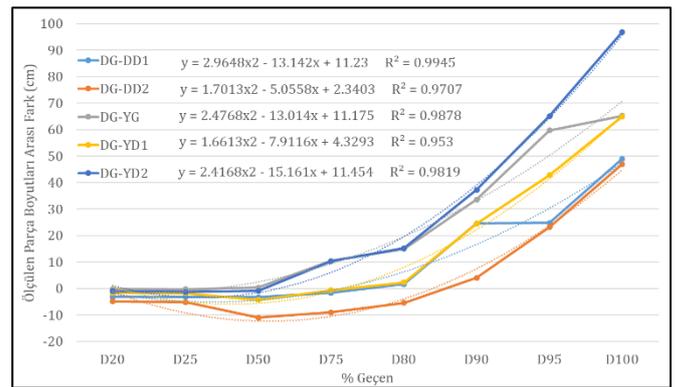
Görüntü işleme tekniği kullanılarak yapılan elek analizlerinde çekilen fotoğrafın yığını temsil etmesi ve mümkün olduğunca tüm yığını görecektir şekilde olması durumunda, daha dar açıdan çekilen fotoğraf ile yapılan analizlerden farklar beklenir. Bu tür çalışmalarda amaç mümkün olduğunca yığının gerçek parça boyut dağılımını ortaya koyabilmektir. Takdir edilmelidir ki, yığının gerçek parça boyut dağılımına en yakın dağılımı, yığını dik açıdan gören ve tüm yığını temsil eden fotoğraf üzerinde yapılan analiz verecektir. Bu nedenle DG ile sırasıyla DD1, DD2, YG, YD1, YD2'nin parça boyutlarının karşılaştırılması yapılmıştır.

Gerçek parça boyut dağılımına en yakın dağılım sonuçlarını verdiği düşünülen dik ve geniş açıdan çekilen (DG) fotoğrafın analiz sonuçlarından elde edilen D5, D10 D20, D25, D50, D75, D80, D90 ve D100 % geçen malzemedeki parça boyutları ile diğer görsellerden (DD1, DD2, YG, YD1, YD2) elde edilen ve aynı % geçen malzemeye karşılık gelen parça boyutları arasındaki ilişkiler, Şekil 9'daki doğrusal modeller üzerinden gösterilmiştir.



Şekil 9. DG ve DD1, DD2, YG, YD1, YD2 Parça Boyutları Arasındaki İlişki Grafiği

Şekil 9 incelendiğinde; doğrusal modeller ile en yüksek belirlilik katsayısı DG-DD1 ( $R^2=0.9799$ ) ve DG-YG ( $R^2=0.9777$ ) parça boyutları arasında gerçekleşirken, en düşük belirlilik katsayısı ise DG-YD1 ( $R^2=0.9165$ ) ve DG-YD2 ( $R^2=0.9558$ ) parça boyutları arasında gerçekleşmiştir. Tüm modellerdeki belirlilik katsayılarına bakıldığında DG ve DD1, DD2, YG, YD1, YD2 arasındaki ilişkilerin oldukça yüksek olduğu söylenebilir. Ancak, D50 % geçen malzemeden sonraki her bir % geçen malzemeye karşılık gelen parça boyutları arasındaki sapmaların giderek arttığı açık bir şekilde görülmektedir. DG ile ölçülen parça boyutları ve diğer (DD1, DD2, YG, YD1, YD2) ölçülen parça boyutları farkları arasındaki ilişki grafiği ise Şekil 10'da verilmiştir.

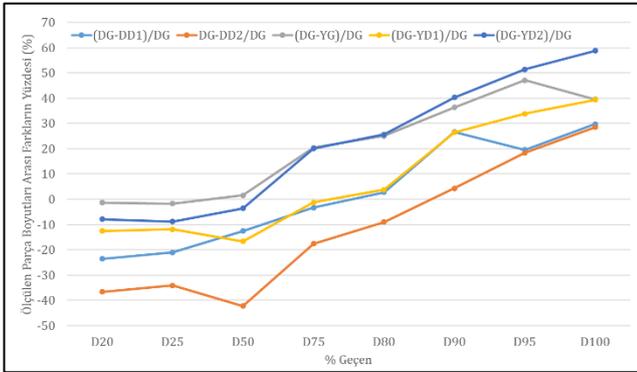


Şekil 10. DG ve DD1, DD2, YG, YD1, YD2 Parça Boyut Farkları Arasındaki İlişki Grafiği

Şekil 10 incelendiğinde geçen malzeme yüzdesi arttıkça DG ve DD1, DD2, YG, YD1, YD2 parça boyutları arasındaki farklar parabolik olarak artmaktadır.

Parabolik modeller ile ortaya çıkan belirlilik katsayıları DG-DD1 ( $R^2=0.9945$ ), DG-DD2 ( $R^2=0.9707$ ), DG-YG ( $R^2=0.9878$ ), DG-YD1 ( $R^2=0.953$ ) ve DG-YD2 için ( $R^2=0.9819$ ) olarak gerçekleşmiştir. Kısacası, yığının tamamını dik açıdan gören (DG) fotoğraf üzerinden yazılım ile elde edilen parça boyut dağılımları ile aynı fotoğraf üzerinden seçilen iki bölge (DD1 ve DD2) ile yatay yönden geniş açıda çekilen (YG) fotoğraf ve üzerinden seçilen bölgelerden (YD1-YD2) yazılım ile elde edilen parça boyut dağılımları arasındaki farklar arasında oldukça yüksek belirlilik katsayılarına sahip parabolik bir ilişki söz konusudur.

DG ve DD1, DD2, YG, YD1, YD2 arasındaki geçen % malzemeye karşılık gelen parça boyutları arasındaki farkların yüzdesel olarak ifade edilmiş hali ise Şekil 11'de gösterilmektedir.



Şekil 11. DG ve DD1, DD2, YG, YD1, YD2 Parça Boyutları Arasındaki Farkların Yüzdesi

Şekil 11 incelendiğinde; ilk dikkat çeken durum her bir karşılaştırma için belirli geçen malzeme yüzdesine kadar (yaklaşık D50-D75) parça boyutları arasındaki farkların yüzdesinin negatif olduğu (DG parça boyutları daha küçük), belirli geçen malzeme yüzdesinden sonra ise pozitif olduğu (DG parça boyutları daha büyük) görülmektedir. D20 geçen malzeme yüzdesinde, DG-DD2 parça boyutları arasında yaklaşık -%35 yüzdesel fark oluşurken, D100 geçen malzeme yüzdesinde, DG-YD2 parça boyutları arasında +%60 yüzdesel fark oluşmaktadır. Bu durum geniş ve dik açıdan tüm yığının fotoğrafını (DG), fotoğraftan seçilen bölgelere göre daha ince ve daha iri boyutları temsil etmesi ve onların analize tabi olmasından kaynaklanmaktadır. Kısacası, yığının tamamını görmeyen diğer seçilen bölgelerde (DD1, DD2, YD1, YD2) ve yine yığının tamamını görmeyen yatay ve geniş açıda çekilen görselde (YG) ince malzemelerin çok az olması ayrıca daha iri parçaların yine analize girmemesinden kaynaklanmaktadır.

#### 4. Sonuçlar ve Öneriler

Dijital Görüntü Analiz Yöntemi kullanılarak yapılan birçok çalışmada patlatma sonucu oluşan yığının çok küçük bir bölümü analize tabi tutulmakta ve parça boyut dağılımı belirlenmektedir. Bu tür çalışmalarda analizler daha kısa zamanda yapılmakta ancak gerçek parça boyut dağılımına yakın bir dağılımın elde edilip edilmediği anlaşılmamaktadır.

Bu çalışmada bir manyezit açık işletmesinde yapılan bir uygulama patlatmasının parça boyut dağılımı, gerek İHA yardımıyla yığının dik açıdan ve gerekse yığının yatay geniş açıdan çekilen fotoğraflar üzerinde analizler ile belirlenmiştir. Ayrıca her bir açıdan çekilen fotoğraflar üzerinde yığının bir kısmını temsil eden ancak ortalama parça boyutuna yakın olduğu öngörülen ikişer bölge seçilmiş ve onlar da parça boyut analizine tabi tutulmuştur. Aynı yığının ait toplam altı görsel ile yapılan parça boyut analizleri karşılaştırılarak aşağıdaki sonuçlar ve öneriler ortaya konulmuştur:

- Yığının dik açıdan çekilen fotoğraf ile yapılan analizler sonucunda malzemenin %50'sinin geçtiği parça boyutu DG, DD1 ve DD2 için sırasıyla 26.1 cm, 29.4 cm ve 37.1 cm, yığının yatay açıdan çekilen fotoğraf ile yapılan analizler sonucunda ise YG, YD1 ve YD2 için sırasıyla, 25.7 cm, 30.4 cm ve 27 cm olarak belirlenmiştir. Buna göre, ortalama parça boyutunda DG ve YG arasında benzerlik olurken, geniş açı fotoğraflardan seçilen küçük bölgelerde daha büyük parça boyutları (1-11 cm daha fazla) elde edilmiştir.
- Altı farklı görsel (DG, DD1, DD2, YG, YD1, YD2) üzerinde yapılan parça boyut analizleri sonucunda, geçen malzeme yüzdesinin D25 olduğu parça boyutuna kadar birbirleri arasındaki farklar fazla değilken D50'den itibaren farklar artmaya başlamakta D90'dan sonra ise 65 cm'ye kadar ulaşmaktadır.
- Dik ve geniş açıdan çekilen (DG) fotoğrafın analiz sonuçlarından elde edilen parça boyutları ile diğer (DD1, DD2, YG, YD1, YD2) analizlerden elde edilen parça boyutları karşılaştırıldığında; geçen malzeme yüzdesi (% Geçen) arttıkça DG ile diğerlerinin parça boyutları arasındaki farkların tüm modeller için parabolik olarak artış gösterdiği belirlenmiştir.
- Yığının geniş ve dik açıdan gören DG ve diğer DD1, DD2, YG, YD1, YD2 için yazılım ile elde edilen parça boyutları arasındaki yüzdesel farklar belirli geçen malzeme yüzdesine (D50-D75) kadar negatif, bundan daha büyük yüzde (%) geçen malzemede ise pozitif yönlüdür. Bu durum; yığının tamamının temsil edilmediği görsellerde (DD1, DD2, YG, YD1, YD2) ortalamadan küçük ince ve iri boyutlu malzemelerin analize dâhil olmamasından kaynaklanmaktadır.

Elde edilen bu sonuçlara göre yığına dik çekilen ve yığının tamamını gören fotoğraflar ile yapılan analizlerden elde edilen elek analiz sonuçlarının gerçek değerlere en yakın olduğu varsayıldığında; daha dar açıdan ya da yığına yatay çekilen fotoğraflar ile yapılan analizlerin, yığının parça boyut dağılımını tam olarak yansıtmadığı söylenebilir. Sadece 3 adet patlatma deliği kullanılarak yapılan bu örnek çalışmada dahi, yığının tümünü gören dik çekilen fotoğraf ile yapılan parça boyut analiz sonuçları ile yığını temsil etmeyen diğer görseller ile yapılan parça boyut analizleri arasında özellikle iri parça boyutlarında önemli farkların olduğu görülmüştür. Dolayısıyla, daha büyük patlatmalardaki yığın parça boyut dağılımının ortaya çıkarılması çalışmalarında, daha büyük hatalar meydana gelmesi kaçınılmaz olacaktır. Büyük patlatmalarda yapılan analizlerde, çekilen ölçekli fotoğrafın en azından yığının büyük bir bölümünü temsil etmesi yararlı olacaktır. Yığının çok küçük bir kısmını temsil eden fotoğraflar üzerinden parça boyut analizlerinin yapılması önerilmemektedir.

Sonuç olarak, özellikle üretim patlatmalarında ekonomik kayıpların en aza indirilmesi için görüntü analiz yöntemi kullanılarak yapılan parça boyut analizlerinin, yığının tamamını dik açıdan gören yüksek çözünürlüklü fotoğraflar üzerinden yapılması önerilmektedir.

### Teşekkür

RHI Magnesita firması yöneticileri, mühendisleri ve çalışanlarına yardım ve destekleri için teşekkür ederim.

### Araştırmacıların Katkısı

Bu çalışmada; Hakan Ak verilerin toplanması, bilimsel yayın araştırması, istatistiksel analizler, makalenin ve sonuçlarının oluşturulması konularında katkı sağlamıştır.

### Çıkar Çatışması

Yazar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir.

### Kaynaklar

- Akyıldız, Ö. (2015). *Kumtaşı ocaklarında patlatma faaliyetlerinde parçalanma modellerinin incelenmesi*. (Yüksek Lisans), Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi,
- Bedri, K., Bachar Assed, M. A., Taib, H., Hadji, R., Defalia, N., & Filali, M. (2024). Blast design and improvement of the quality of fragmentation in the aggregate quarries. Case study: Djebel Bouzegza C01. *Geomatics, Landmanagement and Landscape*(2). 10.15576/gll/2024.2.04
- Ceviz, H., & Akçakoca, H. (2011). Yığın parça boyut dağılımının belirlenmesinde bazı görüntü analiz yöntem sonuçlarının karşılaştırılması.

*Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 15(3).

- Cunningham, C. (1983). *The Kuz-Ram model for prediction of fragmentation from blasting*. Paper presented at the Proc. first int. symp. on rock fragmentation by blasting.
- Derman, R. (2019). *Açık Maden İşletmelerinde Sayısal Görüntü İşleme Yöntemi ile Patlatma Veriminin Analizi*. Fen Bilimleri Enstitüsü, Çukurova Üniversitesi,
- Elahi, T. A., & Hosseini, M. (2017). Analysis of blasted rocks fragmentation using digital image processing (case study: limestone quarry of Abyek Cement Company). *International Journal of Geo-Engineering*, 8(1), 16.
- Figueiredo, J., Torres, V., Cruz, R., & Moreira, D. (2023). Blasting fragmentation study using 3D image analysis of a hard rock mine. *Applied Sciences*, 13(12), 7090.
- Fredj, M., Boukarm, R., Saadoun, A., Menacer, K., & Nakache, R. (2024). Effect of Stemming Parameters on Blast-Induced Rock Fragmentation: A Case Study. *ARPHA Proceedings*, 7, 128-135.
- Hüdaverdi, T., & Akyıldız, Ö. (2020). Investigation of blast fragmentation models in a sandstone quarry. *Scientific Mining Journal*, 59(3), 145-156.
- Idowu, K. A., Olaleye, B. M., & Saliu, M. A. (2021). Analysis of blasted rocks fragmentation using digital image processing (Case study: Limestone quarry of Obajana Cement Company). *Mining of Mineral Deposits*.
- Kahraman, E., & Kılıç, A. (2021). Soda Sanayi Karadiken Kalker Ocağında Gerçekleştirilen Patlatma Uygulamalarının Veriminin İncelenmesi. *Soma Meslek Yüksekokulu Teknik Bilimler Dergisi*, 1(31), 13-25.
- Kahraman, E., & Kılıç, A. M. (2013). *Ceyhan Yıllankale Bölgesi Kalker İşletmesinin Patlatma Parametrelerinin İncelenmesi ve Patlatma Sonrası Parça Boyut Dağılımının Belirlenmesi* Paper presented at the Delme-Patlatma Sempozyumu / 8 Drilling-Blasting Symposium, Eskişehir.
- Karadoğan, A., & Yılmaz, P. (2010). Patlamada Dilim Kalınlığının Basamak Boyunca Gösterdiği Değişiminin Parça Boyut Dağılımına Etkilerinin Araştırılması. *İÜ Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 1(1), 19-31.
- Kılıç, A. M. (2015). Gaziantep-Şehit Kamil-Karpuzkaya Bölgesi Kalker İşletmesinin Patlatma Parametrelerinin İncelenmesi ve Patlatma Sonrası Parça Boyut Dağılımının Belirlenmesi. *Çukurova Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 30(2), 217-227.
- Maerz, N. H., Palangio, T. C., & Franklin, J. A. (2018). WipFrag image based granulometry system. In

*Measurement of Blast Fragmentation* (pp. 91-99): Routledge.

- Menacer, K., Saadoun, A., Hafsaoui, A., Fredj, M., Tabet, A., Boudjellal, D. E., . . . Nakache, R. (2025). Stemming Materials Assessing and Its Effect on Rock Fragmentation Using Digital Image Analysis at the Chouf Amar Quarry, M'sila, Algeria. *Journal of Mining and Environment*.
- Nanda, S., & Pal, B. (2020). Analysis of blast fragmentation using WipFrag. *International Journal of Innovative Science and Research Technology*, 5(6), 1561-1566.
- Nefis, M., & Talhi, K. (2016). A model study to measure fragmentation by blasting. *Mining Science*, 23.
- Özdemir, K. (2004). *Dijital görüntü işleme yöntemi ile patlama verimlilik analizi*. (Yüksek Lisans), Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Üniversitesi,
- Özdemir, K. (2009). *Basamak patlatmasında parça boyut dağılımının ardışık işlem faaliyetlerine olan etkilerinin araştırılması*. (Doktora), Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul Teknik Üniversitesi,
- Pekin, A., & Bayırlı, M. (2015). Ercan taşocağı delme patlatma verimliliğinin değerlendirmesi. *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 17(1), 22-31.
- Saadoun, A., Fredj, M., Boukarm, R., & Hadji, R. (2022). Fragmentation analysis using digital image processing and empirical model (KuzRam): a comparative study. *Записки Горного института*, 257, 822-832.
- Tosun, A. (2013). *Açık ocak patlatmalarında yığın boyut dağılımının optimizasyonu*. Fen Bilimleri Enstitüsü, Dokuz Eylül Üniversitesi,
- Tosun, A., Konak, G., Öngen, T., Karakuş, D., & Onur, A. H. (2012). Özgül Şarjin Patlatma Verimliliğine Etkisinin İrdelenmesi. *Scientific Mining Journal*, 51(3).
- Yang, Q., Gao, Q., Jia, Y., Zhou, H., Gao, X., Jiang, W., & Ma, X. (2025). Application of Simulation Methods and Image Processing Techniques in Rock Blasting and Fragmentation Optimization. *Applied Sciences*, 15(6), 3365.

## MODIFIED ADAPTIVE WEIGHT RAO-3 ALGORITHM FOR CONSTRUCTION TIME-COST TRADE-OFF OPTIMIZATION PROBLEMS

Mohammad Azim EIRGASH<sup>1\*</sup>, Yusuf BALTACI<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Ph.D, Civil Engineering Department, Karadeniz Technical University, 61080 Trabzon, Türkiye; Email; azim.eirgash@ktu.edu.tr, ORCID No : <https://orcid.org/0000-0001-5399-115X>

<sup>2</sup> Ph.D, Civil Engineering Department, Karadeniz Technical University, 61080 Trabzon, Türkiye, Email: yusufbaltaci@ktu.edu.tr, ORCID No : <https://orcid.org/0000-0002-0461-2130>

### Keywords

Multi-objective optimization, Rao-3 algorithm, Modified adaptive weight approach, Time-cost optimization.

### Abstract

The Modified Adaptive Weight Approach (MAWA) represents a straightforward method commonly applied to solve time-cost optimization problems. MAWA is a flexible and effective approach that can be applied to various multi-objective optimization problems, including time-cost optimization in construction projects. These algorithms operate on a population of potential solutions that are randomly initialized within the boundaries of the solution space. MAWA assigns uniform weight factors to all individuals in the population without accounting for their specific characteristics. However, each solution possesses unique fitness attributes relative to its position in the solution space. In this study, a multi-objective optimization model combining the Rao-3 algorithm with the MAWA is introduced to generate a set of Pareto-optimal solutions. Two construction project case studies, drawn from existing technical literature and comprising 81 to 146 activities, are analyzed to evaluate the effectiveness of the proposed MAWA-Rao-3 method. The results are benchmarked against those from previously established models that produced approximate Pareto fronts or near-optimal solutions. The findings demonstrate that the MAWA-Rao-3 algorithm performs efficiently in addressing time-cost trade-off problems within the field of construction engineering and management.

## İNŞAAT ZAMAN-MALİYET ÖDÜNLEŞİM OPTİMİZASYONU PROBLEMİ İÇİN DEĞİŞTİRİLMİŞ UYARLANABİLİR AĞIRLIKLI RAO-3 ALGORİTMASI

### Anahtar Kelimeler

Çok amaçlı optimizasyon, Rao-3 algoritması, Değiştirilmiş uyarlanabilir ağırlık yaklaşımı, Zaman-maliyet optimizasyonu.

### Öz

Değiştirilmiş Uyarlanabilir Ağırlık Yöntemi (MAWA), zaman-maliyet optimizasyon problemlerini çözmek için yaygın olarak kullanılan basit bir yöntemdir. MAWA, zaman-maliyet optimizasyonu da dahil olmak üzere çeşitli çok amaçlı optimizasyon problemlerine uygulanabilen esnek ve etkili bir yaklaşımdır. Bu tür problemler genellikle çok amaçlı optimizasyon problemleri olarak ele alınmakta olup, bu problemlerin çözümünde çoğunlukla meta-sezgisel algoritmalar kullanılmaktadır. Bu algoritmalar, çözüm uzayı sınırları içerisinde rastgele başlatılan bir çözüm popülasyonu üzerinde çalışır. MAWA, popülasyondaki tüm bireylere özgül niteliklerini dikkate almadan eşit ağırlık faktörleri atar. Ancak her çözüm, çözüm uzayındaki konumuna bağlı olarak kendine özgü uygunluk özelliklerine sahiptir. Bu çalışmada, Pareto-optimal çözümler elde etmek amacıyla Rao-3 algoritması ile MAWA'nın birleştirildiği çok amaçlı bir optimizasyon modeli sunulmuştur. Teknik literatürden alınan ve 81 ile 146 faaliyet içeren iki inşaat projesi örneği, önerilen MAWA-Rao-3 yönteminin etkinliğini değerlendirmek amacıyla incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar, yaklaşık Pareto cepheleri veya neredeyse optimal çözümler üreten önceki modellerin sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Bulgular, MAWA-Rao-3 algoritmasının inşaat mühendisliği ve yönetimi alanındaki zaman-maliyet dengeleme problemlerini çözmede etkili bir şekilde çalıştığını göstermektedir.

Araştırma Makalesi

Başvuru Tarihi

: 12.06.2025

Kabul Tarihi

: 27.11.2025

Research Article

Submission Date

: 12.06.2025

Accepted Date

: 27.11.2025

\* Sorumlu yazar: [azim.eirgash@ktu.edu.tr](mailto:azim.eirgash@ktu.edu.tr)  
<https://doi.org/10.31796/ogummf.1718264>



Bu eser, Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>) hükümlerine göre açık erişimli bir makaledir.

This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

## 1. Introduction

Multi-objective optimization problems require balancing conflicting objectives, making it challenging to find a single optimal solution. In construction projects, optimizing time, cost, and quality simultaneously is particularly difficult due to the inherent contradictions among these goals. As a result, construction managers must conduct trade-off analyses during the planning and scheduling stages to identify feasible alternatives that best satisfy project priorities Zhang and Xing (2010).

The earliest attempt to apply optimization techniques to time-cost trade-off problems (TCTPs) was made by Meyer et al. (1965), who utilized mathematical models, including linear programming, integer programming, and dynamic programming. Later, Feng et al. (1997) pointed out that these models often assume continuous relationships among decision variables. However, real-world construction activities rely on discrete operational choices involving time, cost, and quality, which make continuous mathematical models less practical. Moreover, integer and dynamic programming approaches can become computationally intensive for complex networks.

Vanhoucke et al. (2007) explored the use of heuristic algorithms for solving TCTPs, emphasizing their simplicity and efficiency for large-scale problems. Unlike mathematical models, heuristic methods apply straightforward decision rules, making them accessible for practical use. However, the reliability of the solutions, especially regarding their global optimality, remains a concern. To overcome these drawbacks, researchers have increasingly turned to metaheuristic algorithms, which are better suited for solving complex multi-objective or many-objective optimization problems by exploring the solution space more thoroughly.

Kumar et al. (2024) developed a TCTP optimization framework tailored specifically to Indian highway projects, utilizing the NSGA-II algorithm. Their model simultaneously minimized time and cost while respecting constraints such as resource availability and activity precedence. The findings showed that NSGA-II outperformed traditional techniques, offering a broad range of Pareto-optimal solutions. To further refine the selection process, the weighted sum method was used, confirming the algorithm's robustness and practicality for complex construction scenarios in India.

The literature clearly indicates that trade-off optimization in construction has been a long-standing challenge. Researchers have adopted three main categories of approaches to tackle TCTPs:

1. Mathematical models such as linear and non-linear programming, aim for exact solutions but are often unsuitable for large or discrete

problems due to high computational demands (Liu et al. 1995).

2. Heuristic methods offer faster results using rule-based approaches but do not guarantee optimality.
3. Metaheuristic algorithms, on the other hand, provide flexible and scalable techniques for identifying a set of optimal trade-off solutions, making them more applicable to real-world construction planning (Eshtehardian et al., 2008).

Albayrak (2020) presented a novel hybrid algorithm (NHA), combining Particle Swarm Optimization (PSO) with Genetic Algorithm (GA) to address the TCT problem. Results indicated that the NHA achieved shorter and more cost-effective project durations than standard PSO.

More recently, Agarwal et al. (2024) suggested a Multi-Objective Particle Swarm Optimization (MOPSO) model for solving TCTPs. Drawing inspiration from swarm intelligence, their model was tested on a real-world project and proved effective in generating a diverse set of Pareto-optimal solutions, outperforming several existing optimization techniques.

In recent years, there has been increasing attention in applying metaheuristic algorithms (MHAs) to solve TCTPs more effectively. These algorithms are particularly suited for navigating complex and high-dimensional search spaces. Various MHAs have demonstrated promising results in solving optimization problems, including GA (Deb et al., 2002), TLBO (Rao et al., 2011), Slime Mould Algorithm (SMA) (Li et al., 2020), Arithmetic Optimization Algorithm (AOA) (Abualigah et al., 2021a), Aquila Optimizer (AO) (Abualigah et al., 2021b), and the Crayfish Optimization Algorithm (COA) (Jia et al., 2023).

More recently, Rao (2020) introduced a new class of metaphor-free and parameter-less optimization algorithms, known as the Rao algorithms. These algorithms are similar to TLBO and Jaya and use a single, simple update mechanism to guide the search process. Despite their conceptual simplicity, the Rao algorithms have shown strong performance across a wide range of constrained and unconstrained optimization problems (Rao, 2020; Rao and Keesari, 2020).

In the context of TCTPs, two widely adopted solution strategies in the literature are the Non-Dominated Sorting (NDS) approach and the Modified Adaptive Weight Approach (MAWA) (Toğan and Eirgash, 2019; Eirgash et al. 2019). While NDS is effective for identifying diverse Pareto-optimal solutions, it can become computationally intensive for large-scale or high-dimensional problems. In contrast, the MAWA

technique is more computationally efficient and helps direct the search toward promising regions of the trade-off surface.

To the best of our knowledge, the integration of the MAWA technique with the Rao-3 algorithm has not yet been investigated for solving TCTPs. In this study, we propose a multi-objective optimization procedure that combines the simplicity of the Rao-3 algorithm with the guided focus of MAWA. A set of benchmark TCTPs is used to evaluate the proposed MAWA-Rao-3 framework, and the results are analyzed in terms of its ability to generate high-quality Pareto front solutions. The findings indicate that the MAWA-Rao-3 algorithm demonstrates robust and competitive performance, making it a promising approach for solving multi-objective TCTP problems.

- A novel multi-objective optimization model integrating Rao-3 algorithm with the MAWA is proposed for solving TCTP problems.
- The Critical Path Method (CPM) is employed as a project scheduling technique to derive time and cost objectives for optimization.
- The proposed MAWA-Rao-3 algorithm demonstrates strong capability in generating Pareto-optimal solutions for complex construction planning scenarios.
- Two real-life case studies involving construction projects with 81 and 146 activities are investigated to assess the practical applicability and performance of the proposed model.
- Hypervolume (HV) and Number of Function Evaluations (NFEs) are used as performance indicators to validate the effectiveness of the MAWA-Rao-3 algorithm.

## 2. Literature Review

TCTP in construction management have been extensively studied, with various optimization approaches proposed over the past decades. Traditional methods like the Critical Path Method (CPM) and Program Evaluation and Review Technique (PERT) provided foundational frameworks for schedule optimization (Kelly, 1961). However, these deterministic approaches often failed to capture the complex, multi-objective nature of real-world construction projects.

Zheng et al. (2005) addressed these limitations by applying the GA-MAWA method to an 18-activity project, adjusting mutation and selection parameters to avoid local optima. Their approach demonstrated improved performance compared to earlier heuristic and mathematical techniques. Similarly, Parveen and Saha (2012) tested MAWA-GA on projects with 7 and 18 activities. They confirmed that the method effectively generated Pareto-optimal solutions and outperformed Zheng et al. (2004) by increasing the number of iterations in the optimization process.

The MAWA represents a significant advancement in multi-objective optimization, addressing limitations of traditional weighted sum methods (Toğan et al. 2020). The development of metaheuristic algorithms has revolutionized TCTP solutions, with genetic algorithms (GAs) demonstrating particular promise (Feng et al., 1997). Eirgash and Dede (2018) employed the TLBO algorithm, which incorporates the concept of assigning various teachers to different student groups along with an adaptive teaching factor. In their study, this algorithm was integrated with the MAWA. The proposed model was tested on construction projects consisting of 18 and 63 activities and demonstrated its capability to produce effective Pareto front solutions. The outcomes of the study outperformed those of similar works in the literature. Notably, the model successfully reached the global optimum for the 18-activity project and delivered optimal solutions for the 63-activity project as well. In a different study, Dede (2018) examined TLBO-MAWA and TLBO-NDS methods in the project with 7 activities. According to the results, TLBO method performed successfully in both the methods. Also, Toğan and Eirgash (2019) proposed the TLBO-MAWA model, applying it to projects with 7, 18, and 63 activities. Their findings showed that the TLBO method produced high-quality solutions and stood out for its algorithmic simplicity. Although numerous innovative algorithms and approaches have been developed for the TCTP, to the best of the authors' knowledge, the work by (Kim and de Week 2005; Ya-ping, and Ying, 2006; Toğan and Eirgash 2019) represents the only notable effort that specifically utilizes MAWA within the context of TCTP. Therefore, the proposed MAWA-Rao-3 method aims to address a significant gap in the existing literature.

A brief summary of related literature is provided in Table 1. The highlights of this study are summarized as follows:

Year	Author (s)	Approach	Problem size	Title Topics
2005	Elbeltagi, Hegazy, and Grierson	GA, MA, PSO, ACO, SFL	18	Five metaheuristic algorithms like GA, MA, PSO, ACO, and SFL are evaluated in comparison, highlighting the weak performance of GA and the strong robustness demonstrated by the PSO approach.
2005	Zheng et al.	MAWA-GA	7	Small scale 7 activity problem is solved using the modified adaptive weighted algorithm.
2008	Eshtehardian, Afshar and Abbasnia	GA	18	Fuzzy set theory allows the genetic algorithm (GA) to effectively address stochastic TCTPs.
2012	Zhang and Ng	ACO	18	Minimizing both of construction Time and Cost via ACO algorithm
2009	Afshar, Ziaraty, Kaveh and Sharifi	ACO	18	The Multi-Colony Non-Dominated Archiving Ant Colony Optimization (NA-ACO) approach assigns distinct ant colonies to individually focus on each objective.
2016	Bettemir and Birgönül	Siemens Algorithm	63	The study demonstrates that the minimum cost slope method yields the optimal solution for the continuous TCTP problem.
2016	Aminbakhsh and Sönmez	PSO	18, 63 and 630	Optimization of Time and Cost with discrete PSO algorithm for the large-scale DTCTPs.
2012	Sönmez and Bettemir	Hybrid-GA	18, 29, 63 and 630	A hybrid GA algorithm is developed by integrating the strengths of simulated annealing (SA) with quantum simulated annealing, enhancing its optimization capabilities
2019	Toğan and Eirgash	NDSII-TLBO	18, 63 and 630	This study employs TLBO algorithm to optimize the TCTP problems in construction projects.
2020	Toğan et al.	New MAWA GA, TLBO, and Jaya	18, 63, and 630	Novel adaptive weight formulations have been proposed to enhance the efficiency of time–cost optimization processes.
2023	Bettemir and Birgönül	HMHH, DE	81, 146, and 291	Solving the discrete TCTP using an adaptive search domain approach enhances the optimization process by dynamically adjusting the solution space.
2024	Sulub et al.	OAOA, NDSII-AOA	63, 81 and 146	An Arithmetic Optimization Algorithm incorporating an Opposition Jumping Rate mechanism has been developed to effectively solve TCTP optimization problems.
2025	Eirgash	OBJA	9, 19	The impact of jumping rate on the O-Jaya algorithm for solving discrete TCTP problems.

The paper is structured as follows: First, we present the theoretical foundations of time-cost optimization, including key problem formulations and their significance in construction management. Next, we introduce the MAWA and detail its integration with the Rao-3 optimization algorithm for solving various discrete TCTP problems in construction projects. The subsequent section evaluates the MAWA-Rao-3 algorithm's performance through comprehensive benchmarking against established optimization problems. The paper concludes with a detailed discussion of findings and their practical implications for construction project management.

### 3. Methodology

Figure 1 illustrates the research methodology employed in this study, which addresses multi-objective optimization in project management with an emphasis on balancing time and cost. The approach begins with the development of a comprehensive model integrating these three interrelated objectives. Subsequently, several optimization algorithms are examined, including the proposed MAWA-Rao-3 and the baseline Rao-3, alongside benchmark algorithms such as NDSII-AOA, NDSII-TLBO, and NDSII-AO. These algorithms are applied to case studies of varying complexity, specifically projects comprising 81 and 146 activities. The performance of the algorithms is

assessed considering the number of objective functions (NFEs) and the Hypervolume (HV) indicator. Additionally, the traditional Critical Path Method (CPM) is utilized to determine the overall project duration. the modified adaptive weight approach (MAWA) is employed as a multi-objective optimization approach to enhance the solution quality.

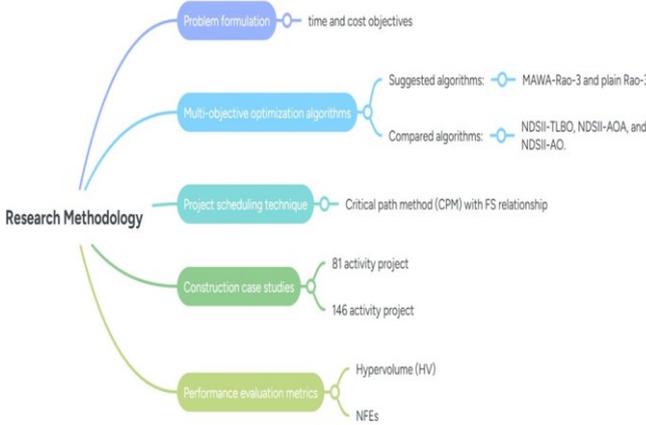


Figure 1. Methodology map of this study

### 3.1. Problem formulation of Trade-offs Problems

The trade-off optimization process aims to reduce both project duration and cost at the same time, identifying optimal solutions that can be applied across all activities in construction projects.

*Objective 1:* Minimizing of project time (PT): The minimization of project duration is as follows:

$$Min PT = \max (ES_i + d_i), \forall i = 1,2, \dots, m \quad (1)$$

where:

- $PT$  = total project duration
- $ES_i$  = earliest start time of activity  $i$
- $d_i$  = duration of activity  $i$
- $m$  = total number of activities in the project
- $ES_i$  is the earliest start time of activity  $i$ .

*Objective 2:* Minimizing of project cost (PC): The minimization of project cost is formulated as follows:

$$Min PC = \sum_{i=1}^m cost_i \quad (2)$$

where:

- $PC$  = total project cost
- $cost_i$  = cost of activity  $i$  for the chosen execution mode

### 3.2. Modified Adaptive Weight Approach (MAWA) in Multi-Objective Optimization

The modified adaptive weight approach (MAWA) is a computationally efficient and conceptually simple

method widely used in addressing multi-objective optimization problems, particularly TCTP problems commonly encountered in the construction engineering field (Toğan et al. 2020). These problems are characterized by conflicting objectives, making metaheuristic algorithms essential for exploring trade-off solutions and generating Pareto-optimal approximations. Within the MAWA framework, a population of potential solutions is randomly initialized within the defined bounds of the solution space and subsequently evaluated based on multiple objective functions. To guide the search and balance trade-offs, MAWA employs a weighting strategy based on solution quality. According to Zheng et al. (2004), the adaptive weighting mechanism in MAWA follows four key conditions, which are formulated as follows:

$$1. S_c^{max} \neq S_c^{min} \text{ ve } S_t^{max} \neq S_t^{min}$$

$$\begin{aligned} V_c &= S_c / (S_c^{max} - S_c^{min}) \\ V_t &= S_t / (S_t^{max} - S_t^{min}) \end{aligned} \quad \begin{aligned} W_c &= V_c / (V_c + V_t) \\ W_t &= V_t / (V_c + V_t) \end{aligned} \quad (3)$$

$$2. S_c^{max} = S_c^{min} \text{ and } S_t^{max} = S_t^{min}$$

$$\begin{aligned} W_c &= 0,5 \\ W_t &= 0,5 \end{aligned} \quad (4)$$

$$3. S_c^{max} \neq S_c^{min} \text{ and } S_t^{max} = S_t^{min}$$

$$\begin{aligned} W_c &= 0,1 \\ W_t &= 0,9 \end{aligned} \quad (5)$$

$$4. S_c^{max} = S_c^{min} \text{ and } S_t^{max} \neq S_t^{min}$$

$$\begin{aligned} W_c &= 0,9 \\ W_t &= 0,1 \end{aligned} \quad (6)$$

Let  $S_t^{max}$  and  $S_t^{min}$  denote the maximum and minimum values, respectively, of the project duration objective function in the current iteration. Similarly, let  $S_c^{max}$  and  $S_c^{min}$  represent the maximum and minimum values of the total direct cost objective function in the same iteration. The parameters  $v_t$  and  $v_c$  are expressed as the ratios between the minimum values and the ranges

(i.e., differences between maximum and minimum values) for project duration and total cost, respectively, and are defined as:

$$F(x) = W_t * \left( \frac{S_t - S_t^{\min} + m}{S_t^{\max} - S_t^{\min} + m} \right) + W_c * \left( \frac{S_c - S_c^{\min} + m}{S_c^{\max} - S_c^{\min} + m} \right) \tag{6}$$

$m = 0,001$

Here,  $x$  denotes a candidate solution in the current generation, and  $F(x)$  refers to its corresponding fitness value. The terms  $S_c$  and  $S_t$  represent the total cost and project duration of the  $x^{\text{th}}$  solution, respectively. The parameter  $m$  is a small positive random value within the range  $(0, 1)$ , while  $w_c$  and  $w_t$  are the adaptive weights assigned to cost and time, respectively. To prevent situations where  $S_c^{\max} = S_c^{\min}$  or  $S_t^{\max} = S_t^{\min}$ , the random value  $m$  is incorporated into Equation (6), as suggested by Zheng et al. (2004).

This value is sufficiently small to have a negligible impact on the normalization process while ensuring stable fitness evaluation and avoiding division-by-zero errors during optimization.

### 3.3. Rao-3 optimization algorithm

The Rao-3 optimization algorithm, introduced by Rao (2020) as the third variant in a series that includes Rao-1 and Rao-2, is a parameter-free metaheuristic method. Its design eliminates the need for algorithm-specific hyperparameter tuning, thereby enhancing user accessibility and simplifying its implementation.

$$X'_{j,k,i} = X_{j,k,i} + r_{1,j,i}(X_{j,best,i} - |X_{j,worst,i}|) + r_{2,j,i}(|X_{j,k,i} \text{ or } X_{j,l,i}| - (X_{j,l,i} \text{ or } X_{j,k,i})) \tag{7}$$

Where,

- $X_i$ : Current solution
- $X_{best}$  : Best solution in the current population
- $X_{worst}$  : Worst solution in the current population
- $X_j, X_k$  : Randomly selected different solutions from the population
- $r_1, r_2$ : Random numbers in the range  $[0, 1]$

In the term  $|X_{j,k,i} \text{ or } X_{j,l,i}|$ , candidate solution  $k$  is compared with another candidate  $l$  randomly chosen from the existing candidates in the population. The term  $|X_{j,k,i}|$  is chosen if  $k$  is more suitable than  $l$ . Else if,  $|X_{j,l,i}|$  is selected. The same rule applies to the second term (i.e.  $X_{j,l,i}$  or  $X_{j,k,i}$ ). The flowchart of the process can be tracked in Figure 2.

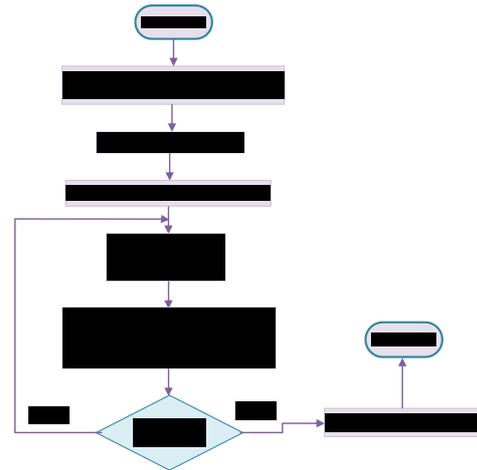


Figure 2. Flowchart of the MAWA-Rao-3 algorithm for TCTP

## 4. Numerical Examples

The effectiveness of the MAWA-Rao-3 model in solving TCTP problems was assessed using two medium-scale benchmark cases with 81 and 146 activities, derived from Bettemir and Birgonul (2023). The algorithm was implemented in MATLAB and executed on a system with an Intel® Core™ i3-3110M CPU (2.40 GHz) and 6 GB RAM. As TCTPs are multi-objective in nature, conventional techniques such as non-dominated sorting (NDS) and the MAWA (Deb et al., 2002; Zheng et al. 2004) are commonly used. In this study, the MAWA-Rao-3 algorithm was applied to evaluate its performance on the selected problems.

### 4.1. Numerical example of 81-activity project

A complex construction project consisting of 81 activities, originally presented by Bettemir and Birgonul (2023), is resolved to evaluate the performance of the proposed algorithm. Each activity in the project features six discrete execution modes, adding to the scheduling complexity. An indirect cost rate of \$2000 per day is assumed for the duration-based cost analysis. Due to the combinatorial nature of the problem, the project presents a solution space of approximately  $1.072 \times 10^{63}$  possible scheduling scenarios. To assess the effectiveness of the proposed MAWA-Rao-3 algorithm, its results are compared with those obtained using the original Rao-3 algorithm and the benchmark solution reported by Bettemir and Birgonul (2023), which was generated using a hybrid heuristic-metaheuristic (HHMH) approach. A summary of the comparative trade-off solutions is provided in Table 2. The results indicate that the MAWA-Rao-3 algorithm consistently achieves competitive or improved outcomes in terms of both time and cost trade-offs. For instance, at a project duration of 345 days, the MAWA-Rao-3 produces a total cost of

\$3,491,150, which is lower than the \$3,498,200 obtained by the plain Rao-3 under the same duration. Similar patterns are observed for other time points (e.g., 346, 347, 348 days), where MAWA-Rao-3 frequently outperforms the plain Rao-3 in cost efficiency, and competes closely with the benchmark HHMH results. In terms of computational performance, the proposed MAWA-Rao-3 model demonstrates a significant advantage. While both MAWA-Rao-3 and plain Rao-3 used the same number of populations (NOP = 200), MAWA-Rao-3 achieved these with only 30,000 function evaluations (NFE), compared to 1,250,000 NFEs required by the HHMH method. This corresponds to just 2.5% of the computational cost, highlighting the remarkable efficiency of the MAWA-Rao-3 in solving complex, medium-scale TCTPs.

Consequently, the MAWA-Rao-3 algorithm proves to be an effective and computationally effective approach for addressing TCTP problems in construction project planning. It offers a compelling alternative to more computationally intensive metaheuristic methods without compromising on the quality of the approximate Pareto-optimal solutions.

Table 2. Trade-off solutions of 81 activity TCTP problem

Sr. No	Bettemir and Birgonul (2023) HHMH		This paper			
			Plain Rao-3		MAWA-Rao-3	
	PCT	PCC	PCT	PCC	PCT	PCC
1	389	3321550	345	3498200	345	3491150
2			346	3499000	346	3496950
3			347	3550000	347	3519600
4			359	3507700	359	3492500
5			349	3527950	349	3512200
6			348	3523050	348	3517700
7			360	3517500	360	3505050
8			358	3518700	358	3517950
9			362	3513700	362	3509000
10			342	3545700	342	3533100
NOP			200		200	
NOI			180		150	
NFE	1250000		36000		30000	

Note: HHMH: Hybrid heuristic meta-heuristic

Table 3 presents a comparative evaluation of the proposed MAWA-Rao-3 algorithm against three other state-of-the-art multi-objective optimization models previously reported by Sulub et al. (2024): NDSII-TLBO, NDSII-AO, and NDSII-AOA. All methods are applied to the same 81-activity time–cost trade-off project to identify efficient Pareto front solutions. A direct comparison with Bettemir and Birgonul (2023) is not feasible in terms of schedule efficiency, as the authors provided only selected trade-off solutions rather than a detailed schedule or comprehensive Pareto front. Therefore, for fairness and rigor, the performance of the MAWA-Rao-3 is assessed against the NDSII-based algorithms. The results clearly show that MAWA-Rao-3 obtained satisfactory solutions, making it an attractive and efficient option for solving TCTP problems in the construction domain.

Table 3. Pareto front solutions obtained by the comparison algorithms for the 81-activity TCTPs

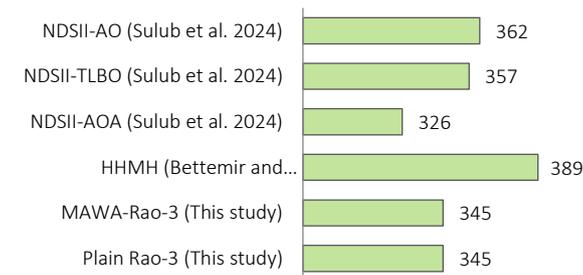
Sr. No	Sulub et al. 2024				(This study)			
	NDSII-TLBO		NDSII-AO		NDSII-AOA		MAWA-Rao-3	
	PCT	PCC	PCT	PCC	PCT	PCC	PCT	PCC
1	357	3371950	362	3400100	285	3601500	345	3491150
2	370	3358100	346	3414150	326	3469400	346	3496950
3	348	3383750	355	3402700	320	3486050	347	3519600
4	311	3451350	296	3526750	287	3563850	359	3492500
5	333	3406350	353	3340050	298	3538600	349	3512200
6	319	3448950	290	3521400	312	3487400	348	3517700
7	341	3396600	322	3422000	304	3522350	360	3505050
8	310	3477450	386	3537950	307	3500850	358	3517950
9	299	3492400	381	3350950	286	3593250	362	3509000
10	297	3503950	284	3575350	291	3549950	342	3533100
NOP	100		200		100		200	
NOI	90		180		180		150	
NFE	36000		36000		36000		30000	

Note: Teaching learning-based optimization (TLBO), Aquila optimizor (AO)

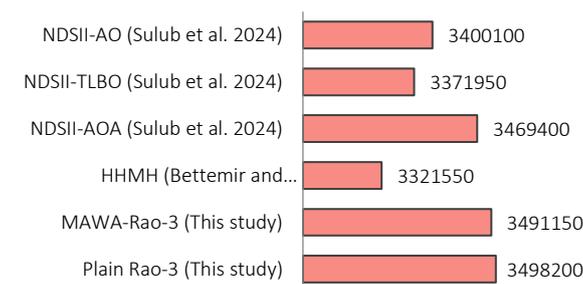
The comparative analysis evaluates six optimization algorithms based on project time (days) and cost (\$). Among the tested methods, NDSII-AOA (Sulub et al., 2024) demonstrates superior time efficiency, completing projects in just 326 days - significantly faster than other NDSII variants (NDSII-TLBO: 357 days; NDSII-AO: 362 days) and Rao-3-based approaches (345 days). HHMH (Bettemir and Birgonul, 2023) emerges as the most cost-effective solution at \$3,321,550, though it requires the longest project duration (389 days). NDSII-TLBO presents a balanced alternative, offering moderate time efficiency (357 days) with competitive costs (\$3,371,950). The Rao-3 variants (MAWA-Rao-3 and plain Rao-3) show room for improvement, performing moderately in time (345 days) but lagging in cost efficiency (\$3,491,150-\$3,498,200). Hence, Figure 3, visualizes the results from Table 3, demonstrating the better performance of MAWA-Rao-3 in finding the shorter project duration. In simpler terms, when minimizing project duration is a higher priority for decision-makers compared to cost, the approximate Pareto front solutions obtained using the MAWA-Rao-3 is as good as comparison algorithms.

rate of \$4000 per day is applied in this study. The scheduling complexity of the problem is immense, with approximately  $1.12 \times 10^{102}$  potential combinations. While Bettemir and Birgonul (2023) presented only a single preferred solution, the MAWA-Rao-3 algorithm provides a comprehensive set of Pareto front solutions for this project. These solutions, illustrated through both tabular and graphical formats, offer project managers detailed insights into the trade-offs between cost and duration, enabling more informed decision-making.

Table 4 presents the trade-off solutions obtained through the plain Rao-3 algorithm, highlighting the relationship between project cost and duration through Pareto optimal solutions. Notably, the MAWA-Rao-3 algorithm searches a narrower region of the solution space compared to the standard Rao-3 yet succeeds in achieving superior outcomes on the Pareto front. This suggests that MAWA-Rao-3 is more efficient in locating high-quality solutions, offering a broader range of viable options tailored to specific project requirements. As previously discussed, although the case study originates from the work of Bettemir and Birgonul (2023), their research provides only a single desirable outcome rather than a complete Pareto front. Therefore, for a more meaningful comparison, the performance of the proposed MAWA-Rao-3 algorithm is also evaluated against other contemporary multi-objective algorithms, including NDSII-TLBO, NDSII-AOA, and NDSII-AO.



(a) Project time (days)



(b) Project cost (\$)

Figure 3. Desired approximate Pareto front solutions of TCTP for 81-activity project

**4.1. Case study of 146-activity project**

A medium-sized construction project consisting of 146 activities, originally analyzed by Bettemir and Birgonul (2023), is utilized as a test case to further validate the effectiveness of the proposed models. An indirect cost

Table 4. Pareto front solutions obtained by the comparison algorithms for the 146-activity TCTP

Sr. No	Bettemir and Birgonul (2023)		This paper			
	HHMH		Plain Rao-3		MAWA-Rao-3	
	PCT	PCC	PCT	PCC	PCT	PCC
1	560	6238500	552	6490000	530	6432750
2			541	6542750	545	6372750
3			544	6537500	548	6375750
4			541	6570500	556	6374000
5			554	6538500	591	6379000
6			594	6591250	552	6475000
7			656	6564000	571	6424250
8			569	6464250	561	6469750
9			555	6487000	548	6525750
10			570	6456250	579	6399250
NOP			200		200	
NOI			200		200	
NFE	6000000		40000		40000	

The results presented in Table 5 offer a comprehensive comparative analysis of the proposed MAWA-Rao-3 algorithm with three state-of-the-art multi-objective optimization methods, NDSII-TLBO, NDSII-AO, and NDSII-AOA, for solving a 146-activity TCTP. From the perspective of solution quality, the MAWA-Rao-3 algorithm demonstrates remarkable balance between

project completion time (PCT) and project completion cost (PCC). Its solutions range from 530 to 579 days for PCT and from \$6,237,250 to \$6,482,750 for PCC. While NDSII-AOA provides faster solutions with PCTs as low as 487 days, they come at a significantly higher cost, reaching up to \$6,890,000. Conversely, MAWA-Rao-3 maintains a better equilibrium, offering competitive PCTs without excessive financial burden, making it highly suitable for real-world applications where cost control is critical. While NDSII-AOA offers faster

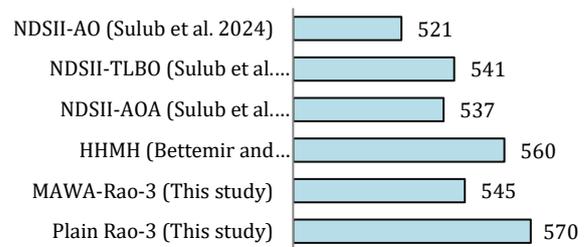
schedules and NDSII-AO delivers marginal improvements in completion time, both fall short in terms of cost efficiency and computational demand. Moreover, the normalized function evaluations (NFE) correspond to roughly 7%, comparing 40,000 to 6,000,000. That means, MAWA-Rao-3 requires significantly fewer function evaluations compared to the HHMH algorithm.

Table 5. Pareto front solutions of comparison algorithms for 146 activity TCTP problem

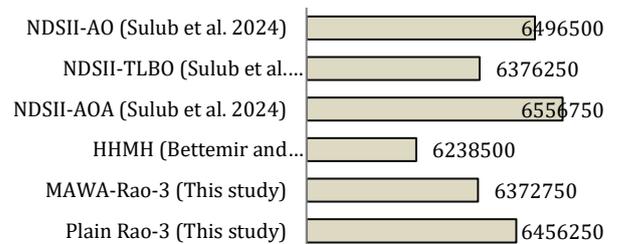
Sr. No	Sulub et al. 2024				(This study)			
	NDSII-TLBO		NDSII-AO		NDSII-AOA		MAWA-Rao-3	
	PCT	PCC	PCT	PCC	PCT	PCC	PCT	PCC
1	523	6458000	521	6496500	537	6556750	530	6432750
2	535	6394250	541	6542750	480	6835000	545	6372750
3	537	6412500	526	6613250	523	6566000	548	6375750
4	538	6467850	523	6655250	510	6595750	556	6374000
5	539	6435250	554	6538500	509	6639000	591	6379000
6	537	6593570	537	6562000	504	6642250	552	6475000
7	541	6376250	520	6722000	487	6755750	571	6424250
8	530	6544520	520	6664000	515	6582000	561	6469750
9	539	6537550	524	6657000	490	6737750	548	6525750
10	528	6697650	520	6497000	499	6689000	579	6399250
NOP	100		100		100		200	
NOI	100		200		200		200	
NFE	40000		40000		40000		40000	

Note: Teaching learning-based optimization (TLBO), Aquila optimizor (AO)

A direct comparison of scheduling efficiency with the previously proposed model by Bettemir and Birgonul (2023) is not feasible, as they only presented the desired solution without a detailed schedule in table format. Therefore, to ensure a fair comparison, the MAWA-Rao-3 algorithm was evaluated against the NDSII-TLBO, NDSII-AOA, and NDSII-AO algorithms. Figure 4, which visualizes data from Tables 4 and 5, highlights the suitability of MAWA-Rao-3 in achieving shorter project durations. Simply put, when minimizing project duration is prioritized over cost, the approximate Pareto front solutions produced by MAWA-Rao-3 are comparable to those obtained by the other algorithms.



(a) Project time (days)



(b) Project cost (\$)

Figure 4. Desired approximate Pareto front solutions of TCTP for 146-activity project

### 5. Performance Metrics for TCTP Problems

The literature does not provide a standardized performance metric for evaluating multi-objective optimization algorithms, given their inherent complexity compared to single-objective problems. Various quality indicators, such as convergence and diversity, have been introduced (Basseur and Zitzler, 2006; Hamdy et al. 2016). This paper used the Hypervolume (HV) metric for evaluation, each representing different performance aspects. This concept is illustrated in Figure 5 and is supported by findings in the literature (Senouci and Mubarak, 2016).

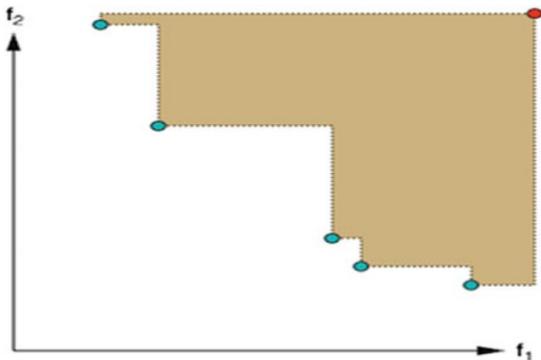


Figure 5. HV in case of bi-objective minimization problems

$$HV = \int_R \prod_{i=1}^m (f_i^{ref} - f_i(x)) dx \tag{8}$$

Where:

*R*: the dominant region defined by the Pareto front.

*m*: the number of objectives

$f_i^{ref}$ : the reference point for the *i*-th objective, usually set slightly worse than the worst solution.

$f_i(x)$ : the value of *i*-th objective for solution *x*.

Figure 6 presents a comparative analysis of algorithms applied to projects with 81 and 146 activities. The comparison includes NDSII-TLBO, NDSII-AOA, NDSII-AO, and the standard Rao-3 algorithms. Based on the Hypervolume (HV) metric, MAWA-Rao-3 exhibits comparable performance, underscoring its effectiveness in producing a well-distributed and comprehensive approximation of the Pareto front. This demonstrates the suitability of MAWA-Rao-3 for solving time-cost trade-off problems (TCTP).

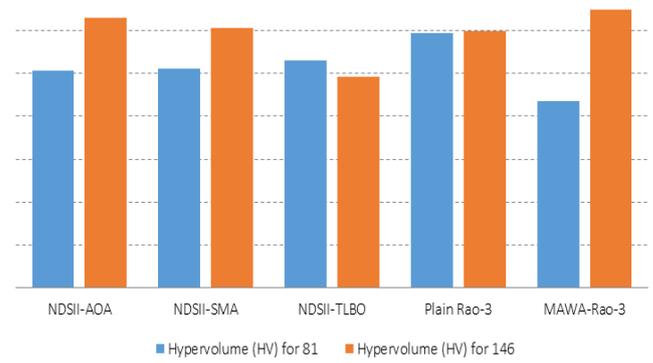


Figure 6. Performance metrics comparison of proposed algorithms.

### 6. Conclusion

This study introduced a novel multi-objective optimization model, MAWA-Rao-3, which integrates the Modified Adaptive Weight Approach (MAWA) with the parameter-less Rao-3 metaheuristic algorithm, to address time-cost trade-off problems (TCTPs) in construction project management. Unlike conventional weight assignment strategies, MAWA adaptively adjusts weight factors based on the evolving fitness characteristics of each solution, enhancing the algorithm’s ability to balance exploration and exploitation during the optimization process.

The performance of the proposed model was validated through two benchmark construction project scenarios comprising 81 and 146 activities, respectively, sourced from the existing technical literature. These test cases represent medium-scale, real-world projects and encompass varying levels of complexity. The obtained results were benchmarked against those generated by other established models that employ metaheuristic strategies for TCTP optimization, including methods that approximate the Pareto front.

The empirical findings demonstrated that the MAWA-Rao-3 algorithm effectively generates high-quality Pareto-optimal solutions, offering a more balance between project time and cost objectives. Notably, the model yielded a broader and more diverse set of non-dominated solutions compared to conventional Rao-3 and other existing approaches. This indicates that the MAWA component significantly contributes to the applicability and adaptability of the search process.

Furthermore, due to its parameter-less nature, the Rao-3 framework facilitates easy implementation without the need for extensive hyperparameter tuning. Overall, the integration of MAWA with Rao-3 provides a computationally efficient and reliable approach for solving complex TCTPs.

While this uniform weighting strategy simplifies the implementation and maintains computational efficiency, it overlooks the inherent diversity among

solutions. Specifically, candidate solutions may exhibit distinct fitness characteristics and varying levels of proximity to the Pareto front, which are not captured when a homogeneous weighting scheme is applied. Consequently, although MAWA serves as a practical tool in multi-objective optimization, its effectiveness may be constrained by its limited capacity to adaptively respond to the dynamic nature of the solution landscape.

Future work may extend this framework by incorporating additional objectives such as quality, environmental impact, or risk, and evaluating the model's performance on larger-scale projects or under uncertainty. Additionally, hybridization with a non-dominated sorting or enhancement with learning mechanisms could further improve convergence behavior and solution diversity.

The case study problems can be obtained from the following link:

[https://drive.google.com/drive/folders/1R5w6SUZPk\\_n6obihwvgvZ9MBpMqKRzKCS?usp=sharing](https://drive.google.com/drive/folders/1R5w6SUZPk_n6obihwvgvZ9MBpMqKRzKCS?usp=sharing)

#### Author Contribution

Mohammad Azim Eirgash: Conducted the analysis and interpretation, edited the manuscript, developed and implemented the modeling process, performed the literature review, and led the writing of the article.

Yusuf Baltaci: Supervised the research, provided critical revisions and suggestions, contributed to the methodological framework, and supported the finalization and approval of the manuscript.

#### Conflict of Interest

The authors declare that there is no conflict of interest regarding the publication of this article.

#### Data Availability Statement

The data, models, and codes that support the findings of this study are available from the corresponding author upon reasonable request.

#### References

- Abualigah. L, Diabat. A, Mirjalili. S, Elaziz. M.A, Gandomi. A.H, (2021a). The arithmetic optimization algorithm, *Computer Methods in Applied mechanics and Engineering*, 376, 113609. <https://doi.org/10.1016/j.cma.2020.113609>
- Abualigah. L, Yousri. D, Abd Elaziz. M, Ewees. A.A, Al-qaness. M. A., Gandomi. A. H. (2021b). Aquila optimizer: A novel meta-heuristic optimization algorithm, *Computers & Industrial Engineering*, 157,107250. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2021.107250>

- Afshar, A., Ziaraty, A., Kaveh. A and Sharifi. F. (2009). Nondominated archiving multicolumn ant algorithm in time-cost trade-off optimization. *Journal Construction Engineering and Management*, 135, 7, 668-674.
- Agarwal, A.K., Chauhan, S.S., Sharma, K. et al. (2024), "Development of time-cost trade-off optimization model for construction projects with MOPSO technique", *Asian Journal Civil Engineering*. 25, 4529-4539, <https://doi.org/10.1007/s42107-024-01063-3>
- Albayrak, G. (2020). "Novel hybrid method in time-cost trade-off or resource-constrained construction projects". *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 44 (4), 1295-1307. <https://doi.org/10.1007/s40996-020-00437-2>
- Aminbakhsh, S., and Sönmez, R. (2016). Applied discrete particle swarm optimization method for the large-scale discrete time-cost trade-off problem." *Expert System with Applications*, 51, 177-185.
- Basseur, M., Zitzler, E. (2006). A preliminary study on handling uncertainty in indicator-based multiobjective optimization. In: *Lecture Notes in Computer Science*. Springer Berlin Heidelberg. 3907, p. 727-39. [https://doi.org/10.1007/11732242\\_71](https://doi.org/10.1007/11732242_71).
- Bettemir, Ö. H. (2009). Optimization of time-cost-resource trade-off problems in project scheduling using meta-heuristic algorithms. Doctoral dissertation, Middle East Technical University, Turkey.
- Bettemir, Ö. H., and Birgönül, T. (2016). Network analysis algorithm for the solution of discrete time-cost trade-off problem. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 21, No. 4, pp. 1047-1058.
- Bettemir, Ö.H. and Birgonul, M.T. (2023), "Solution of discrete time-cost trade-off problem with adaptive search domain", *Engineering, Construction and Architectural Management*, 0969-9988. <https://www.emerald.com/insight/0969-9988.htm>
- Deb., K., Pratap, A., Agarwal, S., and Meyarivan, T. (2002). "A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II." *IEEE Transaction and Evolution Computing*, 6(2), 182-197.
- Dede, T., (2018). Decision-Making Process Techniques Used in the Optimization of Construction Projects, *Engineering Sciences, NWSAENS*, 13, 2, 128-136.

- Eirgash, M. A., and Dede, T. (2018). "A multi-objective improved teaching learning-based optimization algorithm for time-cost trade-off problems." *Journal of Construction Engineering, Management and Innovation*, 1(3), 118-128.
- Eirgash, M. A., Toğan, V., and Dede, T. (2019). "A multi-objective decision-making model based on TLBO for the time-cost trade-off problems." *Structural Engineering and Mechanics*, 71(2), 139-151
- Eirgash, M.A. (2025). Influence of jumping rate on opposition-based jaya algorithm for discrete time cost trade-off optimization problems, *Uludağ University Journal of The Faculty of Engineering*, 30(1), 35-50.
- Elbeltagi, E., Hegazy, T., and Grierson, D. (2005). "Comparison among Five Evolutionary-Based Optimization Algorithms." *Advanced Engineering Informatics*, Vol. 19, pp. 43-53.
- Eshtehardian, E., Afshar, A., and Abbasnia, R. (2008). "Time-cost optimization: using GA and fuzzy sets theory for uncertainties in cost." *Construction Management and Economics*, Vol. 26, No. 7, pp.
- Feng, C-W., Liu, L., and Burns, S. A. (1997) "Using genetic algorithms to solve construction time-cost trade-off problems." *Journal of Computing in Civil Engineering*, Vol. 11, No. 3, pp.184-189.
- Hamdy, M., Nguyen, A.T., Hensen, J.L.M. (2016). A performance comparison of multi-objective optimization algorithms for solving nearly-zero-energy-building design problems. *Energy Building*;121(6):57-71.  
<https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.03.035>.
- Jia, H. Rao, H. Wen., C. Mirjalili, S. (2023). "Crayfish optimization algorithm", *Artificial Intelligence Review*, <https://doi.org/10.1007/s10462-023-10567-4>
- Kelly, J. E. (1961). "Critical path planning and scheduling: Mathematical basis" *Operational Research*, 9(3), 167-179.
- Kim, I.Y. and de Week, O.L.(2005). Adaptive weighted-sum method for bi-objective, *Journal of Construction Division*, 91(1), 45-68, 1965
- Kumar, K.M., Agrawal, D., Vishwakarma, V.K. Eirgash, M.A (2024). Development of time-cost trade-off optimization model for Indian highway construction projects using non-dominated sorting genetic algorithm-II methodology. *Asian Journal of Civil Engineering*. 25, 5975-5988, <https://doi.org/10.1007/s42107-024-01157-y>
- Li, S, Chen., H, & Wang., M. (2020) Slime mould algorithm: a new method for stochastic optimization. *Future Generation Computer Systems*. <https://doi.org/10.1016/j.future.2020.03.055>
- Liu, L., Burns, S., and Feng, C. (1995). "Construction time-cost trade-off analysis using LP/IP hybrid model." *Journal of Construction Engineering and Management*, 121(4), 446-454.
- Meyer, W.L., Shaffer, L.R. (1965). Extending CPM for Multifirm Project Time-Cost Curves. *Optimization: Pareto front generation*. *Structural and Multidisciplinary Optimization* 29(2), pp. 149-158.
- Parveen, S. ve Saha, S. K., (2012). GA Based Multi-Objective Time-Cost Optimization in a Project with Resources Consideration, *International Journal of Modern Engineering Research, IJMER*, 2, 6, 2012, 4352-4359.
- Rao, R. V. (2020). Rao algorithms: Three metaphor-less simple algorithms for solving optimization problems. *international journal of industrial engineering computations*, 11 (1): 107-130. <https://doi.org/10.5267/j.ijiec.2019.6.002>.
- Rao, R. V., & Keesari, H. S. (2020). Rao algorithms for multi objective optimization of selected thermodynamic cycles. *Engineering with Computers*. <https://doi.org/10.1007/s00366-020-01008-9>.
- Rao, R. V., Savsani, V. J., and Vakharia, D. P. (2011). "Teaching-learning-based optimization: a novel method for constrained mechanical design optimization problems." *Computer Aided Design*, Vol. 43, No. 3, pp. 303-315.
- Senouci AB, Mubarak SA. (2016). Multiobjective optimization model for scheduling of construction projects under extreme weather. *Journal of Civil Engineering Management*, 22(3): 373-81.
- Sönmez, R., and Bettemir, O. H. (2012). "A hybrid genetic algorithm for the discrete time-cost trade-off problem." *Expert Systems with Applications*, Vol. 39, No. 13, pp. 11428-11434.
- Sulub, A.S., Eirgash, M.A. & Toğan, V. (2024). An arithmetic optimization algorithm based on opposition jumping rate for time cost trade-off optimization problems. *Asian Journal of Civil Engineerin*, 26, 867-886 <https://doi.org/10.1007/s42107-024-01227-1>

Toğan, V. and Eirgash, M.A. (2019). Time-Cost Trade-off Optimization of Construction Projects using Teaching Learning Based Optimization. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 23(1), 10-20. <https://doi.org/10.1007/s12205-018-1670-6>

Toğan, V. Berberoğlu, N. Başağa, H.B. (2020). New adaptive weight formulations for time-cost optimization. *Structures*, 28, 2291-2299.

Vanhoucke, M., Debels, D. (2007). The discrete time/cost trade-off problem: extensions and heuristic procedures. *Journal of Scheduling*, 10(5), 311-326.

Ya-ping, K. and Ying, X.(2006). Construction Time-Cost Trade-off Analysis Using Ant Colony Optimization Algorithm," 2006 International Conference on Management Science and Engineering, Lille, France, pp. 2039-2044, doi: 10.1109/ICMSE.2006.314128.

Zhang, H., and Xing, F. (2010). "Fuzzy-multi-objective particle swarm optimization for time-cost-quality trade-off in construction. "Automation in Construction, 19, 8, 1067-1075.

Zhang, Y., and Ng, S. (2012). "An ant colony system based decision support system for construction time-cost optimization." *Journal of Civil Engineering and Management*, Vol. 18, No. 4, pp. 580-589

Zheng, D. X. M., Ng, S. T., and Kumaraswamy, M. M. (2004). "Applying a genetic algorithm-based multiobjective approach for time-cost optimization." *Journal of Construction Engineering and Management*, 130, 2, 168 - 176.

Zheng, D., Ng, S., and Kumaraswamy, M. (2005). "Applying Pareto ranking and niche formation to genetic algorithm-based multiobjective time-cost optimization." *Journal of Construction Engineering and Management*, 131, 1. 81-91.

## COMPARATIVE ANALYSIS OF MECHANICAL PROPERTIES OF EPOXY COATED AND UNCOATED REINFORCEMENT BAR

Kerem AYBAR<sup>1\*</sup>, Serdal ÜNAL<sup>2</sup>, Ömer KARAGÖZ<sup>3</sup>, Mehmet CANBAZ<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Müh. ve Mim. Fak., Malzeme ve Metalürji Müh. Bölümü, Eskişehir  
Cep Tel : +90 544 870 87 67

kaybar@ogu.edu.tr, ORCID No: <https://orcid.org/0000-0001-6347-843X>

<sup>2</sup>Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Müh. ve Mim. Fak., İnşaat Müh. Bölümü, Eskişehir  
serdalunall@gmail.com, ORCID No: <https://orcid.org/0000-0002-5200-9969>

<sup>3</sup>Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Müh. ve Mim. Fak., İnşaat Müh. Bölümü, Eskişehir  
okaragoz@ogu.edu.tr, ORCID No: <https://orcid.org/0000-0002-3755-8345>

<sup>4</sup>Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Müh. ve Mim. Fak., İnşaat Müh. Bölümü, Eskişehir  
mcanbaz@ogu.edu.tr, ORCID No: <https://orcid.org/0000-0002-0175-6155>

Keywords	Abstract
Epoxy Coating Reinforcing Steel Adherence Mechanical Properties Post-installed Rebar	<i>This study aims to enhance the mechanical and bond performance of reinforcing bars embedded in concrete by applying epoxy coatings as a protective layer against external effects. For this purpose, epoxy-coated and uncoated rebars with a diameter of 10 mm and length of 30 cm were embedded into 15×15×15 cm concrete blocks using two different methods: cast-in-place and post-installed with chemical anchoring after curing. Each specimen contained a single rebar, and mechanical tests including yield strength, tensile strength, fracture strength, reduction of area, elongation at break, toughness, modulus of elasticity, and adherence strength were conducted. The results showed that epoxy coating slightly improved mechanical properties such as yield and tensile strength, while enhancing toughness and maintaining sufficient ductility. Although a slight decrease in stiffness and plastic strain capacity was observed, the coating increased the reliability of yield behavior. Most notably, adherence strength was significantly improved by epoxy coating, particularly in post-installed specimens, where an increase of over 30% was recorded. Overall, epoxy coating proved to be an effective solution for improving both mechanical integrity and adhesion performance of reinforcing bars, especially in conditions where chemical durability and long-term performance are critical.</i>

## EPOKSİ KAPLAMALI VE KAPLAMASIZ DONATILARIN MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN KARŞILAŞTIRMALI ANALİZİ

Anahtar Kelimeler	Öz
Epoksi Kaplama Donatı Çeliği Aderans Mekanik Özellikler Donatı Filiz Ekimi	<i>Bu çalışma, donatı çeliğinin dış etkilere karşı korunmasını sağlamak ve beton içindeki mekanik ve aderans performansını artırmak amacıyla epoksi kaplama uygulamasını incelemektedir. Bu amaçla, 10 mm çapında ve 30 cm uzunluğundaki epoksi kaplı ve kaplamasız filizler, 15×15×15 cm boyutlarındaki beton bloklara iki farklı yöntemle yerleştirilmiştir: döküm sırasında doğrudan ve kür sonrası kimyasal dübelle sonradan ekilerek. Her numunede bir adet filiz bulunmakta olup; akma dayanımı, çekme dayanımı, kopma dayanımı, kesit daralması, kopma uzaması, tokluk, elastisite modülü ve aderans dayanımı gibi mekanik testler gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar, epoksi kaplamanın akma ve çekme dayanımı gibi mekanik özellikleri artırdığını, tokluğu iyileştirdiğini ve yeterli süneklik sağladığını ortaya koymuştur. Rijitlikte ve plastik şekil değiştirme kapasitesinde azalma gözlenmiş olsa da, kaplama akma davranışının güvenilirliğini artırmıştır. En dikkat çekici sonuç ise aderans dayanımındaki artış olmuş, özellikle sonradan ekilen filizlerde %30'un üzerinde iyileşme sağlanmıştır. Genel olarak, epoksi kaplama, kimyasal dayanım ve uzun ömürlülüğün önemli olduğu koşullarda donatıların mekanik bütünlüğünü ve aderans performansını artıran etkili bir çözüm sunmaktadır.</i>



Bu eser, Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>) hükümlerine göre açık erişimli bir makaledir.

This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

---

Research Article		Research Article	
Submission Date	: 28.07.2025	Submission Date	: 28.07.2025
Acceptation Date	: 29.09.2025	Accepted Date	: 29.09.2025

---

\* Corresponding author: [kaybar@ogu.edu.tr](mailto:kaybar@ogu.edu.tr)  
<https://doi.org/10.31796/ogummf.1752655>

---

## 1. Introduction

Reinforced concrete is one of the most widely used construction materials due to its excellent compressive strength and versatility. However, concrete alone has limited tensile capacity, which necessitates the incorporation of reinforcing steel bars (rebars) to carry tensile and flexural stresses within structural elements (Mast, Dawood, Rizkalla and Zia, 2008; Amirtharaj and Rose, 2025). These rebars significantly improve the ductility and load-bearing capacity of concrete members, allowing structures to sustain higher stresses and undergo controlled deformation before failure (Rauf, Whaib and Elwi, 2025). Despite their vital role, reinforcing steels are vulnerable to environmental degradation, primarily corrosion caused by exposure to moisture, chlorides, carbonation, and other aggressive agents (Fuhaid and Niaz, 2022). Corrosion of rebars leads to cross-sectional loss, cracking, and spalling of the concrete cover, severely reducing the service life and safety of reinforced concrete structures (Yadeta, Siriwardane, Mohammed and Lemu, 2024). Thus, enhancing the durability of reinforcing steel and mitigating corrosion effects remain critical challenges in civil engineering and materials science.

In recent decades, epoxy coatings have gained prominence as an effective method to protect reinforcing bars against corrosive environments (Yan Deng, Wang, Xue, Hua and Chen, 2022). Epoxy coatings consist of polymer-based resins that create a continuous, impermeable barrier on the steel surface, preventing the ingress of water, oxygen, and aggressive ions responsible for corrosion initiation and propagation (Ou, Wang and Lu, 2021). Beyond corrosion resistance, epoxy coatings can improve the surface quality by filling micro-voids and smoothing out irregularities, which positively affects the bond between the rebar and surrounding concrete (Tang, Wang, Hilman, Chen and Du, 2025). This dual functionality makes epoxy-coated rebars particularly suitable for use in harsh exposure conditions such as marine infrastructures, chemical plants, and bridge decks, where durability demands are exceptionally high. Furthermore, the application of epoxy coatings is often cost-effective compared to more invasive corrosion protection techniques, promoting their widespread use in both new construction and rehabilitation projects (Aljibori, Alamiery and Kadhum, 2023).

While the primary function of epoxy coatings is corrosion protection, there is growing interest in understanding how these coatings influence the mechanical behavior of reinforcing bars (Sørensen, Kiil, Dam-Johansen and Weinell, 2009). Mechanical properties such as yield strength, ultimate tensile strength, elongation, toughness, and adherence strength with concrete are crucial for the reliable performance of reinforced concrete elements under service and ultimate loads (Mujalli, Dirar, Mushtaha, Hussien and Maksoud, 2022). Some studies have reported that epoxy coatings can slightly enhance tensile and yield strengths by reducing surface defects and stress concentrations, while others have observed minor reductions in stiffness or plastic deformation capacity due to the coating's presence (Liu and Vipulanandan, 2005). Additionally, bond characteristics between epoxy-coated rebars and concrete or grout can be altered, impacting load transfer and anchorage performance (Zhou and Qiao, 2018). Comprehensive investigation of these effects is essential to optimize coating formulations and application methods, ensuring that protective measures do not compromise structural integrity but rather contribute to the longevity and safety of reinforced concrete structures (Okokpujie, Tartibu, Musa-Basheer and Adeoye, 2024).

Although numerous studies have examined the corrosion protection performance of epoxy-coated rebars, fewer works have systematically addressed their combined effect on mechanical properties and bond behavior, particularly under different installation methods. Previous research has reported varying outcomes: some studies highlighted improvements in tensile strength and bond due to surface smoothing and void filling (Wang et al, 2023; Singh and Ghosh, 2005), while others noted reductions in stiffness or ductility linked to the coating layer (Natino et al, 2021; Chen et al., 2010). These inconsistencies underline the need for further experimental investigation and comparative analysis. By building upon and contrasting our findings with these earlier studies, the present work aims to provide a more comprehensive understanding of the dual role of epoxy coatings in enhancing both mechanical integrity and bond performance.

The novelty of this study lies in its dual focus on both the installation method and the mechanical-bond behavior of epoxy-coated rebars. While most previous studies have primarily examined the corrosion protection

performance of epoxy coatings, limited attention has been given to their influence on bond characteristics in different application scenarios. In particular, the comparison between cast-in-place and post-installed rebars with chemical anchoring has not been thoroughly investigated in the literature. By evaluating adherence strength, tensile properties, and microstructural features (SEM) simultaneously, this research provides a comprehensive understanding of how epoxy coating contributes not only to corrosion resistance but also to enhanced mechanical and bond performance.

This study provides a comprehensive experimental evaluation of how epoxy coating not only enhances the corrosion resistance of reinforcing bars but also affects their mechanical properties and bond performance with concrete. While numerous studies exist on the protective effects of epoxy coatings, research comparing the impact of coating in different installation methods (cast-in-place and post-installed with chemical anchoring) on the mechanical and bond behavior of reinforcement is limited. In this context, our work addresses this gap by thoroughly investigating the combined influence of coating and installation technique on rebar performance. The findings offer valuable insights for optimizing epoxy coating applications and designing durable reinforced concrete structures.

**2. Materials and Method**

**2.1. Materials**

In production, CEM IV/B (P) 32.5 N type pozzolanic cement containing trans was used as an additive produced by ÇİM-SA cement factories. The properties of the cements were obtained from the manufacturer and are shown in Table 1 in terms of chemical, physical, and mechanical properties.

Table 1. Properties of cement used in production

SiO <sub>2</sub> , %	38.00	Density, g/cm <sup>3</sup>	2.87
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , %	9.68	Specific surface, cm <sup>2</sup> /g	4450
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , %	2.91	Initial setting, min	190
CaO, %	32.20	Final setting, min	270
MgO, %	1.64	Expansion, mm	1.00
K <sub>2</sub> O, %	1.14	Compressive Strength, MPa	
Na <sub>2</sub> O, %	1.00	7 days	20.10
SO <sub>3</sub> , %	2.06	28 days	30.10

Tap water was used as mixed water. The chemical analysis of the mixed water is shown in Table 2.

Table 2. Properties of mix water

Chemical Properties, mg/l					
Al	Cu	Ni	NO <sub>3</sub>	Fe	K
0.032	0.016	2.01	11.1	0.008	6.8
Physical Properties					
Conductivity, µS/cm		Hardness, Fd <sup>0</sup>		Ph	
522		26.9		7.7	

Two different types of crushed stone sourced from SELKA crushed stone quarries were used in the concrete produced. Table 3 shows the sieve analysis of the aggregates used.

Table 3. Granulometry of crushed stones

Sieve mesh size, mm	Sieve passing, %	Sieve passing, %
16	100	100
11.2	100	87
8	100	2
4	90	0
2	63	0
1	46	0
0.5	32	0
0.25	22	0
0.125	15	0
0.063	10	0
Fineness Modulus	2,48	6,01
Fine Materials %	6	6

S420 reinforced concrete steel was used as reinforcement. The material properties are shown in Table 4.

Table 4. Properties of S420

Yield Strength, MPa	≥420	C <0.25
Tensile Strength, MPa	≥500	S <0.05
Elongation at break, %	10<	P <0.05

Epoxy is a two-component, epoxy-polyamine-based material. The material was obtained from DY0. The material properties are shown in Table 5.

Table 5. Properties of epoxy

Density, g/cm <sup>3</sup>	1.02-1.2	Flash point	>21°C
Solid part, %	50 - 61	Epoxy/hardener	2

**2.1. Method**

Ø10 mm diameter rebars were cut to a length of 30 cm. As shown in Figure 1, half of these rebars were coated with epoxy, while the other half remained uncoated.



Figure 1. Coated rebars used in production

Concrete mixtures were prepared using the mix proportions given in Table 6 and cast into 15×15×15 cm molds. The concrete was designed with a water-to-cement ratio (w/c) of 0.67 using CEM IV/B (P) 32.5 N pozzolanic cement. Aggregates consisted of crushed sand (0–4 mm) and crushed stone (4–16 mm) with the gradation shown in Table 3. No chemical admixtures

were used. The mixing procedure followed EN 196-1: cement and aggregates were dry-mixed for 2 minutes at low speed (60 rpm), followed by gradual addition of water and mixing for 2 minutes at medium speed (120 rpm). After a rest period of 1 minute, mixing continued for another 2 minutes at medium speed to ensure homogeneity. Concrete cubes were prepared in accordance with EN 12390-2 and EN 12390-3. Curing was carried out in a controlled environment at  $20 \pm 2$  °C and  $95 \pm 5\%$  relative humidity until testing age. The average 28-day compressive strength was measured as 30.1 MPa, with an indirect tensile strength of 2.8 MPa and a static modulus of elasticity of 28.5 GPa.

Table 6. Mix ratio of concrete, kg/m<sup>3</sup>

Cement	300	Crushed sand	1100
Water	200	Crushed stone	750

For each test condition (coated/uncoated, cast-in-place/post-installed), three replicate specimens were tested. Reported values represent the mean of three measurements, with standard deviations provided in the results section.

As illustrated in Figure 2, half of the Ø10 rebars, both coated and uncoated, were embedded in the concrete during casting, while the other half were post-installed after the curing process. One day after casting, the specimens were demolded and placed in a standard curing environment. The cube specimens in which no rebars were embedded during casting were drilled after reaching 28-day strength, and the remaining coated and uncoated rebars were installed using epoxy-based chemical anchors. Steel rebars with a nominal diameter of 10 mm and total length of 300 mm were used. For pull-out tests, the effective embedment length was set to 80 mm. Epoxy coating was applied after mechanical surface preparation (sandblasting). The bars were coated using a dip-coating technique with an epoxy-polyamine resin (DYO, Türkiye). The average coating thickness was measured as 200–250 µm using a coating thickness gauge. After coating, the rebars were cured at ambient laboratory conditions ( $20 \pm 2$  °C, RH 60%) for 7 days before use.



Figure 2. Cast-in and Post-installed Rebars

The produced reinforced concrete specimens were then subjected to a pull-out test to determine their adherence strengths. After the adherence tests, the rebars were extracted from the concrete elements and, as shown in Figure 3, tensile tests were conducted to examine changes in their mechanical properties. Pull-out tests were conducted using a 100 kN capacity universal testing machine in displacement-controlled mode at a rate of 0.5 mm/min, following EN 1881 and ASTM C900. A preload of 0.5 kN was applied to ensure alignment. Displacement and slip were monitored using LVDTs placed at the loaded and free ends of the rebar. Tensile tests were conducted according to EN ISO 6892-1 at a strain rate of  $0.002 \text{ s}^{-1}$ . The rib geometry of the reinforcement followed EN 10080 specifications. After the tensile test, microstructure evaluations were performed using SEM images of samples taken from epoxy-coated and uncoated reinforcement bars.



Figure 3. Tensile test under laboratory conditions.

In this study, research and publication ethics were compiled with.

### 3. Results and Discussion

Figure 4 compares the yield strength, tensile strength, and rupture strength values obtained from tensile tests conducted on epoxy-coated and uncoated rebars. The results indicate that the epoxy coating does not negatively affect the mechanical performance of the reinforcement; on the contrary, it provides a slight enhancement. The average yield strength of uncoated rebars was measured as 523.89 MPa, whereas epoxy-coated rebars exhibited a 2.9% increase, reaching 539.16 MPa. Similarly, the ultimate tensile strength of the coated rebars was found to be slightly higher (627.18 MPa) than that of the uncoated ones (622.08 MPa), indicating an improvement of approximately 0.8%. This improvement suggests that the protective film formed by the epoxy coating may reduce surface defects and stress concentrations, leading to a more uniform stress distribution. A similar trend was observed in rupture strength, increasing from 579.54 MPa in uncoated rebars to 591.8 MPa in epoxy-coated rebars. These findings demonstrate that epoxy coating not only provides protection against corrosion but also

contributes positively to the preservation of mechanical integrity.

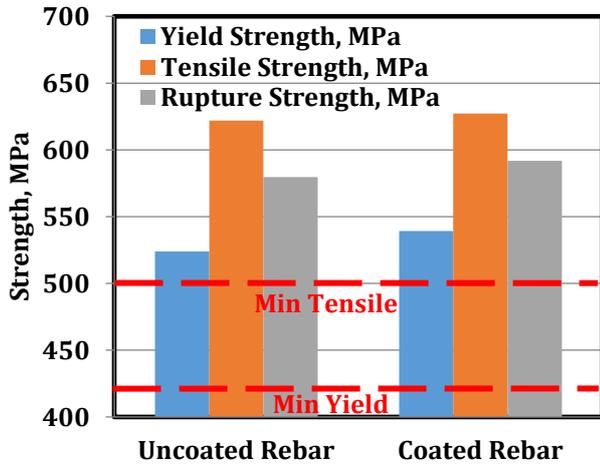


Figure 4. Strengths of rebars in reinforced concrete

Figure 5 compares the ultimate-to-yield strength ratio ( $R_m/R_e$ ) and the ratio of actual yield strength to nominal yield strength ( $R_{e act}/R_{e nom}$ ) for epoxy-coated and uncoated rebars. The  $R_m/R_e$  ratio is a key indicator of a material's ductility and its tendency to undergo plastic deformation. For uncoated rebars, this ratio was 1.187, whereas it slightly decreased to 1.163 for epoxy-coated rebars. This slight reduction suggests that the coating results in a maximum strength value closer to the yield point, potentially indicating a marginally lower plastic deformation capacity. On the other hand, the  $R_{e act}/R_{e nom}$  ratio was higher in coated rebars (1.284) compared to uncoated ones (1.247). This increase indicates that the epoxy coating contributes to achieving a higher actual yield strength relative to the nominal characteristic value. This can be attributed to the coating's ability to isolate surface imperfections, enhancing stress transfer efficiency and improving the predictability of performance under load. Overall, while the epoxy coating may slightly reduce the plastic deformation potential, it improves the reliability and consistency of yield strength performance.

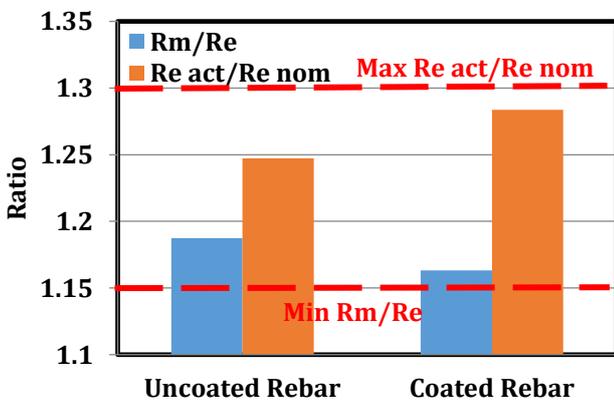


Figure 5. Strength ratios of rebars under different loading conditions

Figure 6 presents a comparison of the percentage reduction of area and total elongation at break obtained from tensile tests on epoxy-coated and uncoated rebars. The results indicate that the epoxy coating has a limited and somewhat contrasting influence on ductility. While the reduction of area for uncoated rebars was 43.75%, this value decreased to 39.16% for epoxy-coated rebars. This reduction suggests that the epoxy coating may slightly restrict necking behavior by increasing surface friction, thereby leading to a more distributed rather than localized deformation. On the other hand, the total elongation at break showed a slight increase in coated rebars (17%) compared to uncoated ones (16.5%). This implies that the coating may promote more uniform stress distribution during elastic deformation, thus slightly enhancing ductility. Overall, the epoxy coating does not cause a significant negative effect on ductility; instead, it alters the deformation characteristics by affecting the distribution rather than the magnitude of plastic strain.

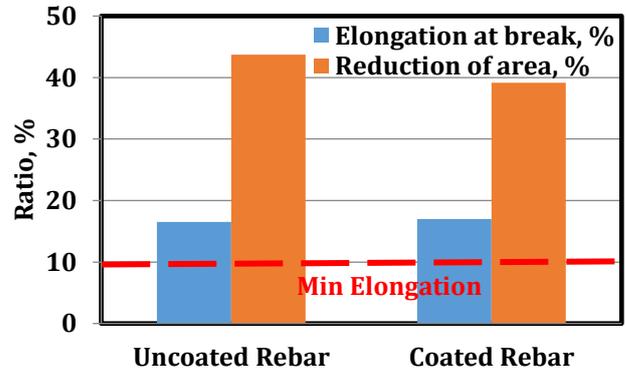


Figure 6. Reduction of area and elongation of rebars

Figure 7 compares the toughness and modulus of elasticity values obtained from tests conducted on epoxy-coated and uncoated rebars. The results indicate that the epoxy coating contributes positively to the energy absorption capacity (toughness) of the reinforcement, while slightly reducing its stiffness (modulus of elasticity). The toughness of the uncoated rebar was measured at 105.54 Nmm/mm<sup>3</sup>, whereas the epoxy-coated rebar showed a 2.2% increase, reaching 107.91 Nmm/mm<sup>3</sup>. This improvement suggests that the epoxy coating may reduce stress concentrations at the microstructural level, thereby slowing crack propagation and enabling the rebar to absorb more energy before failure. On the other hand, the modulus of elasticity of the coated rebar was found to be 194.77 GPa, approximately 8% lower than that of the uncoated rebar (211.60 GPa). This reduction implies that the coating slightly limits the stiffness of the reinforcement in the elastic deformation range, allowing for greater deformability and contributing to a more ductile behavior. In conclusion, the epoxy coating enhances the toughness of the rebar while moderately decreasing its elastic stiffness.

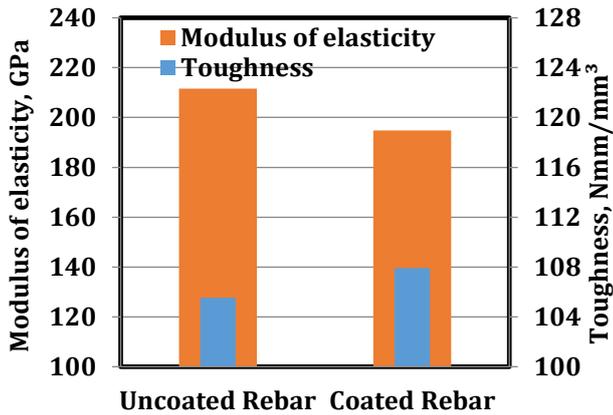


Figure 7. Toughness and modulus of elasticity of rebars

Figure 8 presents the adherence strength results obtained from tests conducted on four different types of rebar configurations. The data clearly show that both the presence of epoxy coating and the method of rebar installation significantly influence bond performance. For cast-in-place rebars, the uncoated samples exhibited an adherence strength of 13.88 MPa, whereas the epoxy-coated counterparts demonstrated a 3.2% increase, reaching 14.32 MPa. This improvement is likely due to the epoxy coating enhancing mechanical interlock and adhesion at the steel-concrete interface by filling microvoids and increasing surface roughness. In post-installed rebars, the effect of epoxy coating was even more pronounced: while uncoated samples achieved an adherence strength of 6.71 MPa, the coated ones reached 8.84 MPa an increase of approximately 31.7%.

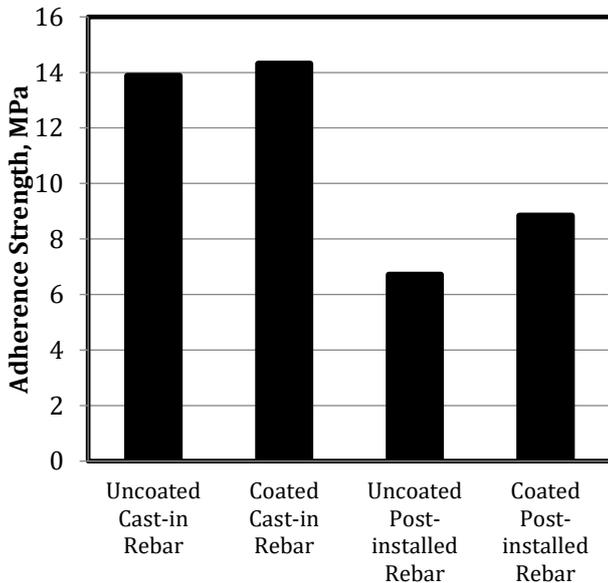


Figure 8. Adherence strength of rebars

This substantial improvement suggests that in chemical anchoring systems, the epoxy coating significantly enhances the bond by improving the interaction between the rebar and the anchoring resin. Overall,

epoxy coating improves adherence strength in both cast-in-place and post-installed systems, with a notably greater effect observed in post-installed applications.

The findings of this study are consistent with and extend prior research on the effects of epoxy coating on reinforcing steel. For example, Zhou and Qiao (2018) reported that epoxy-coated rebars in ultra-high performance concrete exhibited improved bond behavior due to the filling of surface voids and enhanced interfacial adhesion, which aligns with the significant bond strength increase observed in our post-installed specimens. Similarly, Tang et al. (2025) highlighted that polymer-based coatings can delay crack propagation and improve fracture performance, which supports the toughness enhancement recorded in this study. On the other hand, Liu and Vipulanandan (2005) and Sørensen et al. (2009) observed a slight reduction in stiffness and deformation capacity due to the presence of epoxy layers, which is in agreement with our findings of decreased modulus of elasticity and marginal reduction in plastic strain potential. These comparisons demonstrate that our results are consistent with existing knowledge while advancing the literature by explicitly addressing the combined effects of epoxy coating and installation method, an aspect that has received limited attention so far.

Figure 9 presents SEM micrographs of the steel-concrete interface and reinforcement surfaces after testing, comparing corrosion-free and corroded rebars at different magnifications. In the corrosion-free samples, the epoxy coating formed a continuous and compact barrier, ensuring strong adhesion with the concrete matrix and maintaining surface integrity. In contrast, corroded rebars exhibited interfacial gaps, microcracks, and evident surface deterioration, indicating that bond failure primarily occurred at the steel-concrete interface. These microstructural observations confirm the critical role of epoxy coating in limiting interfacial degradation and reducing corrosion-induced damage. By providing a smooth and intact protective film, epoxy enhances bond quality and preserves long-term adherence performance, supporting the mechanical test results and highlighting its effectiveness, particularly under aggressive conditions where uncoated rebars are highly susceptible to deterioration.



Figure 9. Epoxycoated and uncoated reinforcement bars after the tensile test

#### 4. Conclusions

The results are concluded as below:

- Epoxy coating was found to have a positive effect on the mechanical strength of reinforcing steel. Compared to uncoated rebars, epoxy-coated specimens exhibited increases in yield strength (from 523.89 MPa to 539.16 MPa), tensile strength (from 622.08 MPa to 627.18 MPa), and rupture strength (from 579.54 MPa to 591.8 MPa), indicating that the coating preserves structural integrity without compromising load-bearing capacity.
- In terms of ductility, the effect of the epoxy coating was limited and showed varying tendencies. While the reduction of area slightly decreased in coated specimens (from 43.75% to 39.16%), the total elongation at break showed a slight increase (from 16.5% to 17%). These findings suggest that the coating may slightly limit localized plastic deformation while contributing to a more uniform stress distribution in the elastic range.
- The observed increase in toughness (from 105.54 to 107.91 Nmm/mm<sup>3</sup>) demonstrates that the epoxy coating enhances the energy absorption capacity of the rebar. In contrast, the decrease in modulus of elasticity (from 211.60 GPa to 194.77 GPa) indicates a slight reduction in stiffness, contributing to a more ductile behavior of the material.
- Although the decrease in the  $R_m/R_e$  ratio (from 1.187 to 1.163) suggests a minor reduction in plastic deformation potential, the increase in  $R_{eact}/R_{enom}$  ratio (from 1.247 to 1.284) reveals that the epoxy coating improves the consistency and predictability of yield strength. This contributes to

more reliable structural performance under loading conditions.

- Regarding adherence strength, epoxy coating improved adhesion in both cast-in-place and post-installed applications, with a much more pronounced effect in the latter. While adherence strength increased by 3.2% for cast-in-place rebars, it rose by 31.7% for post-installed rebars. This highlights the significant enhancement provided by epoxy in chemical anchorage systems.

In general, epoxy coating enhances the mechanical, bond, and energy absorption performance of reinforcing bars without negatively affecting their ductility. Particularly in post-installed systems, the coating offers substantial advantages in terms of bond behavior, making epoxy-coated rebars a reliable alternative for use in aggressive environments and long-lasting concrete structures. Future studies could investigate the long-term durability and corrosion resistance of epoxy-coated rebars under varying environmental conditions to further validate their performance in aggressive environments. Additionally, exploring the combination of epoxy coating with alternative reinforcement materials or innovative anchoring techniques may provide insights into optimizing both mechanical and bond performance in reinforced concrete structures.

#### Acknowledgement

This study was not funded by any organization.

#### Contribution of Researchers

Kerem Aybar contributed to the literature review, experimental study, evaluation of experimental results. Serdal Ünal contributed to the article writing and editing, translation of the original article text into English.

Ömer Karagöz contributed to the methodology, experimental study, evaluation of experimental results. Mehmet Canbaz contributed to the conceptualization, evaluation of experimental results, preparation of graphs, and visualization.

#### Conflict of Interest

No conflicts of interest have been declared by the authors.

#### References

- Aljibori, H. S., Alamiery, A., & Kadhum, A. A. H. (2023). Advances in corrosion protection coatings: A comprehensive review. *Int. J. Corros. Scale Inhib*, 12(4), 1476-1520. <http://doi.org/10.17675/2305-6894-2023-12-4-6>
- Amirtharaj, J., & Rose, A. L. (2025). A state-of-the-art review on the Structural Behavior of concrete

- structures reinforced with various rebars as alternative to steel rebars. *Journal of Building Engineering*, 113387. <http://doi.org/10.1016/j.jobbe.2025.113387>
- Chen, G., Volz, J. S., Brow, R. K., Yan, D., Reis, S. T. D., Wu, C., & Tao, X. (2010). Coated steel rebar for enhanced concrete-steel bond strength and corrosion resistance.
- Fuhaid, A. F. A., & Niaz, A. (2022). Carbonation and corrosion problems in reinforced concrete structures. *Buildings*, 12(5), 586. <http://doi.org/10.3390/buildings12050586>
- Liu, J., and Vipulanandan, C. (2005). Tensile bonding strength of epoxy coatings to concrete substrate. *Cement and concrete Research*, 35(7), 1412-1419. <http://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.06.035>
- Mast, R. F., Dawood, M., Rizkalla, S. H., and Zia, P. (2008). Flexural strength design of concrete beams reinforced with high-strength steel bars. *ACI Structural Journal*, 105(5), 570. <http://doi.org/10.14359/19940>
- Mujalli, M. A., Dirar, S., Mushtaha, E., Hussien, A., and Maksoud, A. (2022). Evaluation of the tensile characteristics and bond behaviour of steel fibre-reinforced concrete: An overview. *Fibers*, 10(12), 104. <http://doi.org/10.3390/fib10120104>
- Natino, M. R. L., Yang, Y., Nakamura, H., & Miura, T. (2021). Experimental study on the effect of anti-corrosive coatings on bond behavior of corroded rebar. *Construction and Building Materials*, 274, 121716.
- Okokpujie, I. P., Tartibu, L. K., Musa-Basheer, H. O., & Adeoye, A. O. M. (2024). Effect of coatings on mechanical, corrosion and tribological properties of industrial materials: a comprehensive review. *Journal of Bio-and Tribo-Corrosion*, 10(1), 2. <http://doi.org/10.1007/s40735-023-00805-1>
- Ou, B., Wang, Y., & Lu, Y. (2021). A review on fundamentals and strategy of epoxy-resin-based anticorrosive coating materials. *Polymer-Plastics Technology and Materials*, 60(6), 601-625. <http://doi.org/10.1080/25740881.2020.1819317>
- Rauf, F. L., Whaib, M. S., & Elwi, M. (2025). Improving the Behavior of Damaged Reinforced Concrete Beams. *Mathematical Modelling of Engineering Problems*, 12(1). <http://doi.org/10.18280/mmep.120128>
- Singh, D. D. N., & Ghosh, R. (2005). Unexpected deterioration of fusion-bonded epoxy-coated rebars embedded in chloride-contaminated concrete environments. *Corrosion*, 61(8), 815-829.
- Sørensen, P. A., Kiil, S., Dam-Johansen, K., and Weinell, C. E. (2009). Anticorrosive coatings: a review. *Journal of coatings technology and research*, 6(2), 135-176. <http://doi.org/10.1007/s11998-008-9144-2>
- Tang, Y., Wang, Y., Hillman, M. C., Chen, J. S., and Du, J. (2025). Fracture experiments of coated and non-coated epoxy-alumina composites coupled with micro-CT. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 192, 108762. <http://doi.org/10.1016/j.compositesa.2025.108762>
- Wang, X., Cao, Q., Tang, F., Pan, H., Chen, X., & Lin, Z. (2023). Mechanical properties and corrosion behavior of dual-filler-epoxy-coated steel rebar under a corrosive environment. *Coatings*, 13(3), 604.
- Yadeta, K. F., Siriwardane, S. C., Mohammed, T. A., & Lemu, H. G. (2024). Influence of pre-existing cracks and concrete cover on service life of reinforced concrete and mechanical behaviour of corroded rebars. *International Journal of Structural Integrity*, 15(2), 283-297. <http://doi.org/10.1108/IJSI-12-2023-0139>
- Yan, L., Deng, W., Wang, N., Xue, X., Hua, J. and Chen, Z. (2022). Anti-corrosion reinforcements using coating technologies—A review. *Polymers*, 14(21), 4782. <http://doi.org/10.3390/polym14214782>
- Zhou, Z., and Qiao, P. (2018). Bond behavior of epoxy-coated rebar in ultra-high performance concrete. *Construction and Building Materials*, 182, 406-417. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.113>

## URBAN DESIGN AND NOISE MANAGEMENT: ENVIRONMENTAL NOISE PROBLEMS AND SOLUTIONS SUGGESTIONS IN MARDIN CITY CENTRE

Mehmet Salih AYDIN <sup>1</sup>, Zuhar ÖZÇETİN <sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> Siirt Üniversitesi, Güzel Sanatlar ve Tasarım Fakültesi, Mimarlık Bölümü, Siirt

ORCID No : <https://orcid.org/0000-0001-9243-4014>

<sup>2</sup> Uşak Üniversitesi, Mimarlık ve Tasarım Fakültesi, Mimarlık Bölümü, Uşak

ORCID No : <https://orcid.org/0000-0003-4441-9471>

Keywords	Abstract
<p>Mardin Noise control Sound Environmental noise Urban design</p>	<p>Noise pollution has become an increasingly important environmental issue, especially with the acceleration of urbanisation and population growth. In the literature, noise pollution is defined as unwanted or annoying sounds and its negative effects on human health, the environment and social life are emphasised. Traffic noise is the most common source of environmental noise in urban areas. Noise measurements and analyses are important in determining which areas are priority areas in combating this problem. Especially in historical and touristic cities, the effects of traffic noise on both people and structures have become an important research topic.</p> <p>International organisations such as the World Health Organization (WHO) and the European Union have set limit values for noise levels. In Türkiye, the Regulation on the Assessment and Management of Environmental Noise is also accepted as an important reference in this regard.</p> <p>In this context, noise measurements revealed that the main sources of traffic noise in the centre of Mardin were air horns used in motor vehicles, exhausts from blowers, and older vehicle models. The study's key finding was that equivalent noise levels exceeded the regulatory limit values at all nine measurement points in the evening (limit 65 dBA) and at night (limit 60 dBA). The maximum noise level measured, particularly in the evening, was 83.0 dBA, which exceeded the limit value by 18.0 dBA. The maximum level at night was determined to be 78.6 dBA. These findings demonstrate that noise levels have negative psychological and physiological effects on public health and quality of life. Based on these critical findings, detailed proposals for urban design solutions for Mardin city centre were presented at the end of the study.</p>

## KENTSEL TASARIM VE GÜRÜLTÜ YÖNETİMİ: MARDİN ŞEHİR MERKEZİNDE ÇEVRESEL GÜRÜLTÜ SORUNLARI VE ÇÖZÜM ÖNERİLERİ

Anahtar Kelimeler	Öz
<p>Mardin Gürültü kontrolü Ses Çevresel gürültü Kentsel tasarım</p>	<p>Gürültü kirliliği, çevresel bir sorun olarak özellikle kentleşmenin ve nüfus artışının hızlanmasıyla daha belirgin hale gelmiştir. Literatürde gürültü kirliliği, istenmeyen ya da rahatsızlık veren sesler olarak tanımlanmakta; insan sağlığı, çevre ve toplumsal yaşam üzerindeki olumsuz etkileri vurgulanmaktadır. Trafik gürültüsü, kentsel alanlarda en yaygın çevresel gürültü kaynağıdır. Gürültü ölçümleri ve analizleri, bu sorunla mücadelede hangi bölgelerin öncelikli olduğunu belirlemek açısından önemlidir. Özellikle tarihi ve turistik şehirlerde, trafik kaynaklı gürültünün hem insanlar hem de yapılar üzerindeki etkileri önemli bir araştırma konusu olmuştur.</p> <p>Dünya Sağlık Örgütü (WHO) ve Avrupa Birliği gibi uluslararası kuruluşlar tarafından gürültü seviyelerine ilişkin belirlenmiş sınır değerler bulunmaktadır. Türkiye'de de bu konuda Çevresel Gürültü Kontrol Yönetmeliği ve Binaların Gürültüye Karşı Korunması Hakkındaki Yönetmelik önemli referanslar olarak kabul edilmektedir.</p> <p>Bu bağlamda yapılan gürültü ölçümleri sonucunda, Mardin kent merkezindeki trafik gürültüsünün ana kaynakları; motorlu araçlarda kullanılan havalı kornalar, üfleme egzozlar ve eski model araçlar olarak belirlenmiştir. Çalışmanın temel bulgusu, 9 farklı ölçüm noktasının tamamında, akşam (limit 65 dBA) ve gece (limit 60 dBA) saatlerindeki eşdeğer gürültü seviyelerinin Yönetmelik sınır değerlerini aştığıdır. Özellikle akşam saatlerinde ölçülen maksimum gürültü seviyesi 83.0 dBA'ya ulaşarak, limit değeri 18.0</p>



Bu eser, Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>) hükümlerine göre açık erişimli bir makaledir.

This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

*dB'A'ya kadar aşmıştır. Gece saatlerinde ise maksimum seviye 78.6 dBA olarak tespit edilmiştir. Bu bulgular, gürültü seviyelerinin halk sağlığı ve yaşam kalitesi üzerinde olumsuz psikolojik ve fizyolojik etkilere sahip olduğunu göstermektedir. Elde edilen bu kritik veriler doğrultusunda, çalışmanın sonunda Mardin şehir merkezi için kentsel tasarıma dayalı detaylı çözüm önerileri sunulmuştur.*

Araştırma Makalesi	Research Article
Başvuru Tarihi : 18.08.2025	Submission Date : 18.08.2025
Kabul Tarihi : 25.11.2025	Accepted Date : 25.11.2025

\* Sorumlu yazar: [zahal.ozcetin@usak.edu.tr](mailto:zahal.ozcetin@usak.edu.tr)  
<https://doi.org/10.31796/ogummf.1767887>

## 1. Introduction

Noise: although it is the general term for a group of sounds produced in an unharmonious and irregular manner, and although it is a situation that is rarely mentioned compared to other environmental pollution, it is a serious problem that reduces people's comfort. As people become more aware and prefer to live comfortably, the awareness of noise has been understood and in recent years there have been many studies carried out in this regard.

Urbanisation and population density are increasing due to the needs of today's conditions. With this urbanisation comes noise pollution. This pollution is now becoming a problem and has negative physiological and psychological effects on people. The main pollutants affecting all living things in nature can be defined as industrial and transport sources. Efforts should be made to create conscious faces, exposure times, noise maps and acoustic reports to minimise or eliminate noise.

In response to noise pollution, people need to create optimal mental and physical conditions. An ideal working environment should be created according to the measures required by ergonomic science. It is important to try to adapt noise pollution to people or people to noise pollution according to ergonomic conditions.

Depending on the current conditions, both the need for transport and the need for vehicles are increasing. Due to the increased noise generated by these long highways, it has a detrimental effect on the physical and mental health of residents. As a result, this situation reduces the effectiveness of our work and education. As a result of the studies and surveys, it has been observed that people are the most affected by the noise pollution caused by the motorway. In order to minimise this noise pollution, the Ministry of Environment, Urbanisation and Climate Change has issued the Environmental Noise Control Regulation. This regulation, which is stricter in the areas of education, culture and health, supports the creation of noise maps according to the distribution of noise and the number of people in the region. In this context, the study firstly includes a literature review on noise, then the current situation noise measurements were made at the identified points in the selected heavy

traffic areas in the city of Mardin and analyses were carried out. The current situation assessment was carried out at 9 points in the densely functional areas identified based on the centre of Mardin and the study area was examined with environmental noise analyses. In order to determine the noise levels especially in the traffic areas in the city centre of Mardin, heavy traffic flow, high population, historical places, points with intensive vital activities were identified and evaluations were made based on standards and regulations.

## 2. Literature Review

In his study, Demir (2013) drew a noise map of the Beşiktaş district of Istanbul province and proposed solutions. It is believed that macro-level decision makers, especially local governments, should take precautions on this issue, create or expand recreational areas, and take precautions before the negative effects on human health occur, especially in large cities (Demir, 2013).

Akay (2015) determined the noise level in a certain area on Yeni İstanbul Street in Konya province to minimise the negative effects and investigated the relationship between plants and road noise. Measurements were taken 3 times a day for 14 days at 6 fixed points in the study area and the average sound level was determined. Sound was generated in the study area with a sound source corresponding to the average sound level in the area, and test measurements were made between 02:00 and 05:00 to determine how low the background noise of the selected groups was. Based on the test measurements, it was found that the maximum noise reduction between the test points was 2.8 dBA. As a result of the measurements made to determine the effect of distance on the degree of sound attenuation, it was determined that the degree of sound attenuation increased to 4.6 dBA due to the proximity of the sound source to the sound group (Akay, 2015).

Ögel (2015); tried to determine the sources of traffic noise pollution in the centre of Isparta province, measured the environmental noise, analysed, interpreted and evaluated by making maps. According to the results of the research; It was found that the most important source of noise in Isparta province is traffic noise, the noise level is high in the central parts of the

city and low in the outer neighbourhoods. Noise levels depend on weather conditions, vehicle speed and road conditions. It was found that the noise perception of Isparta village residents differed according to gender, age and the administrative unit in which they had lived for many years (Ögel, 2015).

Kahveci (2016) identified a study area of approximately 340 ha on Turgut Özal Boulevard, which extends 800 m north and south of the district in Çukurova district, Adana province, where traffic is heaviest. SoundPLAN software was used to determine and map noise levels in the study area. Based on the analysis of the current situation, satellite images, topographic maps and geodetic studies, the population affected by the noise level was identified and the data to be used by the programme, vehicle counts and noise measurements were carried out. Contaminated areas were determined within the scope of the district code of conduct, and noise prevention or reduction proposals were developed for these areas (Kahveci, 2016).

Özçetin (2016) conducted a road noise measurement and modelling programme, as well as a noise control analysis and noise mapping study. As a result of the comparison of the measurements repeated at different times and the simulation program data with each other, it was determined that the differences were within acceptable values (Özçetin, 2016).

In his study, Sezgin (2016) aimed to raise awareness of noise as an environmental issue. The study included the results of a survey conducted to measure the awareness of the residents of Şişli regarding noise pollution. Literature review and field research methods were used together. Evaluation of the research results; Noise is not considered as a form of environmental pollution by the residents of Şişli district (Sezgin, 2016).

Bilgen (2017); attempted to determine the noise levels at intersections and busy roads in the city centre of Nevşehir, determine the relevant factors, and create noise maps based on the obtained data. The noise measurements were transferred to the ArcGIS environment and morning, midday and evening noise maps of Nevşehir city centre were created. By evaluating the maps and the obtained data, necessary suggestions were presented to reduce and prevent noise pollution in the city centre (Bilgen, 2017).

Kaşağıcı (2017); aimed to determine the noise problem experienced by people living in the city centre of Kayseri, and to determine the measures that can help the central and local governments to solve this environmental problem. Based on the measurement results and survey evaluations, both preventive and noise-reducing solutions were proposed in the city and possible measures were evaluated (Kaşağıcı, 2017).

Taşkaya (2017) determined which noise sources were affected to what extent in Elâzığ from the noise

measurements conducted by the Marmara Research Centre in 2015 and 2016 (Taşkaya, 2017).

The study conducted by Eren (2018) aimed to determine the noise levels in areas with high traffic and tourist density in the centre of Safranbolu, to investigate the noise-causing effects, and to prepare noise maps based on the data obtained. The noise measurements were transferred to the ArcGIS environment and a total of 16 noise maps were created for the Safranbolu district centre in the summer and winter seasons, including weekdays and weekends in the morning, afternoon and evening (Eren, 2018).

Katranç (2018) investigated the levels of noise pollution and environmental impacts in a sample consisting of the central districts of Şanlıurfa. Noise levels were measured using a Rion sound level meter at measurement points in the morning, afternoon and evening hours. As a result of the data obtained, Eyyubi was identified as the district with the highest noise level among Haliliye Karaköprü and Eyyubi districts (Katranç, 2018).

According to Demirel (2019), source-based and combined political noise maps were prepared and impact analysis was conducted in the areas within the service boundaries of Bolu Municipality. The SoundPLAN programme was used for this purpose. Noise measurements at 12 points were used to verify the modelling studies. In the joint assessment of the impact of roads, industrial and recreational facilities in the study area, it was determined that the most noise-sensitive settlements were the micro-districts passing through the main roads (Demirel, 2019).

Halaçlar (2019) in his study; In Adana city centre, the traffic was most intense at the intersections identified on Turgut Özal and Kenan Evren boulevards between 07:00-08:00, 19:00-20:00, 23:00-01:00 at night. In the study, a noise map was prepared according to the results of the calculation of the measures to be taken using the SoundPLAN program. As a result, the noise sources were identified and the levels of these environmental sources were measured and determined (Halaçlar, 2019).

In his research, Kulu (2019) investigated whether the sound generated by the Kabataş-Bağcılar tram systems in Istanbul province was assessed as noise within the scope of the current regulations. For this purpose, sound level measurements were carried out at the designated points, taking into account the types of vehicles, and the data obtained was analysed in detail to determine whether the values were within the limits. When the results were examined, the effects of noise in the measured areas were studied and the measures to be taken were determined in accordance with the data collected (Kulu, 2019).

In his study, Savaş (2019) focused on the efforts of the residents of Hisar Houses, located near the Beykoz Kavacık Mevkii Highway, to prevent noise pollution. 4-metre single-sided noise barrier was proposed as a solution to reduce the current noise level caused by noise from Hisar Houses. After the noise barrier was installed, SoundPlan 7.4 was used to map the noise in the new situation and calculate how much the noise level could be reduced from the current situation. As a result of the noise barrier modelling studies, noise levels in the residential area were determined using noise maps with limit values (Savaş, 2019).

In his study, Zengin (2019) examined the extent of noise in areas with heavy traffic in the city centre of Erzurum and tried to take precautionary measures. Noise pollution is one of the most important driving forces of unplanned and unhealthy urbanisation. He identified 4 heavy traffic points for noise modelling in Erzurum city centre. As a result, the existing noise sources in Erzurum city center were created and the environmental pollution levels were measured and the pollution parameters were determined using the mapping method (Zengin, 2019).

In the study conducted by Kaya (2020); The maximum noise levels were measured in important areas of Gaziantep city centre and evaluated together with the relevant noise regulations. As a result of this evaluation; it was found that winter months were less noisy, exit hours had more intense noise, and the morning time zone produced less noise compared to day and night measurements (Kaya, 2020).

In a study conducted by Sünnetci (2020), a noise map of Edirne was prepared and old noise measurements were compared with new noise measurements. The main problems causing noise in Edirne centre were recorded. In order to reduce noise, suggestions were made such as increasing noise control, creating a pedestrian zone in the city centre, giving importance to public transport and planning the city in a way that reduces noise (Sünnetci, 2020).

Teneler (2020) identified many health complaints due to auditory and visual discomfort in people living near wind turbines. The aim of this study is to determine the sleep quality of people living near wind turbines in Yaylaköy and Ovacık and in Küçükkaya and to investigate the relationship between sleep quality and socio-economic characteristics, risk perception, health status and noise. It was observed that groups with negative environmental, health and risk perceptions of wind turbines were more disturbed by the turbine. Considering the possible negative effects of power plants, it is recommended to implement practices that protect public health (Teneler, 2020).

Aktaş (2021) study; In the example of Kaleiçi district, the aim was to conduct noise analysis and modelling

through remote sensing (RS) and geographic information systems (GIS) in parallel with the developing technology. As a result, the noise map of the Kaleiçi district, which is of national and international historical/cultural value, was prepared and applicable and effective proposals were developed within the framework of studying this noise with relevant standards (Aktaş, 2021).

In his study, Çoban (2021) found that the average value of the LAeq indicator, which is used for the equivalent sound level in the acoustic assessment of urban parks, was higher than the threshold recommended by the World Health Organisation (WHO) of 55 dBA for outdoor living spaces in all study areas. However, it was found that the L50 indicator, which has a statistically significant relationship with people's perception of quiet, was lower than 55 dBA in all but one of the study areas. It was also found that the L90 indicator, which is recommended to be used as a background noise indicator, remained below 55 dBA in all study areas (Çoban, 2021).

In his study, Kocaman (2021) tried to determine the level of awareness of the people of Turgutlu district against noise pollution. As a result, in this study he focused on the measures that can be taken to reduce the effects of noise pollution (Kocaman, 2021).

Onay (2021) tried to reveal the internal and external noise pollution in schoolyards using Isparta as an example. Based on the results of the study, he proposed the design of separate noise curtains for each schoolyard in order to continue education in schools in a healthier way (Onay, 2021).

Yalçındağ (2021), interested in the subjective side of noise, combined the soundscape method with virtual pedestrian environments and showed that noise perception and control can be evaluated numerically. To do this, he created a survey, which was conducted among 140 people of different age, gender and education at certain times between October 2018 and January 2020. In the implementation phase, it is planned to use virtual walks as an alternative to sound walks and noise control (Yalçındağ, 2021).

Desarnaulds et al. conducted a numerical analysis of the noise reduction potential of road traffic management practices. According to their analysis, reducing the speed limit from 50 km/h to 30 km/h is one of the most effective measures, providing significant noise reduction of 2–4 dBA in passenger vehicles. Furthermore, coordinating traffic lights at intersections or using roundabouts can reduce local noise levels by 1–2 dBA. These international findings provide a scientific basis for urban design and traffic management interventions aimed at reducing noise in Mardin's narrow streets and dense traffic flows (Desarnaulds, et al. 2004).

Table 1. Studies in the Literature

Author/Authors	Year	Place of construction	Name of the study	Method Used
Sami Demir	2013	İstanbul	Creation of Noise Map by Determining Noise Levels in Beşiktaş District Centre of Istanbul	Research Method
Ahmet Akay	2015	Konya	Control of Traffic Noise in Urban Areas with Plant Use: Konya- Istanbul Ring Road Example	Research Method
Cumali Ögel	2015	Isparta	Noise Pollution Caused by Traffic in Isparta City	Research Method
Barış Kahveci	2016	Adana	Mapping of Noise Pollution from Urban Roads in the Case of Adana / Turgut Ozal Boulevard	Research Method
Zuhal Özçetin	2016	Ankara	A Method Proposal on the Analysis of Traffic Noise on Celal Bayar Boulevard and Investigation of its Environmental Effects	Research Method
Sezgin Sezgin	2016	İstanbul	Noise and Noise Awareness as an Environmental Problem: Sisli Example	Quantitative Method
İsmail Bilgen	2017	Nevşehir	Measurement of Traffic Noise Levels in Nevşehir City Centre and Preparation of Noise Map	Research Method
Betül Kaşığıcı	2017	Kayseri	Detection of Noise Pollution in Streets and Sensitive Areas in Kayseri	Mixed Method
Selim Taşkaya	2017	Elâzığ	Analysing the Existing Strategic Noise Maps of Elâzığ Province with a Questionnaire Study	Quantitative Method
Sercan Eren	2018	Karabük	Assessment and Mapping of Noise Pollution in Safranbolu District of Karabük Province	Research Method
Harika Şima Katrancı	2018	Şanlıurfa	Noise Pollution and Environmental Effects in Şanlıurfa	Research Method
Adnan Demirel	2019	Bolu	Preparation of Noise Maps of Cities: Bolu Province Example	Research Method
Soner Halaçlar	2019	Adana	Study of Noise from Vehicles Adana City Centre Example	Research Method
Mücahit Kulu	2019	İstanbul	Environmental Noise Generated by Rail Systems (The Case of Istanbul- Kabataş- Bağcılar Tram Line)	Research Method
Süleyman Savaş	2019	İstanbul	Mapping of Noise from Tem Motorway in Kavacık District of Istanbul and Application of Noise Curtain Model	Research Method
Umut Zengin	2019	Erzurum	Environmental Noise Maps from Traffic and Erzurum City Centre Case Study	Research Method
Gizem Kansu Kaya	2020	Gaziantep	Determination of Noise Levels in High Traffic Areas of Gaziantep and Environmental Impacts	Research Method
Alper Sünnetçi	2020	Edirne	Preparation of Edirne Central District Noise Map	Research Method
Aslı Ata Teneler	2020	İzmir	Determination of Sleep Quality of People Living in Yaylaköy, Ovacık and Küçükçaya Neighbourhoods of İzmir and Evaluation of the Relationship with Environmental Noise	Quantitative Method
Okan Aktaş	2021	Antalya	Geographical Information Systems Based Noise Analysis and Modelling Kaleiçi/Antalya Case	Research Method
Nilgün Akbulut Çoban vd.	2019	Türkiye	General overview to strategic noise maps and action plans in turkey: the case of quiet areas identification process	Research Method
Emine Kocaman	2021	Manisa	Determination of Perceptions and Attitudes towards Noise Pollution in Turgutlu City	Research Method
Büşra Onay	2021	Isparta	Landscape Architecture Approaches in Preventing Noise Pollution in School Gardens and Surroundings: Isparta Example	Research Method
Nazlı Seda Yalçındağ	2021	Türkiye	Investigation of Perceptual Differences in Environmental Noise	Research Method

In their study, Lee et al. proposed a noise reduction strategy to address road and rail traffic noise in Panyu District, Guangzhou, China. Noise maps generated using commercial software predicted that implementing noise barriers would significantly reduce traffic noise levels. The results showed that, with an appropriate barrier strategy, the total area experiencing heavy noise pollution could be reduced by 24.5 km<sup>2</sup> during the day and 24.3 km<sup>2</sup> at night. Furthermore, it was predicted that the proportion of areas meeting legal noise standards would increase by 18.38% during the day and 12.62% at night. Psychoacoustic analyses revealed that installing noise barriers significantly reduced the number of people experiencing severe annoyance; however, the reduction in the number of people experiencing sleep disturbance was insignificant (Lee et al., 2022).

Current research in urban noise control examines the psychoacoustic effects of structural features and perceived annoyance rather than focusing solely on reducing decibel levels. In this context, Eggenschwiler et al. conducted laboratory experiments to analyse the effects of façade surface material (reflective, absorptive or diffusive) and building orientation (parallel or non-parallel walls) on perceived noise annoyance in residential areas. The study's key findings indicate that absorptive façades generally reduce noise annoyance due to lower sound pressure levels. However, surprisingly, absorptive façades are perceived as more annoying than reflective or diffusive façades at the same sound level, indicating a somewhat negative acoustic quality. Furthermore, building rotation resulting in non-parallel walls has been found to reduce noise annoyance compared to parallel walls, and this positive effect tends to persist even when sound levels are equal. These results highlight the importance of façade features and building alignment as architectural control tools for optimising the sound environment in residential areas such as inner courtyards (Eggenschwiler et al., 2022).

Studies related to the subject are presented in Table 1.

### 3. Study of Noise Abatement in the Context of Urban Design Using Mardin as an Example

Within the scope of urban design, noise control analysis was carried out specifically for the city of Mardin.

1st Street is one of the busiest streets in Mardin. It is a historical and tourist street that connects old Mardin and new Mardin. The street passes through the foot of Mardin Castle and connects the upper part of the castle, the northern part, and the lower part of the castle, the southern part. Along the street there are boutique hotels, music venues, restaurants, cafeterias, tourist bazaars, historical sites (mosques, madrasahs, churches). In addition to being an important transport and pedestrian axis, the presence of educational,

medical, commercial, tourist markets, cultural areas and some residential areas played an important role in the selection of the area as a study area (Figure 1).

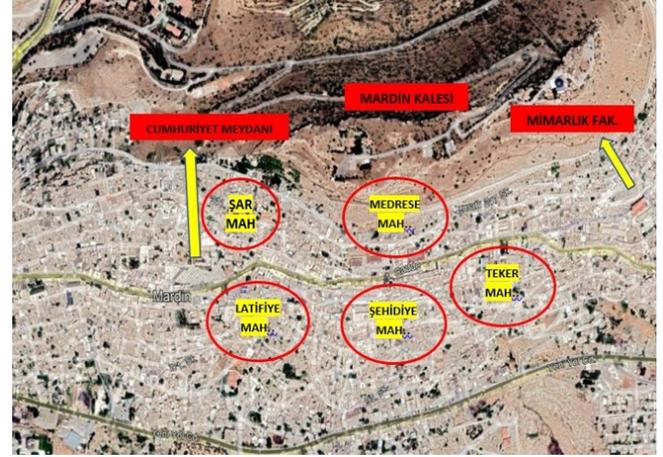


Figure 1. Mardin 1st Street (Google Earth)

A total of nine measurement points were identified on Mardin's 1st Street, which was the focus of the study. Rather than using the grid method commonly employed in noise mapping studies, a targeted and purposive sampling method was chosen to focus on the unique density and noise dynamics of the historical and tourist city centre. While the grid method typically seeks to generate strategic noise maps for extensive urban areas, this study aimed to pinpoint the areas of highest noise exposure on Mardin's narrow, rocky, and heavily trafficked main artery.

The following urban and functional criteria were used to select the measurement points:

- Intersections and axes with the highest concentration of heavy motor vehicle traffic, particularly along 1st Avenue.
- Areas of high population density, including residential areas, historical sites, tourist markets, food and beverage venues, and music entertainment venues in neighbourhoods such as Latifeye, Şar, Teker, Medrese and Şehidiye.
- Areas with the greatest echo and resonance effects caused by the historical urban fabric and narrow streets.

This objective selection aims to clearly identify areas that require urgent urban design intervention, by representing the 'worst-case scenario' in terms of the impact of traffic noise on public health.

#### 3.1. Analysis of measurement results for Noise Control

The sound level meter used in the current situation assessment measurements is a calibrated Svantek

958/SV12L brand noise level meter. The sound measurement range of the device was selected as 30-130 dBA.

9 separate measurement points were identified to be taken in the 1st Street of Mardin Central District, especially in the areas of Latifeye neighbourhood, Şar neighbourhood, Teker neighbourhood, Medrese neighbourhood and Şehidiyle neighbourhood where there is heavy traffic, pedestrians and loud music (Figure 1 and Figure 2).



Figure 2. Display of Measurement Locations on the Map

Traffic noise measurements were conducted on Saturday 27 August 2022 under ideal meteorological conditions, in order to minimise the influence of environmental variables on noise propagation and avoid any negative impact. Data from the measurement day showed that the temperature remained at around 24°C throughout the day, with a relative humidity of approximately 28%. Most importantly, no precipitation was observed during the measurements. The wind speed was kept low at 4 mph (approximately 6.4 km/h), blowing from the southwest. These conditions confirm that the influence of wind on acoustic measurements is negligible, meaning that the equivalent noise levels obtained ( $L_{eq}$ ) reflect the actual values resulting from environmental noise.

In order to determine the noise level in Latifeye, Şar, Teker, Medrese and Şehidiyle neighbourhoods of Mardin city centre and to take precautions against environmental effects and to ensure noise control, highways, intersections and connecting roads where there is heavy traffic were taken and the averages were calculated and the city noise was studied depending on the time of day at the 9 measuring points determined on Saturday during the day, evening and night hours.

9 measurement points were selected according to traffic density in August. The environmental noise measurements were carried out in Latifeye, Şar, Teker, Medrese and Şehidiyle neighbourhoods on Mardin city centre's 1st Avenue, taking into account the hours of highest motor vehicle traffic and Saturday.  $L_{eq}$  measurements were taken between 16:00-18:00 during

the day, 19:00-21:00 in the evening and 23:00-00:30 at night (Figure 3(a,b,c,d,e,f) and 4(a,b,c,d,e,f)).

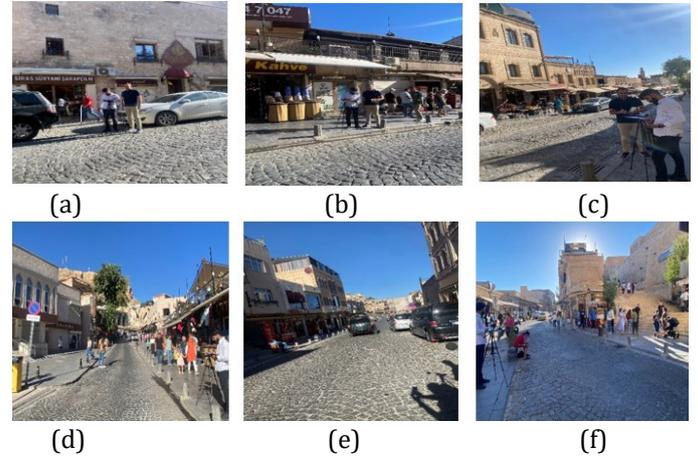


Figure 3. (a,b,c,d,e,f) Photographs from daytime measurements made on Mardin 1st Street in August (Mehmet Salih Aydın archive - Aydın, 2020)

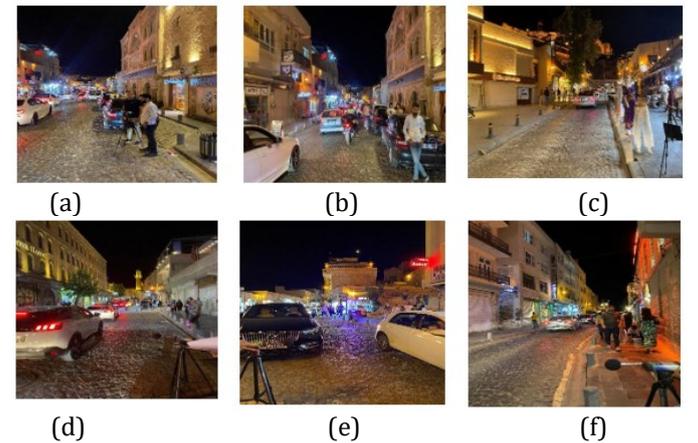


Figure 4. (a,b,c,d,e,f) Photographs from evening and night measurements made on Mardin 1st Street in August (Mehmet Salih Aydın archive - Aydın, 2020)

#### 4. Findings and Discussion

Noise levels were measured in dBA, which gives priority to sounds to which the ear is sensitive. Measurements were analysed by grouping equivalent noise levels ( $L_{eq}$ ) as day, evening and night on Saturday and averaging them. In addition, general noise levels during the day were determined from measurements taken at monitoring points. In total, 9 monitoring points were measured and averaged during the day, evening and night.

As a result of the measurements made at the 9 determined points, a comparison was made with the limit values (Figure 5-Table 2). It is seen that the evening and night noise levels exceed the limit values for each point, while the daytime noise levels are close to the limit values.

Table 2. Day – Evening – Night Comparisons

		1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.
		point	point	point	point	point	point	point	point	point
Day (dBA)	<b>70</b>	68,6	70,5	68,8	68,2	70,0	69,0	69,6	68,9	70,6
Evening (dBA)	<b>65</b>	78,3	80,6	83,0	78,8	76,7	76,6	80,8	75,1	77,2
Night (dBA)	<b>60</b>	74,0	74,2	73,7	73,0	73,2	72,0	78,6	70,8	72,5

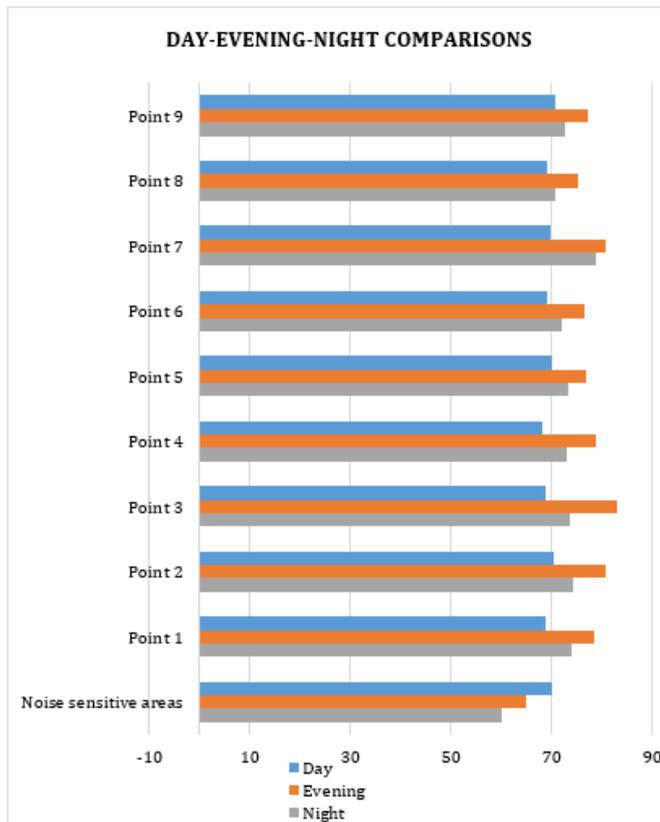


Figure 5. Day-Evening-Night Comparisons

If we look at the noise levels at 9 measurement points in the city centre, the noise levels at the weekend range from 68.2 dBA - 70.6 dBA during the day, 75.1 dBA - 83.0 dBA in the evening and 70.8 dBA - 78.6 dBA at night (Table 3-4-5-6). The most obvious common feature of these locations is that they are places with heavy vehicle traffic, so the noise sources include exhaust noise, horn noise, tyre noise on tarmac or when the brakes are applied. In these areas; pedestrian noise is relatively low and traffic noise is the most obvious feature. According to the results obtained; it can be said that the noise levels at different points of the city centre of Mardin province are at the limit values for daytime evaluation, but higher than the limit values for evening and night evaluation, and that these noise levels negatively affect and will affect people both psychologically and physiologically.

According to the Environmental Noise Control Regulation, the Leq limit values for the study area in central Mardin were set at 70 dBA for daytime, 65 dBA for evening and 60 dBA for night-time. Measurements show that exceedances of these limits are particularly high and persistent during the evening and night-time periods (Table 3).

Table 3. Day – Evening – Night Comparisons

Time Zone	Limit Value (dBA)	Maximum Measured Value (dBA)	Measurement Point	Limit Excess Amount (dBA)
Day	70	70,6	9.point	0,6
Evening	65	83,0	3.point	18,0
Night	60	78,6	7.point	18,6

*Daytime (16:00 – 18:00):* The limit exceedance during this period was lower than during other periods. The maximum value of 70.6 dBA, measured at measurement point 9, exceeded the 70 dBA limit by only 0.6 dBA and remained within it. This is due to the higher limit set for daytime periods in the regulations and the more controlled distribution of traffic flow. However, the average daytime levels at all measurement points, ranging from 68.2 dBA to 70.6 dBA, confirm that the area experiences constant high noise exposure.

*Evening (19:00 – 21:00):* The highest equivalent noise level, 83.0 dBA, was measured at measurement point 3. This value exceeds the relevant regulatory limit of 65 dBA by a significant amount: 18.0 dBA. The main reasons for this were increased evening tourist and recreational pedestrian traffic, heavy motor vehicle use and uncontrolled air horn/exhaust noise. Even the lowest evening level, measured at 75.1 dB(A) at measurement point 8, indicates an exceedance of the limit by at least 10.1 dB(A).

*Night-time (23:00 – 00:30):* The most critical exceedance was recorded at Measurement Point 7, reaching 78.6 dBA. This level exceeds the night-time limit of 60 dBA by 18.6 dBA, indicating that the highest level of excess occurred during the night-time period. This can be attributed to commercial and recreational activities continuing into the late hours, coupled with engine and exhaust noises from older vehicles becoming more pronounced in the quiet of the night.

Table 4. Day measurement

Frequency (Hz)	1.point	2. point	3. point	4. point	5. point	6. point	7. point	8. point	9. point
100	65,1	65,9	67,5	67,0	64,2	65,2	67,5	68,3	63,8
125	65,3	65,9	68,3	65,4	62,1	63,1	64,7	62,4	61,2
160	64,3	66,3	64,3	61,6	63,8	62,1	63,7	61,9	60,7
200	61,8	62,1	62,6	60,5	61	61,7	61,4	60,6	61,0
250	60,4	62,9	59,2	58,7	60,7	60,8	61,5	60,3	60,4
315	60,7	66,5	60,7	59,5	61,6	62,4	60,9	62,1	61,8
400	62,2	62,8	60,8	60,2	63,7	62,3	62,2	61,3	65,1
500	62,8	63,5	59,9	61,0	62,8	62,3	62,0	61,2	65,7
630	64,5	64,9	60,6	61	63,7	62,1	63,0	61,4	65,8
800	60,2	62,5	59,1	58,7	60,5	62,1	61,5	60,2	62,4
1000	58,9	58,8	58,4	57,1	59,7	58,1	59,1	59,3	61,0
1250	56,3	60,3	58,5	58,8	59,3	57,8	58,9	58,5	59,0
1600	54,7	57,6	58,2	59,1	58,5	57,9	59,5	57,7	58,6
2000	52,3	55,0	57,2	55,9	57,7	55,6	57,3	56,2	54,7
2500	51,7	55,7	55,9	54,4	56,1	54,8	55,2	55,1	55,2
3150	51,1	55,7	55,6	54,0	55,6	52,8	53,7	54,9	54,8
4000	49,6	54,0	53,2	50,5	54,7	50,7	51,5	53,4	52,6
5000	45,8	49,4	49,9	47,8	51,7	49,0	49,9	50,7	46,2

Table 5. Evening measurement

Frequency (Hz)	1.point	2. point	3. point	4. point	5. point	6. point	7. point	8. point	9. point
100	70,1	69,0	69,9	66,0	65,5	65,6	76,2	70,1	67,7
125	68,4	74,8	71,5	63,7	64,0	65,5	68,4	70,8	65,8
160	65,5	71,2	70,3	61,0	65,2	60,9	67,1	67,6	64,0
200	63,4	66,8	63,2	58,8	66,4	58,9	71,0	66,5	64,5
250	64,7	68,9	66,1	58,2	68,7	58,3	69,3	64,8	60,2
315	63,8	66,4	64,9	61,9	63,7	59,6	69,8	64,2	59,8
400	63,0	70,6	63,6	60,3	63,1	60,1	72,3	67,7	63,2
500	64,4	76,2	62,7	59,9	64,7	59,8	75,5	64,4	68,6
630	65,8	74,2	62,6	60,3	70,9	60,6	77,1	64,2	64,0
800	70,1	74,4	64,3	60,1	69,4	60,3	73,0	62,8	63,3
1000	72,1	70,0	66,2	60,3	67,5	61,6	69,5	61,6	63,4
1250	71,3	68,8	70,6	65,9	64,6	64,9	69,4	62,4	65,4
1600	70,0	67,8	76,3	68,7	67,4	67,8	68,5	67,4	68,0
2000	64,3	68,6	75,6	72,5	66	70,3	67,0	65,5	70,2
2500	64,4	65,0	73,1	70,0	63,2	66,3	65,0	63,8	66,9
3150	61,3	62,4	68,6	66,9	60,6	64,6	64,3	60,2	62,8
4000	57,8	67,1	67,9	64,6	59,6	62,0	63,7	58,0	62,1
5000	54,2	62,2	69,6	64,7	59,1	61,8	60,8	61,1	61,5

Table 6. Night measurement

Frequency (Hz)	1.point	2. point	3. point	4. point	5. point	6. point	7. point	8. point	9. point
100	69,3	52,6	53,7	51,3	51,9	53,4	54,8	54,5	55,1
125	65,5	51,8	56,1	53,1	52,0	53,3	54,5	56,0	55
160	62,8	50,3	56,5	51,1	50,4	51,4	55,2	55,1	54,3
200	62,9	50,2	65,6	52,2	49,7	53,7	55,4	53,6	51,6
250	60,6	52,1	58,7	56,0	51,5	52,7	56,2	56,6	53,5
315	61,3	53,2	55,0	53,5	49,8	53,3	58,0	56,7	51,4
400	61,4	55,4	67,0	60,3	55,8	55,3	59,9	57,8	57,5
500	60,6	55,7	63,5	64,4	59,5	58,2	62,9	62,1	61,4
630	61,0	59,4	67,0	66,3	63,3	61,4	65,7	64,9	65,8
800	59,4	61,9	65,9	66,5	65,3	60,8	65,8	63,7	66,8
1000	58,4	61,1	63,3	62,9	62,8	58,7	63,8	61,1	63,1
1250	62,6	63,1	66,3	64,1	64,0	61,2	67,4	61,4	64,4
1600	67,2	63,9	63,6	64,2	65,0	63,0	69,8	61,7	63,3
2000	67	64,5	62,3	60,6	63,4	62,7	70,7	60,4	61,1
2500	62,2	63,3	60,2	59,6	61,6	62,1	69,3	56,8	58,4
3150	60,2	66,1	56,6	58,5	57,0	58,1	63,3	54,3	54,1
4000	56,8	64,4	55,5	55,4	56,7	56,9	60,1	51,9	51,5
5000	58,9	62,7	49,4	48,4	57,4	55,0	65,1	45,2	44,2

According to the Regulation on the Protection of Buildings against Noise, the study area in Mardin is within the high noise level.

However, it was noted that the daytime measurements were close to the limit values, while the evening and night measurements were above the limit values (Figure 6).

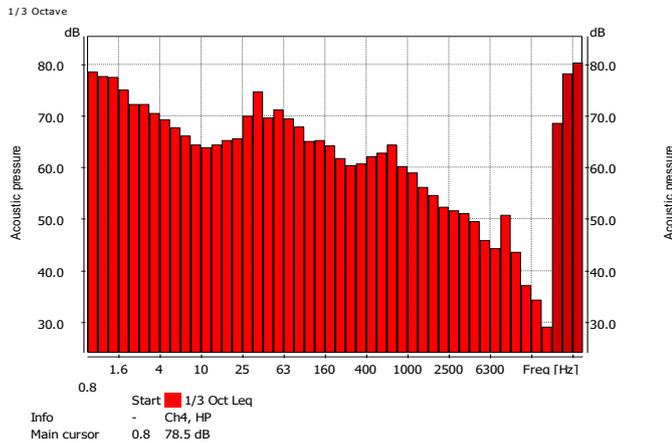


Figure 6. Evaluation of Day-Evening-Night Averages of the First Measurement Point

The World Health Organisation (WHO) has set a noise limit of 55 dBA for outdoor living areas. For a person to feel completely healthy and comfortable, it is essential to be in a state of complete physical and mental well-being. Measurements taken in the city centre show that noise levels exceed the WHO limits at all times of the day. Therefore, people cannot be in a state of complete well-being.

## 5. Conclusions and Recommendation

The analyses show that the noise levels at the nine selected points are above the limit values. The evening and night measurements at these points are above the limit values, while the daytime measurements are within the limit values. The values are lower due to the absence of traffic in the morning hours, and the increase in traffic density due to people leaving work in the evening makes the noise levels at these points different. It has been found that the noise level at weekends is 3-4 dBA lower than on weekdays. This is because the weekend is a holiday and the traffic density is low. However, the readings are still above the limit values. Noise levels are always high at all points except the specified points. Noise levels are highest in the evening hours and lowest in the morning hours.

As a result of the measurements and assessments carried out in general, it has been found that the noise levels at many points exceed the limits set by the Noise Ordinance and the WHO in the noise assessment carried out at weekends. Even the lowest noise level measured

is above the 55 dBA accepted as the limit by the WHO. It can be said that Mardin city centre is generally noisy and disturbs people both psychologically and physiologically.

The main sources as a source of noise in the central district of Mardin; It has been determined that these are air horns used in motor vehicles, blower exhausts used in engines and old model vehicles. As a result, noise today has a negative impact on human health and performance. In our country, where urbanisation is increasing rapidly, road traffic noise is also a major health hazard. For this reason, it has been observed that traffic noise, which has the greatest impact on noise, varies according to vehicle differences.

Considering the study,

- Reducing vehicle speed limits,
- Increasing the use of public transport,
- Limiting heavy vehicles,
- Using porous asphalt instead of dense asphalt for road surfacing,
- Designing natural or artificial barriers in the designated areas within the study area (particularly at points 2, 3 and 7 where limit values are exceeded),
- It is predicted that the use of soundproofing in buildings to reduce noise will greatly reduce the discomfort caused by traffic noise to people living and working by the side of the motorway.

It is suggested that porous asphalt should be used instead of cobblestones, which are known to make a lot of noise when vehicles pass. This will ensure that sound and vibration are absorbed by the porous asphalt, reducing the noise generated by vehicles passing by.

Another suggestion is to close 1st Street completely to traffic and open it to traffic when necessary (service, ambulance, fire brigade, etc.). A solution to noise pollution can be developed in cooperation with the relevant institutions regarding 1st Street. As the entertainment venues on 1st Street are a major environmental nuisance, it is necessary to carry out a soundproofing analysis and control of these buildings and to take soundproofing measures. In areas where an action plan is required and where noise levels are above threshold values, it is expected that noise will be significantly reduced by applying one or more of the above methods.

This study was carried out to investigate the extent to which people living in tourism-oriented settlements, especially where highways and entertainment venues are dense, are affected by noise in terms of environmental noise levels, to develop proposals to reduce noise levels, and to determine the existing noise

levels for new settlements. In addition, it is proposed that town planning and noise levels in new buildings should be planned below the limit values.

In the context of urban design, this study has examined road traffic noise and entertainment-oriented spaces, and it can be recommended that different sources of environmental noise be examined in subsequent studies.

#### Author Contribution Statement

<i>A. Idea and Fiction</i>	<i>B. Literature Review</i>	<i>C. Writing</i>
<i>D. Data Collection</i>	<i>E. Analysis</i>	<i>F. Critical Review</i>
<i>Author 1: B, D,</i>		
<i>Author 2: A, C, E, F</i>		

#### Acknowledgement

This study was produced from Mehmet Salih Aydın's master's thesis.

#### References

- Akay, A., (2015). Controlling Traffic Noise in Urban Areas with Plant Use: Konya-Istanbul Ring Road Example, Master's Thesis, Selcuk University, Institute of Science, Konya.
- Akbulut Çoban, N., Hüsmen, N., Türkel, E., Doğan, G., (2019). General overview to strategic noise maps and action plans in turkey: the case of quiet areas identification process, Paper presented at the InterNoise19, INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference, 16-19 June, 2019. Madrid.
- Akbulut Çoban, N., (2021). Model Proposal for Determining Quiet Areas in Environmental Noise Management: Use of the Soundscape Approach, PhD Thesis, Akdeniz University, Institute of Science, Antalya.
- Aktaş, O., (2021). Geographic Information Systems Based Noise Analysis and Modeling Kaleiçi / Antalya Example, Master's Thesis, Akdeniz University, Institute of Science, Antalya.
- Aydın, M.S., (2020). Investigation of noise control within the scope of urban design in the case of Mardin, Master's Thesis, Siirt University, Institute of Science, Siirt.
- Bilgen, İ., (2017). Measurement of Traffic-Related Noise Levels in Nevşehir City Center and Preparation of Noise Map, Master Thesis, Nevşehir Hacı Bektaş Veli University, Institute of Science, Nevşehir.

- Demir, S., (2013). Creation of a Noise Map by Determining Noise Levels in the Beşiktaş District Center of Istanbul. PhD Thesis, Marmara University, Institute of Science, Istanbul.
- Demirel, A., (2019). Preparation of Noise Maps of Cities: Bolu Province Example, Master's Thesis, Bolu Abant İzzet Baysal University, Institute of Science, Bolu.
- Desarnauldsa, V., Monaya G., and Carvalhob, (2004). A., Noise Reduction by Urban Traffic Management, ICA 2004., 3257-3260.
- Eggenschwiler, K., Heutschi, K., Taghipour, A., Pieren, R., Gisladottir, A., Schaffer, B., Urban Design of Inner Courtyards And Road Traffic Noise: Influence of Façade Characteristics And Building Orientation on Perceived Noise Annoyance, Building and Environment 224 (2022) 109526.
- Eren, S., (2018). Assessment and Mapping of Noise Pollution in Safranbolu District of Karabük Province, Master Thesis, Karabuk University, Institute of Science, Karabuk
- Günel, V., (2006). Cultural Attractions and Tourism Usage Opportunities in Mardin Province, PhD Thesis, Ankara University Institute of Social Sciences, Ankara.
- Halaçlar, S., (2019). Vehicle-Related Noise Study Adana City Center Example, Master's Thesis, Aksaray University, Institute of Science, Aksaray.
- Kahveci, B., (2016). Mapping of Noise Pollution from Urban Roads in Adana/Turgut Özal Boulevard Example, Master's Thesis, Çukurova University, Institute of Science, Adana.
- Kaşağıcı, B., (2017). Detection of Noise Pollution in Streets and Sensitive Areas in Kayseri, Master's Thesis, Erciyes University, Institute of Science, Kayseri.
- Katranç, H. Ş., (2018). Noise Pollution and Environmental Effects in Şanlıurfa, Master's Thesis, Harran University, Institute of Science, Şanlıurfa.
- Kaya, G. K., (2020). Determination of Noise Levels and Environmental Effects in Heavy Traffic Areas of Gaziantep, Master's Thesis, Hasan Kalyoncu University, Institute of Science, Gaziantep.
- Kocaman, E., (2021). Determination of Perceptions and Attitudes Towards Noise Pollution in Turgutlu City, Master's Thesis, Uşak University, Institute of Science, Uşak.
- Kulu, M., (2019). Environmental Noise Created by Rail Systems (Istanbul Kabataş-Bağcılar Tram Line

- Example), Master Thesis, KTO Karatay University, Institute of Science, Konya.
- Lee, H.M., Luo, W., Xie, J. and Lee, H. P., Traffic Noise Reduction Strategy in a Large City and an Analysis of Its Effect, *Appl. Sci.* 2022, 12(12), 6027; <https://doi.org/10.3390/app12126027>.
- Onay, B., (2021). Landscape Architecture Approaches to Preventing Noise Pollution in School Gardens and Surroundings: Isparta Example, PhD Thesis, Süleyman Demirel University, Institute of Science, Isparta.
- Ögel, C., (2015). Traffic-Related Noise Pollution in Isparta City, Master's Thesis, Ondokuz Mayıs University, Institute of Science, Samsun.
- Özçetin, Z., (2016). A Method Proposal for Analysis of Traffic-Related Noise on Celal Bayar Boulevard and Investigation of Its Environmental Effects, PhD Thesis, Gazi University Institute of Science, Ankara.
- Savaş, S., (2019). Mapping of noise arising from the motorway in İstanbul Kavacık location and application of noise curtain model, Master's Thesis, Tekirdağ Namık Kemal University, Institute of Science, Tekirdağ.
- Sezgin, S., (2016). Noise and Noise Awareness as an Environmental Problem: The Şişli Example, Master's Thesis, Ondokuz Mayıs University, Institute of Science, Samsun.
- Sünneci, A., (2020). Preparation of Edirne Central District Noise Map, Specialization Thesis, Trakya University, Institute of Science, Edirne.
- Taşkaya, S., (2017). Examination of Existing Strategic Noise Maps of Elâzığ Province with a Survey Study, Master's Thesis, Ondokuz Mayıs University, Institute of Science, Samsun.
- The World Health Organisation (WHO).
- Teneler, A. A., (2020). Determination of Sleep Quality of Residents of Yaylaköy, Ovacık and Küçükkaya Neighborhoods in İzmir and Evaluation of Its Relationship with Environmental Noise, Medical Specialization Thesis, Ege University, Institute of Science, İzmir.
- Yalçındağ, N. S., (2021). Investigation of Perceptual Differences in Environmental Noise, PhD Thesis, Süleyman Demirel University, Institute of Science, Isparta.
- Zengin, U., (2019). Traffic-Related Environmental Noise Maps and Erzurum City Center Example, Master's Thesis, Ataturk University, Institute of Science, Erzurum.

**BİR BOYUTLU ZEMİN TEPKİSİNİN TAHMİNİ: İNÖNÜ HAVZASI ÖRNEĞİ**Gizem Nur COŞKUN<sup>1</sup>, Murat TÜRKÖZ<sup>2\*</sup>, Ebru CİVELEKLER<sup>3</sup><sup>1,2,3</sup> Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Eskişehir<sup>1</sup> ORCID No : <http://orcid.org/0000-0001-8363-7311><sup>2</sup> ORCID No : <https://orcid.org/0000-0003-0241-113X><sup>3</sup> ORCID No : <http://orcid.org/0000-0002-5528-3453>

Anahtar Kelimeler	Öz
1 Boyutlu Eşdeğer Doğrusal Analiz, 1 Boyutlu Doğrusal Olmayan Analiz, Zemin Davranış Analizleri, Eskişehir-İnönü Havzası, Zemin Büyütmesi.	Zeminlerin farklı fiziksel ve mekanik özelliklere sahip olması, kuvvetli yer hareketinin özelliklerini değiştirebilir ve yapı davranışına doğrudan etki edebilir. Deprem kaynaklı hasarların en aza indirilmesi ve yapı güvenliğinin sağlanabilmesi için, zemin tabakalarının sismik yükler altındaki davranışlarının doğru belirlenmesi ve buna uygun bir yapı tasarımının yapılması büyük önem taşır. Bu nedenle yapıların tasarımından önce deprem sırasında maruz kalacağı etkileri göz önüne almak ve yapı-zemin etkileşimini belirlemek amacıyla zemin tepki analizleri yapılmaktadır. Bu çalışmada Eskişehir Fay Zonu gibi tektonik bir yapının etkisinde bulunan Eskişehir'in İnönü havzasının zemin tepkisinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla çalışma kapsamında belirlenen 17 farklı lokasyonda sondaj ve arazide yapılan kayma dalgası hızı verileri kullanılarak, tek boyutlu (1D) eşdeğer doğrusal ve doğrusal olmayan analizler yapılmıştır. Analizlerden elde edilen spektral parametreler grafiklerle sunulmuştur. Çalışma kapsamında yapılan eşdeğer doğrusal ve doğrusal olmayan zemin tepki analizleri sonucunda en büyük spektral parametreler genel olarak eşdeğer zemin tepki analizlerinden elde edilmiştir. Analizler sonucunda PGA değerlerinin 0.35-0.53 g arasındaki değerlere, maksimum spektral ivmelerin 3.2 g, amplifikasyonların en düşük 1.8 ile en yüksek 3.2 değerlerine ulaştığı ve yerel zemin koşullarının farklılaşmasının zemin tepkisini önemli ölçüde etkilediği belirlenmiştir. Ayrıca, kumlu zemin tabakasının baskın olduğu sondaj lokasyonunda doğrusal olmayan zemin tepkisinden daha büyük değerler elde edilmesi, ince içeriğinin doğrusal olmayan zemin tepkisine etkisi olarak yorumlanmıştır.

**PREDICTION OF THE ONE DIMENSIONAL SITE RESPONSE: THE İNÖNÜ BASIN CASE**

Keywords	Abstract
1-D Equivalent Linear Analysis, 1-D Nonlinear Analysis, Soil Behavior Analysis, Eskişehir-İnönü Basin, Soil Amplification	The different physical and mechanical properties of soils can alter the characteristics of strong ground motion and directly affect structural behavior. In order to minimize earthquake-induced damage and ensure structural safety, it is crucial to accurately determine the behavior of soil layers under seismic loads and to design structures accordingly. For this reason, site response analyses are performed to consider the effects that structures will be exposed to during an earthquake and to determine the structure-soil interaction prior to their design. In this study, the aim is to determine the site response of the İnönü basin in Eskişehir, which is affected by a tectonic structure such as the Eskişehir Fault Zone. To this end, one-dimensional (1D) equivalent linear and nonlinear analyses were performed using drilling and field shear wave velocity data collected at 17 different locations identified within the scope of the study. The spectral parameters obtained from the analyses are presented in the figures. As a result of the equivalent linear and nonlinear site response analyses performed within the scope of the study, the largest spectral parameters were generally obtained from the equivalent site response analyses. The analyses revealed that PGA values ranged between 0.35 and 0.5 g, maximum spectral accelerations reached 3.2 g, amplifications ranged from a minimum of 1.8 to a maximum of



Bu eser, Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>) hükümlerine göre açık erişimli bir makaledir.

This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

*3.2, and variations in local soil conditions significantly affected soil response. In addition, the fact that larger values were obtained from the nonlinear soil response at the borehole location where the sandy soil layer was dominant was interpreted as the effect of the fines content on the nonlinear soil response.*

Araştırma Makalesi

Research Article

Başvuru Tarihi : 09.08.2025

Submission Date : 09.08.2025

Kabul Tarihi : 27.11.2025

Accepted Date : 27.11.2025

\* Sorumlu yazar: [mturkoz@ogu.edu.tr](mailto:mturkoz@ogu.edu.tr)

<https://doi.org/10.31796/ogummf.1760960>

## 1. Giriş

Türkiye güçlü tektonik hareketlerin etkisi altındadır. Son 25 yıl içerisinde 17 Ağustos 1999 Kocaeli, 12 Kasım 1999 Düzce, 23 Ekim 2011 Van, 24 Ocak 2020 Elazığ ve 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş depremleri gibi büyük ve orta ölçekli sarsıntılarla ciddi can ve mal kayıpları yaşamıştır. Kocaeli Depremi; Marmara Bölgesi'nin büyük bir kısmını etkilemiş ve ağır sosyal-ekonomik kayıplara neden olmuştur. Eskişehir şehri ve çevresi de bu depremlerden etkilenmiş olan bölgelerdendir. Bölgede aletsel kayıtlara göre 20 Şubat 1956 tarihinde Eskişehir merkezli kaydedilen depremde şehirde can ve mal kaybına yol açmıştır. Ayrıca çalışma alanı olarak seçilen Eskişehir-İnönü ilçesi de, Pleyistosen'den bu yana aktif olduğu öne sürülen Eskişehir Fay Zonu'nun İnönü-Oklubal segmentinin etkisi altındadır (Altunel ve Barka,1998).

Deprem mühendisliği, olası bir depremin sebep olabileceği etkileri öngörerek depreme dayanıklı yapıların tasarımını amaçlayan bir disiplindir. Bu kapsamda, dinamik yükler altında zemin davranışının belirlenmesi ve zemin-yapı etkileşiminin göz önüne alınarak üst yapıların tasarımının yapılması gerekmektedir. Yerel zemin özelliklerinin farklılık göstermesi, deprem esnasında meydana gelen tekrarlı yüklemeye karakteristiklerine bağlı olarak yer ivmesi genliklerini, yapı üzerinde oluşacak tepki kuvvetlerini ve frekans içeriklerini doğrudan etkiler. Bu nedenle temel zemini oluşturan tabakaların olası bir deprem anında ve sonrasında nasıl davranacağını doğru şekilde belirlenmesi, yapı güvenliği açısından kritik bir öneme sahiptir.

Günümüzde, dinamik yük etkisi altındaki yapıların deprem güvenliğini sağlamak amacıyla, ilgili deprem yönetmeliklerinde tanımlanan tasarım spektrumlarından faydalanılmaktadır. Bu spektrumlar, yapıların doğal titreşim periyotları dikkate alınarak, deprem anında oluşabilecek yatay ve düşey yüklerin belirlenmesine olanak tanımaktadır. Tepki spektrumları, tek serbestlik derecesine sahip sistemler üzerinde etkili olan deprem kaynaklı yer hareketlerinin, sistemin doğal frekansı ve sönüm oranına bağlı olarak oluşturduğu maksimum ivme, hız ve yer değiştirme değerlerini gösteren grafiksel temsillerdir (Kramer,

1996). Tasarım spektrumları ise, bir bölgedeki sismik özellikler ve zemin koşulları göz önünde bulundurularak, farklı büyüklükteki depremlere karşı yapının maruz kalabileceği en yüksek tepkileri temsil etmektedir (Fan, Wang, Xiao; 2018). Yeni yapıların deprem yüklerinin hesabında yaygın olarak bu spektrumlar kullanılır.

Depreme dayanıklı yapı tasarımına yönelik tüm yönetmeliklerde temel amaç, bir yapının 50 yıllık kullanım süresi boyunca maruz kalacağı sismik yükler altında ciddi bir yapısal hasar almaması ve can kaybının önlenmesidir. Türkiye'de yürürlükte bulunan Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY) 2018 ile bu konu daha kapsamlı şekilde ele alınmıştır. TBDY 2018'de, özellikle yerel zemin sınıflarının detaylı belirlenmesi, yapının konumuna, faya olan uzaklığına ve zemin özelliklerine göre deprem yer hareketi spektrumlarının hesaplanması önerilmektedir. Yönetmeliğin 16.5.1.3. maddesinde, ZF sınıfı olarak tanımlanan en zayıf zeminler için zemin tepki analizlerinin yapılmasının zorunlu olduğu belirtilmiş; gerek görülmesi halinde diğer zemin sınıflarında da bu tür analizlerin yapılması tavsiye edilmiştir.

Deprem sırasında zeminde oluşacak büyütmelerin analiz edildiği, deprem sonucunda yapının maruz kalacağı etkilerin belirlenmesi amacıyla zemin tepki analizleri yapılmaktadır. Daha pratik ve daha az zaman gerektirmesi, iş yükünün de daha az olması nedeniyle bir boyutlu (1D) zemin tepki analizleri günümüzde sıklıkla kullanılmaktadır ( Carlton ve Tokimatsu, 2016; Civelekler vd., 2021a; Nghiem ve Chang, 2019; Sun ve Yuan, 2021).

Civelekler ve diğ. Eskişehir şehir merkezi kapsamında yaptıkları bir boyutlu eşdeğer doğrusal ve doğrusal olmayan zemin tepki analiz çalışmalarında, birbirine yakın konumlarda bulunan sondajlarda benzer zemin profili olsa dahi, plastisite ve ince içerik miktarı gibi özelliklerin etkisiyle zemin tepkisinin farklılaştığını belirlemişlerdir. Analiz sonuçlarında yerel zemin koşullarına bağlı olarak farklı spektral ivme ve amplifikasyonların oluştuğunu gözlemlemişlerdir (Civelekler vd., 2021a, 2021b, 2024).

Bu çalışmada Eskişehir'in İnönü ilçesinde 17 farklı lokasyonda yapılmış olan sondaj verileri ve aynı

noktalarda arazide yapılmış olan jeofizik deneylerden biri olan MASW yönteminden faydalanılarak analizler yapılmıştır. Eskişehir'in İnönü ilçesi, Türkiye Deprem Tehlike Haritası'na göre orta düzeyde sismik tehlike barındıran bir deprem kuşağında konumlanmaktadır. Çalışmaların yapıldığı alan jeolojik tarih içinde çok yoğun tektonik aktivitelere maruz kalmış olup, çevresinde büyük deprem üretme kapasitesine sahip fay sistemleri mevcuttur. Kuzey Anadolu Fay Zonu (KAF), Kütahya Fay Zonu, Eskişehir Fay Zonu ve İnönü-Dodurga Fayı bölgedeki en önemli deprem kaynaklarıdır. İnönü-Dodurga segmenti, Eskişehir Fay Zonu içerisinde BKB-DGD ve D-B yönünde uzanmakta ve yüzey morfolojisinde belirgin bir çizgisellik sergilemektedir (Tokay ve Altunel, 2005). Yapısal hasarlara neden olan Eskişehir Fay Zonu içerisinde oluşan 6.4 büyüklüğündeki 1956 depremi şehrin merkezi ve ilçelerinde çok sayıda binanın hasar görmesine neden olmuştur.

Bu çalışmanın amacı, İnönü havzasının bir boyutlu yüzey davranışının belirlenmesi ve bu davranışa yerel zemin etkilerindeki değişikliğin yansımalarının değerlendirilmesidir. Çalışma kapsamında TBDY (2018)' in de önerdiği gibi 11 kuvvetli yer hareketi kullanılarak eşdeğer doğrusal ve doğrusal olmayan zemin tepki analizleri yapılmış ve zeminin dinamik parametreleri belirlenmiştir.

## 2. Materyal ve Metot

Bu çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

### 2.1. Deprem etkisinin zamansal analiz yöntemiyle tanımlanması

Deprem bölgesine özel etkilerinin doğru şekilde analiz edilebilmesi için temel belirleyici unsurlar, yer hareketinin özelliklerine dayanmaktadır. TBDY (2018)'in ikinci bölümünde, birden fazla boyutta gerçekleştirilecek taşıyıcı sistem analizleri için kullanılacak deprem yer hareketlerinin seçimi ve basit ölçekleme yöntemleri önerilmiştir. Yönetmelikte, aşılma olasılığı belirlenmiş olan ve tekrarlanma periyotlarına göre tanımlanan dört farklı Deprem Yer Hareketi Seviyesi (DD-1, DD-2, DD-3 ve DD-4) yer almaktadır.

Sınıflamaya göre DD-1, gerçekleşme olasılığı düşük ancak etki bakımından en büyük olan deprem yer hareketini temsil ederken; DD-2, standart tasarım deprem düzeyi olarak kabul edilmektedir. Dolayısıyla, konut veya ticari yapılar gibi genel kullanım amaçlı binaların tasarımında çoğunlukla DD-2 seviyesi esas alınmaktadır. Buna karşın, hastane, okul ya da nükleer tesis gibi yüksek önem derecesine sahip yapılarda ise DD-1 seviyesi kullanılmaktadır. Türkiye Deprem Tehlike Haritası (AFAD) verilerine göre de Eskişehir ili için öngörülen tasarım deprem düzeyi DD-2'dir.

Analizlerin gerçekleştirildiği İnönü (Merkez) ilçesindeki 17 sondaja ilişkin DD-2 yer hareketi düzeyine ait deprem karakteristikleri, AFAD tarafından sunulan Türkiye Deprem Tehlike Haritaları İnteraktif Web Uygulaması kullanılarak belirlenmiş ve bir tabloya aktarılmıştır (Tablo 1).

Tablo 1. Çalışma için kullanılan sondajların yer aldığı İnönü'ye (Merkez) ait AFAD'ın Türkiye Deprem Tehlike Haritasından elde edilen deprem parametreleri

Mahalle	Zemin Sınıfı	SDS	PGA	PGV
Merkez	ZC	0.955	0.33	20.231

SDS: Yatay elastik tasarım spektrumu

PGA: pik yer ivmesi

PGV: pik yer hızı

### 2.2. Deprem kayıtlarının analiz amaçlı seçilmesi ve uygun şekilde ölçeklendirilmesi

TBDY (2018) yönetmeliğinde, deprem etkilerine dayanıklı yapıların tasarımında kullanılacak kuvvetli yer hareketi kayıtlarının seçilmesinde; tasarımda dikkate alınacak yer hareketi seviyesine uygun olarak deprem büyüklüğü, faydan uzaklık, kaynak türü ve bölgesel zemin koşullarının birlikte değerlendirilmesi önerilmektedir. Bu kapsamda, bu çalışmada gerçekleştirilen zemin tepki analizlerinde (eşdeğer doğrusal ve doğrusal olmayan analizler) gerçek deprem kayıtlarından yararlanılmıştır. Analizlerde kullanılan toplam 11 ivme kaydı, uluslararası düzeyde yaygın biçimde başvuru Pasifik Deprem Mühendisliği Araştırma Merkezi (Pacific Earthquake Engineering Research Center-PEER) sismik hareketlerin veri kayıtlarından (Pacific Ground Motion Database) temin edilmiştir. Bahsedilen veri tabanı dünyanın önde gelen sismik risk bölgelerinde meydana gelmiş depremlere ilişkin ayrıntılı kayıtları araştırmacıların erişimine sunmaktadır. Her bir deprem kaydı, ilgili kayıt istasyonunda ölçülmüş ivme, hız ve yer değiştirme verilerini içermekte olup, analiz için gerekli tüm parametreler standart formatlarda elde edilebilmektedir. Bu çalışmada, PEER veri tabanından seçilen 11 farklı yer hareketi kaydı; sismik tehlike düzeyi, yerel zemin sınıfı, fay mekanizması, deprem büyüklüğü ve kaynak-yapı mesafesi gibi kriterler göz önünde bulundurularak belirlenmiştir. Seçilen kayıtların,  $M_w > 6.0$  büyüklüğünde, doğrultu atımlı faylar üzerinde gerçekleşmiş depremlere ait olması ve fay uzaklıklarının 0-40 km aralığında bulunması tercih edilmiştir. Ayrıca zemin özellikleri açısından, yerel zemin sınıfının  $V_{s30}$  değeri 360-760 m/s aralığında olacak şekilde, tasarım bölgesine benzer koşulları temsil etmesine dikkat edilmiştir. Çalışmada kullanılan bu ivme kayıtlarının ayrıntılı bilgileri Tablo 2'de sunulmaktadır. Böylece, bölgeye özgü dinamik zemin

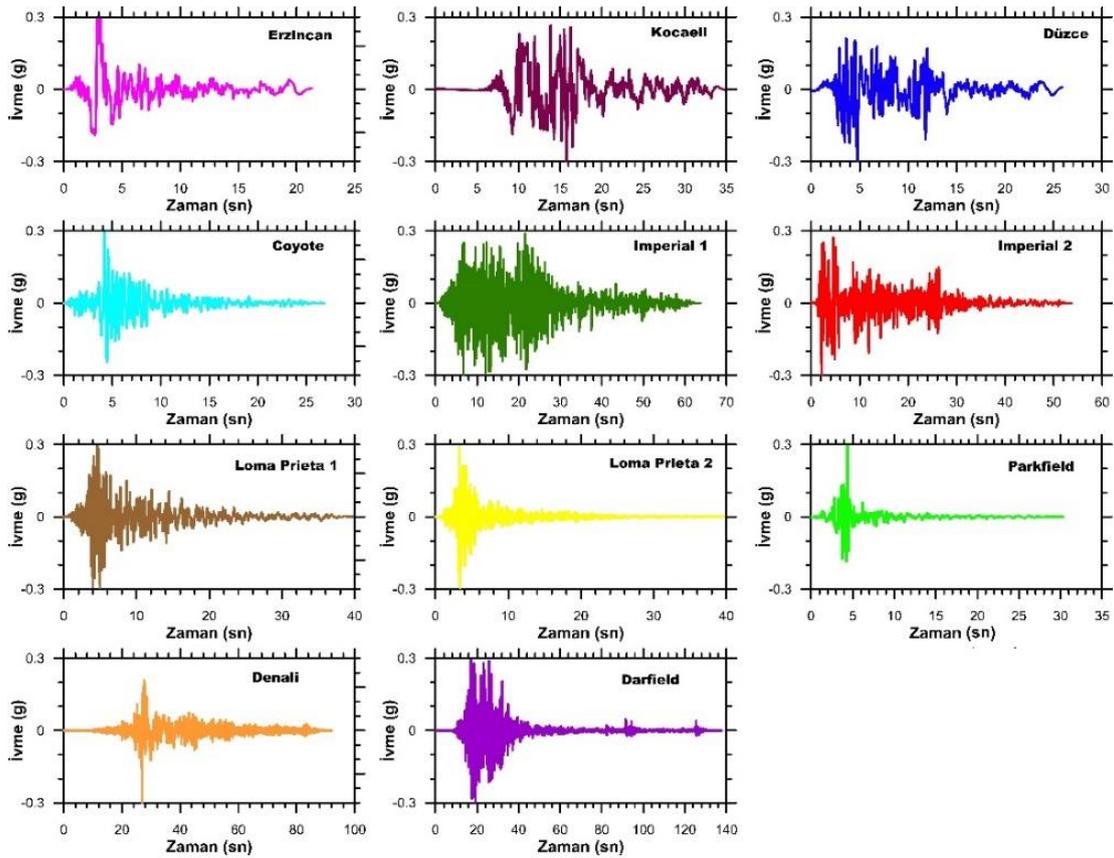
davranışının gerçeğe yakın şekilde modellenmesi amaçlanmıştır.

Tablo 2 Çalışmada kullanılan sismik hareket verileri (PEER, 2006)

Deprem	Yıl	İstasyon	Büyüklik
Erzincan	1992	Erzincan	6.69
Kocaeli	1999	Yarımca	7.2
Düzce	1999	Düzce	7.14
Coyote Lake	1979	SJB	5.7
Imperial Valley	1979	Calipatria	6.5
Imperial Valley	1940	El Centro	6.9
Loma Prieta	1989	Gilroy 3	6.9
Loma Prieta	1989	Gilroy 4	6.9
Parkfield	1966	Benioff	6.1
Denali	2002	TAPS	7.9
Darfield	2010	DSLCL	7.0

Bu çalışmada, eşdeğer doğrusal ve doğrusal olmayan zemin tepki analizleri DeepSoil 7.1 yazılımı aracılığıyla yapılmıştır. Çalışma alanını temsil eden 17 farklı sondaj noktasında, her biri farklı özelliklere sahip toplam 11 kuvvetli yer hareketi kaydı kullanılmış ve böylece her analiz tipi için 187 adet olmak üzere toplamda 374 farklı senaryo çalışılmıştır.

Analiz kapsamında değerlendirilen alandaki tasarım ivme değerlerinin (PGA, g) 0.251 ile 0.33 arasında değiştiği sonucu elde edilmiştir. (Tablo 1). Bu doğrultuda, kullanılan tüm deprem kayıtları, bölgedeki yer hareketi düzeyine uyum sağlayacak şekilde  $PGA(g)=0.3$  ve DD-2 tasarım depremi düzeyine göre ölçeklendirilerek analizlerde kullanılmıştır (Şekil 1). Böylece, sahaya özgü zemin tepkisinin olabildiğince gerçeğe yakın biçimde ortaya konması amaçlanmıştır.



Şekil 1. Çalışma kapsamında eşdeğer doğrusal ve doğrusal olmayan analizlerde kullanılan  $PGA=0.3$  g olarak ölçeklendirilmiş deprem verileri

### 2.3. Çalışmada kullanılan sondajların zemin özellikleri

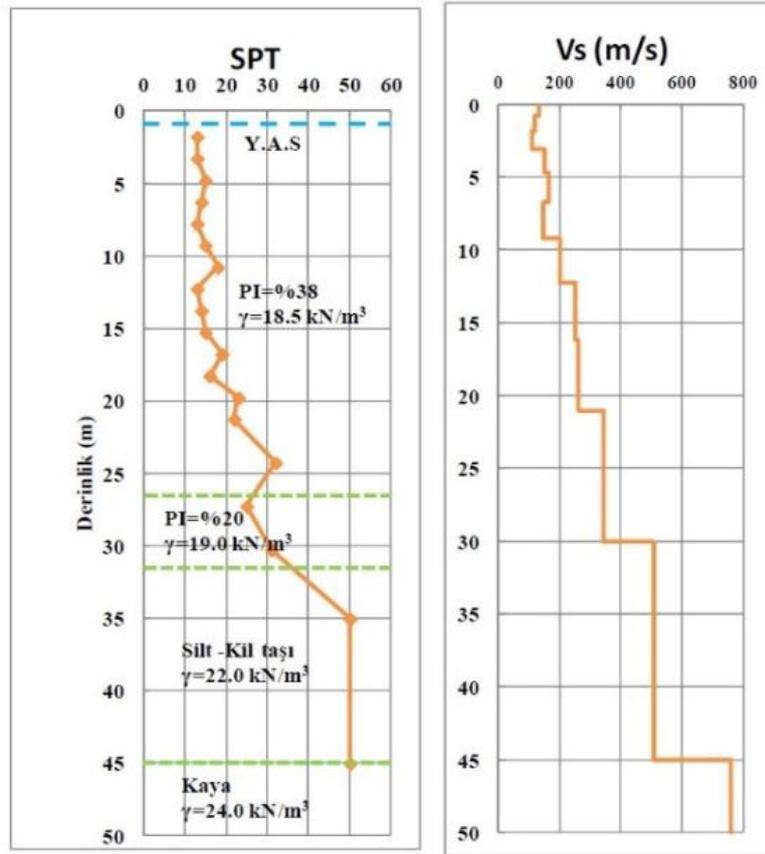
Çalışma alanı olan İnönü Eskişehir iline bağlı bir ilçe olup, Bursa Kütahya yolu üzerinde yer almakta ve Eskişehir iline 33 km mesafede yer almaktadır (Şekil 2). Çalışma kapsamında İnönü sahasında ESOĞÜ BAP kapsamında yapılmış olan 17 sondaj verisi ve arazide aynı noktalarda yapılan MASW çalışmalarından elde edilen sismik veriler kullanılmıştır (Türköz vd., 2013). Arazide yapılan sondaj verilerine göre, çalışma sahasının büyük kısmı, üstte ince taneli, alta ise iri taneli malzemelerden meydana gelen ve "alüvyon" olarak tanımlanan zeminle kaplıdır. Çalışma alanında alüvyon olarak tanımlanan zemin yüzeyden itibaren yüksek plastisiteye sahip kil-silt (CH, MH ve CH-MH), düşük plastisiteli kil-silt (CL, ML ve CL-ML) ve killi siltli kum (SC, SM, SC-SM, SP) ve yer yer killi siltli çakıl (GC-GM) olarak tanımlanmıştır. Bu zemin içerisinde ortalama %7 çakıl, %33 kum ve %60 ince taneli (silt-kil) malzeme bulunmaktadır. Çalışma alanı olan İnönü'de Sarısu Çayına yakın olan bölgelerde alüvyon kalınlığı artmakta kuzey-güney doğrultusunda gidildikçe

kalınlığı tedrici olarak azalmaktadır (Türköz vd., 2013). Şekil 3'de çalışma kapsamında yer alan sondajlardan SK1 sondajının temsili zemin profili ve kayma dalgası hız profili sunulmaktadır.

Çalışmada dikkate alınan zemin tabakalarının kıvam karakteristikleri değişkenlik göstermektedir. Likit limit (LL) değerleri %25 ile %83 değer aralığında olup, ortalama değeri %57'dir. İlgili zemin numunelerinin plastisite indeks değerleri geniş bir yelpazede değişim göstermektedir (PI=%6-59). Ancak ortalama değer %30 civarında tespit edilmiştir. Bu sonuçlar doğrultusunda, ortalama değerlerin plastisite diyagramında A hattının üzerinde ve sıvı limit (LL) %50 sınır çizgisinin sağında konumlandığı görülmektedir. Buna göre, çalışma sahası zemin profili yoğunluk olarak yüksek plastisiteli kil-silt zemin tabakalarından oluşmaktadır. Çalışma alanında, yeraltı suyu seviyesi zemin yüzeyine çok yakın olup derinliği 0.5 m-1.5 m arasında değişmektedir. Kuzeye doğru gidildikçe yeraltı suyu seviyesinin azaldığı görülmüştür. Bölgenin güney doğusunda yer alan kaya birimlerinde ise yüzey topografyasına uygun olarak yüzey sularına rastlanılmıştır (Türköz vd., 2013).



Şekil 2. Çalışma alanı sondaj lokasyon haritası



Şekil 3. Çalışmada analizleri yapılan SK1 sondajı temsili zemin profili ve kayma dalgası hızı örneği

## 2. 4. Zemin Tepki Analizleri

Zemin tepki analizleri, deprem dalgalarının zemin yüzeyinde oluşturacağı etkileri belirlemek amacıyla gerçekleştirilen çalışmalardır. Günümüzde bu analizler genel olarak iki ana başlık altında incelenmektedir:

1. Frekans alanı temelli analizler (eşdeğer doğrusal analizler)
2. Zaman alanı temelli analizler (doğrusal olmayan analizler)

Bu çalışmada kullanılan DeepSoil yazılımı, bir boyutlu zemin davranış analizleri temel alınarak geliştirilmiş olup, ilk olarak 1998 yılında kullanılmaya başlanmıştır. Geliştiricisi Hashash vd. (2016)' a göre DeepSoil, hem frekans hem de zaman tanım alanında çözümleme yapabilme yeteneğine sahip bir analiz aracıdır. Bu sayede hem eşdeğer doğrusal hem de doğrusal olmayan analizlerin gerçekleştirilmesine olanak sağlar.

Programda sınırsız sayıda zemin tabakası tanımlanabilmekte ve her tabaka için yapılan analizler sonucunda; ivme-zaman grafikleri, gerilme-zaman ilişkileri, gerilme birikimi, Fourier dönüşümü bazlı davranış spektrumları ve amplifikasyon spektrumları gibi çeşitli çıktılar elde edilebilmektedir. Ayrıca,

tanımlanan her bir zemin katmanı için detaylı davranış spektrumları da elde edilerek zemin profiline ilişkin kapsamlı değerlendirmeler yapılabilir.

### 2.4.1. Bir Boyutlu Eşdeğer Doğrusal Analiz

Zeminlerin dinamik davranışlarının modellenmesinde yaygın kullanılan yöntemlerden biri olan eşdeğer doğrusal analiz yöntemi, zemin tabakalarının yatay yönde sonsuz ve homojen olduğu varsayımına dayalı olarak, basit ve pratikliği nedeniyle çok tercih edilmektedir (Phillips ve Hashash, 2009; Arduino ve Kramer, 2009). Bu yaklaşım, zemin profilinin dinamik özelliklerini dikkate alarak, deprem sırasında zemin tarafından meydana gelecek büyütme etkilerini tahmin etmek amacıyla kullanılmaktadır.

Bu çalışmada eşdeğer doğrusal zemin tepki analizleri için DeepSoil 7.1 yazılımı kullanılmıştır. Çalışmada, 17 sondajın zemin tabakalarının kalınlığı, birim hacim ağırlığı ve kayma dalgası hızı gibi özelliklerine dayanarak, 30 metre derinliğe kadar tabakalar halinde tanımlama yapılmış ve analiz süreci başlatılmıştır. Eşdeğer doğrusal ve doğrusal olmayan analizlerde, ince taneli (kil-silt) zeminler için Vucetic-Dobry (1991), iri taneli zeminler (kum-çakıl) için ise Seed ve Idriss (1991) tarafından geliştirilen eğriler referans alınmıştır.

Yapılan çalışmalarda plastisite indisinin modül azalımı ve sönümleme oranı üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu belirlenmiştir (Vucetic ve Dobry, 1991). Bu nedenle bu çalışmada bu eğriler tercih edilmiştir.

#### 2.4.2. Bir Boyutlu Doğrusal Olmayan Analiz (Non-linear)

Deprem yüklemeleri altında zeminlerin sergilediği davranış genel olarak doğrusal özellik göstermeyebilir. Bu tür yüklemeler altında zeminin mekanik tepkisi, histeretik gerilme-şekil değiştirme eğrileriyle ifade edilen enerji kayıplarını ve kayma rijitliğinde meydana gelen değişimleri içerdiğinden, doğrusal olmayan analizler daha gerçekçi sonuçlar vermektedir (Bolisetti vd., 2014). Zaman tanım alanında gerçekleştirilen doğrusal olmayan zemin tepki analizlerinde, elastik olmayan tepki özellikleri dikkate alınarak zemin tepkisi daha doğru şekilde modellenir.

Klasik 1-boyutlu eşdeğer doğrusal analiz yönteminde, zemin katmanları yatay ve sonsuz olduğu varsayılır ve her bir tabaka için sabit kayma modülü (G) ve sabit sönüm oranı (D) kabul edilir. Buna karşın, doğrusal olmayan analizlerde zeminlerin gerilme-şekil değiştirme ilişkisi, kayma rijitliği ve sönüm oranlarının birim kayma deformasyonuna bağlı olarak sürekli değiştiği göz önünde bulundurulur. Bu da analizlerde daha detaylı bir davranış incelemesini mümkün kılar.

Bu çalışmada gerçekleştirilen doğrusal olmayan zemin tepki analizleri de DeepSoil 7.1 yazılımı kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Yazılım, doğrusal olmayan davranışı modellemek amacıyla Matasovic ve Vucetic (1993) tarafından önerilen modifiye hiperbolik modeli temel alan bir zemin modelinden yararlanır (Hashash ve Park, 2001). Bu model, zemin içerisindeki gerilmeye bağlı olarak değişen kayma modülü ve sönüm oranlarının etkilerini dikkate alır ve zemin içindeki büyük sınır gerilmelerinin bu özellikler üzerindeki etkisini açıklamak üzere geliştirilmiştir.

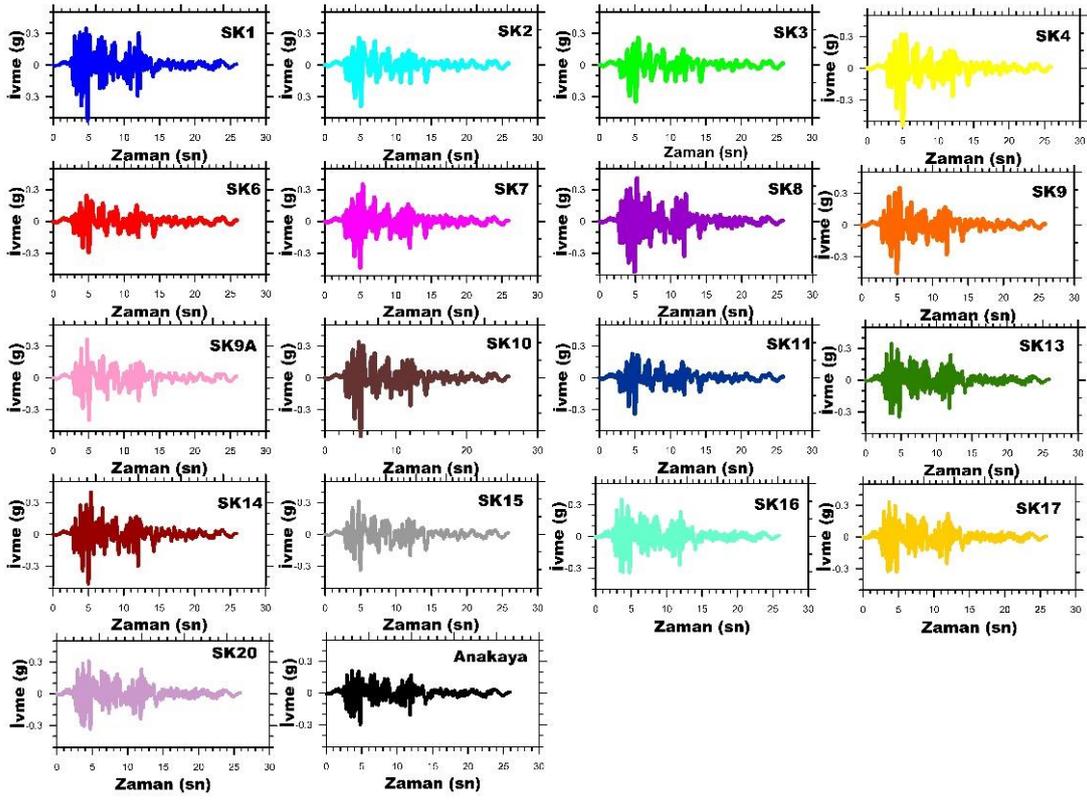
Doğrusal olmayan zemin tepki analizleri kapsamında, 17 adet sondaj noktası için 11 ayrı gerçek deprem hareketi verisinden yararlanarak doğrusal olmayan (non-linear) zemin tepki analizleri yapılmıştır. DeepSoil 7.1 yazılımı kullanılarak gerçekleştirilen analizler, zemin özelliklerine göre oluşturulan zemin profilleri üzerinden gerçekleştirilmiştir. Zemin türüne bağlı olarak, birim kayma deformasyonuna göre değişen her bir zemin tabakası için kayma modülü ve sönüm oranı eğrileri belirlenmiştir. Bu kapsamda kumlu zeminler için Seed ve Idriss (1991) eğrileri, killi-siltli zeminler için ise Vucetic ve Dobry (1991) eğrileri esas alınmıştır.

### 3. Bulguların İncelenmesi ve Değerlendirilmesi

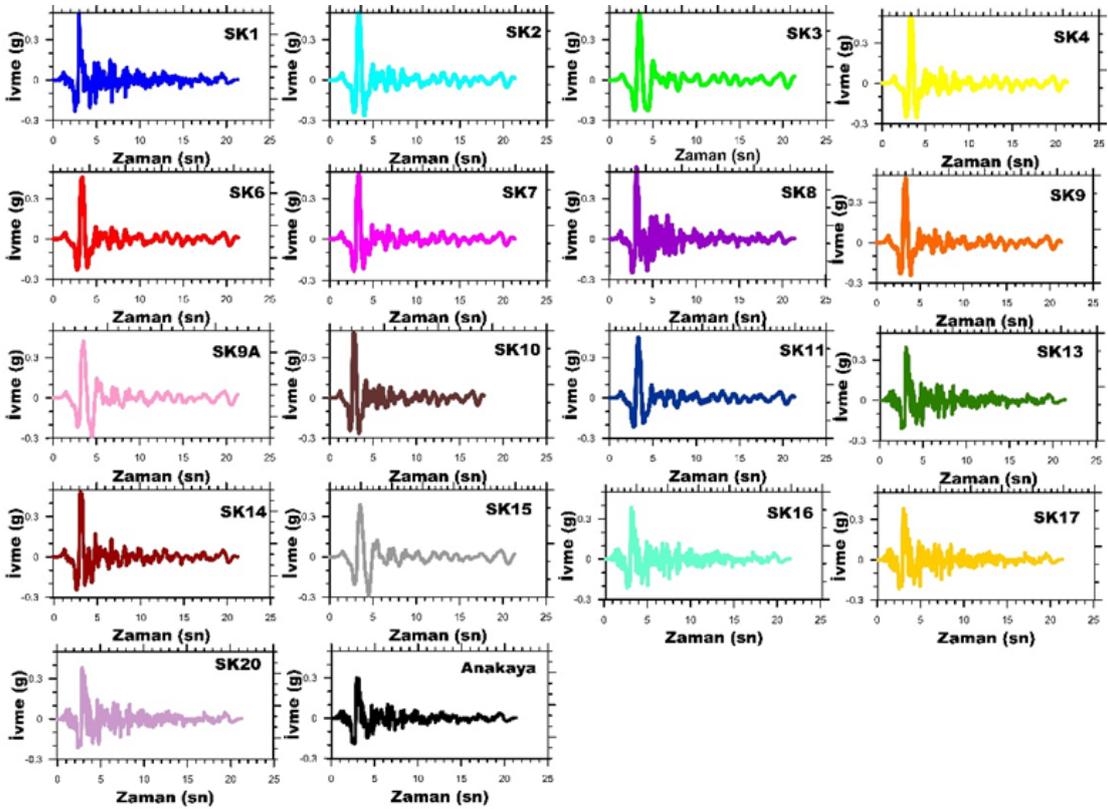
#### 3.1. Eşdeğer Doğrusal Zemin Tepki Analiz Sonuçları

##### 3.1.1. Zemin yüzeyinde ölçülen ivme değerleri

Bu çalışmada, 11 farklı deprem kaydı seçilerek 17 ayrı sondaj noktası için eşdeğer doğrusal analizler gerçekleştirilmiştir. Analizler neticesinde, öncelikle ivme-zaman grafikleri elde edilmiş ve bu grafiklerdeki pik ivme değerlerinin büyüklüğü ile farklı zamanlarda oluşumları, deprem kaynaklı farklı sismik karakteristiklerin göstergesi olarak değerlendirilmiştir. Analizlerde yer alan iki deprem verisi olan Düzce ve Erzincan deprem verileri kullanılarak elde edilen ivme-zaman grafikleri örnek olarak sunulmaktadır (Şekil 4, 5). Düzce deprem verisi kullanılarak elde edilen ivme-zaman değerlerinde yaklaşık 5 sn'de pik ivmeye ulaştığı ve bu değer SK-1, SK-4, SK-10 noktalarında 0.4 ila 0.5g arasında bir değer olduğu sonucu ortaya çıkmıştır (Şekil 4). Erzincan depreminde oluşan ivme-zaman grafikleri incelendiğinde, pik ivmelerin yaklaşık 3,5 sn' de olduğu gözlemlenmiştir. Maksimum pik ivmelerin ise SK13, SK16, SK17 ve SK20 sondajlarında 0.4 g; SK1, SK3, SK7, SK9, SK10, SK14 sondajlarında 0.5 g ve SK2, SK4, SK8 sondajlarında 0,53 g değerlerine ulaştığı belirlenmiştir (Şekil 5).



Şekil 4. Düzce deprem verisi kullanılarak yapılan eşdeğer doğrusal zemin tepki analizlerden elde edilen ivme-zaman grafikleri



Şekil 5. Erzincan deprem verisi kullanılarak yapılan eşdeğer doğrusal zemin tepki analizlerden elde edilen ivme-zaman grafikleri

### 3.1.2. Zemin tepki spektrumu

Eşdeğer doğrusal analizler neticesinde, çalışma sahasına ait davranış spektrumu parametreleri hesaplanmış ve Spektral ivme ( $S_a$ ) ile Periyot ( $T$ ) arasındaki ilişkileri gösteren grafikler oluşturulmuştur (Şekil 6). Analiz kapsamında incelenen 17 sondaj noktasına ilişkin olarak, 11 farklı deprem kaydına dayanarak her bir deprem için ayrı ayrı spektral ivme değerleri elde edilmiştir. Bu değerler, zemin-tepki karakteristiklerinin detaylı değerlendirilmesinde temel teşkil etmektedir. Eşdeğer doğrusal analiz çalışmaları sonucunda, 17 sondaj içerisinde maksimum spektral ivme değerlerinin SK16, SK17 ve SK20 sondajlarında yaklaşık 0.3 saniyelerinde 3.2 g olarak elde edilmiştir. SK2, SK3 ve SK15 gibi sondaj noktalarında daha düşük spektral ivme değerleri elde edilmiştir.

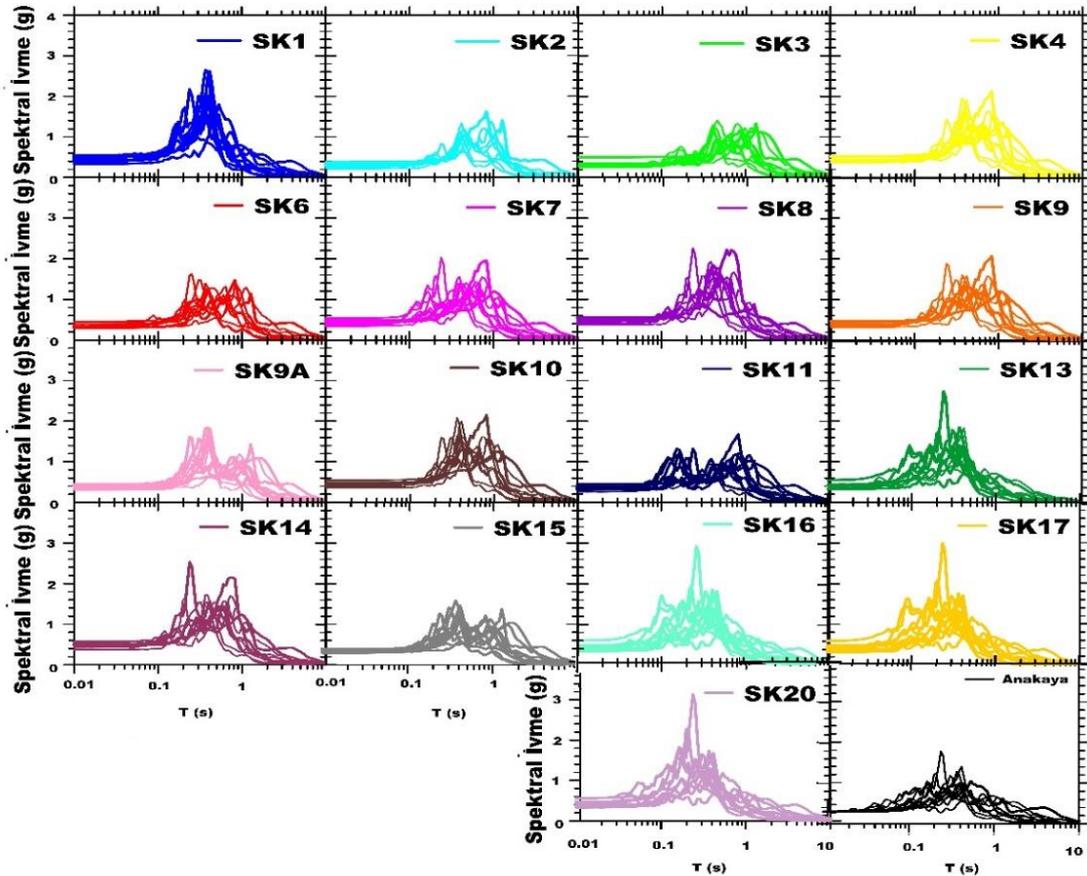
### 3.1.2. Zeminin büyütme değerleri

Deprem mühendisliği disiplininde yapılan araştırmalar, deprem dalgalarının etkisi altında bulunan tabakalı ve yumuşak zeminlerde, zeminin mekanik özelliklerine bağlı olarak hem ivme genliği, hem de hâkim titreşim periyotlarında belirgin büyütme oluştüğünü göstermektedir. Bu büyütme, zemin tabakalarının

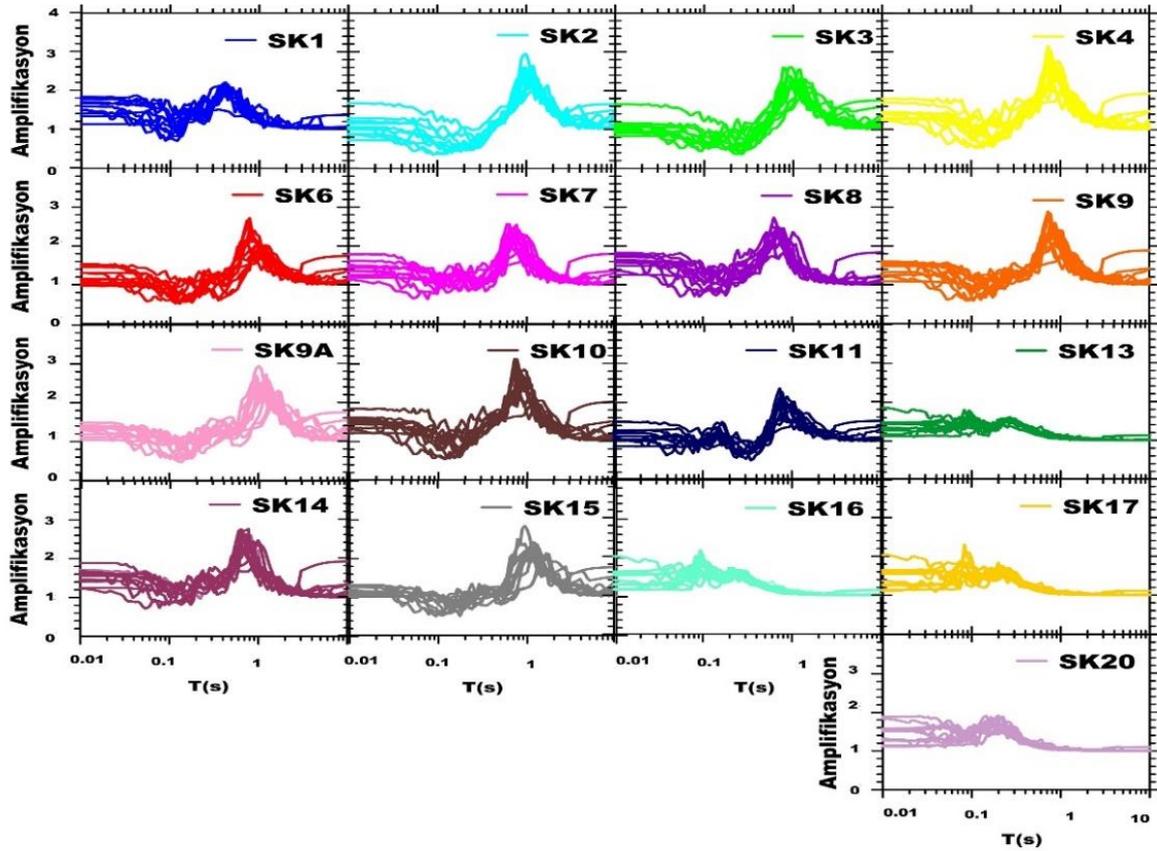
dinamik davranışları ve yerel rezonans etkileri nedeniyle ortaya çıkmakta olup, yapıların deprem performansını doğrudan etkilemektedir. Bu durum, depremin merkez üssünden uzak bölgelerde dahi yarı rezonans etkisi oluşturarak yapı hasarlarına yol açabilmektedir. (Cassaro ve Romero, 1987).

Tasarım tepki spektrumu olarak bilinen spektral ivme ( $S_A$ ) değeri, belirli bir sönümlenme özelliğine (5%) sahip bir alanın farklı deprem kuvvetlerine verdiği maksimum tepkidir. Amplifikasyon faktörü değerleri, zeminin spektral ivmesinin ana kaya spektral ivmesine oranı olarak hesaplanabilir. Amplifikasyon faktörü (zemin büyütme oranı) deprem esnasında yapıların karşılaşabileceği hasarların belirlenmesinde kritik bir parametre olarak öne çıkmaktadır.

Bu çalışmada kapsamında 17 sondaj verisinde 11 farklı deprem verisi kullanılarak yapılan eşdeğer doğrusal zemin tepki analizleri sonucunda büyütme oranı-periyot grafikleri oluşturulmuştur. Burada amplifikasyon (büyütme oranı)'ların 2 ile 3 arasında değişiklik gösterdiği, en yüksek büyütme değerlerinin SK4 ve SK10 sondajında 3.2 değerine ulaştığı, en düşük büyütme değerinin ise SK20 sondajında 1.8 olduğu belirlenmiştir (Şekil 7).



Şekil 6. Eşdeğer doğrusal zemin tepki analiz çalışmaları sonucunda 11 deprem verisinden elde edilmiş  $S_a$  (Spektral ivme) -  $T$  (Periyot) grafikleri



Şekil 7. Eşdeğer doğrusal zemin tepki analiz çalışmaları sonucunda 11 deprem verisinden elde edilmiş amplifikasyon (büyütme)-T (Periyot) grafikleri

### 3.2. Doğrusal Olmayan Zemin Tepki Analiz Sonuçları

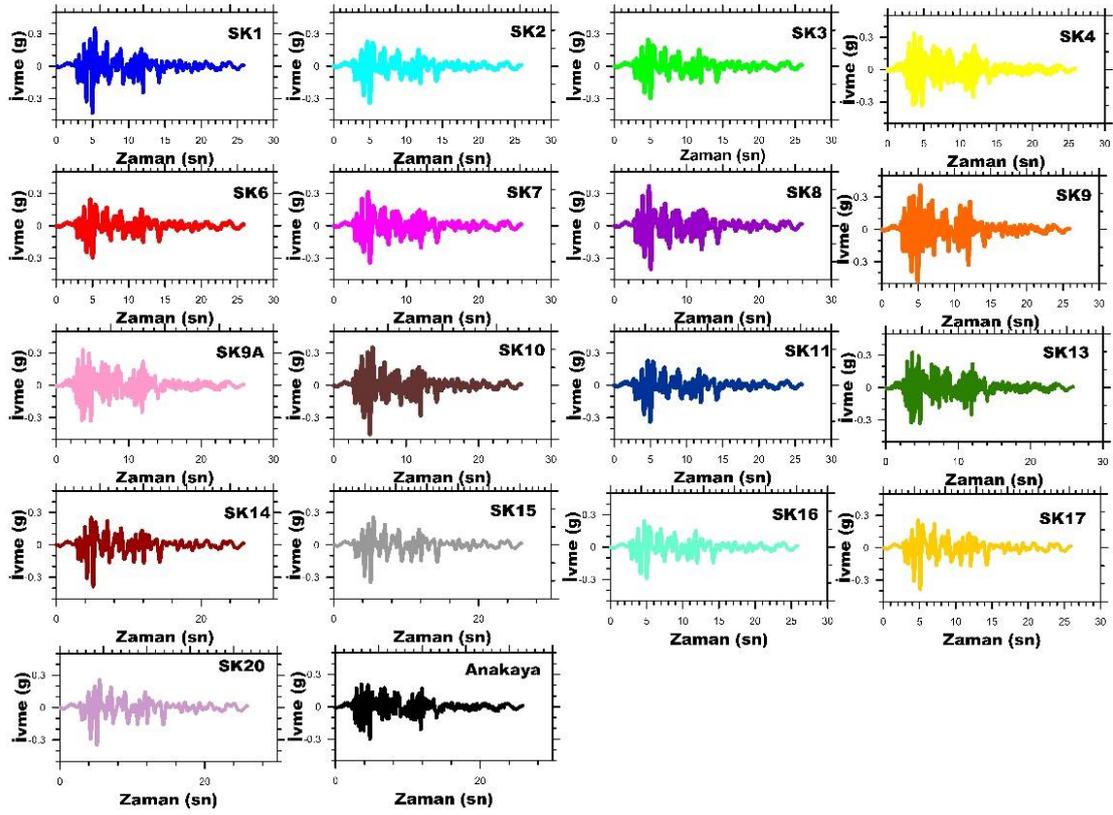
Sismik zemin davranışının zemin tepkisi üzerinde etkisini belirlemek için, Park ve Hashash (2008) tarafından bir dizi modifiye edilmiş eşdeğer doğrusal analiz yöntemi geliştirilmiştir. Bu analizler basitliği, pratikliği ve daha az matematiksel hesaplama gerektirmesi gibi nedenlerle daha çok tercih edilmesine rağmen; tüm zemin katmanları için kayma modülü ve sönümlenmenin sismik hareketin tüm süresi boyunca eşdeğer olmasının çok gerçekçi bir yaklaşım olmayacağı kanısına varılmıştır. Bu nedenle tekrarlı gerilmeler etkisinde farklı kayma modülü ve sönümlenme oranını dikkate almak için doğrusal olmayan (non-linear) zemin tepki analizleri yapılmaktadır. Hashash vd., (2010) çalışmalarında döngüsel yükleme etkisinde zemin tabakalarının tepkisinin genellikle doğrusal olmadığını ve yükleme genliği, döngü sayısı, zemin özelliği, çevre basıncı gibi faktörlere bağlı olduğunu belirlemişlerdir. Ayrıca yumuşak zemin çökellerinden oluşan sahaların güçlü sismik harekete maruz bırakıldığında eşdeğer doğrusal zemin tepkisiyle uyuşmayan sonuçlar elde etmişlerdir (Hashash vd., 2010).

Bu çalışma kapsamında, DeepSoil yazılımı kullanılarak 17 sondaj lokasyonu ve 11 deprem verisi için sahaya

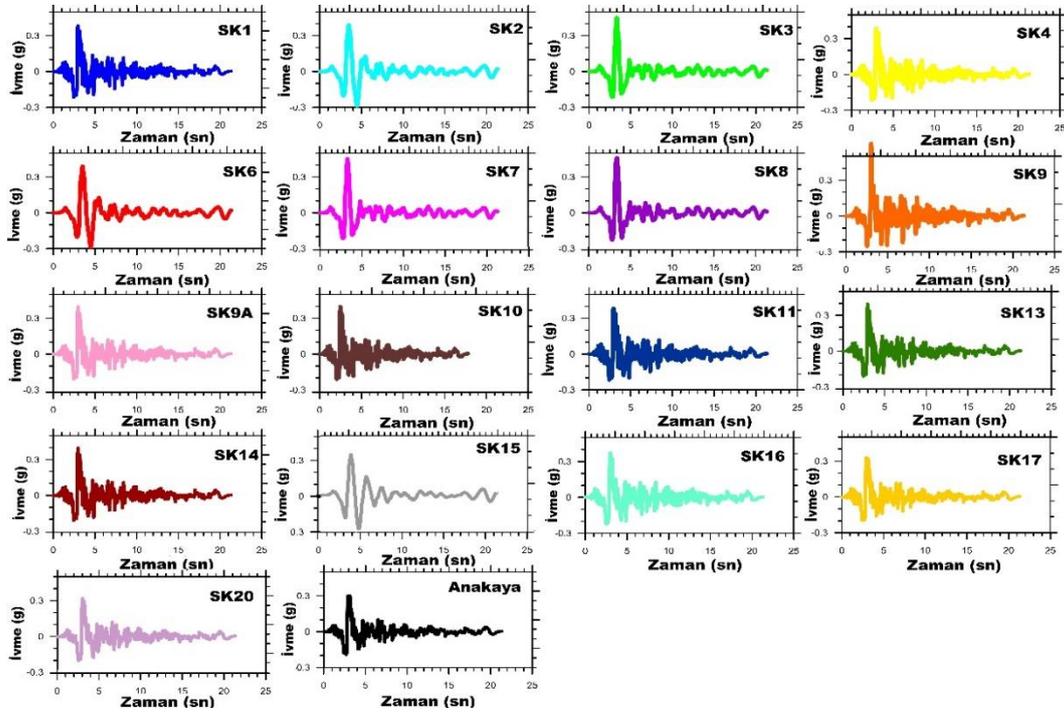
özgü doğrusal olmayan zemin tepki analizleri yapılmıştır. Analizlerde tanımlanan her bir zemin tabakası için kayma modülü ve sönümlenme oranı değişimi için kumlu zeminler Seed ve Idriss (1991) ve killi zeminler için ise Darendeli (2001) eğrileri kullanılmıştır.

#### 3.2.1. Zemin yüzeyinde ölçülen ivme değerleri

Çalışma kapsamında yapılan doğrusal olmayan zemin tepki analizleri sonucunda her bir deprem verisi için ivme-zaman grafikleri oluşturulmuştur. Eşdeğer doğrusal zemin tepki analiz sonuçlarında örnek olarak sunulan Düzce ve Erzincan deprem verisine ait grafikler Şekil 8 ve Şekil 9'da sunulmaktadır. Bu grafikler, her bir sondaj lokasyonunun zemin profiline bağlı olarak oluşan yüzey hareketinin özelliklerinin zemin tepki analizi için önemini kanıtlayan örneklerdir. Doğrusal olmayan zemin tepki analizlerinden elde edilen grafiklerde pik ivme değerlerinin 0.32-0.4 g arasında olduğu belirlenmiştir. Genel olarak eşdeğer doğrusal analiz sonuçlarına göre nispeten daha küçük ivme değerleri elde edilmiştir. Ancak sadece SK9 sondajında pik ivme değerinin büyüdüğü, Düzce deprem verisine göre yaklaşık 0.5 g, Erzincan deprem verisine göre ise 0.53 g değerine ulaştığı gözlemlenmiştir.



Şekil 8. Düzce deprem verisi kullanılarak yapılan doğrusal olmayan (non-linear) zemin tepki analizlerden elde edilen ivme-zaman grafikleri



Şekil 9. Erzincan deprem verisi kullanılarak yapılan doğrusal olmayan (non-linear) zemin tepki analizlerden elde edilen ivme-zaman grafikleri

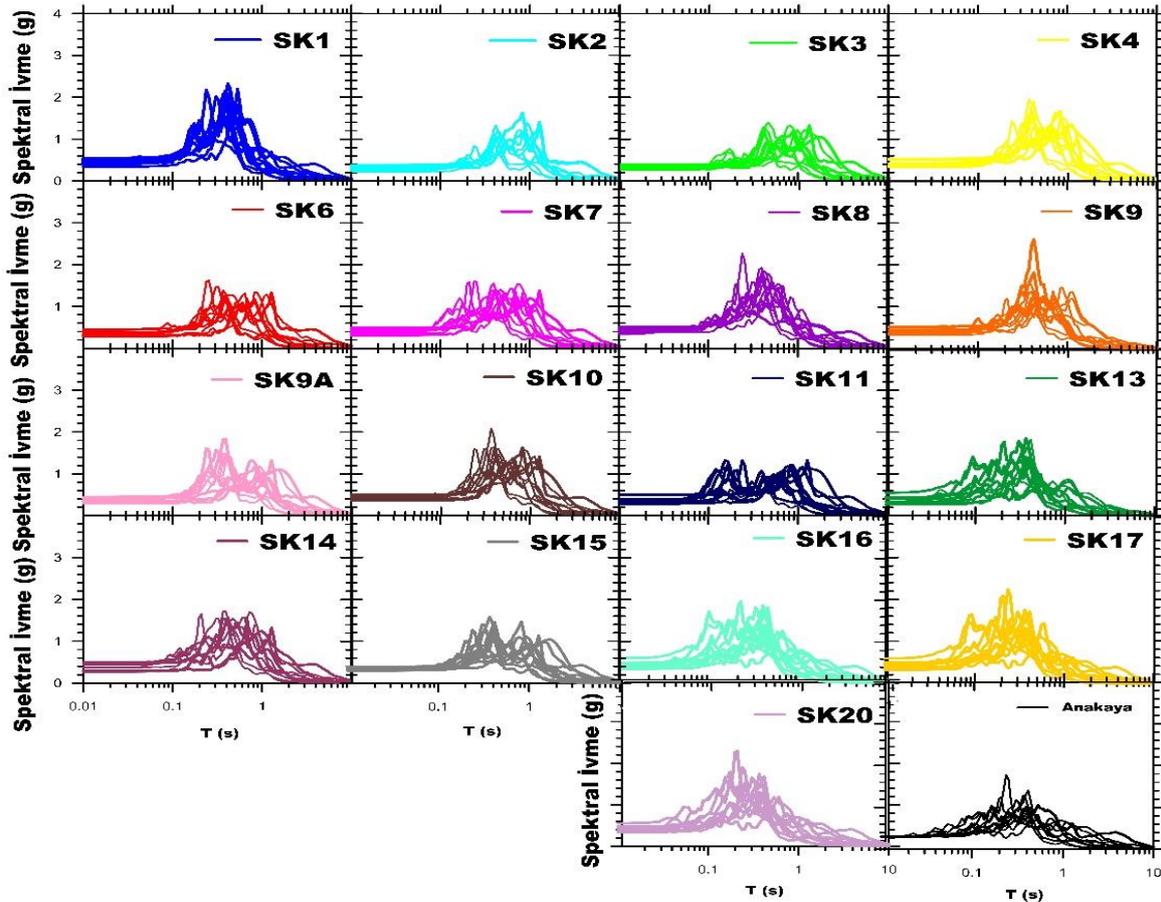
### 3.2.2. Zemin tepki spektrumu

Çalışmada doğrusal olmayan zemin tepki analizlerinden elde edilen Spektral ivme ( $S_a$ )-Periyot ( $T$ ) grafikleri Şekil 10' da sunulmaktadır. Doğrusal olmayan zemin tepki analizlerinden elde edilen  $S_a$ - $T$  grafiklerine göre, tepe spektral ivmesi örneğin SK1, SK8, SK10 ve SK17'de 0.25 sn civarında 2.4 g ve SK2 ve SK4 sondajlarında 0.35 sn 2 g olarak kaydedilmiştir. Tüm sondajların eşdeğer doğrusal zemin tepki analizlerinden elde edilen  $S_a$  ile doğrusal olmayan zemin tepki analizlerinden elde edilen  $S_a$  değerleri karşılaştırıldığında SK9 sondajı hariç, eşdeğer doğrusal zemin tepki analizlerinde daha büyük  $S_a$  değerleri elde edilmiştir. Yalnızca SK9

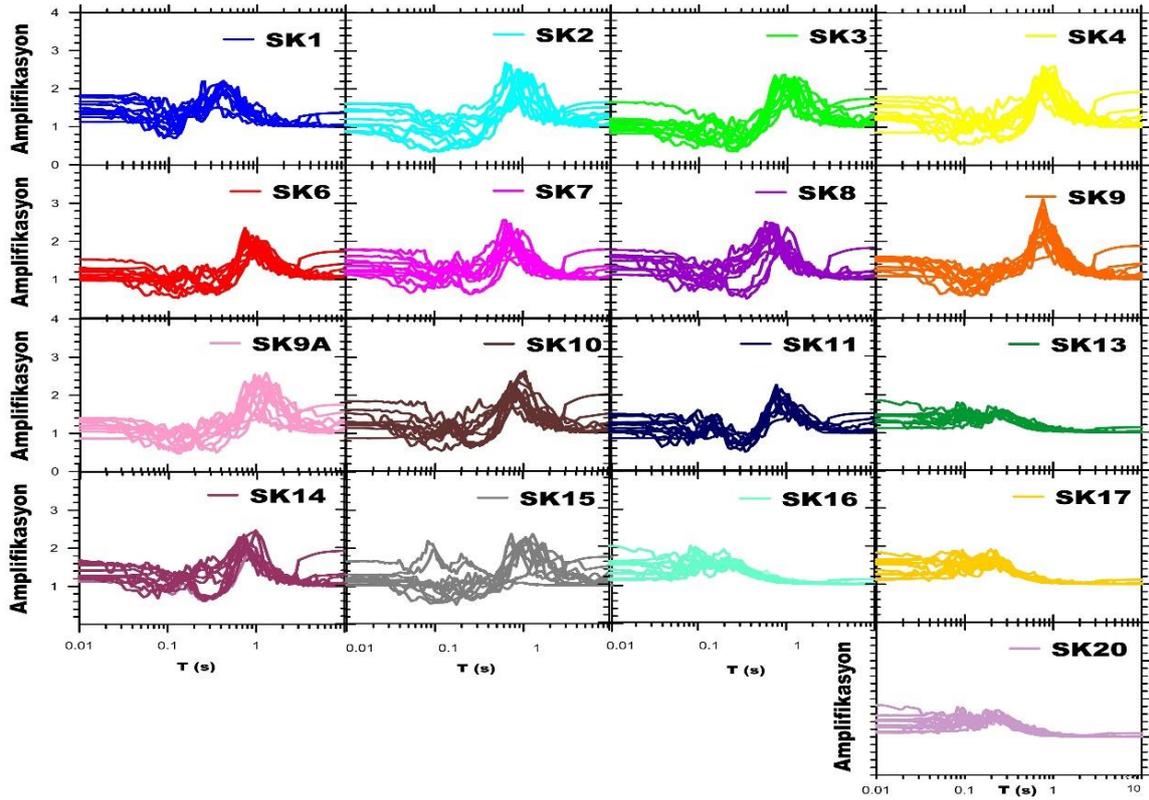
sondajında eşdeğer doğrusal analizlerde maksimum spektral ivme değerinin 2g, doğrusal olmayan analizlerde ise 2.6 g değerine ulaştığı gözlemlenmiştir.

### 3.2.3. Zeminin büyütme değerleri

Çalışma kapsamında yapılan doğrusal olmayan zemin tepki analizleri sonucunda amplifikasyon (büyütme oranı)- periyot grafikleri oluşturulmuştur. Burada amplifikasyon değerlerinin genel eğiliminin 2 ile 3 arasında değişiklik gösterdiği, en yüksek büyütme değerlerinin SK4, SK9 ve SK10 sondajında, en düşük büyütme değerinin SK20 sondajında olduğu belirlenmiştir (Şekil 11).



Şekil 10. Doğrusal olmayan (non-linear) zemin tepki analiz çalışmaları sonucunda 11 deprem verisinden elde edilmiş  $S_a$  (Spektral ivme) - $T$  (Periyot) grafikleri



Şekil 11. Doğrusal olmayan (non-linear) zemin tepki analiz çalışmaları sonucunda 11 deprem verisinden elde edilmiş amplifikasyon (büyütme)-T (Periyot) grafikleri

#### 4. Sonuçlar

Bu çalışmada İnönü havzası için olası depremlerin neden olabileceği sismik yükler altında zemin yüzeyinde oluşabilecek davranışın belirlenmesi için 1D eşdeğer doğrusal ve doğrusal olmayan yöntemleri kullanarak zemin tepki analizleri yapılmıştır. Bu çalışma kapsamında 17 sondaj lokasyonu için 11 farklı gerçek deprem verisine ait ivme kayıtları kullanılarak analizler tamamlanmıştır.

Analizlerde AFAD'ın bu bölge için önerdiği değer maksimum  $PGA=0.33$  g olmasından dolayı, deprem verileri  $0.3$  g' ye ölçeklendirilmiştir. Ancak çalışma kapsamında yapılan eşdeğer doğrusal zemin tepki analizleri sonucunda bu havza için PGA değerlerinin  $0.3-0.54$  arasında pik değerlere ulaştığı belirlenmiştir. Çalışma kapsamında AFAD'ın yapı tasarımı için uzmanlara önerdiği PGA değerlerinden oldukça yüksek değerler elde edilmiştir. Doğrusal olmayan zemin tepki analizleri sonunda ise PGA değerlerinin  $0.3-0.5$  arasında değerlere ulaştığı belirlenmiştir. Genel olarak PGA değerleri göz önüne alınarak karşılaştırma yapıldığında eşdeğer doğrusal analizlerde daha büyük değerler olarak elde edilmiştir. Ancak tamamen kumlu zeminlerden oluşan zemin profilinde, doğrusal olmayan analizlerde PGA'nın  $0.55$  g ye ulaştığı gözlemlenmiştir.

Analizler sonucunda oluşturulan Spektral ivme ( $S_a$ )-Periyot (T) grafikleri yorumlandığında, çoğu sondaj

lokasyonunda maksimum spektral ivmelere düşük periyotlarda ulaşıldığı, 1 saniyeden sonra ise yakın davranışlar gösterdiği gözlemlenmiştir.

Eşdeğer doğrusal zemin tepkisi analiz sonuçlarından elde edilen tüm spektral parametreler ile doğrusal olmayan zemin tepkisinden elde edilen parametreler karşılaştırıldığında, eşdeğer doğrusal zemin tepkisinden daha büyük spektral değerler elde edilmiştir. Sadece SK9 sondajında doğrusal olmayan zemin tepki parametreleri daha büyük değerlere ulaşmıştır. SK9 sondajının zemin özellikleri detaylı incelendiğinde en üstte dolgu, altında kumlu kil, ince kum gibi zemin tabakalarından oluştuğu görülmektedir. Daha çok ince dane içeriğinin baskın olduğu kum tabakalarından oluşan bu zemin profilinde, yerel zemin etkisinin doğrusal olmayan zemin tepkisine etkisi ile açıklanabilmektedir. Ayrıca Civelekler vd. (2021; 2024)'nin Eskişehir şehir merkezi için yaptıkları çalışmalarında, benzer zemin profillerinin aynı anakaya hareketine farklı yansımalar gösterdiğini ve bu yansımaların bazen plastisite etkisiyle bazen de ince içerik miktarıyla davranışı kontrol ederek öne çıktığını belirtmişlerdir. Bu çalışmada yüzey davranışını tahmin etmek için yapılan bir boyutlu analizlerde, ince içerik miktarının davranışı etkilediği gözlemlenmiştir. Çalışma kapsamında son olarak, yerel zemin etkilerine bağlı olarak davranışın farklılaştığı doğrulanmaktadır.

### Teşekkür

Bu çalışma, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Prof. Dr. Murat TÜRKÖZ danışmanlığında ve Dr. Öğr. Üyesi Ebru CİVELEKLER eş danışmanlığında "Yakın kaynaklı deprem etkisine maruz alüvyon zeminlerde zemin büyütme analizi" başlıklı yüksek lisans tezinden üretilmiştir.

### Araştırmacıların Katkısı

Bu araştırmada; Gizem Nur COŞKUN, bilimsel araştırma ve literatür taraması, eşdeğer doğrusal ve doğrusal olmayan zemin tepki analizlerinin uygulanması ve sonuçlandırılması; Murat TÜRKÖZ, verilerin elde edilmesi, analizlerden elde edilen sonuç grafiklerinin yorumlanması ve Ebru CİVELEKLER ise bilimsel yayın araştırması, bir boyutlu zemin tepki analizlerinin uygulanması, analizlerden elde edilen sonuç ve grafiklerin yorumlanması ile makalenin gelişimine fikri yönde katkı sağlamışlardır. Tüm yazarlar makalenin yazımında görev almıştır. Üç yazar da makalenin son halini okuyup, onaylamıştır.

### Çıkar Çatışması

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir.

### Kaynaklar

Altunel, E. ve Barka, A.K. (1998). Eskişehir Fay Zonunun İnönü-Sultandere Arasında Neotektonik Aktivitesi, *Geological Bulletin of Turkey*, 41, 41-52.

Arduino, P. ve Kramer, S.L. (2009). Site response. In: CEE 526 Geotechnical Earthquake Engineering lecture notes, University of Washington, Seattle, WA-USA.

Bolisetti, C., Whittaker, A. S., Mason, H. B., Almufti, I., Willford, M. (2014). Equivalent linear and nonlinear site response analysis for design and risk assessment of safety-related nuclear structures. *Nuclear Engineering and Design*, 275, 107-121.

Carlton, B., ve Tokimatsu, K. (2016). Comparison of Equivalent Linear and Nonlinear Site Response Analysis Results and Model to Estimate Maximum Shear Strain, *Earthquake Spectra*, 32(3), 1867-1887. <https://doi.org/10.1193/021215EQS029MR1>

Cassaro, M. A., E. M. Romero (editors ). (1987). The Mexico City Earthquake-1985, ASCE, New York.

Civelekler, E., Afacan, K. B., Volkan Okur, D. (2021a). Eşdeğer doğrusal ve doğrusal olmayan yaklaşımlara göre sismik yük etkisindeki zeminlerde davranış analizi, *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 29(2), 158-171. <https://doi.org/10.31796/OGUMMF.839703>

Civelekler, E., Okur, D.V., Afacan, K.B. (2021b). A study of the local site effects on the ground response for the city of Eskişehir Turkey, *Bull Eng Geol Env.* <https://doi.org/10.1007/s10064-021-02285-4>

Civelekler, E., Afacan, K.B., Okur, D.V. (2024). Effect of site specific soil characteristics on the nonlinear ground response analysis and comparison of the results with equivalent linear analysis, *Journal of Applied Geophysics*, 220, 105250. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2023.1052505>

Darendeli, M.B. (2001). Development of a new family of normalized modulus reduction and material damping curves. Ph.D. dissertation, University of Texas at Austin, Austin, Tex.

Fan, X., Wang, K., Xiao, S. (2018). Large-scale parallel computation for earthquake response spectrum analysis, *Engineering Computations*, 35, 800-817. Doi:10.1108/EC-08-2016-0294.

Hashash, Y. M. A. ve Park, D. (2001). *Non-linear one-dimensional seismic ground motion propagation in the Mississippi embayment*, *Engineering Geology*, 62 (2001) 185-206.

Hashash, Y. M. A., Phillips, C., Groholski, D. R. (2010). Recent Advances in Non-Linear Site Response Analysis, 5th International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, May 24-29, San Diego, Paper no. OSP 4.

Hashash, Y.M.A., Musgrove, M.I., Harmon, J.A., Groholski, D.R., Phillips, C.A., Park, D. (2016). [DEEPSOIL 6.1, User Manual](#), Urbana, IL, Board of Trustees of University of Illinois at Urbana-Champaign.

Kramer, S. L. (1996). *Geotechnical Earthquake Engineering*, Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, USA.

Matasovic, N. ve Vucetic, M. (1993). Cyclic Characterization of Liquefiable Sands, *ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 119(11), 1805-1822.

Nghiem, H. M., ve Chang, N.-Y. (2019). A new viscous damping formulation for 1D linear site response analysis, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 127, 105860. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2019.105860>

Park D, Hashash Y. M. (2008). Rate-dependent soil behavior in seismic site response analysis, *Canadian Geotechnical Journal*, 45(4), 454-469 <https://doi.org/10.1139/T07-090>

- PEER, P. E. (2006). PEER ground motion database. Berkeley: <http://peer.berkeley.edu/smcat/>.
- Phillips, C., Hashash, Y. M. (2009). Damping formulation for nonlinear 1D site response analyses, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 29(7), 1143–1158.
- Seed, H. B., Idriss. (1991). (Mean Limit), 2017, DEEPSOIL 7.0, User Manual. Urbana-Champaign.
- Sun, R., Yuan, X. (2021). A holistic equivalent linear method for site response analysis. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 141(October 2020), 106476.  
<https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2020.106476>
- Türkiye Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik. (2018). Afet ve Acil Durum Yönetim Başkanlığı, Ankara.
- Türköz, M., Tosun, H., Savaş, H., Orhan, A., Seyrek, E. (2013). Dinamik zemin özelliklerinin jeofizik ve penetrasyon deneyleri ile belirlenmesi ve karşılaştırmalı analiz, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projesi, Proje No: 201115024.
- Tokay F. ve Altunel E. (2005). Eskişehir Fay Zonu'nun İnönü-Dodurga Çevresinde Neotektonik Aktivitesi, *MTA Dergisi*, 130, 1-15
- Vucetic, M. ve Dobry, R. (1991). Effect of soil plasticity on cyclic response. *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, 117 (1): 89-107, 1991.

**ASENKRON MOTOR RULMAN ARIZA ANALİZİ İÇİN LabVIEW TABANLI GUI TASARIMI**Eyüp IRGAT<sup>1</sup>, Abdurrahman ÜNSAL<sup>2\*</sup><sup>1</sup> Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Kütahya Teknik Bilimler Meslek Yüksek Okulu, Kütahya,ORCID No : <https://orcid.org/0000-0003-0399-0436><sup>2</sup> Kütahya Dumlupınar Üniversitesi, Elektrik Elektronik Mühendisliği, Kütahya,ORCID No : <https://orcid.org/0000-0002-7053-517X>

Anahtar Kelimeler	Öz
LabVIEW GUI CNN Asenkron motor Rulman arızaları	<i>Asenkron motorlarda meydana gelen rulman arızalarının erken teşhisi, endüstriyel süreçlerin verimliliği, güvenliği ve bakım maliyetlerinin düşürülmesi açısından kritik öneme sahiptir. Bu çalışmada, asenkron motor rulman arızalarının tespiti ve sınıflandırılması amacıyla çoklu sensör veri füzyonuna dayalı bir Evrişimli Sinir Ağı (CNN) modeli önerilmiştir. Çalışma kapsamında deneysel düzenden elde edilen üç eksenli titreşim, üç fazlı akım ve tork sinyalleri işlenerek spektrogram görüntülerine dönüştürülmüş ve derin öğrenme modeline giriş verisi olarak sunulmuştur. Sistemin uygulanabilirliğini artırmak adına, LabVIEW ve Python entegrasyonuna sahip Grafiksel Kullanıcı Arayüzleri (GUI) geliştirilmiştir. Bu arayüzler sayesinde veri toplama, ön işleme, model eğitimi ve test işlemleri gerçekleştirilebilmektedir. Deneysel sonuçlar, tekil sensör verileri yerine veri füzyonu yaklaşımının kullanılmasının sınıflandırma başarısını belirgin şekilde artırdığını göstermiştir. Tek başına akım ve titreşim verileriyle elde edilen doğrulama doğrulukları sırasıyla %83.91 ve %98.10 iken; titreşim, akım ve tork verilerinin birleştirilmesiyle oluşturulan füzyon modeli %99.48 doğruluk oranına ulaşmıştır. Elde edilen bulgular, önerilen yöntemin endüstriyel ortamlarda arızaları yüksek hassasiyetle tespit edebileceğini ve kestirimci bakım uygulamaları için etkin bir çözüm sunabileceğini ortaya koymaktadır.</i>

**LabVIEW BASED GUI DESIGN FOR INDUCTION MOTOR BEARING FAULT ANALYSIS**

Keywords	Abstract
LabVIEW GUI CNN Induction motor Bearing faults	<i>Early diagnosis of bearing faults in induction motors is of critical importance for industrial process efficiency, safety, and cost-effective maintenance. In this study, a Convolutional Neural Network (CNN) model based on multi-sensor data fusion is proposed for the detection and classification of induction motor bearing faults. Within the scope of the study, three-axis vibration, three-phase current, and torque signals obtained from the experimental setup were processed and converted into spectrogram images to serve as input data for the deep learning model. To enhance the applicability of the system, Graphical User Interfaces (GUIs) featuring integration with LabVIEW and Python were developed. Through these interfaces, data acquisition, preprocessing, model training, and testing processes can be performed. Experimental results demonstrated that using the data fusion approach instead of single sensor data significantly improved classification performance. While the validation accuracy rates obtained with current and vibration data individually were 83.91% and 98.10% respectively, the fusion model created by combining vibration, current, and torque data reached an accuracy rate of 99.48%. The findings reveal that the proposed method can detect faults with high precision in industrial environments, offering an effective solution for predictive maintenance applications.</i>

Araştırma Makalesi

Başvuru Tarihi : 21.05.2025

Kabul Tarihi : 11.12.2025

Research Article

Submission Date : 21.05.2025

Accepted Date : 11.12.2025

\* Sorumlu yazar: [unsal@dpu.edu.tr](mailto:unsal@dpu.edu.tr)<https://doi.org/10.31796/ogummf.1703595>Bu eser, Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>) hükümlerine göre açık erişimli bir makaledir.This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

## 1. Giriş

Asenkron motorlar, güvenilirliği, sağlamlığı ve düşük maliyeti nedeniyle endüstride yaygın olarak kullanılan motor türüdür (Sengamalai, Anbazhagan, Thamizh Thentral, Vishnuram, Khurshaid ve Kamel, 2022). Ancak, zamanla aşınma, yıpranma veya arıza durumları motorların performansını etkileyebilir ve sistemde ciddi arızalara yol açabilir. Bu arızaların başında ise rulman arızaları gelmektedir. Asenkron motorlarda meydana gelen rulman arızaları, sistem performansını doğrudan etkileyen en yaygın arıza türlerinden biridir (Tyagi ve Panigrahi, 2017). Geleneksel arıza tespit yöntemleri, genellikle titreşim analizi, termal görüntüleme ya da akım sinyali analizi gibi fiziksel ölçümlere dayanmaktadır. Bu yöntemlerde analiz süreci çoğu zaman uzman operatörlerin bilgi ve deneyimlerine bağlıdır. Ancak uzmanlar hata yapabilir ve karar verme süreçleri çoğunlukla öznelidir. Ayrıca bu yöntemlerin bazıları anlık değil, dönemsel ölçümlerle sınırlı kalmaktadır. Bu nedenle arızaların erken tespiti zorlaşmakta ve bakım maliyetleri artmaktadır (Zhao, Yan, Chen, Mao, Wang ve Gao, 2019). Bu yüzden, arıza tespiti ve arıza düzeyinin değerlendirilmesini daha nesnel hale getirecek yaklaşımlar geliştirmek gerekmektedir (Ewert, Kowalski ve Orłowska-Kowalska, 2020). Bu noktada, insan uzmanlığını taklit edebilen ve büyük veri kümelerinden öğrenerek yüksek doğrulukta sonuçlar üretebilen yapay zeka teknikleri, bu süreci otomatikleştirmek ve güvenilir hale getirmek için güçlü bir potansiyel sunmaktadır. Son yıllarda yapay zeka teknikleri, özellikle de derin öğrenme algoritmaları, karmaşık sinyallerin analizi ve arıza tespiti alanlarında güçlü bir araç olarak öne çıkmaktadır (Demirci, Saraçbaşı, Emrah, Uzun, Genç ve Özkan, 2022; DüNDAR, Sarıççek, Çinar ve Yazıcı, 2021). Derin öğrenme algoritmalarından biri olan Evrişimli Sinir Ağları (CNN), görüntü işleme başta olmak üzere birçok alanda yüksek başarı oranları elde etmiş, ses ve titreşim gibi zaman serisi verilerinin sınıflandırılmasında da etkin biçimde kullanılmaya başlanmıştır. CNN, özellik çıkarımı ve sınıflandırma işlemlerini aynı yapıda gerçekleştirebildiği için, sinyal işleme süreçlerini basitleştirmekte ve daha yüksek doğrulukta kararlar alınmasını sağlamaktadır (Cengiz, Yaylak ve Gülbandır, 2022; Han, Choi, Hong ve Kim, 2019; Li, Deng, Wu, Chen ve Xu, 2020; Wang vd., 2021). Ancak sadece doğru sınıflandırma değil, aynı zamanda çıktılarının operatör tarafından yorumlanabilir şekilde sunulması da önemlidir. Bu bağlamda LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench), sinyal işleme, görsel arayüz tasarımı ve donanım kontrolü konularında sunduğu güçlü araçlarla ön plana çıkmaktadır. LabVIEW, National Instruments firması tarafından geliştirilmiş olup, mühendislik, bilimsel araştırma ve endüstriyel alanlarda test ve kontrol sistemlerinde yaygın olarak kullanılan bir görsel programlama dilidir. Özellikle veri toplama, test,

ölçüm ve analiz sistemleri geliştirmede etkili bir platformdur (Mekala, Jayabharathi, Rajkumar ve Darshini, 2022). LabVIEW, kullanıcıların bir program oluşturmak için görsel öğeleri sürükleyip bırakabilecekleri bir grafiksel programlama yaklaşımı sağlar. Bu yaklaşım, kullanıcıların sistem tasarımını daha sezgisel ve görsel bir biçimde gerçekleştirmelerine olanak tanımaktadır.

LabVIEW ile tasarlanan bir çalışmada (Chavhan ve Ugale, 2016) yeni satın alınan motorların performansının ve bütünlüğünün doğrulanması için motor üzerinde test yapılması üzerine bir grafiksel kullanıcı arayüzü (GUI) tasarımı geliştirmişlerdir. Tasarlanan GUI ile motorun hız ve yük kontrolü yapılarak motor performansını değerlendirmişlerdir. Başka bir çalışmada (Pavithra ve Rao, 2018) LabVIEW yazılımı, üç fazlı asenkron motorun hız ve dönüş yönü kontrolü için Programlanabilir Lojik Kontrol (PLC) ile iletişim kurmak amacıyla kullanılmıştır.

LabVIEW kullanılarak asenkron motorda arıza tanımlama için önerilen bir çalışmada (Sasireka, Vidhyalakshmi, Rupasri, Sanjai ve Sanjana, 2023), motorun titreşimi ve akım verilerini gerçek zamanlı olarak izleyebilen ve analiz edebilen bir GUI tasarlanmıştır. Makine öğrenimi ile sinyallerden özellikler çıkarıp analiz etmek için LabVIEW sinyal işleme işlevleri kullanılmıştır. Daha sonra, çıkarılan özelliklerin bir arızayı gösterebilecek sapmaları tespit etmek için sağlıklı bir motorun referans modeliyle karşılaştırılması yapılmıştır.

Yapılan bazı çalışmalar, yapay zeka modellerini LabVIEW ortamına entegre ederek kullanıcıya anlık görsel geri bildirim sağlamayı başarmıştır. Ancak literatürde, CNN tabanlı rulman arıza tespiti ile bu çıktılarını LabVIEW GUI üzerinde görselleştiren bütünleşmiş çözümler oldukça sınırlıdır. Bu çalışma, bu boşluğu doldurmayı amaçlamakta; hem yüksek doğruluklu bir arıza tespiti modeli sunmakta hem de bu modeli endüstriyel kullanım için uygun bir kullanıcı arayüzü ile desteklemektedir.

Literatürdeki iş akışları dikkate alınarak tasarlanan arayüzlerde, karmaşık teknik detayların arka planda tutulduğu kullanıcı dostu bir mimari hedeflenmiştir. "Giriş-İşlem-Sonuç" döngüsünü takip eden bu yapı, veri işleme süreçlerinin sıralı ve hatasız yürütülmesine olanak tanıyarak sistemin işlevsel performansını maksimize etmektedir.

Bu çalışmada, asenkron motorlarda rulman arızalarının tespiti için CNN tabanlı bir model geliştirilmiştir. Model, asenkron motordan toplanan titreşim, akım ve tork verileriyle eğitilmiş ve farklı rulman arıza türlerini (sağlam, dış bilezik, iç bilezik ve bilye arızası) sınıflandırmak üzere yapılandırılmıştır. Ayrıca, geliştirilen sistem veri toplama, analiz ve test çıktıları olmak üzere kullanıcıya anlık bilgi sunma amacıyla

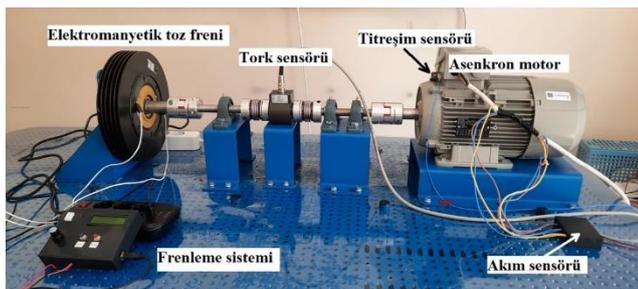
LabVIEW ortamında tasarlanmış GUI üzerinden görselleştirilmiştir. Bu sayede hem arıza tespiti otomatik hale getirilmiş, hem de operatörlerin sistem durumunu anlık olarak takip edebileceği kullanıcı dostu bir platform oluşturulmuştur.

## 2. Metodoloji

Bu bölümde, asenkron motorlarda rulman arızalarının tespiti amacıyla geliştirilen derin öğrenme yaklaşımı sunulmaktadır. Çalışmanın metodolojisi, LabVIEW ortamında tasarlanan üç farklı arayüz ile yönetilen üç temel aşamadan oluşur. Birinci aşamada; Veri Toplama Arayüzü kullanılarak deney düzeneğinden ham sinyaller kaydedilmiştir. İkinci aşamada; veri ön işleme ve veri füzyonu (birleştirme) ile CNN modelinin eğitimi için gerekli olan veri setinin oluşturulması Eğitim Arayüzü üzerinden gerçekleştirilmiştir. Üçüncü aşamada ise Test Arayüzü aracılığıyla, daha önce görülmemiş veriler ile tahmin yapılmış ve sonuçlar görselleştirilmiştir. Bölümün devamında deneysel test düzeneği, arıza oluşturma ve deneysel senaryolar, GUI tasarımları ve model mimarisi ayrıntılı olarak açıklanmaktadır.

### 2.1 Deneysel Test Düzeneği

Çalışmada üç fazlı 50 Hz 1.5 kW 6 kutuplu bir asenkron motor kullanılmıştır. Titreşim, akım ve tork verileri Şekil 1'de verilen deneysel test düzeneği kullanılarak toplanmıştır. Veri toplamak için National Instrument (NI) cRio 9056 veri toplama sistemi kullanılmıştır. Titreşim sinyalleri, 3 eksenli bir titreşim sensörü (PCB 356a15) ve bir NI 9230 modülü ile, akım sinyalleri bir NI 9225 modülü ile ve tork sinyalleri de bir NI 9209 modülü ile toplanmıştır. NI 9230 modülü 3 kanal  $\pm 30V$  analog giriş modülü olup maksimum 12.8 kHz veri okuma hızına sahiptir. 6400 Hz örnekleme hızında üç eksen titreşim sinyallerini okumak üzere ayarlanmıştır. NI 9225 modülü 3 kanal  $\pm 300 V$  analog giriş modülü olup maksimum 50 kHz veri okuma hızına sahiptir. 6400 Hz örnekleme hızında üç faz stator akım sinyallerini okumak üzere ayarlanmıştır. NI 9209 modülü  $\pm 10V$ , 32 kanallı analog giriş modülü olup maksimum 500 Hz veri okuma hızına sahiptir. 100 Hz örnekleme hızında tork sinyallerini okumak üzere ayarlanmıştır.



Şekil 1. Deneysel Test Düzeneği

### 2.2 Arıza Oluşturma ve Deneysel Senaryolar

Çalışmada, endüstriyel ortamdaki rulman bozulmalarını simüle etmek amacıyla yapay hasar oluşturma yöntemi izlenmiştir. Bu kapsamda, motorun tahrik tarafındaki rulmanlar üzerinde mekanik işlem uygulanarak tek nokta arızaları meydana getirilmiştir. Arızalar; rulmanın dış bilezik, iç bilezik ve bilye yüzeylerinde 1.5 mm çapında delikler açılması suretiyle oluşturulmuştur.

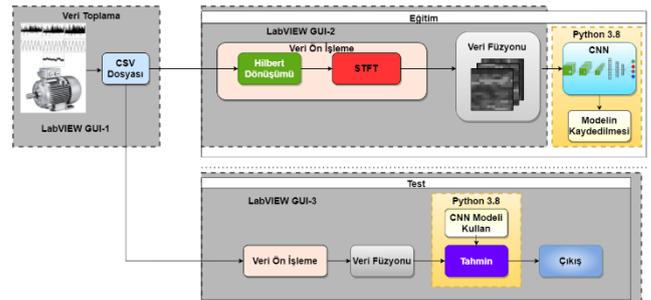
Oluşturulan her bir arıza türü, diğerlerinden bağımsız olarak analiz edilmiştir. Buna göre, geliştirilen arıza teşhis modelinin eğitimi ve testi için toplam dört farklı operasyonel durum tanımlanmıştır. Deneylerde SKF 6205 tipi rulmanlar kullanılmış olup her bir senaryo için tanımlanan rulmanlar Şekil 2'de gösterilmiştir.



Şekil 2. Çalışmada kullanılan rulmanlar a) sağlam, b) dış bilezik arızalı, c) iç bilezik arızalı, d) bilye arızalı

### 2.3. GUI Tasarımları

LabVIEW ortamında geliştirilen sistem; veri toplama, eğitim ve test bölümlerini içeren GUI tasarımlarından oluşmaktadır (Şekil 3). GUI'ler modüler bir şekilde tasarlanmış olup kullanıcıların farklı işlemlere hızlıca erişebilmesi amaçlanmıştır.



Şekil 3. GUI tasarımı

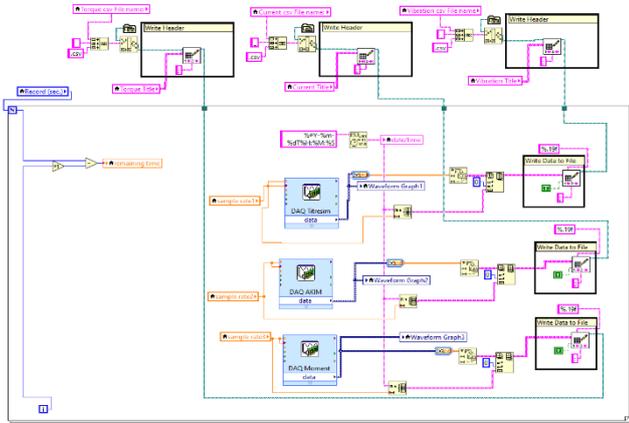
GUI-1 veri okuma ve CSV dosyasına kaydetme için tasarlanmıştır. GUI-1 arayüzü ile sağlam, dış bilezik arızalı rulman, iç bilezik arızalı rulman ve bilye arızalı rulman ile çalıştırılan deneysel test düzeneğinden her sınıf için ayrı ayrı 120 sn süre ile titreşim, akım ve tork verileri kaydedilmiştir. Her rulmandan kaydedilen 120 sn'lik verilerin ilk 100 sn'lik kısmı modelin eğitimi için kullanılırken sonraki 20 sn'lik veriler ise modelin test edilmesi için ayrılmıştır.

GUI-2 veri ön işleme ve veri füzyonu için tasarlanmıştır. GUI-1'de kaydedilen ham veriler (titreşim, akım ve tork) veri ön işlemede Hilbert dönüşümü alınıp STFT ile spektrogramlara çevrilmektedir. Elde edilen spektrogramlar birleştirilerek Python 3.8'de hazırlanan CNN modelinde eğitim verisi olarak kullanılmaktadır.

GUI-3 ise test verisini veri ön işleme, veri füzyonu, önceden eğitilip kaydedilen CNN modelini çağırıp, arka planda çalıştırma ve modelin tahmin sonucunu ekranda göstermek üzere tasarlanmıştır.

### 2.3.1 GUI-1 Veri Toplama Arayüzü

GUI-1 asenkron motora ait titreşim, akım ve tork verilerinin istenen sürede anlık olarak okunup CSV dosyasına kaydedilmesi için tasarlanmıştır. Verilerinin okunması için *DAQ Assistant* nesnelere kullanılmıştır. Blok diyagram sayfasında açılan pencerede *DAQ Assistant* nesnesi bulunarak sayfa üzerine taşınmıştır. Ayrıca sayfaya 6 adet *Write Delimited Spreadsheet.vi* nesnesi eklenmiştir. Bu nesne CSV dosyası oluşturmak için kullanılmıştır. Bu nesnelerin üçü başlık satırı eklemek için diğer üçü ise kayıt süresi boyunca okunan titreşim, akım ve tork verilerini kaydetmek için kullanılmaktadır. GUI-1'e ait blok diyagram Şekil 4'te, ön paneli ise Şekil 5'te görülmektedir.



Şekil 4. GUI-1 Blok Diyagramı



Şekil 5. GUI-1 Ön Paneli

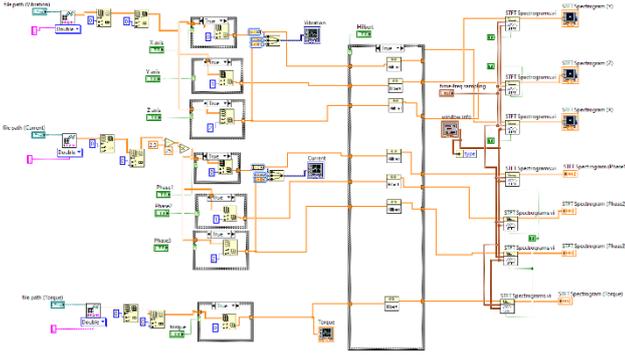
Şekil 5'te titreşim, akım ve tork verilerinin anlık görüntüleri görülmektedir.

### 2.3.2 GUI-2 Eğitim Arayüzü

Bu modül Python 3.8'de hazırlanmış CNN modeli için eğitim verisi hazırlamak üzere tasarlanmıştır. Şekil 3'de görüldüğü gibi 2 kısımdan oluşmaktadır. Birinci kısım veri ön işleme, ikinci kısım veri füzyonudur.

#### 2.3.2.1 Veri Ön İşleme

Veri ön işlemede Hilbert Dönüşümü (HT) ve Kısa Zamanlı Fourier Dönüşümü (STFT) kullanılmıştır. HT, günümüzde arıza teşhisinde yaygın olarak kullanılan gelişmiş sinyal işleme yöntemlerinden biridir. HT, doğrusal olmayan ve durağan olmayan sinyalleri analiz etmek için kullanılan etkili bir zaman-frekans sinyal işleme yöntemi olarak tanımlanmaktadır (Dias ve Silva, 2022; El Idrissi, Derouich, Mahfoud, El Ouanjli, Chantoufi, Al-Sumaiti ve Mossa, 2022; Mahela, Sharma, Kumar, Khan ve Alhelou, 2020; Ramu, Irudayaraj ve Subramaniam, 2020). STFT ile frekansı zamana bağlı olarak değişen sinyallerin analizleri yapılabilmekte olup, asenkron motorların arızalarını tespit etmek için kullanılan en popüler yöntemlerden biridir (Liu, Cheng ve Wen, 2020; Pietrzak ve Wolkiewicz, 2022). Zaman-frekans analizinde kullanılan STFT pencereleri, sinyali küçük parçalara ayırarak, her bir parçanın frekans bileşenlerini incelememizi sağlayan spektrogramlara dönüştürür. Çalışmada kullanılan HT ve STFT işlemlerine ait blok diyagramlar Şekil 6'te verilmiştir.



Şekil 6. GUI-2 Veri Ön İşleme Blok Diyagramı

### 2.3.2.2 Veri Füzyonu

Bu bölümde, CNN modelinin eğitim veri setini oluşturmak amacıyla; titreşim, akım ve tork verilerinden elde edilen spektrogramların birleştirilmesi işlemi detaylandırılmıştır.

Öncelikle titreşim, akım ve tork verilerine ait spektrogram verileri farklı ölçekte olabileceği için normalizasyon işlemine tabi tutulur. Normalizasyon işlemi veriyi 0-1 aralığına sıkıştırır. Böylece büyük ölçekli değerlerin küçük ölçekli değerlere baskın çıkması engellenmiş olur. Bu da derin öğrenme modelinin özellikleri öğrenmesini kolaylaştırır. Normalizasyon işlemine ait formül eşitlik (1)'de verilmiştir.

$$x' = \frac{x - x_{min}}{x_{max} - x_{min}} \quad (1)$$

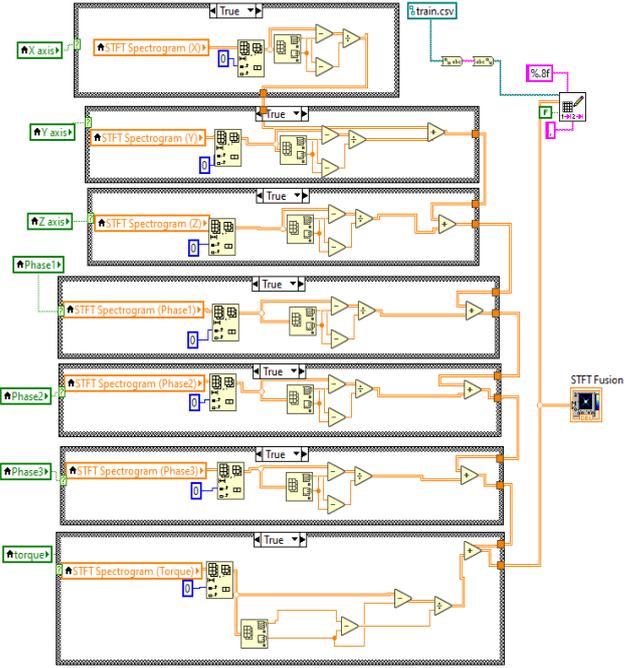
burada  $x$  spektrogramda her bir pixele ait veriyi,  $x_{min}$  spektrogramdaki en küçük veriyi,  $x_{max}$  en büyük veriyi gösterir.  $x'$  ise normalizasyona çevrilmiş veriyi göstermektedir.

GUI-2 arayüzünde (Şekil 8) seçimleri yapılan  $X$  axis,  $Y$  axis,  $Z$  axis,  $Phase1$ ,  $Phase2$ ,  $Phase3$  ve  $Torque$  verileri, normalizasyon işleminin ardından Eşitlik (2)'deki formül ile birleştirilir (Şekil 7).

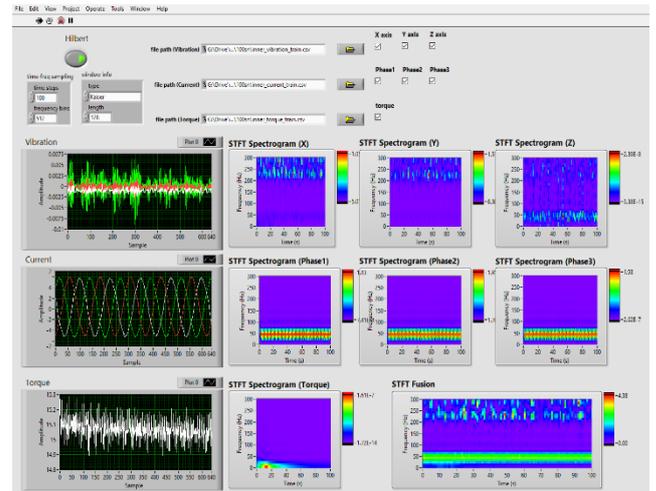
$$F = \sum_{i=1}^7 \begin{cases} x(i) & , \text{ eğer } i. \text{ veri seçildiyse} \\ 0 & , \text{ eğer } i. \text{ veri seçilmediyse} \end{cases} \quad (2)$$

Burada  $i$  sensör verisini temsil eden numaradır. 1:  $X$  eksen titreşim, 2:  $Y$  eksen titreşim, 3:  $Z$  eksen titreşim, 4: akım faz1, 5: akım faz2, 6: akım faz3 ve 7: tork için kullanılmıştır. Eğer GUI-2 üzerinden ilgili sensör seçildiyse normalize edilmiş ilgili spektrogram verisi toplanacak aksi halde toplama dahil edilmeyecektir.

Birleştirme işlemi tamamlanan veri ( $F$ ) train.csv adında yeni bir CSV dosyasına kaydedilir. Bu dosya Python 3.8 de hazırlanan CNN modelinin eğitim verisidir. Eğitilen CNN modeli .h5 formatında dışa aktarılır.



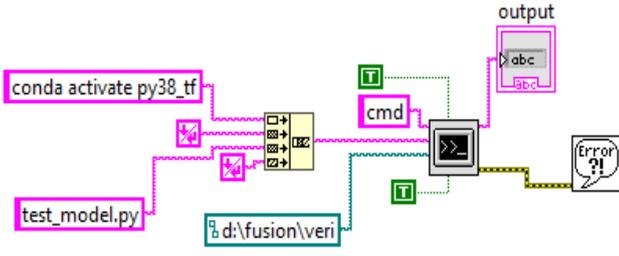
Şekil 7. GUI-2 Veri Füzyonu Blok Diyagramı



Şekil 8. GUI-2 Ön Panel

### 2.3.3 GUI-3 Test Modülü

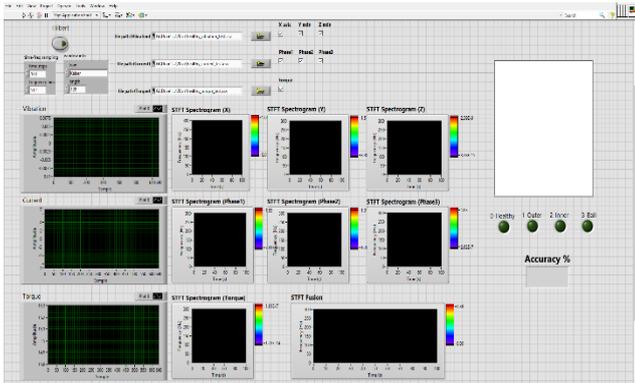
GUI-3 Test modülü, veri ön işleme ve veri füzyonu aşamalarında GUI-2 ile aynı metodolojiyi izlemektedir. Bu modülün temel işlevi; .h5 formatında kaydedilen eğitilmiş CNN modelinin, LabVIEW ortamına entegre edilen Python betikleri (scripts) aracılığıyla arka planda yürütülmesidir.



Şekil 9. LabVIEW ile Python Entegrasyonu Blok Diyagramı

Şekil 9'da, LabVIEW ve Python ortamları arasındaki entegrasyonu sağlayan blok diyagramı verilmiştir. Bu yapıda, arka planda çalışan Python betiklerinden elde edilen analiz sonuçları, arayüz üzerindeki 'output' etiketli metin kutusuna aktararak görüntülenir.

Modelden elde edilen sınıflandırma sonuçlarına göre ilgili arıza görselleri kullanıcı arayüzüne yansıtılır. Sistem, yeniden eğitim gerektirmeksizin doğrudan çıkarım işlemi gerçekleştirdiği için analiz sonuçları yüksek hızda üretilmektedir. GUI-3 Test Modülüne ait ön panel Şekil 10'da görülmektedir.



Şekil 10. GUI-3 Ön Panel

## 2.4 CNN Modeli

CNN modeli Python 3.8 ortamında TensorFlow/Keras kütüphaneleri kullanılarak geliştirilmiştir. Model, iki boyutlu (2D) evrişim işlemleri ile spektrogram verilerini kullanacak şekilde tasarlanmıştır. CNN modelinin katman mimarisi Tablo 1'de verilmiştir.

Çalışmada, görüntü sınıflandırma işlemi için Sıralı (Sequential) bir Derin Öğrenme modeli tasarlanmıştır. Model, öznetelik çıkarımı yapan evrişim (Convolution) blokları ve sınıflandırma yapan tam bağlı (Dense) katmanlardan oluşmaktadır. Modelin giriş kısmında üç adet Conv2D katmanı bulunmaktadır. Bu katmanlarda sırasıyla 8, 64 ve 128 filtre kullanılarak görüntü üzerindeki hiyerarşik özellikler öğrenilmektedir. Her evrişim katmanının ardından, işlem yükünü hafifletmek

ve en belirgin özellikleri korumak amacıyla MaxPool2D katmanı ile boyut indirgeme işlemi uygulanmıştır. Ara katmanlarda, negatif değerleri sıfırlayarak modelin doğrusal olmayan ilişkileri öğrenmesini sağlayan ReLU (Rectified Linear Unit) aktivasyon fonksiyonu tercih edilmiştir. Modelin eğitim verisini ezberlemesini engellemek için ağırlıklı kısımlarına %25 oranında seyreltme (Dropout) uygulanmıştır. Bu işlem, eğitim sırasında rastgele nöronları kapatarak ağırlıklı daha güçlü olmasını sağlamaktadır. Öznetelik çıkarımı tamamlandıktan sonra veriler Flatten işlemi ile tek boyutlu vektöre dönüştürülmüştür. Sınıflandırma bloğunda sırasıyla 32 ve 16 nöronlu iki gizli katman bulunur. Son katmanda, modelin 4 farklı sınıfı ayırt etmesi beklendiğinden 4 nöron kullanılmıştır. Burada aktivasyon fonksiyonu olarak, çıktılarının toplamının 1 olmasını sağlayan ve her sınıf için bir olasılık değeri üreten Softmax kullanılmıştır.

Modelin eğitimi 25 epok (Epoch) boyunca, her adımda 8 veri örneği (Batch size) işlenerek gerçekleştirilmiştir. Optimizasyon algoritması olarak Adam (Learning Rate=0.0001) seçilmiş ve hata hesaplamasında çoklu sınıflandırma problemlerine uygun olan Categorical Crossentropy kayıp fonksiyonu kullanılmıştır.

Tablo 1. CNN Modelinin Katman Mimarisi

Katman Tipi	Filtre / Nöron Sayısı	Kernel	Aktivasyon Fonksiyonu	İşlevi
Conv2D (Giriş)	8	4x4	ReLU	Özellik Çıkarımı
MaxPooling2D	-	2x2	-	Boyut İndirgeme
Conv2D	64	3x3	ReLU	Özellik Çıkarımı
MaxPooling2D	-	2x2	-	Boyut İndirgeme
Conv2D	128	2x2	ReLU	Özellik Çıkarımı
MaxPooling2D	-	2x2	-	Boyut İndirgeme
Dropout	Oran: 0.25	-	-	Aşırı Öğrenmeyi Önleme
Flatten	-	-	-	Veriyi Düzleştirme
Dense (Tam Bağlı)	32	-	ReLU	Sınıflandırma Özellikleri
Dropout	Oran: 0.25	-	-	Aşırı Öğrenmeyi Önleme
Dense (Tam Bağlı)	16	-	ReLU	Ara Sınıflandırma Katmanı
Dense (Çıkış)	4	-	Softmax	Sonuç / Olasılık Dağılımı

Bu çalışma kapsamında yapılan testler ve sonuçların sunulmasında araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

## 3. Bulgular ve Tartışma

Bu bölümde, asenkron motor rulman arızalarının tespiti amacıyla geliştirilen veri füzyonu tabanlı CNN modelinin deneysel sonuçları sunulmaktadır. Modelin başarımları; tekil sensör verileri ve birleştirilmiş veri

setleri üzerinden elde edilen doğruluk oranları, karışıklık matrisi analizleri ve arayüz çıktıları dikkate alınarak kapsamlı bir şekilde değerlendirilmiştir.

Farklı sensör verilerinin (titreşim, akım ve tork) tek başlarına ve birleştirilerek kullanılması durumunda elde edilen model performansları karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Tekil veri ile veri füzyonu yönteminin eğitim ve doğrulama aşamalarındaki doğruluk oranları Tablo 2’de sunulmuştur.

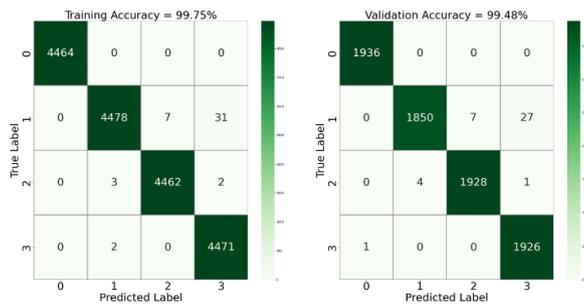
Tablo 2. Farklı Veri Setleri İçin Elde Edilen Eğitim ve Doğrulama Doğruluk Oranları (%)

Veri Setleri	Eğitim Doğruluğu	Doğrulama Doğruluğu
Titreşim	98.70	98.10
Akım	84.28	83.91
Tork	97.61	97.51
Titreşim+Akım+Tork (Füzyon)	99.75	99.48

Tablo 2 incelendiğinde, tekil veri kaynakları arasında en düşük başarımın akım verisiyle (%83.91), en yüksek başarımın ise titreşim verisiyle (%98.10) elde edildiği görülmektedir. Bununla birlikte, önerilen yöntem ile tüm verilerin (titreşim, akım ve tork) birleştirilmesi sonucunda model performansı belirgin şekilde iyileşmiş ve doğrulama aşamasında %99.48 gibi yüksek bir doğruluk oranına ulaşılmıştır. Bu durum, veri füzyonu yaklaşımının arıza tespitindeki etkinliğini ve güvenilirliğini kanıtlar niteliktedir.

Tablo 2’de en yüksek performansı sergilediği görülen veri füzyonu modelinin sınıflandırma başarımı, Şekil 11’deki karışıklık matrisi ile detaylandırılmıştır. GUI-2 arayüzünde ön işleme ve birleştirme adımları tamamlanan spektrogram veri setlerinin kullanıldığı bu analizde; modelin eğitim ve doğrulama süreçlerinde her bir arıza sınıfını (Sağlam, Dış Bilezik, İç Bilezik, Bilye) ne kadar yüksek hassasiyetle ayırabildiği görülmektedir.

Çalışmada kullanılan veri seti her sınıf için 6400 adet olmak üzere toplam 25600 adet görüntüden oluşmaktadır. Veri seti, modelin yanlılık (Bias) oluşturmasını engellemek için 4 farklı sınıf arasında dengeli bir şekilde dağıtılmıştır. Veri setinin %70’i eğitim ve %30’u doğrulama olarak ayrılmıştır.



Şekil 11. Eğitim ve Doğrulama Karışıklık Matrisi

Modelin sağlam rulmanı (0) kolaylıkla ayırt edebildiği, ancak dış bilezik (1), iç bilezik (2) ve bilye (3) arızaları arasında sınırlı da olsa karışıklık yaşadığı görülmüştür. Bu durum sinyallerin bazı frekans bileşenlerinin birbirine yakın olmasından kaynaklanabilir. Bu karışıklık, modelin hassasiyeti artırılarak veya daha fazla veriyle eğitim yapılmasıyla azaltılabilir.

Tablo 3. Doğrulama Performans Raporu

Sınıf	Kesinlik (Precision)	Duyarlılık (Recall)	F1	Örnek Sayısı	Sınıf Bazlı Doğruluk
0	1.000	1.000	1.000	1936	%99.99
1	0.998	0.982	0.990	1884	%99.50
2	0.996	0.997	0.997	1933	%99.84
3	0.986	1.000	0.993	1927	%99.62
Ort.	0.995	0.995	0.995		Genel: %99.48

Tablo 3’de her bir sınıf (0, 1, 2, 3) için hesaplanmış metrikler (Precision, Recall, F1) görülmektedir. En düşük performans Sınıf 1’de görülmektedir. Şekil 11’e bakıldığında, Sınıf 1 olması gereken 27 örneğin yanlışlıkla Sınıf 3 olarak tahmin edildiği anlaşılmaktadır. Ayrıca 7 örnek de Sınıf 2 ile karıştırılmıştır. Bu durum Sınıf 1’in Duyarlılık (Recall) değerini %98.2’ye çekmiştir. Sınıf 3’ün Duyarlılık değeri çok yüksek (%100’e yakın) olsa da, Kesinlik (Precision) değeri diğerlerine göre biraz düşüktür (0.986). Bunun sebebi, aslında Sınıf 1 olan örneklerin Sınıf 3 olarak tahmin edilmesidir. Modelin genel doğrulama başarısı %99.48’dir. Bu, modelin sınıfları ayırt etmede son derece başarılı olduğunu göstermektedir.

Modelin gerçek zamanlı test performansı ise geliştirilen GUI-3 arayüzü üzerinden doğrulanmıştır. Elde edilen test sonuçlarına ait ekran görüntüleri Şekil 12’de verilmiştir.

Şekil 12’de, asenkron motordan elde edilen üç eksenli titreşim, akım ve tork verilerinin test\_model.py betiği ile işlenmesi sonucu elde edilen sınıflandırma çıktıları verilmiştir. Gerçekleştirilen testlerde; sağlam rulman durumu %99.65 doğruluk oranıyla '0- Healthy' sınıfına atanarak arayüzde yeşil gösterge ile görselleştirilmiştir (Şekil 12-a). Arızalı durumlar incelendiğinde ise; dış bilezik arızası kırmızı gösterge ile '1- Outer' %93.56 doğrulukla (Şekil 12-b), iç bilezik arızası sarı gösterge ile '2- Inner' %93.73 doğrulukla (Şekil 12-c) ve bilye arızası mavi gösterge ile '3- Ball' %95.78 doğrulukla (Şekil 12-d) başarıyla tespit edilip GUI-3 üzerinde operatöre sunulmuştur.

Önerilen model hem eğitim hem de test veri kümelerinde yüksek doğruluk oranları sergilemiştir. Ayrıca model çıktılarının LabVIEW arayüzü üzerinde görselleştirilmesi sayesinde, kullanıcıların karar verme süreci hızlandırılmış ve sistemin endüstriyel uygulanabilirliği artırılmıştır.



Şekil 12. GUI-3 Test Sonuçları a) Sağlam Rulman b) Dış Bilezik Arızası c) İç Bilezik Arızası d) Bilye Arızası

Geliştirilen arayüz kullanıcı deneyimi açısından test edilmiş ve aşağıdaki işlevselliği başarıyla yerine getirmiştir:

- **Veri analizi:** Kullanıcılar motor titreşim verilerini anlık olarak yükleyebilmiş ve CNN modelini çalıştırarak arıza türünü görebilmiştir.
- **Otomatik karar desteği:** CNN tarafından yapılan tahmin, arıza durumunu açık bir şekilde göstermektedir.
- **Otomasyon:** İnsan müdahalesine ihtiyaç duymadan teşhis süreci yürütülebilmektedir.
- **Entegrasyon kolaylığı:** LabVIEW-Python entegrasyonu sayesinde sistem kolayca donanım tabanlı uygulamalara uyarlanabilir.

Ancak sistemin bazı sınırlılıkları da göz önünde bulundurulmalıdır:

- Model sadece deneyde kullanılan veri seti üzerinde test edilmiştir; gerçek sistemlerde benzer performans için farklı motorlardan alınan verilerin adaptasyonu gerekebilir.
- LabVIEW arayüzü, büyük veriler ile uzun süreli analize uygun hale getirildiğinde daha yüksek performanslı donanım gerekebilir.

- Saha koşullarındaki gürültülü verilerde model kararlılığı ayrıca değerlendirilmelidir.

#### 4. Sonuç ve Öneriler

Bu çalışmada, asenkron motor rulman arızalarını yüksek doğrulukla tespit etmek amacıyla CNN tabanlı bir model geliştirilmiş ve elde edilen sonuçlar, kullanıcı dostu bir arayüz ile LabVIEW ortamına entegre edilmiştir. Geliştirilen sistem, %99.75 eğitim ve %99.48 doğrulama doğruluğu ile geleneksel yöntemlere kıyasla üstün bir performans sergilemiştir. Veri ön işleme, özellik çıkarımı ve sınıflandırma aşamalarının CNN mimarisi ile otomatikleştirilmesi, manuel mühendislik süreçlerini ortadan kaldırarak sistemin verimliliğini artırmıştır. Ayrıca, LabVIEW entegrasyonu sayesinde bu gelişmiş model, üretim hatları gibi kontrol odaklı endüstriyel ortamlarda operatörler tarafından kolaylıkla kullanılabilir hale getirilmiştir.

Çalışmada elde edilen %99.75'lik sınıflandırma ve %99.48 doğrulama başarısı, yalnızca sağlıklı ve arızalı durumların ayırımında değil, aynı zamanda dış bilezik, iç bilezik ve bilye arızalarının teşhisinde de yüksek kararlılık göstermiştir. Bu yüksek ayırıcılık yeteneği, endüstriyel uygulamalar için şu kritik avantajları sağlayabilir:

- **Erken Uyarı ve Müdahale:** Hata türünün (örneğin bilye arızası) hassasiyetle belirlenmesi, bakım ekiplerinin doğru yedek parça ve ekipmanla en hızlı şekilde müdahale etmesine olanak tanır.
- **Güvenilirlik ve Yanlış Alarmların Önlenmesi:** Yüksek sınıflandırma doğruluğu, endüstriyel sahalarda operatörlerin sisteme olan güvenini sarsan "yanlış pozitif" alarmları minimize eder.
- **Maliyet Optimizasyonu:** Beklenmedik duruşların önüne geçilerek üretim kayıpları engellenir. Böylece reaktif bakımdan kestirimci bakıma geçiş sağlanarak işletme maliyetleri optimize edilir.

Son olarak, geliştirilen bu sistem yalnızca endüstriyel uygulamalar için değil, aynı zamanda görselleştirme yetenekleri sayesinde üniversiteler ve teknik eğitim kurumlarında, sinyal işleme ve yapay zeka tabanlı arıza tespiti konularının öğretilmesinde de etkili bir eğitim aracı olarak kullanılabilir.

Bu çalışmanın bir temel oluşturduğu göz önüne alındığında, gelecekte yapılabilecek geliştirme ve araştırma başlıkları aşağıdaki gibi özetlenebilir:

- **Gerçek zamanlı donanım entegrasyonu:** Sistem, endüstriyel motorlardan gelen canlı sinyallerle entegre edilerek çevrim içi arıza teşhisi yapılabilir.
- **Modelin genellenebilirliğinin artırılması:** Farklı motorlara ait verilerle model yeniden eğitilerek genelleme kapasitesi test edilebilir.

- Derin öğrenme model mimarilerinin karşılaştırılması: Farklı derin öğrenme yapılarıyla CNN performansı karşılaştırılabilir.
- Mobil ya da gömülü sistem entegrasyonu: Raspberry Pi, Jetson Nano, Arduino gibi sistemler kullanılarak taşınabilir bir bakım destek cihazı geliştirilebilir.

Sonuç olarak, bu çalışma, yapay zeka destekli arıza tespitinin endüstriyel otomasyon sistemlerine entegrasyonu konusunda uygulanabilir ve ölçeklenebilir bir yaklaşım sunmaktadır. Böylece, LabVIEW kullanılarak bir arıza tespit sistemi uygulanması, asenkron motorlarının güvenli ve güvenilir bir şekilde izlenmesini sağlayabilir ve işletme maliyetlerini azaltabilir.

Derin öğrenme algoritmalarının bu gibi uygulamalarda sunduğu yüksek doğruluk, gelecekte bakım stratejilerinin merkezinde yer alacağının güçlü bir göstergesidir.

#### Teşekkür

Bu çalışmada kullanılan veriler, Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) 118C252 numaralı araştırma projesi kapsamında toplanmıştır.

#### Araştırmacıların Katkısı

Bu araştırmada; Eyüp IRGAT, makalenin taslağının hazırlanması, literatür taraması, GUI tasarımı, deneysel verilerin toplanması, derin öğrenme analizi; Abdurrahman ÜNSAL, çalışmanın her aşamasına katkı sağlamıştır.

#### Çıkar Çatışması

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir.

#### Kaynaklar

- Cengiz, E., Yaylak, F. ve Gülbandır, E. (2022). Investigation of polyps in endoscopy images by using deep learning algorithm. *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 30(3), 441-453. doi: <https://doi.org/10.31796/ogummf.1122707>
- Chavhan, K. B. ve Ugale, R. T. (2016). Automated test bench for an induction motor using LabVIEW, 1-6. 2016 IEEE 1st International Conference on Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems (ICPEICES), Delhi, India: IEEE. doi: <https://doi.org/10.1109/ICPEICES.2016.7853547>
- Demirci, D., Saraçbaşı, E., Emrah, E., Uzun, İ., Genç, Y. ve Özkan, K. (2022). Domates hastalığı tahmini için gerçek zamanlı uygulama. *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi*

*Dergisi*, 30(1), 90-95. doi: <https://doi.org/10.31796/ogummf.969487>

Dias, C. G. ve Silva, L. C. da. (2022). Induction motor speed estimation based on airgap flux measurement using hilbert transform and fast fourier transform. *IEEE Sensors Journal*, 22(13), 12690-12699. doi: <https://doi.org/10.1109/ISEN.2022.3176085>

Dündar, D. R., Sarıççek, İ., Çınar, E. ve Yazıcı, A. (2021). Kestirimci bakımda makine öğrenmesi: Literatür araştırması. *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 29(2), 256-276. doi: <https://doi.org/10.31796/ogummf.873963>

El Idrissi, A., Derouich, A., Mahfoud, S., El Ouanjli, N., Chantoufi, A., Al-Sumaiti, A. S. ve Mossa, M. A. (2022). Bearing fault diagnosis for an induction motor controlled by an artificial neural network—direct torque control using the hilbert transform. *Mathematics*, 10(22), 4258. doi: <https://doi.org/10.3390/math10224258>

Ewert, P., Kowalski, C. T. ve Orłowska-Kowalska, T. (2020). Low-cost monitoring and diagnosis system for rolling bearing faults of the induction motor based on neural network approach. *Electronics*, 9(9), 1334. doi: <https://doi.org/10.3390/electronics9091334>

Han, J.-H., Choi, D.-J., Hong, S.-K. ve Kim, H.-S. (2019). Motor fault diagnosis using CNN based deep learning algorithm considering motor rotating speed. *2019 IEEE 6th International Conference on Industrial Engineering and Applications (ICIEA)*, 440-445. 2019 IEEE 6th International Conference on Industrial Engineering and Applications (ICIEA), sunulmuş bildiri, Tokyo, Japan: IEEE. doi: <https://doi.org/10.1109/IEA.2019.8714900>

Li, G., Deng, C., Wu, J., Chen, Z. ve Xu, X. (2020). Rolling bearing fault diagnosis based on wavelet packet transform and convolutional neural network. *Applied Sciences*, 10(3), 770. doi: <https://doi.org/10.3390/app10030770>

Liu, D., Cheng, W. ve Wen, W. (2020). Rolling bearing fault diagnosis via STFT and improved instantaneous frequency estimation method. *Procedia Manufacturing*, 49, 166-172. doi: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.07.014>

Mahela, O. P., Sharma, J., Kumar, B., Khan, B. ve Alhelou, H. H. (2020). An algorithm for the protection of distribution feeders using the stockwell and hilbert transforms supported features. *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, 7(6), 1278-1288. doi: <https://doi.org/10.17775/CSEEJPES.2020.00170>

- Mekala, N., Jayabharathi, T., Rajkumar, T. ve Darshini, M. P., (2022). Fault analysis of induction motor using LabVIEW. *International Journal of Engineering Applied Sciences and Technology*, 7(8), 146-150. doi: <https://doi.org/10.33564/IJEAST.2022.v07i08.017>
- Pavithra, G. ve Rao, V. V. (2018). Remote monitoring and control of VFD fed three phase induction motor with PLC and LabVIEW software, 329-335. 2018 2nd International Conference on I-SMAC (IoT in Social, Mobile, Analytics and Cloud) (I-SMAC), sunulmuş bildiri, Palladam, India: IEEE. doi: <https://doi.org/10.1109/I-SMAC.2018.8653657>
- Pietrzak, P. ve Wolkiewicz, M. (2022). Machine learning-based stator current data-driven PMSM stator winding fault diagnosis. *Sensors*, 22(24), 9668. doi: <https://doi.org/10.3390/s22249668>
- Ramu, S. K., Irudayaraj, G. C. R., Subramani, S. ve Subramaniam, U. (2020). Broken rotor bar fault detection using hilbert transform and neural networks applied to direct torque control of induction motor drive. *IET Power Electronics*, 13(15), 3328-3338. doi: <https://doi.org/10.1049/iet-pel.2019.1543>
- Sasireka, M., Vidhyalakshmi, P., Rupasri, M., Sanjai, S. ve Sanjana, G. (2023). Fault identification in induction motor using LabView, 123-128. 2023 Third International Conference on Ubiquitous Computing and Intelligent Information Systems (ICUIS), Gobichettipalayam, India: IEEE. doi: <https://doi.org/10.1109/ICUIS60567.2023.00029>
- Sengamalai, U., Anbazhagan, G., Thamizh Thentral, T. M., Vishnuram, P., Khurshaid, T. ve Kamel, S. (2022). Three phase induction motor drive: a systematic review on dynamic modeling, parameter estimation, and control schemes. *Energies*, 15(21), 8260. doi: <https://doi.org/10.3390/en15218260>
- Tyagi, S. ve Panigrahi, S. K. (2017). A DWT and SVM based method for rolling element bearing fault diagnosis and its comparison with artificial neural networks. *Journal of Applied and Computational Mechanics*, 3(1). doi: <https://doi.org/10.22055/jacm.2017.21576.1108>
- Wang, X., Mao, D. ve Li, X. (2021). Bearing fault diagnosis based on vibro-acoustic data fusion and 1D-CNN network. *Measurement*, 173, 108518. doi: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.108518>
- Zhao, R., Yan, R., Chen, Z., Mao, K., Wang, P. ve Gao, R. X. (2019). Deep learning and its applications to machine health monitoring. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 115, 213-237. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2018.05.050>

## CHARACTERIZATION OF ALIPHATIC COMPOUNDS OBTAINED FROM PROLYSIS OF SUNFLOWER-EXTRACTED BAGASSE

Musa ŞÖLENER\*

<sup>1</sup> Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Kimya Mühendisliği Bölümü, Eskişehir,  
ORCID No : <https://orcid.org/0000-0002-8168-3768>

Keywords	Abstract
<i>Biomass, pyrolysis, aliphatics, characterization, column chromatography</i>	<i>In this study, aliphatic compounds obtained by pyrolysis of sunflower-extracted bagasse were characterized by column chromatography method. The pyrolysis liquid product was separated into two fractions using pentane: pentane-soluble (aliphatic, aromatic, polar fractions) and insoluble (asphaltic) compounds. The chemical composition of the aliphatic fraction was investigated using chromatographic and spectroscopic techniques (FTIR, column chromatography and GC). According to column chromatography results, pyrolysis oil consists of 52 % aliphatic, aromatic, polar fractions and 48 % asphaltic. Column chromatography indicated that the pyrolysis liquid product consists of 8,58 % aliphatic, 19,76 % aromatic and 23,66 % polar fractions. Furthermore, it was shown that the aliphatic compounds mixtures (including from C<sub>23</sub> to C<sub>31</sub>) could be separated into their compounds by the column chromatography method. Chemical characterization of the pentane soluble fraction obtained from the pyrolysis of sunflower extraction bagasse indicated that the pentane soluble fraction could be a raw material source for aliphatic chemicals. The aliphatic compounds obtained by this method can be considered to be a useful alternative to diesel fuels because their carbon distribution is similar to that of diesel fuels.</i>

### AYÇİÇEK EKSTRAKSİYON KÜSPESİNİN PROLİZİNDEN ELDE EDİLEN ALİFATİK BİLEŞİKLERİN KARAKTERİZASYONU

Anahtar Kelimeler	Öz
<i>Biyokütle, piroliz, alifatikler, karakterizasyon, kolon kromatografisi</i>	<i>Bu çalışmada, ayçiçek ekstraksiyon küspesinin pirolizinden elde edilen alifatik bileşikler kolon kromatografisi yöntemi ile karakterize edilmiştir. Piroliz sıvı ürünü pentan kullanılarak pentanda çözünen (alifatik, aromatik, polar fraksiyonlar) ve çözünmeyen (asfaltic) bileşikler olmak üzere iki fraksiyona ayrılmıştır. Alifatik fraksiyonun kimyasal bileşimi kromatografik ve spektroskopik teknikler (FTIR, kolon kromatografisi ve GC) kullanılarak incelenmiştir. Kolon kromatografisi sonuçlarına göre, piroliz yağı %52 alifatik, aromatik, polar fraksiyonlar ve %48 asfalticden oluşmaktadır. Kolon kromatografisi, piroliz yağının %8,58 alifatik, %19,76 aromatik ve %23,66 polar fraksiyonlardan oluştuğunu göstermiştir. Ayrıca, alifatik bileşik karışımlarının (C<sub>23</sub> ila C<sub>31</sub> karbon içeren) kolon kromatografisi yöntemi ile bileşiklerine ayrılacağı gösterilmiştir. Ayçiçek ekstraksiyon küspesinin pirolizinden elde edilen pentan çözünür fraksiyonunun kimyasal karakterizasyonu, pentan çözünür fraksiyonunun alifatik kimyasallar için hammadde kaynağı olabileceğini göstermiştir. Bu yöntemle elde edilen alifatik bileşikler, karbon dağılımları dizel yakıtlarına benzer olduğundan, dizel yakıtlarına faydalı bir alternatif olarak düşünülebilir.</i>

Araştırma Makalesi

Başvuru Tarihi

: 30.09.2025

Kabul Tarihi

: 11.12.2025

Research Article

Submission Date

: 30.09.2025

Accepted Date

: 11.12.2025

\* Sorumlu yazar: [msolener@ogu.edu.tr](mailto:msolener@ogu.edu.tr)

<https://doi.org/10.31796/ogummf.1794100>

#### 1. Introduction

Energy is one of the most important factors in economic and technological development of countries. Energy demand increases rapidly due to the growing population in the world. Because of the limited petroleum, natural gas and coal sources, the energy

problem becomes the major concern for all countries. For this reason, the energy problem causes crises, tensions and even wars in the world. Petroleum, coal and natural gas are at present the principal sources of fuels and organic chemicals although they have high sulfur, nitrogen and metal content. In recent years,



Bu eser, Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>) hükümlerine göre açık erişimli bir makaledir.

This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

biomass and its products have been intensively investigated as alternative raw material sources for fuels and organic chemicals (Ashoor et al., 2023; Osman et al., 2023; Rahmawati et al., 2024; Zhou et al., 2023). The main advantages of using biomass are that it has negligible sulfur, nitrogen and metal content (Liu, Li, Jiang and Yu, 2017; Ngangyo et al., 2019).

In this study, sunflower-extracted bagasse was pyrolyzed in a fixed-bed Heinze retort. Pyrolysis liquid product oil was separated from asphaltene by solving in pentane. The pentane eluate including aliphatic, aromatic and polar fractions was separated its fractions by column chromatography. Additionally, the aliphatic fraction was also separated into its components according to the carbon number distribution.

## 2. Scientific Literature Review

Various biomass sources such as sugar beet, euphorbia, sunflower, hazelnut, cotton etc. can be evaluated as potential fuel and chemical raw material sources (Afif, Anayah and Pfeifer, 2021; Avcı et al., 2025; Carrino, Visconti, Fiorentino and Fagnano, 2020; Ebrahimian, Denayer, Aghbashlo, Tabatabaei and Karimi, 2022; Pfersich et al., 2020).

Synthetic fuel production studies became significant because petroleum, a primary energy source, has limited reserves. Pyrolysis of biomass is a main method used for this purpose. In a previous biomass pyrolysis study, nut shell was selected as biomass source and thermos chemically processed by fast pyrolysis under different conditions in a fixed bad tubular reactor. In that study, GC chromatography of the aliphatic fractions of the liquid product was compared with currently utilized transport fuels such as kerosene and diesel fuel and a big similarity was seen. Pyrolysis liquid product involving 22.7 % aliphatic hydrocarbon was determined in the same study (Onay and Koçkar, 1998). Cotton seed cake was pyrolyzed in a different study and aliphatic fractions of the pyrolysis liquid product gas chromatography showed hydrocarbon distribution between C<sub>10</sub>-C<sub>32</sub> (Pütün, Özbay, Koçkar and Pütün, 1997). Carbon distribution of the pentane eluate of pyrolysis liquid product of sunflower-extracted bagasse is as C<sub>8</sub>-C<sub>31</sub> in the literature. This carbon distribution is similar to that of the diesel fuel also (Yorgun, Şensöz and Koçkar, 2001a).

## 3. Materials

The extracted bagasse sample has been taken from some sunflower oil factories around the city of Eskişehir located in central Anatolia. Silica gel 60 (Merck KGaA, Germany) was used as column packing material. Pentane (Merck KGaA, Germany), Methanol (Merck KGaA, Germany) and Toluene (Merck KGaA, Germany) were used as solvents.

Elemental analysis of sunflower extraction bagasse was carried out with Carlo Erba EA 1108 device. The results of this analysis are shown in Table 1.

**Table 1.** Elemental Compositions of Sunflower-Extracted Bagasse

Component	%
C	58.2
H	7.0
N	8.0
O	26.8

## 3.1. Methods

The sample was first dried, then ground and sieved in a high-speed rotary shear mill. The liquid product obtained after pyrolysis was separated into pentane-soluble and pentane-insoluble fractions. The pentane eluate was separated into subproducts by passing through a silica gel column and analyzed by gas chromatography. The procedures for these processes are detailed below.

## 3.2. Pyrolysis

Pyrolysis experiments were carried out in a 316 stainless steel fixed bed reactor with a volume of 400 cm<sup>3</sup> (70 mm internal diameter), at different sweep gas (N<sub>2</sub>) flow rates, in the particle size range of 0.425<D<sub>p</sub><0.850 mm, with a heating rate of 7°C.min<sup>-1</sup>, up to a final temperature of 500°C. The reactor was heated externally with an electric furnace while the temperature was controlled by a thermocouple located inside the bed. The experimental results obtained from the pyrolysis of the sample are given in Table 2.

**Table 2.** Pyrolysis Yields of Sunflower Extracted Bagasse

N <sub>2</sub> , cm <sup>3</sup> .min <sup>-1</sup>	Oil, %	Gas, %	Char, %	Water, %
0	21.1	28.0	28.5	22.4
50	22.4	22.6	27.8	27.2
100	22.0	21.1	28.0	28.9
200	21.4	22.9	27.8	27.9
500	20.1	24.0	27.7	28.2

## 3.3. Column Chromatography

Chromatographic methods used to separate or purify chemicals use particles with diameters ranging from 1 µm to 250 µm, depending on the method type and the targeted separation sensitivity. These particles can be silica or polymer based. Surface properties of silica or polymeric particles used in chromatography can be changed by chemically modifying their surfaces with organic chains. Si-OH groups on the surface of natural silica can form hydrogen bonds with polar compounds present in the analyte, causing secondary interactions. These interactions result in the separation of

components within the analyte, with greater or lesser retention within the column.

In this study, the oil under experimental conditions where the highest oil yield was obtained as a result of pyrolysis was passed through a column filled with active silica gel (70-230 mesh ASTM) in order to separate aliphatic, aromatic and polar compounds from each other. The method used for this purpose is as follows:

Silica gel activated at 600°C for 8 hours was cooled to room temperature in a porcelain crucible in a desiccator. Exactly 1.00 g of the pyrolysis oil was kept in pentane for 24 hours. Thus, aliphatic, aromatic and polar compounds were taken into the solvent pentane. Asphaltenes in the pyrolysis oil were removed by separating the liquid phase. The obtained aliphatic, aromatic and polar compounds mixture was mixed with the activated silica gel and charged to the top of the previously prepared 20 cm height and 2.5 cm i.d. column filled with activated silica gel and pentane. Then, 100 mL pentane was passed through this column and each 10 mL sample was collected in a separate bottle. Aliphatic compounds were separated from each other by this way. Then, 200 mL of toluene and 200 mL of methanol were passed through the column, respectively. In this way, the aromatic and polar fractions were separated from each other and collected in separate containers. The solvents in the obtained fractions were evaporated and the percentages of aliphatic, aromatic and polar compounds in the mixture were calculated.

### 3.4. Characterization

Pentane subfraction was subjected to Infrared spectra by using Mattson 1000 FTIR spectrophotometer. Each fraction was dried and weighed and then aliphatic compounds were subjected to elemental analysis (Carlo Erba, EA 1108) to determine the amounts of the carbon, hydrogen, nitrogen and oxygen. From the elemental analysis result, H/C ratio was determined. 10 mL pentane samples were analyzed by using a Hewlett-Packard 5890 A Gas Chromatography with flame ionization detector (FID) to compare them with conventional transport fuels.

All the experiments were carried out with parallels and the consistency of the results were checked.

## 4. Results

The volatiles, fixed carbon, ash and moisture amounts of the sample are shown in Table 3.

**Table 3.** Proximate Analysis of Sunflower-Extracted Bagasse (wt% as received)

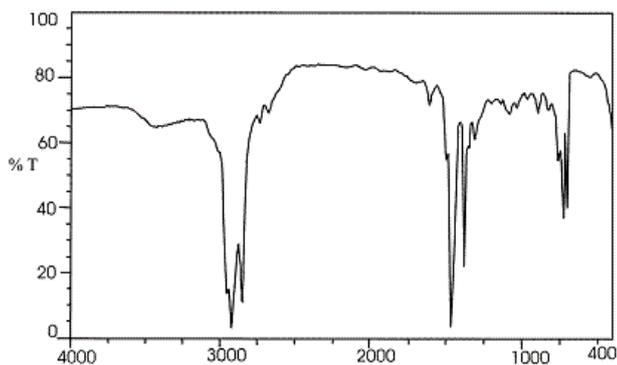
Volatiles	78.4
Fixed carbon	10.5
Ash	6.1
Moisture	5.0

When the pentane-insoluble fraction was dried and weighed, it was found that the pyrolysis oil consisted of 48% asphaltenes. It was determined that the pentane-soluble part consisted of a mixture of aliphatic, aromatic and polar compounds at a rate of 52%. This mixture was separated by column chromatography and it was calculated that the pyrolysis oil consisted of 8.58% aliphatic, 19.76% aromatic and 23.66% polar compounds.

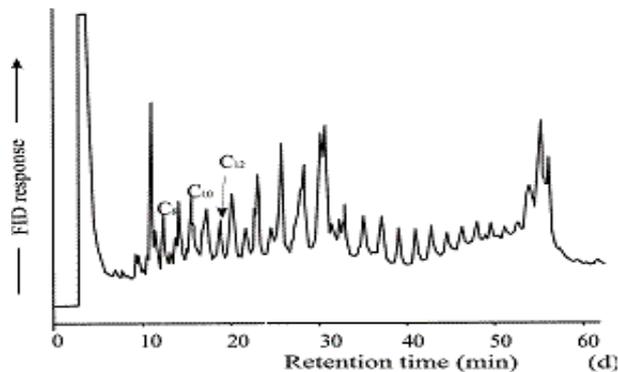
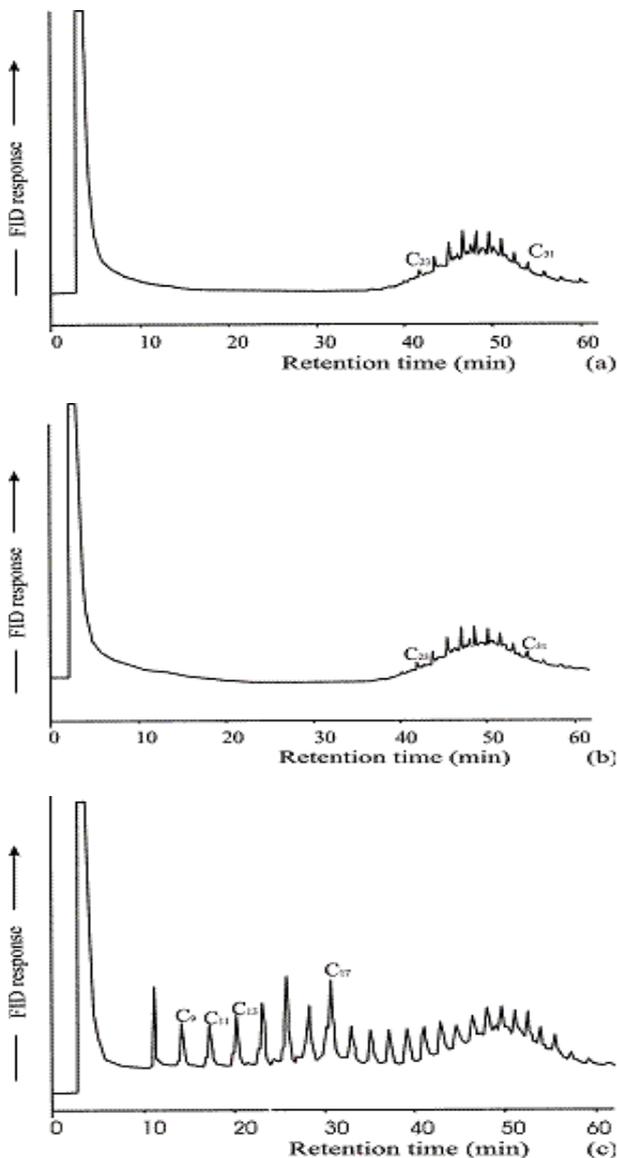
Fourier transform infrared (FTIR) spectra, representing functional group compositional analysis of pentane soluble material is shown in Figure 1. Symmetrical and asymmetrical C-H stretching vibrations of aliphatic CH<sub>3</sub> and CH<sub>2</sub> groups between 2800-3000 cm<sup>-1</sup> and C-H bending vibrations of aliphatic CH<sub>3</sub> and CH<sub>2</sub> groups between 1350-1475 cm<sup>-1</sup> indicate the presence of alkane groups in pentane soluble fraction. The presence of ketone, quinone, aldehyde groups etc. could be explain with C=O stretching vibration between 1650 and 1750 cm<sup>-1</sup>. Aliphatic in plane and out of plane C-H bending vibrations were observed at nearly 700-800 cm<sup>-1</sup>. These peaks indicate that hydrocarbons with more than seven carbon atoms are present in the pentane soluble fraction (Pütün et al., 1997). The elemental analysis of the aliphatic compounds obtained from the pyrolysis oil is shown in Table 4 and their gas chromatograms are in Figure 2. According to the results obtained from gas chromatography, the aliphatic compounds including C<sub>23</sub>-C<sub>31</sub> were in the first 10-mL sample passed through the column (Figure 2 (a)). The same content was determined for the second 10-mL sample as can be seen in Figure 2 (b). In the third 10-mL sample, all the aliphatic compounds except the ones having C<sub>8</sub>, C<sub>10</sub>, and C<sub>12</sub> passed according to the Figure 2 (c). The chromatogram of the fourth 10-mL sample is shown in Figure 2 (d). Since the chromatograms of the samples taken after the fourth 10 mL were similar, the GC chromatograms after the fourth sample were not given.

**Table 4.** Elemental Analysis of Aliphatic Compounds Obtained from Pyrolysis Oil

Compound	Amount (%)	Mol Number	H/C ratio
C	79.21	6.6008	
H	12.72	12.7200	CH <sub>1,9270</sub> O <sub>0,0764</sub>
N	-	-	H/C = 1,9270
O	8.07	0.5044	



**Figure 1.** FTIR Spectra of Aliphatic Compounds Obtained from Pyrolysis Oil.



**Figure 2.** Gas Chromatograph of Aliphatic Compounds Obtained from Pyrolysis Oil. (a; first 10-mL, b; second 10-mL, c; third 10-mL, d; fourth 10-mL).

**5. Discussion**

It is known that pyrolytic oil/bio-oil, or a mixed hydrocarbon mixture, is produced by the chemical decomposition of compounds containing high amounts of organic matter, such as biomass, by heating them at high temperatures in an oxygen-free environment. The purpose of this study is not to determine the conditions that yield the highest pyrolytic oil from sunflower extracted bagasse.

The primary purpose of this study is to investigate whether pyrolytic oil obtained from the pyrolysis of any biomass can be purified into more valuable byproducts using simple chemical processes. Based on this, it was demonstrated that the pyrolytic oil obtained in this study can be separated from asphaltenes by first extracting the aliphatic, aromatic, and polar compounds present in the mixture using pentane solvent.

This study also demonstrated that pyrolysis oil can be separated into fractions using a simple, inexpensive and hand-made silica column.

When Figures 2 a and b are examined, it is seen that the first compounds to separate from the mixture are those containing between 23 and 31 C. This is likely due to the high molar mass of these compounds. This method can also be easily used in the purification of valuable chemicals. Figure 2 (d) shows that carbon distribution lies between C<sub>8</sub> and C<sub>31</sub>.

When this results are compared with diesel chromatogram, carbon distribution of the sample is found similar to diesel fuel. For this reason, the aliphatic compounds obtained by this method are considered to be a useful alternative to diesel fuels and chemical feedstocks (Pütün et al., 1999; Yorgun et al., 2001a; Yorgun, Şensöz and Koçkar, 2001b).

**Conflict of Interest**

There is no conflict of interest with any person or institution in the study.

### Authorship Contribution Statement

In this research, the experiments, literature review, creation of figures, tables and articles, and interpretation of the results were done by Musa ŞÖLENER.

### References

- Afif, R. A., Anayah, S. S., & Pfeifer, C. (2020). Batch pyrolysis of cotton stalks for evaluation of biochar energy potential. *Renewable Energy*, 147, 2250–2258. doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.09.146>
- Ashoor, S., Khang, T. U., Lee, Y. H., Hyung, J. S., Choi, S. Y., Lim, S. E., ... Na, J-G. (2023). Bioupgrading of the aqueous phase of pyrolysis oil from lignocellulosic biomass: a platform for renewable chemicals and fuels from the whole fraction of biomass. *Bioresources and Bioprocessing*, 10, 34. doi: <https://doi.org/10.1186/s40643-023-00654-3>
- Avcı, Hansu, T., Atelge, R., Kaya, M., Demir, Kıvrak, H., ve Atabani, A. (2025). Atık fındık kabuğu tabanlı heterojen katalizörlerle atık yağlardan biyodizel üretimi [Biodiesel Production from Waste Oils with Hazelnut Shell-Based Heterogeneous Catalysts]. *Türkiye Teknoloji ve Uygulamalı Bilimler Dergisi*, 3(1), 1–14. doi: <https://doi.org/10.70562/tubid.1659612>
- Carrino, L., Visconti, D., Fiorentino, N., & Fagnano, M. (2020). Biofuel production with castor bean: A win-win strategy for marginal land. *Agronomy*, 10, 1690. doi: <https://doi.org/10.3390/agronomy10111690>
- Ebrahimian, E., Denayer, J. F. M., Aghbashlo, M., Tabatabaei, M., & Karimi, K. (2022). Biomethane and biodiesel production from sunflower crop: A biorefinery perspective. *Renewable Energy*, 200, 1352–11361. doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.10.069>
- Liu, W.-J., Li, W.-W., Jiang, H., & Yu, H.-Q. (2017). Fates of Chemical Elements in Biomass during Its Pyrolysis. *Chemical Reviews*, 117(9), 6367–6398. doi: <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.6b00647>
- Ngangyo, Heya, M., Foroughbakhch, Pournavab, R., Carrillo, Parra, A., Zelinski, V., & Salas, Cruz, L. R. (2019). Elemental Composition and Flue Gas Emissions of Different Components from Five Semi-Arid Woody Species in Pyrolysed and Non-Pyrolysed Material. *Sustainability*, 11(5), 1245. doi: <https://doi.org/10.3390/su11051245>
- Onay Ö., ve Koçkar Ö. M. (1998). Fındık Kabuklarından Hızlı Piroliz Yöntemiyle Sentetik Sıvı Yakıt Eldesi [Production of liquid fuel from nut shell by fast pyrolysis]. *Journal of Engineering and Architectural Faculty of Eskişehir Osmangazi University*, 11(1), 72–81. doi: <https://dergipark.org.tr/tr/pub/ogummf/issue/30463/329430>
- Osman, A. I., Farghali, M., Ihara, I., Elgarahy, A. M., Ayyad, A., Mehta, N., ... Rooney D. W. (2023). Materials, fuels, upgrading, economy, and life cycle assessment of the pyrolysis of algal and lignocellulosic biomass: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 21(3), 1419–1476. doi: <https://doi.org/10.1007/s10311-023-01573-7>
- Pfersich, J., Arauzo, P. J., Lucian, M., Modugno, P., Titirici, M-M., Luca, F., & Kruse, A. (2020). Hydrothermal conversion of spent sugar beets into high-value platform molecules. *Molecules*, 25(17), 3914. doi: <https://doi.org/10.3390/molecules25173914>
- Pütün, A. E., Özbay, N., Koçkar, Ö. M., & Pütün, E. (1997). Fixed-bed Pyrolysis of cotton seed cake: Product Yield and Compositions, *Energy Sources*, 19, 905–915. doi: <https://doi.org/10.1080/00908319708908900>
- Pütün, A. E., Özcan, A., & Pütün E. (1999). Pyrolysis of Hazelnut Shells in a Fixed-bed Tubular Reactor: Yields and Structural Analysis of Bio-oil, *J. Anal. Appl. Pyrolysis* 52 (1), 33–49. doi: [https://doi.org/10.1016/S0165-2370\(99\)00044-3](https://doi.org/10.1016/S0165-2370(99)00044-3)
- Rahmawati, Z., Santoso, L., Abdullah, W. N. W., Hamid, A., Jamari, N. L. A., Sugiarso, D., ... Widati, A. A. (2024). Biomass as an alternative feedstock to oleochemicals. *RSC Advances*, 14(39), 28827–28843. doi: <https://doi.org/10.1039/D4RA04481A>
- Yorgun, S., Şensöz, S., & Koçkar Ö. M. (2001a). Characterization of the pyrolysis oil produced in the slow pyrolysis of sunflower-extracted bagasse. *Biomass and Bioenergy*, 20(2), 141–148. doi: [https://doi.org/10.1016/S0961-9534\(00\)00064-7](https://doi.org/10.1016/S0961-9534(00)00064-7)
- Yorgun, S., Şensöz, S., & Koçkar, Ö. M. (2001b). Flash Pyrolysis of Sunflower oil Cake for Production of Liquid Fuels, *J. Anal. Appl. Pyrolysis* 60 (1), 1–12. doi: [https://doi.org/10.1016/S0165-2370\(00\)00102-9](https://doi.org/10.1016/S0165-2370(00)00102-9)
- Zhou, Y., Remon, J., Pang, X., Jiang, Z., Liu, H., & Ding, W. (2023). Water-based review: Hydrothermal conversion of biomass to fuels, chemicals and materials: A review holistically connecting product properties and marketable applications. *Science of The Total Environment*, 886, 163920. doi: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163920>

**Ag İÇEREN Sn FOLYO ANOTLARIN LİTYUM-İYON PİLLERDE ELEKTROKİMYASAL DAVRANIŞI**Reşat CAN ÖZDEN<sup>1</sup><sup>1</sup> ESOĞÜ, Metalurji ve Malzeme Müh. Bölümü, ORCID No : <https://orcid.org/0000-0002-9242-3136>

Anahtar Kelimeler	Öz
Kalay Alaşım Folyo Lityum-İyon	<i>Yüksek kapasiteli anot malzemelerine olan ihtiyaç, lityum-iyon pillerde konvansiyonel grafitin ötesine geçen metal alaşımlarının araştırılmasını teşvik etmektedir. Bu çalışmada, Ag katkılı Sn folyo anotlarının elektrokimyasal davranışı araştırılmış ve Sn-Ag (%3 Ag) lehim alaşımının folyo formuna soğuk haddeleme ile şekillendirilmesiyle elde edilen yapının yarım hücre performansı değerlendirilmiştir. Üretilen folyo, CR2032 tipi yarım hücrelerde Li metali karşıt elektrot olarak kullanılarak test edilmiş; çoklu çevrimli döngüsel voltametri (CV) analizleriyle alaşımlanma-geri alaşımlanma mekanizmalarına ilişkin karakteristik pikler belirlenmiştir. Ardından farklı akım yoğunluklarında (1-4 mA cm<sup>-2</sup>) sabit kapasite kontrollü şarj-deşarj deneyleri gerçekleştirilmiş ve potansiyel-kapasite profilleri ile çevrim kararlılığı incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar, folyo hâline getirilen Ag katkılı Sn alaşımının 1 mA cm<sup>-2</sup> ve 2 mA cm<sup>-2</sup> akım yoğunluklarında kararlıdeşarj kapasitelerine ulaştığını göstermektedir. Bu düşük akım yoğunluklarında %99'un üzerinde Coulombik verim elde edilirken, akım yoğunluğu 4 mA cm<sup>-2</sup> seviyesine çıkarıldığında yüksek polarizasyon etkisiyledeşarj kapasitesinin yaklaşık 1.4 mAh cm<sup>-2</sup> seviyesine gerilediği belirlenmiştir. Sabit kapasite döngülerinde gözlenen gerilim eğrileri, Sn-Ag alaşımının çok kademeli lityumlama davranışını doğrulamaktadır. Genel olarak elde edilen bulgular, Ag katkısının Sn folyo anotlarda elektrokimyasal kararlılığı desteklediğini ve bu alaşımın lityum-iyon piller için potansiyel bir anot adayı olduğunu ortaya koymaktadır.</i>

**ELECTROCHEMICAL PERFORMANCE OF Ag-CONTAINING Sn FOIL ELECTRODES FOR LI-ION BATTERIES**

Keywords	Abstract
Tin Alloy Foil Lithium-Ion	<i>The demand for high-capacity anode materials has encouraged the exploration of metal alloys that can surpass conventional graphite in lithium-ion batteries. In this study, the electrochemical behavior of Ag-containing Sn foil anodes was investigated, and the half-cell performance of a Sn-Ag (3 wt% Ag) solder alloy shaped into a foil through cold rolling was evaluated. The produced foil was tested in CR2032-type half-cells using lithium metal as the counter electrode. Multi-cycle cyclic voltammetry (CV) analyses were performed to identify the characteristic peaks associated with alloying and de-alloying mechanisms. Subsequently, constant-capacity charge-discharge experiments were conducted at different current densities (1-4 mA cm<sup>-2</sup>), and potential-capacity profiles along with cycling stability were examined. The results indicate that the Ag-containing Sn alloy foil achieves stable discharge capacities at current densities of 1 mA cm<sup>-2</sup> and 2 mA cm<sup>-2</sup>, respectively. While a Coulombic efficiency of over 99% was obtained at these low current densities, it was determined that the discharge capacity decreased to approximately 1.4 mAh cm<sup>-2</sup> due to high polarization when the current density was increased to 4 mA cm<sup>-2</sup>. The voltage profiles observed during constant-capacity cycling confirm the multi-step lithiation behavior of the Sn-Ag alloy. Overall, the findings reveal that Ag incorporation supports the electrochemical stability of Sn foil anodes and demonstrates that this alloy is a promising anode candidate for lithium-ion battery applications.</i>

Araştırma Makalesi

Başvuru Tarihi

Kabul Tarihi

: 18.11.2025

: 11.12.2025

Research Article

Submission Date

Accepted Date

: 18.11.2025

: 11.12.2025

\* Sorumlu yazar: [rcanozden@ogu.edu.tr](mailto:rcanozden@ogu.edu.tr)<https://doi.org/10.31796/ogummf.1826265>Bu eser, Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>) hükümlerine göre açık erişimli bir makaledir.This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

## 1. Giriş

Yüksek enerji yoğunluklu ve uzun ömürlü lityum-iyon pillerin geliştirilmesi amacıyla, geleneksel grafit anotların ötesine geçen metal alaşımlı anot malzemeleri yoğun bir şekilde incelenmektedir. Özellikle Kalay(Sn)-tabanlı alaşımlar, yüksek teorik kapasiteleri ( $\sim 994 \text{ mAh.g}^{-1}$ ) nedeniyle umut vaat etmektedir (Ying, Chen, Yu, 2017). Bununla birlikte, hacim değişimleri ve elektrot yüzey yapısının bozulmasına bağlı çevrimsel kararsızlık gibi zorluklar da önemli araştırma konuları arasında yer almaktadır.

Sn-alaşımlı anotların performansını artırmak için alaşım bileşiminin, mikro-yapısal özelliklerin ve üretim yöntemlerinin optimize edilmesi gerekmektedir. Örneğin, Sn-Ag alaşımları, Sn matrisi içerisinde  $\text{Ag}_3\text{Sn}$  ara fazlarının dağılımı sayesinde mekanik stabilite kazandırma potansiyeli göstermektedir (Bhavan, Pazhani, Amer ve diğ., 2024). Ayrıca alaşım folyo formunda üretim ve soğuk deformasyon işlemleri, elektrotlar için doğrudan membran-elektrot yapılarını destekleyebilecek avantajlar sunmaktadır.

Bu çalışmada, Sn-Ag (%3 Ag) lehim alaşımından elde edilen folyo anotta soğuk haddeleme sonrası elde edilen yapısal karakterizasyon (XRD, SEM, optik mikroskop) ve elektrokimyasal performans (CV, sabit kapasite kontrollü çevrimler) birlikte incelenmiş olup, alaşım folyo anotta üretim ve performans arasındaki ilişkiyi açığa çıkarmayı amaçlamaktadır. Bu yaklaşım, alaşımlı folyo elektrotlarını daha pratik uygulamalara yönlendirebilecek nitelikte bir katkı sunmaktadır.

## 2. Bilimsel Yazın Taraması

Lityum-iyon pillerin enerji yoğunluğu ve performansını artırmaya yönelik arayışlar, grafit anotların sınırlı kapasitesi nedeniyle metal-lityum alaşımlarını önemli bir araştırma alanı hâline getirmiştir. Bu alaşımlar arasında kalay, yaklaşık  $994 \text{ mAh.g}^{-1}$  teorik kapasitesi ve uygun çalışma potansiyeliyle öne çıkmaktadır. Bununla birlikte Sn tabanlı anotlarda lityumlama sırasında meydana gelen büyük hacim değişimleri, çatlama, pulverizasyon ve elektriksel temas kaybı gibi sorunlara yol açmaktadır (Yang, Zavalij ve Whittingham, 2003). Bu zorlukları azaltmak amacıyla Sn'nin farklı elementlerle alaşımlanması, mikro yapısının düzenlenmesi veya mekanik olarak biçimlendirilmesi yaygın araştırma konularıdır.

Son yıllarda metal folyo anot yaklaşımı, aktif malzemenin bağlayıcı ve iletken katkı kullanılmaksızın doğrudan folyo formunda elektrot olarak kullanılmasını mümkün kılması nedeniyle dikkat çekmiştir. Sn ve Sn alaşımlarının folyo elektrot olarak kullanılması, yüksek hacimsel kapasite ve sade üretim süreci gibi avantajlar sunmaktadır; ancak kompakt folyolarda lityumlama sırasında heterojen deformasyon ve çatlama riskleri devam etmektedir (Tu

ve diğ., 2021). Bu nedenle folyonun hem mekanik hem de elektrokimyasal açıdan daha kararlı hâle getirilmesi üzerine çalışmalar artmıştır.

Farklı element katkılarının Sn folyo anotlarda gerilme dağılımını iyileştirdiği ve çevrim kararlılığını artırdığı çeşitli araştırmalarla gösterilmiştir. Örneğin Zn katkısının mikro yapı düzenini ve elektrokimyasal tepkime homojenliğini geliştirdiği rapor edilmiştir (Nguyen ve Kim, 2024). Benzer şekilde Cu, Al veya diğer alaşım elementlerinin folyo anotların deformasyon davranışı üzerinde olumlu etkiler sağlayabileceği belirtilmiştir (Zhang ve diğ., 2021). Ayrıca bazı çalışmalar, Ag ve benzeri elementlerin Sn matrisi içerisindeki dağılımının elektriksel iletkenliği destekleyebileceğini ve elektrot bütünlüğünün korunmasına katkı sağlayabileceğini göstermektedir (Zhang ve diğ., 2022; Heligman, Kreder ve Manthiram, 2019).

Metal folyo anotlarda üretim yöntemleri de performansı belirleyen önemli bir etkidir. Soğuk haddeleme gibi mekanik şekillendirme işlemlerinin, folyonun lityumlama-delityumlama döngüleri sırasında ortaya çıkan gerilmelere daha iyi uyum sağlayabilen bir morfoloji oluşturabildiği, özellikle Sn ve Sn alaşımlarında yapılan çalışmalarla ortaya konmuştur (Xu ve diğ., 2019; Tu ve diğ., 2021).

Bilimsel yazın incelendiğinde Sn-Ag sistemine ilişkin çok sayıda çalışma bulunmakla birlikte, Ag katkılı Sn alaşımlarının doğrudan folyo formunda ve soğuk haddeleme sonrası yarım hücre elektrokimyasal performansının sistematik olarak ele alındığı çalışmaların sınırlı olduğu görülmektedir. Bu çalışma, Sn-Ag (%3 Ag) lehim alaşımının folyo formuna getirilmesiyle elde edilen yapının döngüsel voltametri ve sabit kapasite testleri altındaki davranışını inceleyerek literatürdeki bu eksikliği gidermeyi amaçlamaktadır.

## 3. Yöntem

Bu çalışmada, endüstriyel güvenilirliği ve standartlara uygunluğu nedeniyle Alpha Assembly Solutions firmasından ticari olarak temin edilen SAC300 kurşunsuz lehim alaşımı kullanılmıştır. Çalışma genelinde sunulan alaşım kompozisyon oranları ağırlıkça (wt.%) ifade edilmiştir. Üretici teknik verilerine göre alaşım;  $3.0 \pm 0.2$  Gümüş (Ag) ve maksimum  $0.05$  Bakır (Cu) içermekte olup, bakiye element Kalaydır (Sn). Alaşım, soğuk şekillendirme işlemine hazırlanmak üzere küçük parçalara ayrılmıştır. Başlangıç kalınlığı  $10 \text{ mm}$  olan Sn-Ag alaşım külçesi, laboratuvar tipi çift merdaneli hadde cihazı kullanılarak oda sıcaklığında soğuk haddelenmiştir. Ara tavlama uygulanmaksızın gerçekleştirilen işlemde, her pasoda ortalama  $15-20$  oranında kesit daralması (redüksiyon) sağlanmış ve yaklaşık  $20$  paso sonunda  $200 \mu\text{m}$  nihai kalınlığa

ulaşmıştır. Bu süreç sonucunda, hadde yönü boyunca uzayan numunede toplam %98 oranında plastik deformasyon elde edilmiştir. Elektrokimyasal testlerde kullanılmadan önce folyo aseton ile ultrasonik olarak temizlenmiş ve oda sıcaklığında kurutulmuştur.

Optik mikroyapı incelemeleri, soğuk haddeleme işlemi ile folyo hâline getirilen Sn-Ag (%3 Ag) alaşımının makro-ölçekli yüzey morfolojisini değerlendirmek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Bu kapsamda, folyo numuneleri mekanik olarak kesilmiş, yüzeyleri etanol ile temizlenmiş ve görüntü kontrastını artırmak için kısa süreli %2 nital dağlama uygulanmıştır. Dağlama işleminin ardından numuneler herhangi bir ek işlem yapılmadan optik mikroskop altında incelenmiştir. Optik görüntüler 200x büyütmede kaydedilmiş olup, haddeleme sırasında uygulanan pasoların yüzey üzerinde oluşturduğu yönsel yapı ve makro-ölçekli deformasyon izlerinin gözlemlenmesinde kullanılmıştır. Alaşıma ait yüzey morfolojisi ve kullanım sonrası değişimlerin belirlenmesi amacıyla taze yüzey ve kullanım sonrası yüzey olmak üzere iki farklı durumda taramalı elektron mikroskobu (SEM) analizi yapılmıştır. SEM görüntüleri ikincil elektron (SE) modunda alınmış ve yüzey topografisi, kırılma/çatlama bölgeleri ile lityumlama sonrası oluşan morfolojik değişimler değerlendirilmiştir.

Alaşımındaki faz bileşimini belirlemek için X-ışını kırınımı (XRD) analizi gerçekleştirilmiştir. XRD ölçümleri Cu K $\alpha$  ( $\lambda = 1.5406 \text{ \AA}$ ) radyasyonu kullanılarak  $2\theta = 20\text{--}90^\circ$  aralığında yapılmış ve Sn-Ag alaşımına ait karakteristik fazlar tanımlanmıştır.

Elektrokimyasal testlerde CR2032 tipi düğme hücreler kullanılmıştır. Hücre montajı, nem ve oksijen oranının 0.1 ppm'in altında tutulduğu argon atmosferli bir eldiven kabini (glove box) içerisinde gerçekleştirilmiştir. Çalışma elektrodu olarak hazırlanan Sn-Ag folyolar, 16 mm çapında diskler halinde kesilmiş (aktif yüzey alanı  $\sim 2.0 \text{ cm}^2$ ) ve herhangi bir bağlayıcı veya iletken katkı kullanılmadan doğrudan akım toplayıcı/aktif malzeme olarak kullanılmıştır. Karşı elektrot olarak Li metali, ayırıcı olarak polipropilen mikro gözenekli membran (Celgard 2400) ve elektrolit olarak 1 M LiPF $_6$  içeren EC:DMC (1:1, hacimce) çözeltisi tercih edilmiştir. Çalışmada, alaşımın baz elektrolit içerisindeki yalın elektrokimyasal davranışını belirlemek amacıyla elektrolite fluoroetilen karbonat (FEC) veya benzeri bir katkı maddesi ilave edilmemiştir. Sonuçların güvenilirliğini ve tekrarlanabilirliğini doğrulamak adına bir adet eşlenik hücre hazırlanmış ve test edilmiştir."

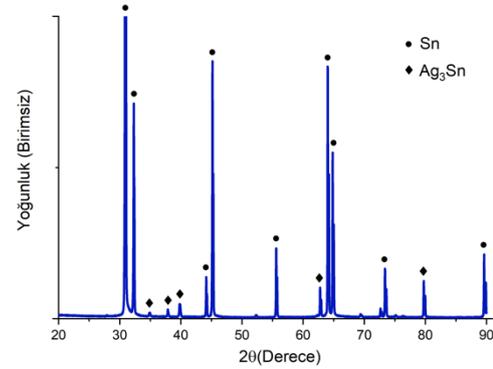
Döngüsel voltametri (CV) ölçümleri 0.01–1.5 V (Li/Li $^+$ ) potansiyel aralığında, 0.1 mV s $^{-1}$  tarama hızında ve üç çevrim olacak şekilde gerçekleştirilmiştir. Sabit kapasite kontrollü şarj-deşarj testlerinde 1, 2, 3 ve 4 mA cm $^{-2}$  akım yoğunlukları uygulanmıştır. Potansiyel-

kapasite profilleri ve çevrim kararlılığı galvanostatik moda kaydedilmiştir. Tüm ölçümler potansiyostat/galvanostat sistemi ile yapılmıştır.

Elde edilen veriler değerlendirilerek Sn-Ag folyosunun lityumlama davranışı, tersinirlik özellikleri ve akım yoğunluğu değişimine verdiği tepkiler analiz edilmiştir. Bu çalışmada, araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

#### 4. Bulgular ve Tartışma

Şekil 1, soğuk haddeleme ile yaklaşık 200  $\mu\text{m}$  kalınlığa getirilen Sn-Ag (%3 Ag) alaşım folyosunun X-ışını kırınım desenini göstermektedir. Desende gözlenen baskın pikler, literatürde Sn-Ag lehim alaşımları için bildirilen  $\beta$ -Sn fazına ait karakteristik kırınım konumları ile uyumludur (Bhavan ve diğ., 2024).



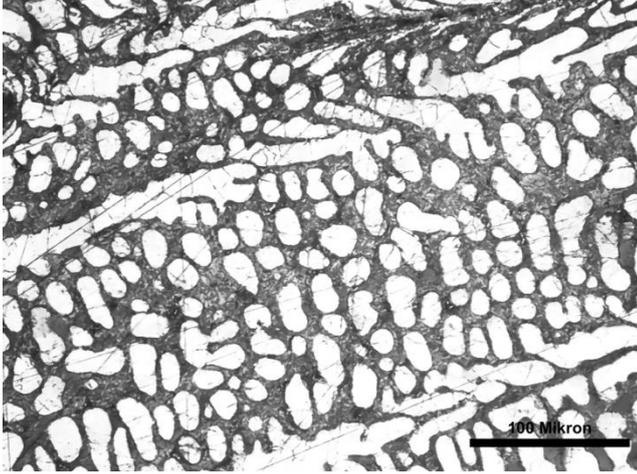
Şekil 1. Sn-Ag folyoya ait XRD grafiği

Yaklaşık 30–32° aralığındaki güçlü pikler  $\beta$ -Sn (200) ve  $\beta$ -Sn (101) düzlemlerine, 43–44° civarındaki pik  $\beta$ -Sn (211) düzlemine, 55–56° civarındaki pik  $\beta$ -Sn (301) düzlemine ve 62–63° civarındaki pik  $\beta$ -Sn (112) düzlemine karşılık gelmektedir. Bu dağılım, folyo anotun  $\beta$ -Sn ana matrisi yapısını koruduğunu ve haddeleme işleminin alaşımın kristal faz bileşimini değiştirmedikini göstermektedir.

Bhavan ve diğ. (2024)'te rapor edildiği üzere Sn-Ag sistemlerinde  $\beta$ -Sn matrisi yanında sınırlı miktarda Ag $_3$ Sn ara fazı da gözlenebilmektedir. XRD deseninde 38–40°, 65° ve 77° civarında ortaya çıkan düşük şiddetli pikler, söz konusu çalışmada Ag $_3$ Sn fazına atfedilen kırınım konumlarıyla uyumludur. Bu sonuç, Sn-Ag %3 lehim alaşımı folyosunun  $\beta$ -Sn ana fazı içerisinde dağılan az miktarda Ag $_3$ Sn içeren tipik bir Sn-Ag lehim mikroyapısına sahip olduğunu teyit etmektedir.

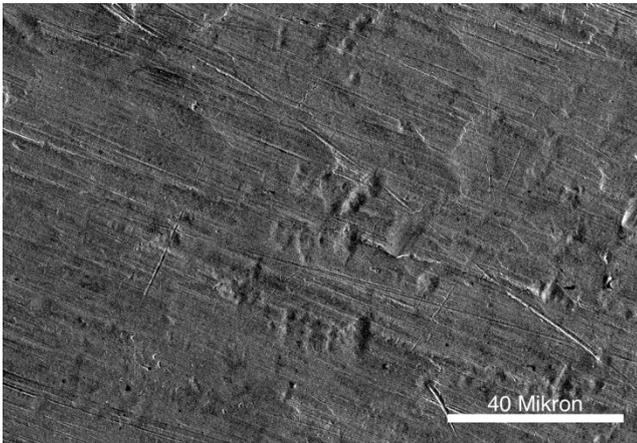
Şekil 2'deki mikroyapı görüntüsünde Sn-Ag alaşım sistemlerinde sıkça rapor edilen dendritik bir yapı görülmektedir. Beyaz tonlu, dallanmış ve uzamış alanlar  $\beta$ -Sn dendritlerine, bu bölgeler arasındaki daha koyu tonlu alanlar ise alaşımdaki Ag $_3$ Sn ara fazının oluşturduğu bölgeler olarak görünmektedir. Dendrit kollarının belirli bir doğrultuda hizalanmış olması,

soğuk haddeleme sırasında uygulanan pasoların yönüne bağlı bir şekil değişiminin izlerini yansıtmaktadır. Görüntüde dendritik bölgelerin süreklilik gösterdiği, ara faz bölgelerinin ise adacıklı veya ince bantlar hâlinde dağıldığı izlenmektedir. Bu morfolojik yapı, Sn-Ag alaşımının katılaşma sırasında gelişebilen dendritik büyüme karakterini yansıtmaktadır.



**Şekil 2.** Sn-Ag folyoya ait optik mikroyapı görüntüsü (%2 Nital)

Şekil 3'te yer alan taze yüzey SEM görüntüsü, optik mikroyapıda gözlenen bu çizgisel yönelmeyi daha yüksek çözünürlükte doğrulamakta ve yüzeyin genel sürekliliğini ortaya koymaktadır. Taze SEM yüzeyinde büyük kırıklar, boşluklar veya ayrışmalar izlenmemekte; yüzeyin kompakt bir metalik yapı sergilediği görülmektedir. SEM yüzeyi boyunca yer yer gözlenen hafif kontrast değişimleri, Sn-Ag alaşımlarında düşük Ag içeriğinde bulunabilen ince  $Ag_3Sn$  intermetalik bölgelerinin optik çözünürlükte tam seçilemediği durumlarla benzerlik göstermektedir (Zhang ve diğ., 2021).

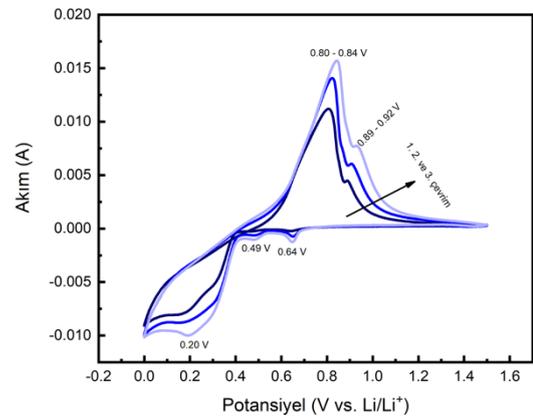


**Şekil 3.** Sn-Ag (%3 Ag) folyosunun taze yüzeyine ait SEM görüntüsü

Bu gözlemler, Sn-Ag folyosunun ilk durumda  $\beta$ -Sn matrisinin hâkim olduğu ve olası ince intermetalik

dağılımlarının yüzeyde sınırlı kontrast farklılıkları şeklinde ifade bulduğu tipik bir soğuk haddeleme sonrası morfolojiyi yansıttığını göstermektedir (Heligman ve diğ., 2019).

Şekil 4, Sn-Ag (%3 Ag) folyonun 0.01–1.50 V (Li/Li<sup>+</sup>) potansiyel aralığında ölçülen döngüsel voltametri (CV) eğrilerini göstermektedir. Grafikteki eğriler, Sn esaslı malzemelerin karakteristik lityumlama/delityumlama mekanizmasını doğrulayan belirgin redoks pikleri sergilemektedir. Özellikle 0.8 V ve 0.9 V civarında gözlenen indirgenme pikleri, elektrodun kademeli lityumlama sürecine işaret etmektedir (Yang, Zavalij, Whittingham, 2003).

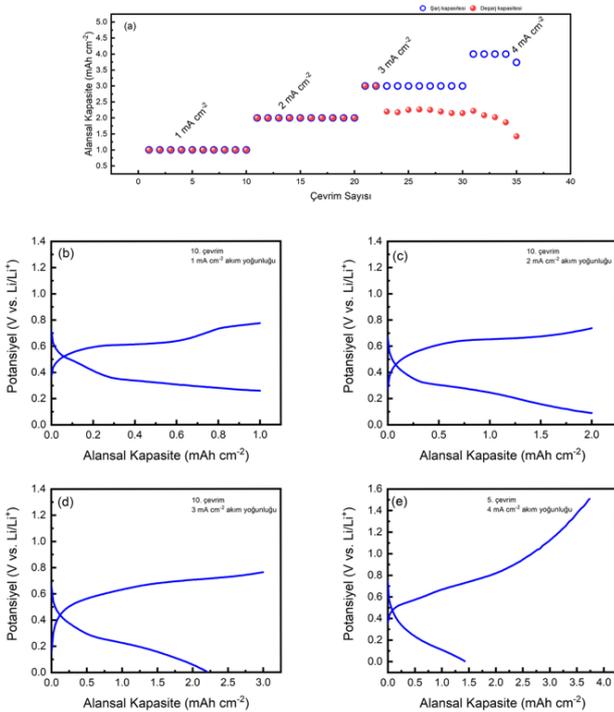


**Şekil 4.** Sn-Ag (%3 Ag) folyonun 0.01–1.5 V potansiyel aralığında kaydedilen döngüsel voltametri (CV) eğrileri

Bu potansiyel değerleri, literatürde saf Sn'nin lityumlama esnasında sırasıyla  $Li_2Sn_5$ ,  $LiSn$  ve  $Li_{22}Sn_5$  fazlarını oluşturduğu çok basamaklı dönüşüm mekanizmasıyla örtüşmektedir. Yükseltgenme sürecinde 0.2, 0.49 ve 0.64 V'ta ortaya çıkan pikler ise  $Li_{22}Sn_5$  fazının kademeli olarak  $LiSn$ ,  $Li_2Sn_5$  ve son olarak metalik Sn'e delityumlanması ile ilişkilendirilmiştir (Nguyen ve Kim, 2024). Redoks çiftleri arasındaki dar potansiyel farkı ve keskin pik profilleri, elektrodun düşük polarizasyona ve yüksek elektrokimyasal aktiviteye sahip olduğunu kanıtlar niteliktedir. Ayrıca, ardışık çevrimlerde pik akımlarının düzenli olarak artması, tekrarlanan lityumlama/delityumlama süreçleriyle elektrot arayüzeyinin daha aktif hale geldiği bir aktivasyon sürecinin varlığını göstermektedir [EL].

CV eğrisinde gözlenen zayıf ancak tekrarlanabilir bazı küçük pikler, Sn-Ag sistemlerinde düşük oranda bulunduğu bilinen  $Ag_3Sn$  ara fazının elektrokimyasal reaksiyon bölgeleriyle ilişkili olabilir; benzer düşük şiddetli özellikler Bhavan ve diğ. (2024) tarafından da rapor edilmiştir. Bu zayıf özellikler, Ag katkısının folyo içinde dağılımının elektrokimyasal tepkimeyi sınırlı fakat tekrarlı biçimde etkilediğini düşündürmektedir.

Şekil 5, Sn-Ag elektrodunun sabit kapasite altında farklı akım yoğunluklarındaki elektrokimyasal performansını göstermektedir. Şekil 5a incelendiğinde, elektrotun  $1\text{mA}\cdot\text{cm}^{-2}$  ve  $2\text{mA}\cdot\text{cm}^{-2}$  gibi düşük akım yoğunluklarında oldukça kararlı bir çevrim davranışı sergilediği görülmektedir. Bu akım koşullarında şarj ve deşarj kapasitelerinin birbirine yakın değerlerde seyretmesi, yüksek Coulombik verim ve iyi bir tersinirlik ortaya koymaktadır. Akım yoğunluğunun  $3\text{mA}\cdot\text{cm}^{-2}$  seviyesine ve üzerine çıkarılmasıyla birlikte elektrokimyasal performansta belirgin bir azalma başlamaktadır. Özellikle  $4\text{mA}\cdot\text{cm}^{-2}$  akım yoğunluğunda, şarj kapasitesinin yüksek seviyelerde korunmasına rağmen deşarj kapasitesindeki ani ve ciddi düşüş, şarj-deşarj eğrileri arasındaki farkın büyümesine ve Coulombik verimin düşmesine neden olmuştur. Kapasite kaybının temel mekanizması, Şekil 5b-5e' de verilen voltaj profillerinin evrimi incelendiğinde daha açık bir şekilde görülmektedir.



**Şekil 5.** Sn-Ag (%3 Ag) folyo anotun farklı akım yoğunluklarındaki elektrokimyasal davranışı: (a) 1–4  $\text{mA cm}^{-2}$  akım yoğunluklarında çevrim performansı; (b–e) ilgili akım yoğunluklarında 10. çevrime ait potansiyel–kapasite profilleri.

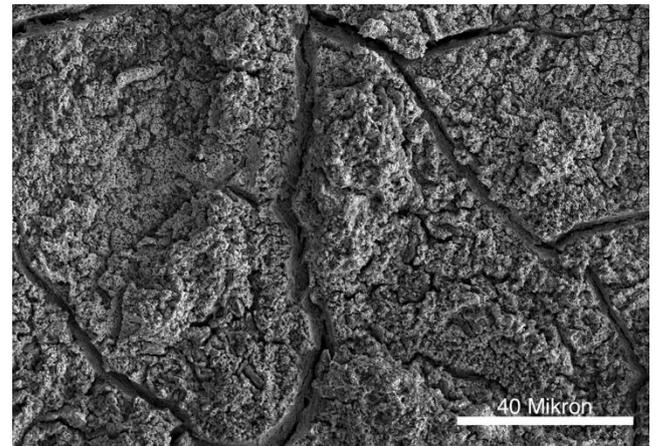
Düşük akım yoğunluklarında gözlenen düz ve belirgin voltaj platoları, akım yoğunluğu arttıkça daha eğimli bir yapıya dönüşmekte ve voltaj histeresinin ( $\Delta V$ ) genişlediği izlenmektedir. Bu durumun özellikle Şekil 5e'de belirginleşmesi, yüksek akım hızlarında elektrot iç direncinin neden olduğu polarizasyonun arttığını ve lityum iyonu difüzyon kinetiğinin uygulanan akım hızını karşılayamadığını göstermektedir (Jeong, Wang, Yoon ve diğ., 2024). Sonuç olarak artan akım

yoğunluğu, difüzyon limitlerine daha hızlı ulaşılmasına yol açmakta ve elektrodun voltaj sınırlarına erken ulaşması nedeniyle aktif malzemenin tam kapasiteyle kullanılmasını engellemektedir.

Genel olarak bu sonuçlar, Sn-Ag (%3 Ag) folyo anotun düşük akım yoğunluklarında yüksek tersinirlik ve belirgin lityumlama davranışı sergilediğini, akım yoğunluğu arttıkça ise kinetik etkiler nedeniyle eğrilerin daha eğimli hâle geldiğini ancak elektrotun çevrim boyunca kapasite üretmeyi sürdürdüğüne ortaya koymaktadır.

Şekil 6, belirli sayıda şarj-deşarj çevriminden sonra Sn-Ag (%3 Ag) folyo anotun yüzey morfolojisini göstermektedir. Kullanım sonrası yüzeyde taze duruma kıyasla belirgin bir pürüzlülük artışı ve yüzey boyunca düzensiz çıkıntılar gözlenmektedir. Bu çıkıntılar, lityumlama-delityumlama döngüleri sırasında Sn matrisi içinde meydana gelen hacim değişimlerinin yüzeyde lokal gerilmeler oluşturmasıyla ilişkili olabilecek morfolojik değişimlerdir. Görüntüde farklı yönlere dağılmış küçük ölçekli kabarmalar ve yüzey dalgalanmaları dikkat çekmekte olup, bu yapılar elektrot yüzeyinin çevrimler boyunca mekanik olarak yeniden şekillenmesinin bir sonucu olarak değerlendirilir.

Yüzeyde bazı bölgelerde ince hat şeklinde mikro çatlak oluşumları izlenmekle birlikte, bu çatlakların geniş yüzey kopmalarına dönüşmediği ve folyonun genel bütünlüğünün korunduğu görülmektedir. Yüzeydeki hafifçe kabarık ve daha parlak görünen yapılar, lityumlama süreçlerinde Sn bölgelerinde oluşan hacimsel değişimlerin ve yüzey reaksiyon ürünlerinin mikro morfolojik izleri olarak değerlendirilebilir. Ayrıca yüzey boyunca gözlenen ince partikül benzeri oluşumlar, çevrim sırasında yüzeyde büyüyen SEI tabakasının lokal birikimleriyle ilişkili olabilir.



**Şekil 6.** Sn-Ag (%3 Ag) folyonun kullanım sonrası SEM görüntüsü.

Genel olarak kullanım sonrası SEM görüntüsü, folyonun elektro-kimyasal çevrimler sırasında yüzey morfolojisinde belirli ölçüde değişim yaşadığını;

pürüzlülük artışı, lokal kabarma ve yüzey dalgalanmaları şeklinde gözlenebilen mikro ölçekte deformasyonların oluştuğunu ancak bu değişimlerin folyonun bütünlüğünü bozacak seviyeye ulaşmadığını göstermektedir. Bu davranış, Sn ve Sn-alaşımli folyo anotların lityumlama sonrası literatürde rapor edilen yüzey değişimleri ile uyumludur.

## 5. Sonuçlar

Bu çalışmada Sn-Ag (%3 Ag) lehim alaşımının soğuk haddeleme ile folyo hâline getirilmesiyle elde edilen yapının yarım hücre koşullarındaki elektrokimyasal davranışı incelenmiştir. XRD analizleri folyonun  $\beta$ -Sn ana fazı ile sınırlı miktarda  $Ag_3Sn$  ara fazı içerdiğini göstermiştir. Optik mikroyapı ve taze yüzey SEM görüntüleri, haddeleme işlemi sonucunda folyo üzerinde yönlü bir deformasyon yapısının oluştuğunu ve yüzey bütünlüğünün korunduğunu ortaya koymuştur. Kullanım sonrası SEM görüntülerinde ise çevrimler boyunca yüzeyde pürüzlülük artışı ve lokal deformasyonlar gözlenmiş, ancak folyonun genel yapısal bütünlüğünün sürdüğü belirlenmiştir.

Elektrokimyasal analizler, Sn-Ag folyonun düşük ve orta akım yoğunluklarında yüksek tersinirlik ve kararlı potansiyel-kapasite davranışı sergilediğini göstermiştir. Akım yoğunluğu arttığında kapasite düşüşleri gözlenirse de elektrotun çevrim boyunca kapasite üretmeye devam ettiği belirlenmiştir. Döngüsel voltametri sonuçları, Sn-Ag alaşımının çok kademeli lityumlama mekanizmasını doğrulamış ve ardışık çevrimlerde kararlı redoks davranışı göstermiştir.

Çalışma bulguları, soğuk haddelenmiş Sn-3.0Ag folyonun özellikle düşük ve orta akım yoğunluklarında ( $1-2 \text{ mA cm}^{-2}$ ) %99'u aşan Coulombik verim ile üstün bir elektrokimyasal kararlılık sergilediğini kanıtlamaktadır. Yüksek akım hızlarında ( $4 \text{ mA cm}^{-2}$ ) artan polarizasyon etkisi kapasiteyi  $1.4 \text{ mAh cm}^{-2}$  seviyesinde sınırladırsa da, elde edilen voltaj profilleri Ag katkısının yapısal bütünlüğü desteklediğini doğrulamaktadır. Sonuç olarak bu veriler, alaşımın çok kademeli lityumlama mekanizması sayesinde lityum-iyon piller için dayanıklı bir anot alternatifi olduğunu göstermektedir.

## Teşekkür

Bu çalışma Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından FHD-2025-3453 no'lu proje kapsamında desteklenmiştir.

## Araştırmacıların Katkısı

Bu çalışma tek yazarlı olup araştırmanın tüm aşamaları yazar tarafından gerçekleştirilmiştir.

## Çıkar Çatışması

Yazar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir.

## Kaynaklar

- Bhavan, J. S., Pazhani, A., Amer, M. ve diğerleri. (2024). Microstructural evolution and phase transformation on Sn-Ag solder alloys under high-temperature conditions focusing on  $Ag_3Sn$  phase. *Advanced Engineering Materials*, 26(13), 2400660. doi: <https://doi.org/10.1002/adem.202400660>
- Heligman, B. T., Kreder, K. J. ve Manthiram, A. (2019). Zn-Sn interdigitated eutectic alloy anodes with high volumetric capacity for lithium-ion batteries. *Joule*, 3(2), 493-504. doi: <https://doi.org/10.1016/j.joule.2018.10.028>
- Jeong, W. J., Wang, C., Yoon, S. G., Liu, Y., Chen, T. ve McDowell, M. T. (2024). Electrochemical behavior of elemental alloy anodes in solid-state batteries. *ACS Energy Letters*, 9, 2554-2563. doi: <https://doi.org/10.1021/acseenergylett.4c00915>
- Nguyen, H. M. ve Kim, J. (2024). Enhancing the electrochemical performance of Sn-Zn alloy anode foil for lithium-ion batteries through microstructural engineering. *Journal of Energy Chemistry*, 93, 173-181. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jechem.2023.10.020>
- Peng, H., Chen, S., Yu, H. ve diğerleri. (2022). Alloy-type anodes for high-performance rechargeable batteries. *Angewandte Chemie International Edition*, 61(38), e202208313. doi: <https://doi.org/10.1002/anie.202208313>
- Tu, N. T., Liang, X. ve Meng, Y. S. (2021). Circumventing chemo-mechanical failure of Sn foil battery anode by grain refinement and elaborate porosity design. *Energy Storage Materials*, 35, 34-45. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ensm.2020.11.017>
- Xu, R., Sun, J., Chen, Y., Li, Y. ve Zhang, X. (2019). Sn-alloy foil electrode with mechanical prelithiation: Full-cell performance up to 200 cycles. *Nano Energy*, 57, 157-165. doi: <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2018.12.060>
- Yang, J., Zavalij, P. Y. ve Whittingham, M. S. (2003). Anodes for lithium batteries: Tin revisited. *Electrochimica Acta*, 48, 4155-4161. doi: [https://doi.org/10.1016/S0013-4686\(03\)00504-9](https://doi.org/10.1016/S0013-4686(03)00504-9)
- Ying, H., Chen, H. ve Yu, H. (2017). Metallic Sn-based anode materials: Application in high-performance lithium-ion and sodium-ion batteries. *Advanced Science*, 4(6), 1600439. doi: <https://doi.org/10.1002/advs.201600439>

Zhang, Y., Guo, S., Li, Z., Zhou, X. ve Wang, X. (2021). A room temperature alloying strategy to enable commercial metal foil for efficient Li/Na storage and deposition. *Energy Storage Materials*, 38, 51-60. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ensm.2021.03.017>

Zhang, Y., Li, T., Xu, R., Guo, S. ve Zhou, X. (2022). Defect character distribution regulation of alloy foil anode for high volumetric energy density lithium-ion batteries. *Energy Storage Materials*, 50, 130-139. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ensm.2022.07.018>

## PATH PLANNING CONSIDERING DRIVER PREFERENCES USING ANALYTIC HIERARCHY PROCESS FOR ELECTRIC VEHICLES

Mehmet ARIKAN<sup>1\*</sup>, Sinem BOZKURT KESER<sup>2</sup>, İnci SARIÇİÇEK<sup>3</sup>, Ahmet YAZICI<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Eskişehir Osmangazi University, Center of Intelligent Systems Applications Research, Eskişehir

<sup>2,4</sup> Eskişehir Osmangazi University, Faculty of Engineering and Architecture, Computer Engineering, Eskişehir

<sup>3</sup> Eskişehir Osmangazi University, Faculty of Engineering and Architecture, Industrial Engineering, Eskişehir

<sup>1</sup> ORCID No: <https://orcid.org/0009-0005-4364-8768>

<sup>2</sup> ORCID No: <https://orcid.org/0000-0002-8013-6922>

<sup>3</sup> ORCID No: <https://orcid.org/0000-0002-3528-7342>

<sup>4</sup> ORCID No: <https://orcid.org/0000-0001-5589-2032>

Keywords	Abstract
<p>Electric vehicle Path planning Driver preference Analytical Hierarchy Process Dijkstra algorithm</p>	<p>Sustainable transportation and green logistics are becoming increasingly important, and the efficient use of electric vehicles (EVs) plays a critical role. However, efficient path planning for EVs remains a major challenge due to limited driving range and the need for optimised charging strategies. Usually, path recommendations are made based on a single criterion. However, drivers may want to consider multiple criteria for path selection. This study focuses on building a multi-criteria path planning algorithm that incorporates driver preferences by considering total travel time, energy consumption and travelling distance. To obtain the appropriate recommendation, these three criteria are evaluated using the Analytical Hierarchy Process (AHP) and Dijkstra algorithm is used to identify roads that take into account driver preferences. Johnson technique was used to remove negative energy weights due to energy recovery and solved the incompatibility problem of the Dijkstra algorithm with negative edge weights. The results have shown the proposed algorithm can efficiently generate solutions designed based on driver preferences and is suitable for EV routing applications. This study presents a method to increase user satisfaction by aiming at the widespread adoption of EVs and emphasizes the importance of multi-criteria decision making in addressing the unique challenges of EVs.</p>

## ELEKTRİKLİ ARAÇLAR İÇİN ANALİTİK HİYERARŞİ SÜRECİ KULLANARAK SÜRÜCÜ TERCİHLERİNİ DİKKATE ALAN YOL PLANLAMA

Anahtar Kelimeler	Öz
<p>Elektrikli araç Yol planlama Sürücü tercihi Analitik Hiyerarşi Süreci Dijkstra algoritması</p>	<p>Sürdürülebilir taşımacılık ve yeşil lojistik giderek daha önemli hale gelmektedir ve elektrikli araçların verimli kullanımı kritik bir rol oynamaktadır. Ancak, sınırlı sürüş menzili ve optimize edilmiş şarj stratejilerine duyulan ihtiyaç nedeniyle elektrikli araçlar için verimli yol planlaması büyük bir zorluk olmaya devam etmektedir. Genellikle, yol önerileri tek bir kritere dayalı olarak yapılır. Ancak, sürücüler yol seçimi için birden fazla kriteri göz önünde bulundurmak isteyebilir. Bu çalışma, toplam seyahat süresi, enerji tüketimi ve seyahat mesafesini dikkate alarak sürücü tercihlerini içeren çok kriterli bir yol planlama algoritması oluşturmaya odaklanmaktadır. Uygun öneriyi elde etmek için bu üç kriter Analitik Hiyerarşi Süreci kullanılarak değerlendirilmiş ve sürücü tercihlerini dikkate alan yolları belirlemek için Dijkstra algoritması kullanılmıştır. Enerji geri kazanımı nedeniyle negatif enerji ağırlıklarını kaldırmak için Johnson tekniği kullanılmış ve Dijkstra algoritmasının negatif edge ağırlıkları ile uyumsuzluk sorunu çözülmüştür. Sonuçlar, önerilen algoritmanın sürücü tercihlerine göre tasarlanmış çözümleri verimli bir şekilde üretebildiğini ve elektrikli araç rotalama uygulamaları için uygun olduğunu göstermiştir. Bu çalışma, elektrikli araçların yaygın olarak benimsenmesini hedefleyerek kullanıcı memnuniyetini artırmaya yönelik bir yöntem sunmakta ve elektrikli araçların kendine özgü zorluklarının ele alınmasında çok kriterli karar vermenin önemini vurgulamaktadır.</p>

Araştırma Makalesi

Research Article

Başvuru Tarihi : 14.05.2025

Submission Date : 14.05.2025

Kabul Tarihi : 11.12.2025

Accepted Date : 11.12.2025

\* Sorumlu yazar: [arikanmehmet2626@gmail.com](mailto:arikanmehmet2626@gmail.com)

<https://doi.org/10.31796/ogummf.1698018>



Bu eser, Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>) hükümlerine göre açık erişimli bir makaledir.

This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

## 1. Introduction

Electric vehicles (EVs) are becoming increasingly popular as global environmental policies encourage a shift away from fossil-fuelled vehicles. EVs have lower fuel consumption, reducing environmental impact and providing higher efficiency than internal combustion engine vehicles (ICEVs) (Ramachandaramurthy et al., 2023). The comparisons made between EVs and ICEVs highlight the advantages of EVs when it comes to total cost of ownership, energy efficiency, emissions, maintenance frequency and acceleration, supporting their growing market potential (Liu et al., 2021). Moreover, numerous governments globally have enacted policies aiming to phase out sales of new ICEVs in a short period of time (Fulton et al., 2019). This shift in the market brings with it new challenges that need to be overcome and optimised in order to increase user demand for EVs compared to ICEVs. EVs can have limited driving range, which causes range anxiety for potential customers, so efficient path planning emerges as an important need (Faraj and Basir, 2016).

EV path planning addresses unique constraints such as limited driving range and low-density charging station network (Eisner, Funke and Storandt, 2011). While route planning of conventional ICEVs includes criteria such as distance, time, travel impediments, scenery and vehicle cost (Pahlavani and Delavar, 2014), EV route planning prioritises energy consumption and charging cost in addition to time and distance (Kucukoglu, Dewil and Cattrysse, 2021). Since a single criterion may not be ideal in urban road networks, the use of personal and commercial EVs may require different routing criteria in terms of satisfaction and efficiency. Multi-criteria decision making (MCDM) based approaches can solve these complex routing problems (Bouakouk, Abdeli, Mokdal and Othman, 2022). MCDM is a helpful procedure for decision making when more than one criterion is available (Gavade, 2014). While MCDM considers limitations such as vehicle capacity and delivery time windows in ICEV applications, it considers criteria such as travel costs, fuel consumption and time efficiency. EVs have specific constraints for MCDM to handle, battery range, location of charging stations, and charging time are a few of them (Abidin, Abidin and Daud, 2025).

There are some studies that include single criteria path planning for EVs (Alizadeh et al., 2014; Artmeier et al., 2010). Most path-planning studies in the literature focus on a single criterion and do not consider driver preferences. Less commonly, some MCDM-based studies exist for EV path planning algorithms. For example, Schoenberg and Dressler (2022) proposed a MCDM-based EV path planning method to reduce waiting times at charging stations. To the best of our knowledge, the application of MCDM in EV path planning has received significantly less attention in the literature compared to

single criteria approaches. The contributions of this study can be summarized as follows:

- A path planning algorithm for EVs is proposed by incorporating driver preferences.
- This study focuses on shortest path planning by considering energy consumption, travel time, and distance, while incorporating driver preferences through the Analytical Hierarchy Process (AHP)
- The Dijkstra algorithm is used to calculate the paths based on driver preferences.
- The Johnson technique is employed to handle negative weights in EV-specific energy consumption calculations.

In this study, the aim is to provide path recommendations for EV users in urban travel from a multi-criteria perspective. The study focuses on determining the most suitable path by considering energy consumption, travel time, and travel distance. Additionally, the AHP was employed to incorporate driver preferences into the decision-making process. The novelty of this study lies in weighting the three commonly used objective functions in the literature according to driver preferences through AHP and proposing a single path that simultaneously considers these three criteria based on the derived weights. Thus, the proposed method distinguishes itself from existing studies by offering a personalized path recommendation for EV drivers.

The structure of this paper is as follows: Section 2 reviews the methodology in the context of related literature. Materials and methods are provided in Section 3. Section 4 presents the results, and finally, Section 5 concludes with a discussion, a summary of findings, and future work.

## 2. Literature Review

There have been several studies in the literature on path planning for EVs. Alizadeh et al. (2014) proposed an EV path planning model that integrates dynamic traffic conditions, electricity costs and charging decisions using an extended transport graph model. Their findings show that coordinated strategies are more effective in minimizing costs and maintaining grid stability. Ding et al. (2020) presented a charging alert and path planning approach that combines traffic information, charging station queues, and energy consumption monitoring in real time.

Researchers have also focused on developing criteria-based routing strategies for electric EVs in addition to classical path planning approaches. Udhan et al. (2022) proposed a modified Dijkstra algorithm in which travel time is prioritised based on physical distance and edges are identified based on traffic density, segment length and average vehicle speed, thus reducing travel time.

Knez, Dumancic, Erdelic and Mardesic (2023) addressed the Energy Shortest Path Problem (ESPP) and Time Dependent Shortest Path Problem (TDSPP) using a modified Dijkstra algorithm. In their study, they showed that energy-optimal paths cause an increase in travel time due to the selection of low-speed urban roads in addition to low-energy paths provided by energy-optimal paths.

Drivers may prefer paths based on more than one objective through MCDM methods. Bozkurt, Yazici and Keskin (2012) presented a multi-criteria route planning approach that integrates driver preferences and combines criteria such as travel time and road safety with a regular pairwise comparison method and regular increasing monotone quantifier guided ordered weighted averaging (OWA) operators. Rosita, Rosyida and Rudiyanto (2019) proposed a system that combines Dijkstra's algorithm with MCDM to improve path selection based on various parameters. With a modification of Dijkstra's algorithm, the shortest paths are generated using normalised weights of criteria such as distance, cost, congestion and risk. The combination of MCDM and Dijkstra's algorithm allowed priorities to be set and path selection to be customised, minimising costs while avoiding high-risk routes. Similarly, Kien Hua and Abdullah (2018) proposed the Weighted Sum Dijkstra Algorithm (WSDA) to address multiple criteria such as cost, distance and time. WSDA was found to outperform the traditional Dijkstra algorithm.

AHP can be applied to manage multiple objectives. Yang and Li (2010) proposed an emergency response routing algorithm for fire rescue operations by integrating Dijkstra's algorithm and AHP in a Geographic Information System (GIS) framework. AHP was used to assign weights to various criteria such as road width, type, traffic and intersection delays. It was observed that this hybrid approach achieved better performance in emergency scenarios compared to the traditional Dijkstra algorithm. In the same direction, Ahmed, Ibrahim and Henfy (2018) proposed an emergency routing method that can integrate eight different criteria by combining AHP method and Dijkstra algorithm. Keser, Yazici and Gunal (2016) integrated the A\* algorithm with AHP using criteria such as travel distance, travel time, road safety and fuel consumption. To improve the decision mechanism, Xinlei, Wen, Zhan and Tao (2022) proposed a Fuzzy Analytic Hierarchy Process (FAHP) method integrated with a dynamic Dijkstra algorithm that takes into account driver preferences and real-time traffic fluctuations. Nasution, Husni, Kuspriyanto and Yusuf (2022) applied the Fuzzy Analytic Hierarchy Process-Express (F-AHP-Express) method together with the Dijkstra shortest path algorithm to evaluate multiple route criteria. Ribeiro and Longaray (2024) combined AHP and ELECTRE II for emergency team prioritization, integrated with Dijkstra's algorithm to determine the shortest response routes on urban road networks. A summary of the literature on path planning algorithms that consider driver preferences is presented in Table 1.

Table 1. Summary of Research on Driver Preferences in Path Planning Algorithms

Study	Evaluated Criteria	MCDM Method	Algorithm
Xinlei et al. (2022)	Cost, passenger flow, construction cost, environmental impact	Fuzzy AHP	Dijkstra
Yang and Li (2010)	Travel time, traffic volume, road type, road width, number of junctions	AHP	Dijkstra
Bozkurt et al. (2012)	Travel time, road safety	Pairwise Comparison and OWA Operators	Dijkstra
Rosita et al. (2019)	Cost, distance, congestion, risk	Custom priority-based weighting	Dijkstra
Ahmed et al. (2018)	Travel time, road type, road length, traffic volume, road width, mass	AHP	Dijkstra
Keser et al. (2016)	Travel time, travel distance, road safety, fuel consumption	AHP	A*
Kien Hua and Abdullah (2018)	Distance, safety, comfort, aesthetic view	Weighted Sum Method	Dijkstra
Study	Evaluated Criteria	MCDM Method	Algorithm
Schoenberg and Dressler (2022)	Driving time, waiting time, charging time, energy consumption	Multi-criterion shortest path	A*
Ribeiro and Longaray (2024)	Equipment availability, vehicle type, accessories, operational readiness	AHP and ELECTRE II	Dijkstra
Nasution et al. (2022)	Route length, traffic congestion, travel time, weather, road heterogeneity	Fuzzy AHP	Dijkstra

The literature review reveals that multi-criteria routing studies are common for ICEVs. However, to the best of our knowledge, no existing study in the literature has proposed a path planning algorithm for EVs that explicitly integrates multiple criteria while considering driver preferences.

### 3. Materials and Methods

In this study, a path planning algorithm is proposed for EVs, integrating the weighting of three different objective functions—total travel distance, total travel time, and total energy consumption—while incorporating driver preferences. The AHP, a multi-criteria decision-making approach, is employed to determine the relative weights of these objectives. Then, Dijkstra algorithm is applied in the routing phase to determine the shortest path.

The proposed multi-criteria path planning algorithm contains two sequential phases. The first phase focuses on generating three different paths, each individually selected based on one of the three criteria (total travel distance, total travel time, and total energy consumption). In the hybrid approach, three criteria are considered during the second phase to propose a route aligned with driver preferences. In this phase, AHP makes it possible to combine these criteria based on the weights assigned by the driver. The effectiveness of the proposed algorithm is evaluated on a graph representation of the Eskişehir Osmangazi University campus environment. The OpenStreetMap (OSM) data is utilized to construct the road network graph. The list of symbols used in the following subsections is provided in Table 2, along with their explanations.

Table 2. Nomenclature

Notation	Description
$G$	A graph
$V$	The set of nodes in a graph
$E$	The set of edges in a graph
$W$	Edge weight
$v_k$	A node $v_k \in V$
$t_{ij}$	Travel time on the edge $(i, j)$
$e_{ij}$	Energy consumption on the edge $(i, j)$
$d_{ij}$	distance of edge $(i, j)$
$sl_{ij}$	Average speed on the edge $(i, j)$
$E_{pot}$	Potential energy
$E_{kin}$	Kinetic energy
$E_{rot}$	Rotational energy
$E_{gain}$	Energy gain
$E_{veh}$	Energy of the vehicle
$E_{loss}$	Energy loss
$E_{air}$	Aerodynamic drag energy
$E_{roll}$	Rolling resistance energy
$E_{const}$	Constant power consumption energy
$P_{const}$	Constant power consumption
$E_{bat}$	Energy contained in the battery
$\eta_{prop}$	Propulsion efficiency
$\eta_{recup}$	Recuperation efficiency

Notation	Description
$m$	Mass of the vehicle
$g$	Gravitational acceleration
$h$	Elevation
$v$	Current velocity of the vehicle
$J$	Rotational inertia/moment of inertia
$\rho$	Air density
$C_d$	Drag coefficient
$A$	Frontal area of the vehicle
$C_{roll}$	Rolling resistance coefficient
$\Delta s$	Covered distance
$\Delta t$	Time interval
$x_i$	Original value of the given criterion
$x_{max}$	The maximum score of the criterion
$\lambda_{max}$	Largest eigenvalue of a matrix
$x_{ij}^l$	Criterion value for that edge
$u_l$	Weight of that criterion

### 3.1. Objective Functions in Path Optimization

The road network representing the testing area was constructed using the OSMnx library from an .osm file containing map data in XML format. For simplification and prevention of node connection issues, the graph was filtered to retain drivable road types only. The directed graph of a road network can be represented as  $G(V, E)$  which defined as an ordered pair of nodes  $V$  and edges  $E$ . Here, each node  $v_k \in V$  represented by its latitude, longitude and altitude information, where  $v_k \in V (k = 1, 2, 3, \dots, n)$  and  $(v_i, v_j) \in E, i, j = 1, 2, 3, \dots, n, i \neq j$ . For each pair of  $v_i$  and  $v_j$  are neighbor nodes which represent an edge that is associated with a weight based on defined criteria. Elevation data from a GeoTIFF file was added to nodes to enable slope calculations used in energy modeling. Each edge in the road network was attached to weights for travel time ( $t_{ij}$ ), travel distance ( $d_{ij}$ ) and energy consumption ( $e_{ij}$ ).

#### Travel time

The travel time value for each edge was calculated using the road length and the average speed of the traveled highway types (e.g., 110 km/h for motorways, 50 km/h for primary roads). The travel time that results in minutes is calculated using Equation 1, where  $sl_{ij}$  is the average speed on the edge.

$$t_{ij} = d_{ij} / sl_{ij} \tag{1}$$

#### Travel distance

The travel distance represents a straightforward metric of travel distance based on the physical length of the road segment in kilometers obtained from the .osm file.

### Energy consumption

The energy consumption for each road segment is determined by considering the physical energy required to travel that segment. These demands consider constant power consumption, resistive forces, elevation changes, and velocity variations. It is computed for discrete time step  $k$  using detailed energy models (Kurczveil, López, and Schnieder 2014). The vehicle's energy obtained by the kinetic energy, the potential and the rotational energy in Equation 2, energy gain between time steps  $k$  and  $k + 1$  in Equation 3, energy loss in Equation 4, air resistance in Equation 5, rolling resistance in Equation 6, and constant power intake in Equation 7. Then, the energy contained in the vehicle's battery depending on propulsion and recuperation in Equation 8 and Equation 9.

$$E_{veh}[k] = E_{kin}[k] + E_{pot}[k] + E_{rot}[k] \quad (2)$$

$$= m \cdot g \cdot h[k] + \frac{m}{2} \cdot v^2[k] + \frac{J}{2} \cdot v^2[k]$$

$$\Delta E_{gain}[k] = E_{veh}[k + 1] - E_{veh}[k] - \Delta E_{loss}[k] \quad (3)$$

$$\Delta E_{loss}[k] = \Delta E_{air}[k] + \Delta E_{roll}[k] + \Delta E_{const}[k] \quad (4)$$

$$\Delta E_{air}[k] = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_d \cdot A \cdot v^2[k] \cdot |\Delta s[k]| \quad (5)$$

$$\Delta E_{roll}[k] = C_{roll} \cdot m \cdot g \cdot |\Delta s[k]| \quad (6)$$

$$\Delta E_{const}[k] = P_{const} \cdot \Delta t \quad (7)$$

$$E_{bat}[k + 1] = E_{bat}[k] - \Delta E_{gain}[k] \cdot \eta_{prop}^{-1}, \quad (8)$$

if  $\Delta E_{gain}[k] < 0$

$$E_{bat}[k + 1] = E_{bat}[k] - \Delta E_{gain}[k] \cdot \eta_{recup}, \quad (9)$$

if  $\Delta E_{gain}[k] \geq 0$

For each edge  $(i, j)$ , assuming it takes  $n$  units of time to travel from node  $i$  to node  $j$ , total energy consumption  $e_{ij}$  is calculated using Equation 10 for discrete time step  $k$ .

$$e_{ij} = \sum_{l=k}^{k+n-1} (E_{bat}[l + 1] - E_{bat}[l]) \quad (10)$$

Factors such as vehicle mass, speed, altitude changes and aerodynamics are taken into account in the energy calculations for each edge. Energy losses such as air resistance, rolling resistance and rotational resistance are also included in the model, enabling a comprehensive evaluation of energy consumption. In addition, the model allows energy recovery by considering the gains from regenerative braking in EVs. Therefore, some edges may have negative values, but this problem is solved in the path planning section. This validated model is also used in the traffic simulator

SUMO (Simulation of Urban MObility) and is suitable for estimating energy consumption for various road types.

### 3.2. Multi-Criteria Decision-Making Approach using Analytical Hierarchy Process

In this study, AHP was used to assign weights to objective functions (total travel time, total energy consumed, and total travel distance) based on driver preferences (Vaidya and Kumar, 2006). The mentioned objective functions serve as criteria in the objective function decision-making process. AHP enables systematic decisions to be made by determining the relative importance of multiple criteria through a structured pairwise comparison process. Thus, the preferred routes by the driver were calculated with Dijkstra algorithm using the weights obtained as a result of the AHP.

The AHP begins with the normalization of criteria to ensure their comparability and integration into the decision-making process. The normalized values are calculated by Equation 11 using the maximum score method in Malczewski (1999), where  $x'_i$  represents the normalized value of the  $i^{\text{th}}$  criterion, and  $x_i$  is the original value of the given criterion and  $x_{max}$  represents the maximum score of the criterion across the network. The results are scaled to a range between 0 and 1.

$$x'_i = \frac{x_i}{x_{max}} \quad (11)$$

Original and normalized values of each criterion for an edge  $(v_i, v_j)$  are shown in Table 3.  $(t'_{ij})$ ,  $(d'_{ij})$ , and  $(e'_{ij})$  represents the normalized values of each criterion.

The pairwise comparison matrix is created using the Saaty Scale (Saaty, 1980), which helps assign relative value to each criterion with a 1 – 9 scale representing linguistic terms presented in Table 4.

Table 3. Normalization of the Criteria

Criteria	Original	Normalized
Travel Time	$[0 \infty)$	$[t_{min} / t_{max} \ 1], t'_{ij}$ $= t_{ij} / t_{max}$
Travel Distance	$[0 \infty)$	$[d_{min} / d_{max} \ 1], d'_{ij}$ $= d_{ij} / d_{max}$
Energy Consumption	$[0 \infty)$	$[e_{min} / e_{max} \ 1], e'_{ij}$ $= e_{ij} / e_{max}$

Table 4. Relative Importance Scale

Relative Importance	Scale
Equally important	1
Slightly more important	3
Important	5
Very important	7
Extremely important	9
Intermediate values	2,4,6,8

The pairwise comparison is given in Table 5. Each element of the matrix signifies the relative importance of one criterion compared to another according to driver preferences, with diagonal elements given a value of 1 to indicate equal importance when a criterion is compared to itself. For example, the linguistic term ‘extremely important’ is selected to compare travel distance with energy consumption in Table 5, represented with numerical value 9, which sets the importance of energy consumption over travel distance to 1/9.

Table 5. Pairwise Comparison of Criteria

	Travel	Energy	Travel
Travel Time	1	3	1/7
Energy Consumption	1/3	1	1/9
Travel Distance	7	9	1

The driver preferences in Table 5 were transformed into an overall priority weight vector through the following steps:

Matrix  $C$  is constructed from Table 5 as

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 1/7 \\ 1/3 & 1 & 1/9 \\ 7 & 9 & 1 \end{bmatrix}$$

Then, the following Equation 12

$$\frac{c[i,j]}{\sum_{i=1}^n c[i,j]} \tag{12}$$

is applied to each cell of matrix  $C$  for normalization to create the following matrix  $D$ :

$$D = \begin{bmatrix} 0.1200 & 0.2307 & 0.1139 \\ 0.0399 & 0.0769 & 0.0886 \\ 0.8400 & 0.6923 & 0.7974 \end{bmatrix}$$

Then, the following Equation 13

$$\frac{\sum_{j=1}^n D[i,j]}{n} \tag{13}$$

is applied to matrix  $D$  to obtain the column vector  $U$ .

$$U = \begin{bmatrix} 0.1549 \\ 0.0686 \\ 0.7765 \end{bmatrix}$$

In this example, the column  $U$  represents the overall priority weights. The priority weight of the criteria travel time, energy consumed, and travel distance are  $u_1 = 0.1549$ ,  $u_2 = 0.0686$ , and  $u_3 = 0.7765$ , where  $\sum_{i=1}^3 u_i = 1$ .

A consistency check is performed as the last step of the AHP to ensure the weights are reliable. Consistency Ratio (CR) in Equation 14 is calculated, where  $\lambda_{max}$  is the largest eigenvalue of the matrix  $C$ ,  $n$  is the number of criteria, and  $RI$  is a constant value depending on the number of criteria (e.g.,  $RI = 0.58$  for  $n = 3$ ,  $RI = 0.9$  for  $n = 4$ ).

$$CR = \frac{\lambda_{max} - n}{RI \cdot (n - 1)} \tag{14}$$

The value of CR should be less than 0.1 for consistency. In our example, it's calculated as 0.0708, showing that the pairwise comparison matrix is consistent and the AHP is reliable.

An edge weight  $W_{ij}$  on edge  $(v_i, v_j)$ ,  $i \neq j$  represents the final objective function assigned to each edge in the road network. This calculated with Equation 15, where  $(x_{ij}^l)$  ( $l = 1, 2, 3, \dots, k$ ) are the normalized criteria weights for the edge. This calculation incorporates the AHP-derived weights with the edge attributes from Phase 1, allowing for a weighted evaluation of each road segment considering driver preferences.

$$W(v_i, v_j) = W_{ij} = \sum_{l=1}^k (x_{ij}^l)' u_l \tag{15}$$

$$= (x_{ij}^1)' u_1 + (x_{ij}^2)' u_2 + (x_{ij}^3)' u_3$$

By incorporating these weighted evaluations, the AHP-based methodology ensures that the path planning process aligns with driver preferences while effectively balancing the multiple criteria.

### 3.3. Path Planning Algorithm

The Dijkstra algorithm resolves the problem of determining the shortest path from a source to a destination in a graph (Javaid, 2013). It is a greedy approach to solving the single-source shortest path problem. It finds the shortest path from a source node to all other nodes in a connected graph without negative weights and works efficiently for both directed and undirected graphs (Medak and Gogoi, 2018). This algorithm helps identify the shortest path by minimizing the total cost of the path implemented by the Python NetworkX library. The flowchart of the overall process of the proposed algorithm is given in Figure 1.

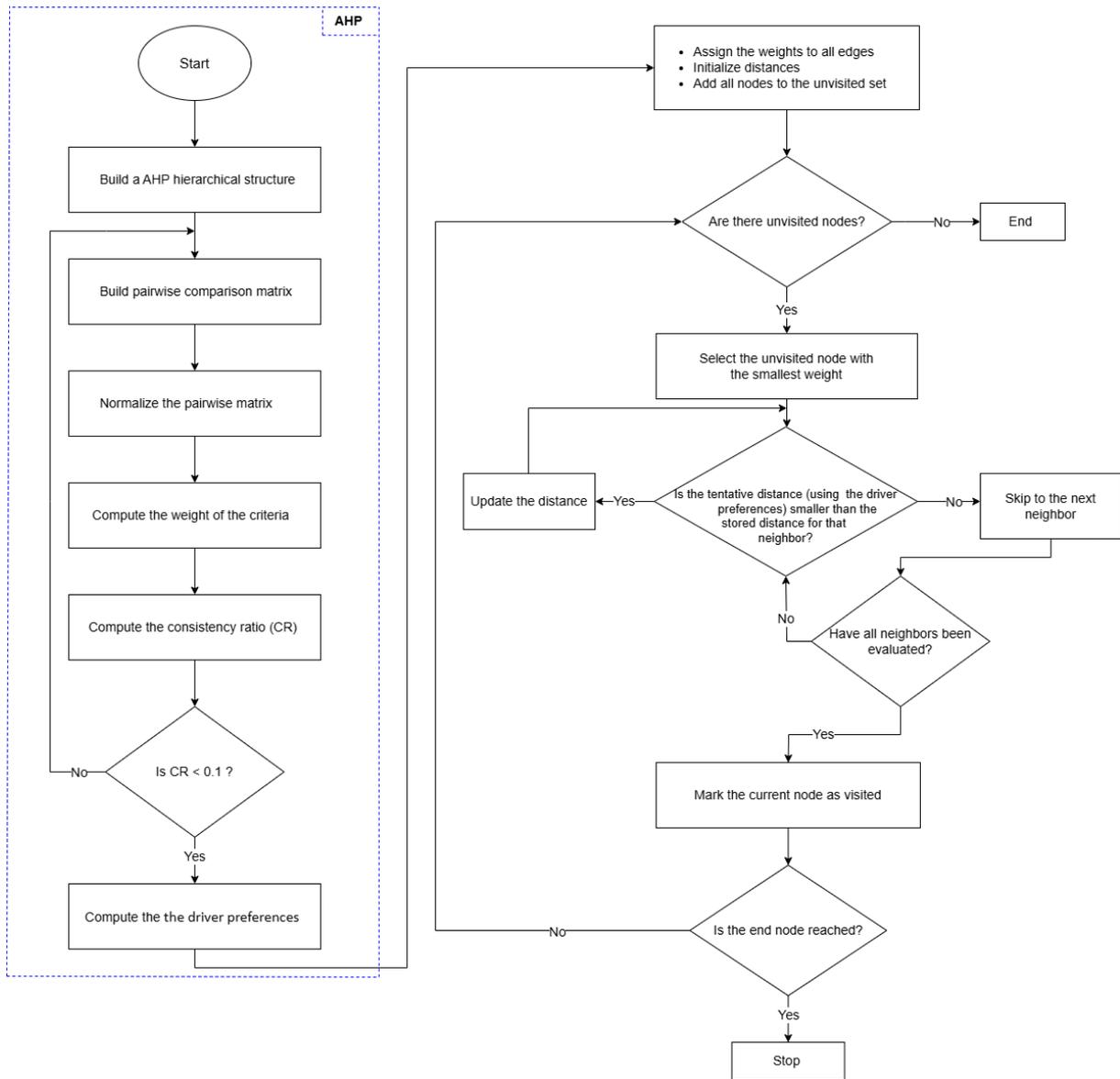


Figure 1. The Framework for the Proposed Path Planning Algorithm

The proposed method, illustrated in Figure 1, presents a multi-objective optimization approach for EV path planning by incorporating travel time, total consumed energy, and total travel distance into a unified path that aligns with driver preferences. Utilizing the AHP, it assigns weights to these objectives based on their relative importance and addresses negative energy weights through Johnson's technique. The final path is determined using the Dijkstra algorithm, ensuring an efficient and customized solution that aligns with the optimization objectives and driver preferences.

Energy consumption differs from other objectives since energy weights can be negative due to recuperation, and shortest algorithms, like Dijkstra algorithm (Dijkstra, 1959), cannot be directly applied. To solve this, Johnson technique (Johnson, 1977) is used to reweight the graph

to eliminate negative weights while preserving the relative order of paths. Johnson technique deals with negative edge weights in a graph in several stages. First, a super-source node  $q$  is added to the graph, connecting it to all other nodes with edges of weight zero. Next, the Bellman-Ford algorithm (Bellman, 1958) is applied from this super-source node to compute the shortest distances ( $h[v]$ ) from the super-source to all other nodes. The method terminates if a negative cycle is detected since the shortest paths are not well-defined. Following this, each edge  $(v_i, v_j)$  in the graph is reweighed using the formula  $W'(v_i, v_j) = W(v_i, v_j) + h[v_i] - h[v_j]$ , where  $h[v_i]$  and  $h[v_j]$  are the shortest path distances from the Bellman-Ford algorithm. This reweighting ensures that all edge weights  $W'(v_i, v_j)$  become non-negative. After the reweighting, the super-

source node is removed from the graph. This results in a modified graph that does not contain any negative edge weights. This enables the correct application of Dijkstra algorithm to determine the shortest paths.

**4. Experimental Results**

In order to test the proposed methodology, selected criteria for total travel time, total consumed energy, and

total travel distance were individually visualized on a single map for better understanding. The experiment was conducted with limitations inside the Eskişehir Osmangazi University (ESOGU) campus area, as shown in Figure 2, where start and end points were selected to represent three different paths.

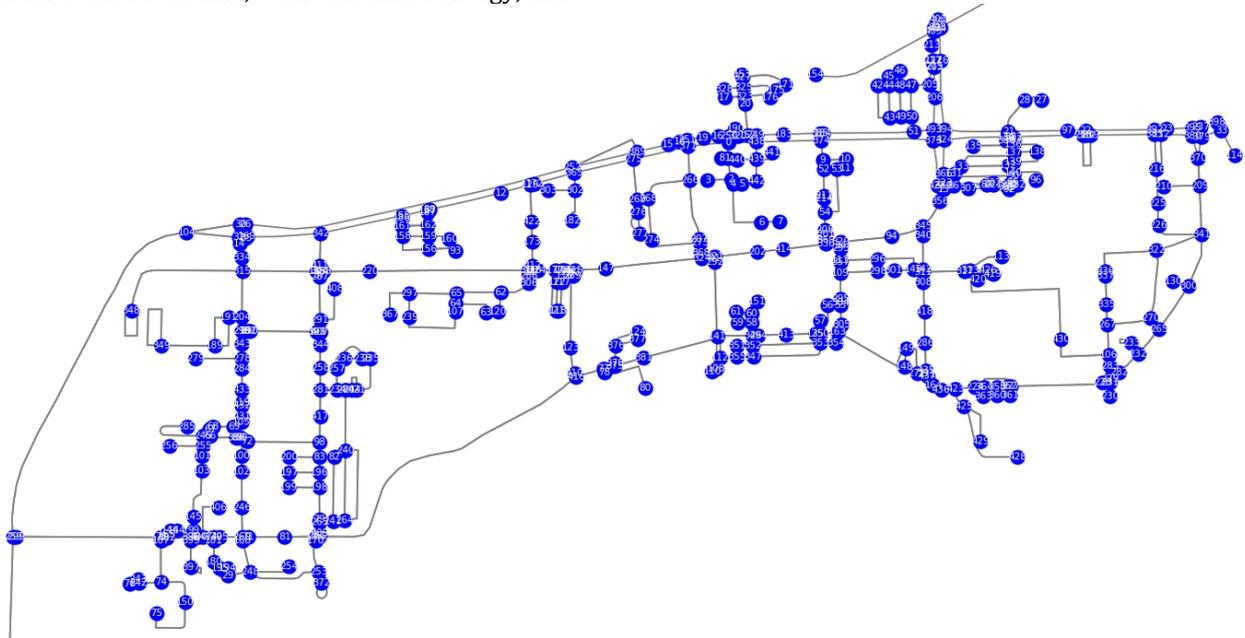


Figure 2. The Graph of the Eskişehir Osmangazi University

The visualization was created using Folium, an interactive mapping library, and OSM, an open-source geospatial database. Figure 3 presents the visualized result of the Dijkstra algorithm based on a single criterion (total travel time, total travel distance, and total energy consumption), while Table 5 summarizes the numerical statistics for path for total time (Path-TT), path total distance (Path-TD), and path for total energy (Path-TE).

Table 5. Comparison of Paths Considering Three Criteria

Measured Criteria	Path-TT	Path-TD	Path-TE
Total travel Time (s)	216.978	246.576	225.576
Total travel Distance (m)	1382.4	1219.1	1256.9
Total Consumed Energy (Wh)	198.7	199.1	192.7

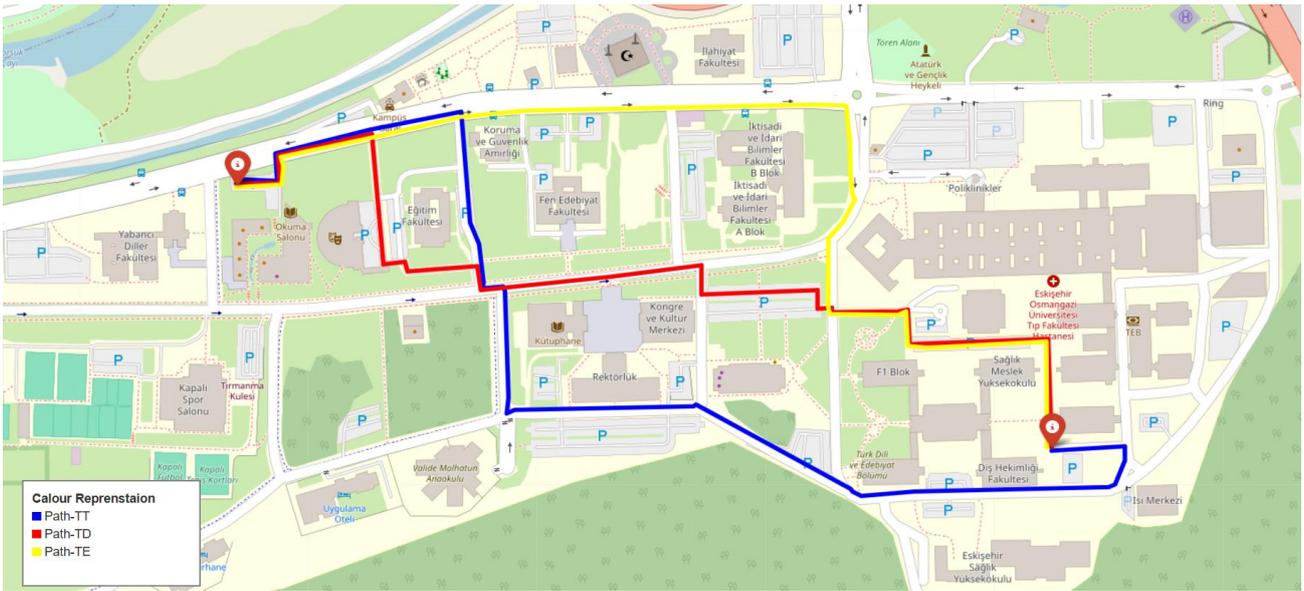


Figure 3. Paths considering single criterion

In the next phase, a driver preferred path was generated using AHP to combine multiple criteria based on driver preferences. According to the relative importance assigned to each criterion, travel distance was found to be the most important, followed by travel time and energy consumption. The priority weight of the criteria

travel time, energy consumed, and travel distance were  $u_1 = 0.1549$  ,  $u_2=0.0686$ , and  $u_3 = 0.7765$ . These weights were then integrated into Dijkstra algorithm to determine the driver preferred path, and the visualized result is presented in Figure 4.

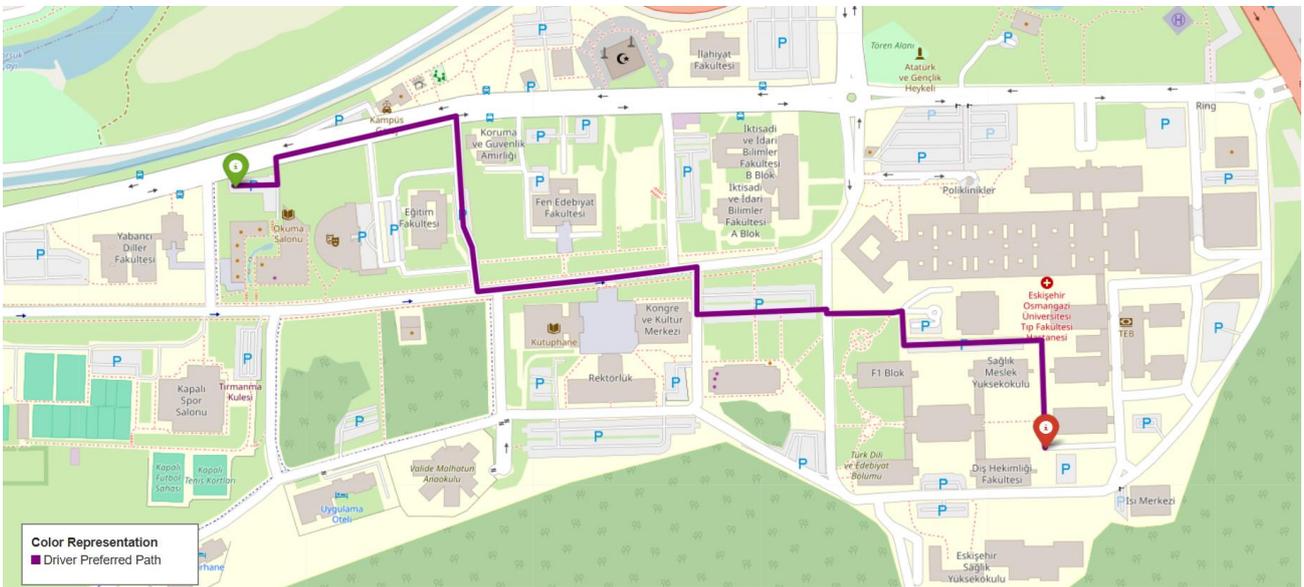


Figure 4. The Final Path Integrating Driver Preferences

The driver preferred routing process was shown to create unique paths compared to all three single criterion paths even within a small testing area. The length of the path is 1232.7 meters, energy consumption is 195.4 Wh and travel time is 231.576 seconds. With these results, it is shown that our proposed method

offers unique and effective results in line with the driver preferences by considering multiple criteria.

## 5. Conclusion

A path-planning approach that can integrate driver preferences within the EV context is studied in this paper. The proposed algorithm combines total travel time, total travel distance, and total energy consumption in a single scope while also addressing the unique preferences of EV drivers via AHP. Dijkstra algorithm augmented with Johnson's technique to handle negative energy weights results in efficient and practical path planning. Experimental results show that the proposed methodology fulfills expectations for both single and multi-criteria routing and is capable of generating balanced paths by driver preferences. This algorithm, tested at ESOGU campus, has demonstrated its capability in EV routing scenarios. ESOGU campus is a relatively small area and may not fully reflect large-scale or high-traffic conditions. Future studies can create more comprehensive, dynamic and larger networks by including live traffic and charging station data and additional criteria such as road quality and usability. This will make the results more realistic and more suitable for practical applications.

## Acknowledgements

This paper is supported by the OPEVA project that has received funding within the Chips Joint Undertaking (Chips JU) from the European Union's Horizon Europe Programme and the National Authorities (France, Belgium, Czechia, Italy, Portugal, Turkey, Switzerland), under grant agreement 101097267. Views and opinions expressed are, however, those of the author(s) only and do not necessarily reflect those of the European Union or Chips JU. Neither the European Union nor the granting authority can be held responsible for them.

This work is also supported by the Scientific and Technical Research Council of Turkey (TUBITAK), Contract No 222N269, project title: OPTimization of Electric Vehicle Autonomy (OPEVA)

## Authorship Contribution Statement

Mehmet Arıkan contributed to the experimental design and implementation, methodology, and manuscript writing. Sinem Bozkurt Keser and İnci Sarıçiçek contributed to methodology, manuscript writing, review, and editing. Ahmet Yazıcı contributed as the project leader by reviewing the manuscript and providing critical feedback.

## Declaration of Competing Interest

The authors have no conflicts of interest to declare regarding the content of this article.

## References

Abidin, S. Z., Abidin, N. I. Z., & Daud, H. (2025). Decision-Making Support in Vehicle Routing Problems: A

Review of Recent Literature. *Journal of Advanced Research in Applied Sciences and Engineering Technology*, 44(2), 124-134. doi: <https://doi.org/10.37934/araset.44.2.124134>

Ahmed, S., Ibrahim, R. F., & Hefny, H. A. (2018). Mobile-based routes network analysis for emergency response using an enhanced Dijkstra's algorithm and AHP. *International Journal of Intelligent Engineering and Systems*, 11(6), 252-260. doi: <https://doi.org/10.22266/IJIES2018.1231.25>

Alizadeh, M., Wai, H. T., Scaglione, A., Goldsmith, A., Fan, Y. Y., & Javidi, T. (2014). Optimized path planning for electric vehicle routing and charging. In *2014 52nd Annual Allerton Conference on Communication, Control, and Computing (Allerton)* (pp. 25-32). Monticello, IL, USA: IEEE. doi: <https://doi.org/10.1109/ALLERTON.2014.7028431>

Artmeier, A., Haselmayr, J., Leucker, M., & Sachenbacher, M. (2010). The shortest path problem revisited: Optimal routing for electric vehicles. In *KI 2010: Advances in Artificial Intelligence* (pp. 309-316). Karlsruhe, Germany: Springer. doi: [https://doi.org/10.1007/978-3-642-16111-7\\_35](https://doi.org/10.1007/978-3-642-16111-7_35)

Bellman, R. (1958). On a routing problem. *Quarterly of applied mathematics*, 16(1), 87-90. doi: <https://doi.org/10.1090/qam/102435>

Bouakouk, M. R., Abdelli, A., Mokdad, L., & Othman, J. B. (2022). Dealing with complex routing requirements using an MCDM-based approach. In *2022 International Wireless Communications and Mobile Computing (IWCMC)* (pp. 1256-1261). Dubrovnik, Croatia: IEEE. doi: <https://doi.org/10.1109/IWCMC55113.2022.9825024>

Bozkurt, S., Yazici, A., & Keskin, K. (2012). A multicriteria route planning approach considering driver preferences. In *2012 IEEE International Conference on Vehicular Electronics and Safety (ICVES 2012)* (pp. 324-328). Istanbul, Turkey: IEEE. doi: <http://doi.org/10.1109/ICVES.2012.6294270>

Dijkstra, E. W. (1959). A note on two problems in connexion with graphs. *Numerische Mathematik*, 1(1), 269-271. doi: <https://doi.org/10.1007/BF01386390>

Ding, D., Li, J., Tu, P., Wang, H., Cao, T., & Zhang, F. (2020). Electric vehicle charging warning and path planning method based on spark. *IEEE Access*, 8, 8543-8553. doi: <https://doi.org/10.1109/access.2020.2964307>

Eisner, J., Funke, S., & Storaandt, S. (2011). Optimal route planning for electric vehicles in large networks. In

- Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence*, 25(1), 1108–1113. San Francisco, CA, USA. doi: <https://doi.org/10.1609/aaai.v25i1.7991>
- Faraj, M., & Basir, O. (2016). Range anxiety reduction in battery-powered vehicles. In 2016 *IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC)* (pp. 1-6). IEEE. doi: <http://doi.org/10.1109/ITEC.2016.7520190>
- Fulton, L. M., Jaffe, A., & McDonald, Z. (2019). *Internal combustion engine bans and global oil use*. University of California eScholarship. Retrieved from <https://escholarship.org/uc/item/52j400b1>
- Gavade, R. K. (2014). Multi-Criteria Decision Making: An overview of different selection problems and methods. *International Journal of Computer Science and Information Technologies*, 5(4), 5643-5646.
- Javaid, A. (2013). *Understanding Dijkstra's algorithm*. SSRN. Retrieved from <https://ssrn.com/abstract=2340905>
- Keser, S. B., Yazıcı, A., & Günel, S. (2016). A multi-criteria heuristic algorithm for personalized route planning. *Anadolu University Journal of Science and Technology A-Applied Sciences and Engineering*, 17(2), 299-313 doi: <https://doi.org/10.18038/btda.06501>
- Kien Hua, T., & Abdullah, N. (2018). Weighted Sum-Dijkstra's Algorithm in Best Path Identification based on Multiple Criteria. *Journal of Computer Science & Computational Mathematics*, 107–113. doi: <https://doi.org/10.20967/jcscm.2018.04.008>
- Knez, D., Dumancic, A., Erdelic, T., & Mardesic, N. (2023). Solving Shortest Energy and Time-Dependent Travel Time Path Problems on a Small-Sized Road Network. In *Proceedings Elmar - International Symposium Electronics in Marine* (pp. 33–36). Zadar, Croatia: IEEE. doi: <https://doi.org/10.1109/ELMAR59410.2023.10253923>
- Kucukoglu, I., Dewil, R., & Cattrysse, D. (2021). The electric vehicle routing problem and its variations: A literature review. *Computers & Industrial Engineering*, 161, 107650. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2021.107650>
- Kurczveil, T., López, P. Á., & Schnieder, E. (2014). Implementation of an energy model and a charging infrastructure in SUMO. In *Simulation of Urban Mobility: SUMO 2013, Revised Selected Papers* (pp. 33–43). Berlin, Germany: Springer. doi: [http://doi.org/10.1007/978-3-662-45079-6\\_3](http://doi.org/10.1007/978-3-662-45079-6_3)
- Liu, Z., Song, J., Kubal, J., Susarla, N., Knehr, K. W., Islam, E., ... & Ahmed, S. (2021). Comparing total cost of ownership of battery electric vehicles and internal combustion engine vehicles. *Energy Policy*, 158, 112564. doi: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2021.112564>
- Malczewski, J. (1999). *GIS and multicriteria decision analysis*. New York, NY: John Wiley & Sons, Inc.
- Medak, J., & Gogoi, P. P. (2018). Review and analysis of single-source shortest path problem using Dijkstra's algorithm. *IOSR Journal of Computer Engineering*, 20(2), 10–15.
- Nasution, S. M., Husni, E., Kuspriyanto, K., & Yusuf, R. (2022). Personalized route recommendation using F-AHP-Express. *Sustainability*, 14(17), 10831. doi: <https://doi.org/10.3390/su141710831>
- Johnson, D. B. (1977). Efficient algorithms for shortest paths in sparse networks. *Journal of the ACM (JACM)*, 24(1), 1-13. doi: <https://doi.org/10.1145/321992.321993>
- Pahlavani, P., & Delavar, M. R. (2014). Multi-criteria route planning based on a driver's preferences in multi-criteria route selection. *Transportation research part C: emerging technologies*, 40, 14-35. doi: <https://doi.org/10.1016/j.trc.2014.01.001>
- Ramachandaramurthy, V. K., Ajmal, A. M., Kasinathan, P., Tan, K. M., Yong, J. Y., & Vinoth, R. (2023). Social acceptance and preference of EV users—a review. *IEEE Access*, 11, 11956-11972. doi: <http://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3241636>
- Ribeiro, D. L., & Longaray, A. A. (2024). A Novel Computational Mathematical Model for Team and Route Selection of the Emergency Response Operations. *Engineering, Technology & Applied Science Research*, 14(2), 13624-13630. doi: <https://doi.org/10.48084/etasr>
- Rosita, Y. D., Rosyida, E. E., & Rudiyanto, M. A. (2019). Implementation of dijkstra algorithm and multi-criteria decision-making for optimal route distribution. *Procedia Computer Science*, 161, 378–385. doi: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2019.11.136>
- Saaty, T. L. (1980). The analytic hierarchy process (AHP). *The Journal of the Operational Research Society*, 41(11), 1073-1076.
- Schoenberg, S., & Dressler, F. (2022). Reducing waiting times at charging stations with adaptive electric vehicle route planning. *IEEE Transactions on*

*Intelligent Vehicles*, 8(1), 95-107. doi:  
[10.1109/TIV.2022.3140894](https://doi.org/10.1109/TIV.2022.3140894)

Udhan, P., Ganeshkar, A., Murugesan, P., Permani, A. R., Sanjeeva, S., & Deshpande, P. (2022). Vehicle route planning using dynamically weighted Dijkstra's algorithm with traffic prediction. *arXiv preprint arXiv:2205.15190*. Retrieved May 2, 2025. doi:  
<https://doi.org/10.48550/arXiv.2205.15190>

Vaidya, O. S., & Kumar, S. (2006). Analytic hierarchy process: An overview of applications. *European Journal of operational research*, 169(1), 1-29. doi:  
<http://doi.org/10.1016/j.ejor.2004.04.028>

Xinlei, M., Wen, C., Zhan, G., & Tao, Y. (2022). Adaptive decision support model for sustainable transport system using fuzzy AHP and dynamical Dijkstra simulations. *Mathematical Biosciences and Engineering*, 19(10), 9895-9914. doi:  
<https://doi.org/10.3934/mbe.2022461>

Yang, S., & Li, C. (2010). An enhanced routing method with Dijkstra algorithm and AHP analysis in GIS-based emergency plan. In *2010 18th International Conference on Geoinformatics* (pp. 1-6). Beijing, China: IEEE. doi:  
<https://doi.org/10.1109/GEOINFORMATICS.2010.5567840>

## INSTRUMENTED FIELD DATA-BASED ASSESSMENT ON LOAD TRANSFER BEHAVIOR IN RAMMED AGGREGATE PIER® (RAP) ELEMENTS

Ece KURT BAL<sup>1\*</sup>, Mustafa Kubilay KELEŞOĞLU<sup>2</sup>, Kemal Önder ÇETİN<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Istanbul University-Cerrahpasa, Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering, Istanbul, Türkiye

ORCID No: <https://orcid.org/0000-0003-2889-5881>

<sup>2</sup> Istanbul University-Cerrahpasa, Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering, Istanbul, Türkiye

ORCID No: <https://orcid.org/0000-0003-1721-7946>

<sup>3</sup> Middle East Technical University, Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering, Ankara, Türkiye

ORCID No: <https://orcid.org/0000-0003-0540-2247>

### Keywords

Rammed Aggregate Pier®,  
Loading Test,  
Instrumentation,  
Load Transfer

### Abstract

Among the methods of stone column installation, the use of Rammed Aggregate Pier® (RAP) elements offers an alternative to traditional methods like deep foundations or excavation/backfill for sites with challenging soil conditions that cannot meet the performance criteria of superstructures. The goal of using RAP elements is to reduce settlements to acceptable levels, increase load-bearing capacity, and minimize liquefaction potential. In this study, full-scale field load test was performed to identify the variation of shear resistance along RAP element installed by the Impact® System (displacement), making this research the first and only study conducted on RAP elements produced using the displacement system. More specifically, load cells were used to assess the mobilization of vertical load distribution along the column. By utilizing these load cells positioned at various levels along the column, the axial load distribution was monitored concurrently during the loading test. Full-scale load test results demonstrated that, under a 57.5 ton load, the displacement measured at the tell-tale element (reading bars mounted on load cells) varied relative to the displacement measured at the top level of the column, by approximately 15% at the 1 m level, and in the other levels (2 m, 4 m, and 6 m) by about 2-5%. When these results were evaluated in terms of the literature-defined settlement ratio ( $R_b \gg 1$ ), the measured displacements indicated that the response was governed by lateral expansion of the column. Furthermore, the load cells indicated that the applied load mobilized rapidly up to the 1 m level ( $\sim 2D$ ;  $D$ : pier diameter), with only about 10% of the load being transmitted; in other words, the load was accommodated predominantly by circumferential friction rather than transmission to the column tip. These findings support a deformation mechanism for RAP elements with  $L/D \gg 3.5$  ( $L$ : pier length) that is driven by circumferential friction rather than tip capacity.

## DARBELİ KIRMATAŞ KOLON® (DKK) ELEMANLARINDA YÜK TRANSFER DAVRANIŞININ ENSTRÜMANTASYONLU SAHA VERİ TABANLI DEĞERLENDİRİLMESİ

### Anahtar Kelimeler

Darbeli Kırmataş Kolon®,  
Yükleme Testi,  
Enstrümantasyon,  
Yük Transferi

### Öz

Taş Kolon imalat yöntemleri arasında yer alan ve üst yapı performans kriterlerini karşılayamayacak özelliklere sahip olan zeminlerde derin temel ya da kazı/dolgu gibi mevcut yöntemlere alternatif olan Darbeli Kırmataş Kolon® (DKK) elemanları ile oturumaların uygun seviyelere indirilmesi, taşıma kapasitesinin artırılması ve sivilleşme potansiyelinin azaltılması hedeflenmektedir. Bu çalışmada, enstrümantasyonlu DKK elemanı üzerinde gerçekleştirilen tam ölçekli yüklem testi sonuçları değerlendirmeye alınmış olup, bu araştırma Impact® Sistemi (displacement) ile imal edilen Darbeli Kırmataş Kolon® elemanlarındaki yük mobilizasyonunun anlaşılmasına yönelik yürütülen ilk ve tek çalışma niteliğindedir. Bu kapsamda özel olarak tasarlanan ve kolonun farklı kademelerine yerleştirilen yük hücreleri ile yüklem testi sırasında ölçümler yapılarak kolon boyunca mobilize olan eksenel yük dağılımı eşzamanlı olarak ölçülmüştür. Tam ölçekli yüklem testi sonuçları, 57.5 ton yüklem altında tell-tale (yük hücrelerine monte edilmiş okuma çubukları) elemanlarında ölçülen deplasmanın, kolon üst kotunda ölçülen deplasmana göre 1 m seviyesinde yaklaşık %15'i, diğer seviyelerde



Bu eser, Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>) hükümlerine göre açık erişimli bir makaledir.

This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

(2 m, 4 m ve 6 m) ise %2-5'i aralığında değiştiğini göstermiştir. Elde edilen bu sonuçlar literatürde tariflenen oturma oranı ( $R_b \gg 1$ ) cinsinden de değerlendirildiğinde ölçülen deplasmanların kolonun yanal genişlemesinden kaynaklı olduğunu göstermiştir. Ayrıca yük hücreleri, uygulanan yükün 1 m seviyelerinde ( $\sim 2D$ ; D: kolon çapı) hızla mobilize olduğunu ve bu seviyelere yükün ancak %10'unun iletildiğini; başka bir ifade ile yükün kolon ucuna aktarılmadan çevre sürtünmesi ile karşılandığını göstermiştir. Bu sonuçlar,  $L/D \gg 3.5$  (L: kolon boyu) olan DKK elemanlarının, uç kapasitesinden ziyade çevre sürtünmesine dayalı olan çalışma prensibini de destekler mahiyette bulunmuştur.

Araştırma Makalesi		Research Article	
Başvuru Tarihi	: 16.06.2025	Submission Date	: 16.06.2025
Kabul Tarihi	: 11.12.2025	Accepted Date	: 11.12.2025

\* Sorumlu yazar: [ekurt@sentezinsaat.com.tr](mailto:ekurt@sentezinsaat.com.tr)  
<https://doi.org/10.31796/ogummf.1719084>

## 1. Introduction

Ground improvement techniques have become essential in modern geotechnical engineering to enhance the bearing capacity, settlement and stability of soft or problematic soil profiles, ensuring the safe support of overlying structures. Among these techniques, Rammed Aggregate Pier® (RAP) elements have gained significant attention due to their efficiency, versatility, and high performance in various soil conditions. RAP elements, as documented in the literature (e.g., Lawton and Fox, 1994; Wissmann and Fox, 2000), are highly effective in improving soft soil profiles to support structures by increasing bearing capacity and reducing soil deformations under monotonic or cyclic loading (e.g., Lawton, Fox, and Handy, 1994; Wissmann, Moser, and Pando, 2001).

Additionally, they play a critical role in mitigating liquefaction risks in sandy and silty soils (e.g., Wissmann, Ballegooy, Metcalfe, Dismuke and Anderson, 2015). Similarly, RAP technology, rooted in traditional stone column design principles, has emerged as a preferred method in recent years due to its superior installation performance and speed. The distinguishing feature of RAP lies in its installation technology, which provides 2-9 times greater stiffness compared to other stone column methods (White, Wissmann, Barnes, and Gaul, 2002), making it a robust solution for ground improvement. The design and performance of both rammed aggregate piers and stone columns are influenced by several critical factors. The design of aggregate piers hinges on their capacity to endure applied loads and stresses while minimizing deformations in the forms of bulging and settlements. These elements also ensure the integrity of the composite soil-aggregate pier system by keeping overall settlements within permissible limits. The stress transfer mechanism between the piers and the surrounding soil is a fundamental aspect that influences their performance, requiring detailed investigation to optimize design approaches. For stone columns, the capacity and deformation behavior are

significantly influenced by the installation method, more specifically, the type of compaction process employed -whether vertical or horizontal vibration. Traditional methods, such as vibro-compaction and vibro-displacement systems (wet/dry, top/bottom feed), rely on horizontal vibration for compaction (John, Tim, Hilary, and Michael, 2012). In contrast, RAP systems, utilize vertical vibration, where an impact hammer compacts the aggregate vertically while also densifying the surrounding soil laterally. Vertical vibration techniques have been proposed to modify the passive earth pressure coefficient, with findings indicating that initial earth pressure coefficient ( $K_0$ ) tends to approach the Rankine passive earth pressure coefficient ( $K_p$ ) as a result of installation effects (Handy and White, 2006). RAP elements are constructed employing high-frequency impacts instead of horizontal vibrations. This method involves densifying the soil in thin layers, applying pre-strain and pre-stress, which results in highly dense and stiff foundation elements due to increased confining stresses that significantly minimize vertical displacements under foundation loads.

The design procedures for stone columns have advanced significantly since the 1960s, with early approaches focusing on bearing capacity and settlement-based methodologies. Over the past decade, the integration of field data and theoretical models with numerical methods has further refined these design practices, enhancing their reliability and applicability. Given the growing popularity of RAP elements as soil improvement solutions, understanding their design principles, stress transfer mechanisms, and performance under various loading conditions has become more critical than ever.

This research aims to explore the mechanisms of stress distribution in Rammed Aggregate Pier® elements constructed by the Impact® System (displacement) which utilizes 3-up-2-down compaction procedure. It also compares these experimental results with existing literature to provide comprehensive insights into their

performance when subjected to vertical loads, which in turn is hoped to contribute to the optimization of their design and application in geotechnical engineering.

As part of this framework, a specialized load cell has been designed to enable the placement of the RAP element at different levels of the pier. This design aims to elucidate whether the applied load is transmitted along the column primarily through circumferential friction along its length or whether it is transmitted to the column tip, thereby revealing the column behavior.

Although the literature includes studies aimed at understanding load mobilization for RAP elements installed with the replacement system, this study represents the first and pioneering investigation developed to elucidate the load transfer mechanism of RAP elements produced using the displacement system.

## 2. Literature Review

Rammed Aggregate Pier® elements are extensively utilized in geotechnical practice, serving as a key method for enhancing the bearing capacity of weak soil conditions. The integrated system comprising the pier and surrounding soil by this process reduces the compressibility of the soil and mitigate the excessive settlement under applied loads. Additionally, the piers promote radial drainage, accelerating the consolidation process in cohesive soils and further contributing to improved shear strength, stability and liquefaction potential. Furthermore, the vibration and volumetric densification during RAP installation are anticipated to enhance the strength and rigidity of non-cohesive soils, such as sandy, gravelly, or low-plasticity silty materials. By installing compacted layers through vertical ramming action into the soft/loose soil matrix, the upper structure loads are effectively distributed within the treated zone. The effectiveness of load transfer into the improved zone primarily relies on the lateral support stress exerted by the adjacent soil.

Extensive research has been performed on the failure mechanisms of stone columns, primarily employing limit equilibrium approaches to assess bearing capacity under specific failure modes (Greenwood, 1970; Vesic, 1972; Hughes and Withers, 1974; Wong, 1975; Madhav and Vitkar, 1978; Barksdale and Bachus, 1983).

The bearing capacity of RAP supported footings is typically limited by settlement, but excessive pressure can trigger yield in the improved soil, reaching its limit equilibrium capacity. In unimproved soils, shear failure surfaces are generally presumed to develop along circular paths or logarithmic spiral paths beneath the foundation. RAP-improved soil exhibits complex failure due to interactions between rigid piers and weaker surrounding soil. Possible failure modes illustrated in Figure 1 are categorized into four distinct types: a)

Bulging of individual piers; b) Shear failure under pier tips; c) Shearing within the pier-soil interface; d) Shearing below the improved soil zone (Wissmann, 1999).

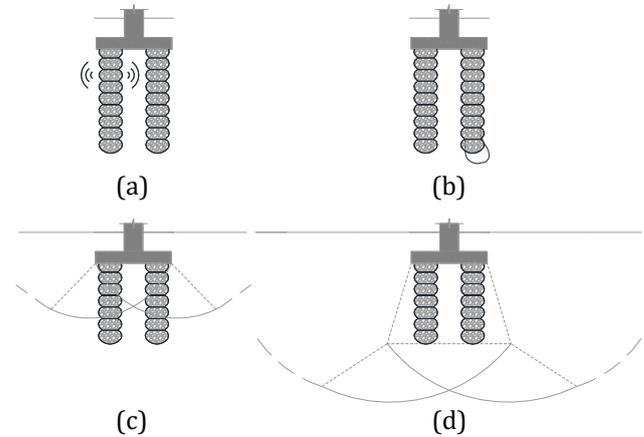


Figure 1. Potential Failure Modes for Rammed Aggregate Pier® (RAP) Elements (Wissmann, 1999).

Mitchell (1981) describes bulging failure in stone columns within saturated clays (Figure 1a), where applied pressure mobilizes shear strength, causing outward bulging, primarily in the upper portions due to lower lateral earth pressure near the surface. Evaluative techniques for single columns in soft cohesive soils assume a three-dimensional stress state, with lateral confining stress considered the ultimate passive resistance provided by the adjacent soil playing a critical role in supporting the column. Bulging failure, where the column deforms laterally under vertical load, is common for long columns bearing on a stiff stratum. The potential for shear failure beneath the base of individual RAP elements, as shown in Figure 1b, occurs when the total load transfers to the tip of insufficiently long columns (Barksdale and Bachus, 1983; McKelvey, Sivakumar, Bell and Graham, 2004; Suleiman and White, 2006).

The potential of shearing within the RAP-improved soil, as shown in Figure 1c, involves shear planes passing through the piers and surrounding soil, with the shear strength determined by the frictional resistance of the matrix soil and RAP elements.

Shearing below the RAP-improved soil matrix (Figure 1d) is evaluated by analyzing stresses at the foundation of the improved layer estimated using a 2:1 load spread, with the allowable bearing pressure (NAVFAC, 1983), with results for typical parameters provided.

Ultimately, the bearing capacity depends on column diameter, and the rigidity and strength of both the pier and surrounding soil, influenced by pier length having a negligible effect on long columns. This is supported by model tests indicating most of the applied load is primarily transmitted to the surrounding soil instead of

the pier base (Hughes and Withers, 1974). This load transfer mechanism has been validated through field and laboratory tests, emphasizing the importance of soil column interaction.

Hughes and Withers (1974) investigated the decaying stress responses with depth in stone column elements through a model test. Figure 2 shows the variation of vertical stresses with depth, where the stress decreases from a maximum ultimate value at the top during bulging failure to zero at 6 m depth. This study shows that increasing the column length beyond a certain value (6 meters for their particular setup) does not enhance the column's strength. When the column length is reduced, part of the applied vertical stress is transmitted to the soil at the tip, causing the columns to behave partially like end-bearing piles. If the columns are shortened sufficiently so that the base stress exceeds the soil's bearing capacity, end-bearing failure occurs before bulging of columns start.

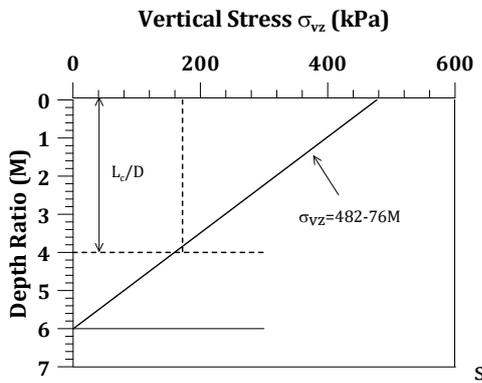


Figure 2. Vertical Stress Distribution in the Model Stone Column (Hughes and Withers, 1974).

The vertical stress distributions at different load increments, measured from total-stress cells embedded in the shafts of the replacement piers, are presented in Figure 3 and Figure 4. In White et al. (2007), the RAP length was chosen as 2.97 m, while in Gamboa (2022) it is tested as 4.2 m.

For a 2.97 m long RAP, White et al. (2007) indicated that under 240 kN vertical load, the vertical stress is reduced to 18% of its value at the top of the elements at a depth of 2.3 meters, while Gamboa (2022) reported that under 255 kN the same depth experiences roughly a 15% of the stresses applied at the top.

The vertical-stress variations are nonlinear and they decay rapidly with depth within couple of diameters of the element, indicating that a significant portion of pier cap loads are transmitted to host soils via shaft shear below the pier cap depth.

Overall, the load transfer mechanism of stone columns, which depends on their stiffness, lateral soil

confinement, and radial load spreading, provides an efficient solution for strengthening soft soil foundations.

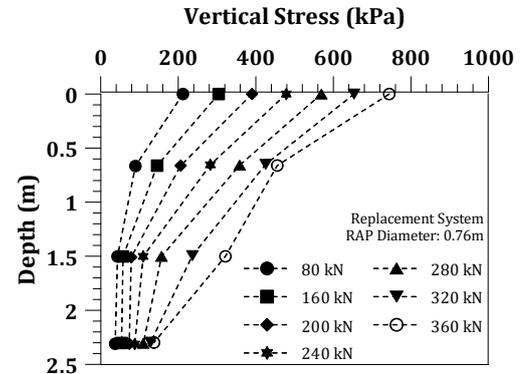


Figure 3. Measurements of Vertical Stress Increase Along Pier Shaft (White et al., 2007).

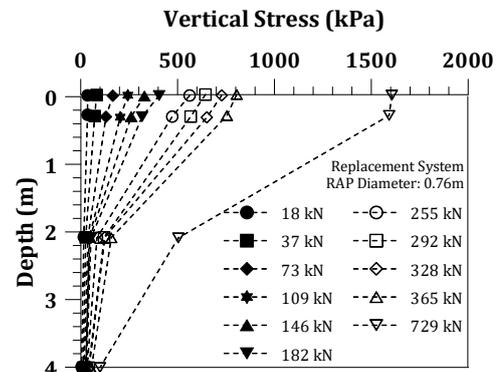


Figure 4. Measurements of Vertical Stress Increase Along Pier Shaft (Gamboa, 2022).

### 3. Methodology

To further investigate this load transfer mechanism, a well-instrumented Impact® Rammed Aggregate Pier® (RAP) was designed to assess the load distribution along the pier. A specialized load cell, engineered to withstand compacted aggregate conditions and capable of simultaneous data recording, was designed and constructed by GeoAnts-GeoDestek LLC to assess axial load along the RAP. During pier installation and load testing, sensor data were monitored in real time using a field data acquisition unit.

This section describes the soil profile of the research site, the preliminary validation tests conducted to finalize the load cell design, the installation of the instrumented Impact® RAP, and the loading tests performed on the instrumented pier.

### 3.1. Soil Profile Characterization

The instrumented RAP test was conducted at an ongoing pier installation site on the Aegean Sea coast in Milas, Muğla, Türkiye, facilitating easy access for the research team and equipment (Figure 5).

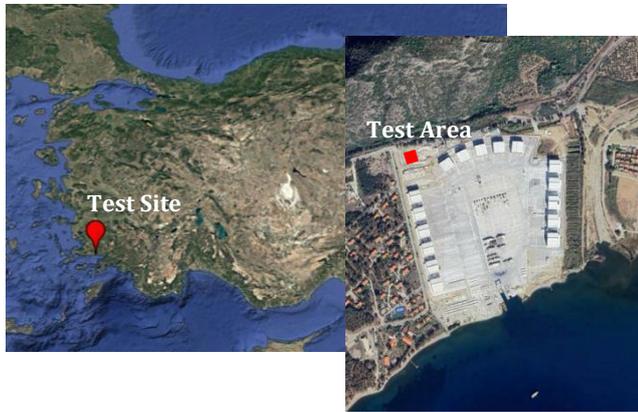


Figure 5. Instrumented RAP Installation Test Site.

Figure 6 presents the variations of SPT N, liquid limit (LL), plastic limit (PL), and water content ( $\omega$ ), with depth, along with the soil profile. The geotechnical soil profile indicates a 1 meter thick upper layer of uncontrolled fill (blocky, clayey, sandy) underlain by sandy, gravelly soft to medium stiff clay layers extending to depths of 11 m. Beneath these, a 4 m thick silty sand gravel layer is followed, by silty medium dense sand down to 20 m. Groundwater is observed at a depth of 2 m.

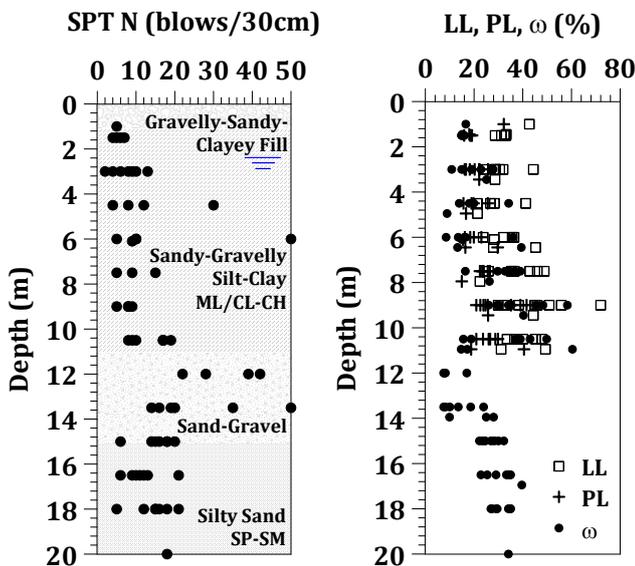


Figure 6. Variation of SPT N, LL, PL,  $\omega$  Values with Depth Along with the Representative Soil Profile.

The Impact<sup>®</sup> RAP installation steps are planned to be thoroughly described in order to provide a comprehensive overview of the system technology

prior to proceeding with the load cell design and integration.

### 3.2. Impact<sup>®</sup> Rammed Aggregate Pier<sup>®</sup> Installation

Impact<sup>®</sup> RAP elements are constructed using displacement methods with a mobil-ram base unit fitted with a high-frequency vibratory hammer. Upon reaching the designed depth with a 36 cm diameter patented chained tamper head and mandrel, aggregate is placed hopper inside, flowing to the mandrel's base. The tamper head and mandrel are then withdrawn approximately 1 meter and driven back down 0.67 m, forming a 0.33 m thick compacted lift. Compaction is achieved through hydraulic crowd pressure and dynamic vertical energy, densifying the aggregate within the displaced cavities to create stiff aggregate pier elements with a final diameter of approximately 50 cm. Figure 7 shows a view from the RAP installation site.

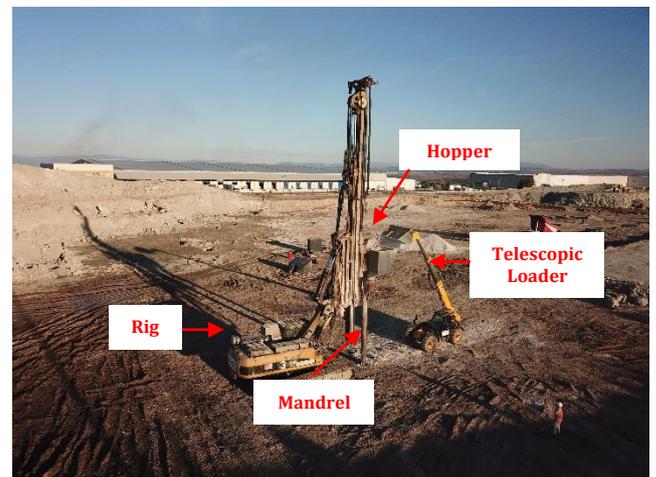


Figure 7. A View from Impact<sup>®</sup> RAP Installation Site.

### 3.3. Load Cell Design

A specialized load cell was designed to measure loads at various levels within the pier. Since the Impact<sup>®</sup> RAP installation involves driving the mandrel into the soil using axial force and vertical vibration, the key focus was to ensure the load cell remains undamaged. A trial study was conducted to assess and mitigate the potential damage to the load cell at the mandrel tip during installation. The mandrel was inserted to a depth of 2 m, the load cell manually lowered to the pier shaft, and the standard RAP installation procedure commenced as compacting the aggregate material above the load cell as shown in Figure 8. After the demo-installation, rapid plate load test was performed to confirm the successful recording of load cell data.

Figure 9 shows that during RAP installation, the total load distribution in the load cell provides a stable load level under dead aggregate loads both during mandrel driving and after the load cell reached the base.

Furthermore, the load cell data recording presented in Figure 9 confirms that the 3-up/3-down (for the bottom bulb-Step 1) and 3-up/2-down (Steps 2-3-4) RAP installation procedure, schematically depicted in Figure 8, was successfully implemented.



Figure 8. Impact® RAP Installation Steps.

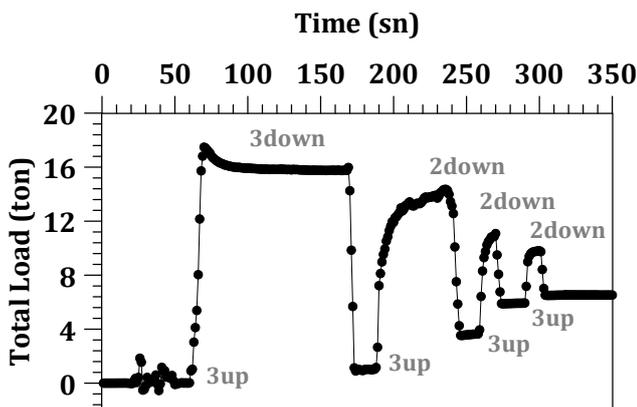


Figure 9. Measured Total Load During RAP Installation.

Figure 10 presents the data recording obtained from the load cell during the plate loading test performed after RAP installation.

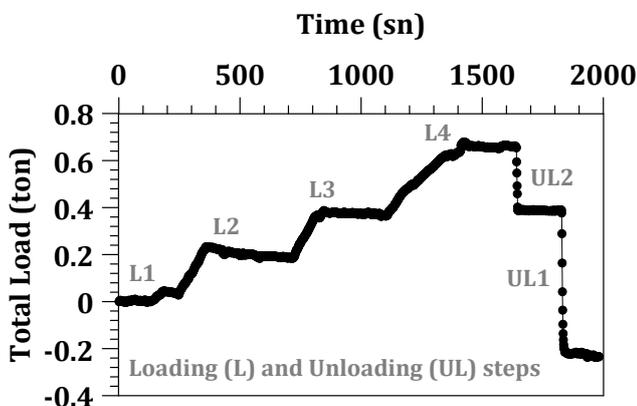
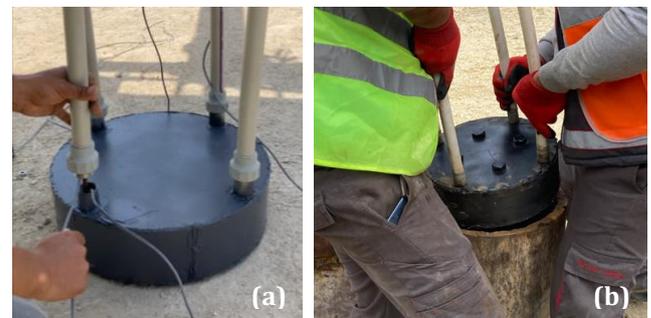


Figure 10. Measured Total Load During Plate Load Test.

The plate loading test involved four incremental loading stages of 5 tons, 10 tons, 15 tons, and 20 tons (Figure 10 - L1 to L4). A linear increase in the load cell data was observed during each loading stage, and data stabilization was confirmed at each load level. Following the loading stages, the load was unloaded in two stages (Figure 10 - UL1 & UL2). Data acquisition continued briefly after the completion of the loading test, and data collection ceased once data stabilization was observed.

The modified load cell was designed with an outer diameter of 33 cm and a height of 13.4 cm (Figure 11). Four independently operating full-bridge resistive strain gauge load cells were placed inside. A 4 mm thick steel around the circumference was implemented to enclose, protect the load cell from water and moisture and withstand damage during mandrel driving with axial force and vertical vibration.



Demo-load cell

- t=10 mm (plate)
- $\phi=46$  cm (plate)
- t=2 mm (cover)

Modified-load cell

- t=12 mm (plate)
- $\phi=33$  cm (plate)
- t= 4 mm (cover)

Figure 11. The Schematic View of the Designed Load Cells: a) Demo-load cell b) Modified-load cell.

Signal cables for each strain gauge channel were routed to the surface through four custom designed tell-tale channels encased in PPRCs sleeves. To measure vertical deformations at the load cell levels, tell-tale bars were also used at the exact locations of the load cells.

Figure 12, Figure 13 and Figure 14, the setup of the tell-tale bars and signal cables at each load cell site is presented. The data from the sensor channels were stored via two specially manufactured 8-channel signal conditioning and digitizing data acquisition units, each with built-in recording capability, and were displayed in real-time using desktop software on-site. At each level, four load cells were positioned to sense the load together, with a total of 16 load cells distributed across four different levels.

At each level, a load cell equipped with four load-measuring sensors was meticulously positioned to ensure that the load cell remained horizontally

oriented without any tilt. For the tilt-meters, a single 4-channel data acquisition unit was used, and the values were displayed in real-time via software, both during the installation of the piers and during load testing. The tilt-meters were used to provide valid information about the final positions of the load cells after placement.

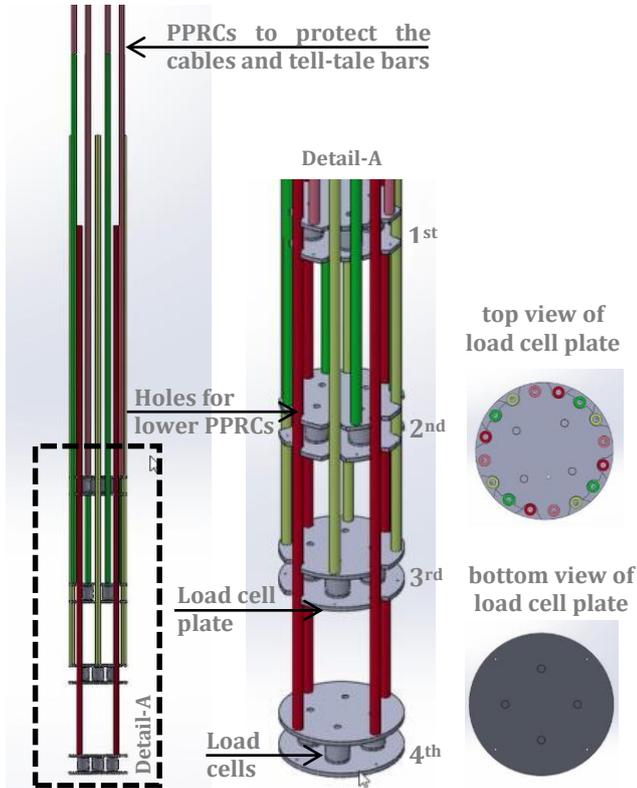


Figure 12. The Schematic View of the Designed Load Cell.



Figure 13. The Photographs from Site of the Designed Load Cell (3<sup>rd</sup> level).

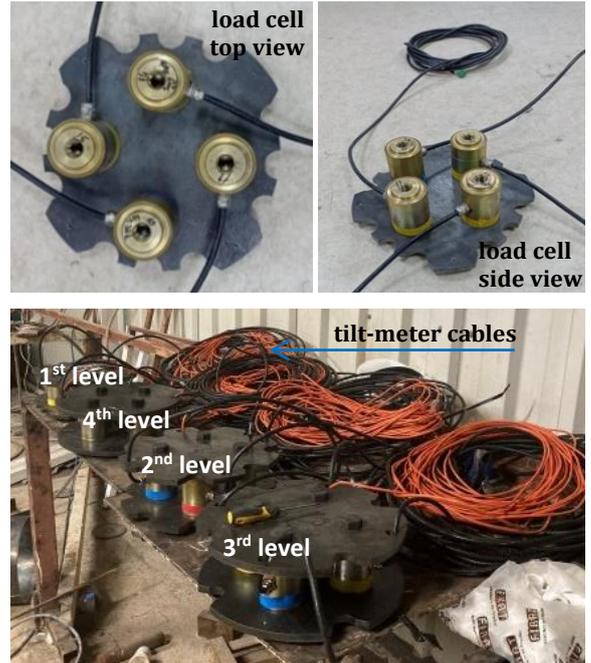


Figure 14. The Photographs from Site of the Designed Load Cell.

### 3.4. Instrumented Impact® RAP Installation

To mitigate granular material collapse during load cell placement, a separate casing was used during pier installation (Figure 15). The installation process for the instrumented test pier involved the following steps: A 40 cm diameter casing was driven to a depth of 6 m using a conical sacrificial plate. A 25 cm diameter mandrel was then lowered to 8 m to install RAP between depths 8 m and 6 m. After retracting the mandrel, the initial load cell was positioned precisely at 6 m. The mandrel was reinserted, and RAP was installed between depths of 6 m and 4 m. Using the same procedures load cells were subsequently placed at depths of 4 m, 2 m, and 1 m, with RAP installations performed between those levels. The process concluded with the final RAP installation reaching the ground surface. Care was taken to avoid damaging the cables, and data was systematically recorded throughout the RAP installation. The load cells remained stable without tilting in any direction.

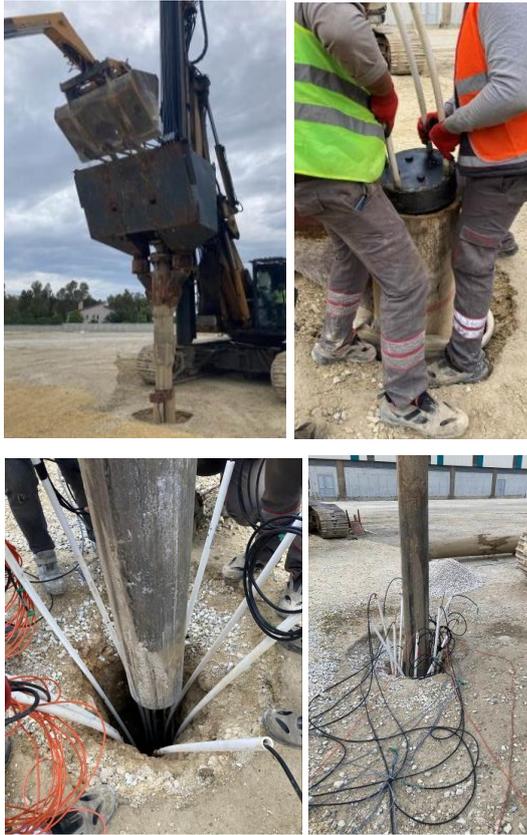


Figure 15. Some Photos from Instrumented Impact® RAP Installation.

### 3.5. Full Scale Modulus Load Test on Instrumented Impact® RAP

The full-scale loading test followed the ASTM D-1143 standard to assess load mobilization along the pier. The counterweight included four steel pipes (38 cm diameter) and 60 tons of concrete blocks: two blocks measuring 2 m x 2 m x 1 m and four blocks with a diameter of 2.3 m and thickness of 1 m. A hydraulic jack applied the load, controlled by a 100 ton capacity load cell. Displacement at the top of the column was measured using three dial gauges. However, at the tell-tale elements, out of the sixteen installed gauges, only ten were operational and successfully monitored displacements (three gauges at levels 1, 2, and 3, one gauge at level 4). Load values were recorded at each stage, starting with 5% increments until the maximum load was reached. Measurements continued for the recommended duration, ensuring the settlement rate exceeded 0.254 mm/hour or 0.064 mm/15 minutes. The test lasted 13 hours and 15 minutes. The load test was conducted according to the loading scheme outlined in Table 1. Figure 16 illustrates the loading test setup.

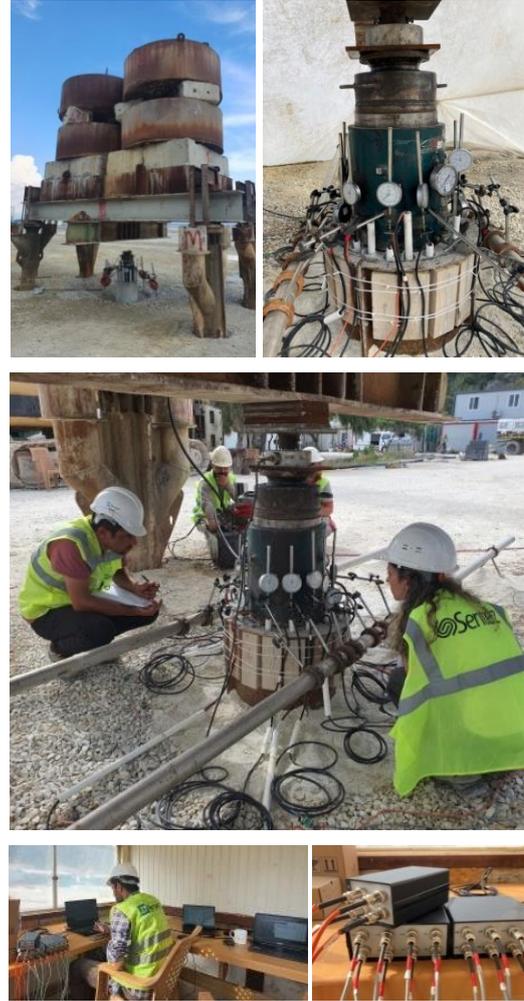


Figure 16. The Instrumented RAP Load Test Setup.

Table 1. Full Scale Modulus Load Test Scheme.

#	Load Cycle (%)	Time (min.) min./max.	Load (ton)	#	Load Cycle (%)	Time (min.) min./max.	Load (ton)
0	5	5/-	1.2	17	100	5/-	25.0
1	16	15/60	4.0	18	133	5/-	33.2
2	33	15/60	8.25	19	150	15/60	37.5
3	50	15/60	12.5	20	175	15/60	43.7
4	66	15/60	16.5	21	200	15/60	50.0
5	83	15/60	20.7	22	230	15/60	57.5
6	100	15/60	25.0	23	150	5/-	37.5
7	115	60/240	28.7	24	100	5/-	25.0
8	133	15/60	33.2	25	66	5/-	16.5
9	150	15/60	37.5	26	33	5/-	8.25
10	133	5/-	33.2	27	0	5/-	0.0
11	100	5/-	25.0	28	100	5/-	25.0
12	66	5/-	16.5	29	200	5/-	50.0
13	33	5/-	8.25	30	264	5/-	66.0
14	0	5/-	0.0	31	276	5/-	69.0
15	33	5/-	8.25	32	0	-	0.0
16	66	5/-	16.5				

**4. Results**

This section will present the results of the instrumented load test, along with the load cell measurements recorded during the testing process.

**4.1. Load Test Results**

The loading test was conducted in three cycles, applying loads of 37.5 tons, then to 57.5 tons, and ultimately about 66 tons. Deformations of 47.28 mm, 91.8 mm, and 123.35 mm were recorded at 37.5 tons, 57.5 tons, and 66 tons, respectively. At the final load, the deformation at the top of the RAP increased significantly around 135 mm. Figure 17 illustrates the load-settlement ( $q-\delta$ ) behaviors of the instrumented pier during the test for each load cell levels.

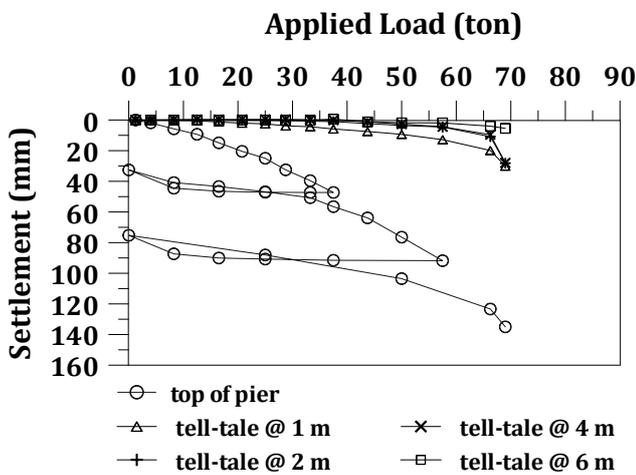


Figure 17. The Applied Load vs. Top-of-Pier Settlement Graphs Including of Tell-Tale Responses for 1<sup>st</sup> Level (1 m), 2<sup>nd</sup> Level (2 m), 3<sup>rd</sup> Level (4 m), and 4<sup>th</sup> Level (6 m).

Under the 57.5 ton load, displacement at 1 m depth measured about 15% of the top-level displacement, while at depths of 2 m, 4 m, and 6 m, displacements ranged from 5% to 2%. The tell-tale load-settlement curves indicate that bulging deformation predominantly releases during compression. Chen, Han, Oztoprak, and Yang (2009) demonstrated that the settlement ratio, defined as,  $R_b = (\delta_{top} - \delta_{tip}) / \delta_{tip}$ , supports in evaluating the contributions of both the pier shaft and the underlying soil to the pier's settlement. When  $R_b > 1$  settlement mainly arises from the pier's shortening, including bulging and compression. Conversely when  $R_b < 1$ , the majority of settlement is ascribed to the compression of the soil beneath the pier tip. For the instrumented Impact<sup>®</sup> RAP element, the settlement ratio is  $\gg 1$ , and the observed bulging behavior is found to be consistent with the literature. Furthermore, the pier length is sufficiently long for tip behavior to manifest, as indicated by a length to

diameter ratio (L/D) exceeding 3.5, as per Suleiman and White (2006). Pier stiffness decreases sharply for settlements under 20 mm and gradually approaches a minimum asymptote as settlement exceeds 20 mm.

**4.2. Load Cell Readings**

During the pier installation and loading test, continuous data was collected from the load cells installed at the four levels of the pier. There was no evidence of tilting of the load cells during any of the load cycles. The measured load from load cells along with load cycle times during the loading test is presented in Figure 18. The load distribution recorded by the load cells are shown in Figure 19.

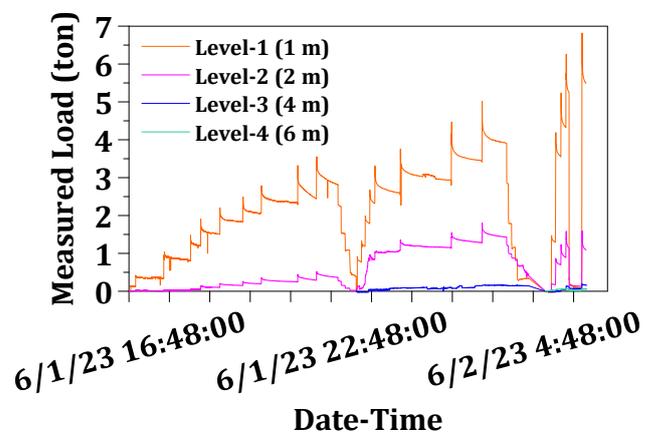


Figure 18. Measurements of Load vs. Load Cycle Time During the Loading Test.

The first (at 1 m) and second (at 2 m) level load cells recorded significant axial loads at the first cycle of the loading which reached up to a maximum load of 37.5 tons. For the second cycle, a small value was recorded at the third level (at 4 m) under 57.5 tons. The fourth level load cell (at 6 m) standard recording data in the third cycle at approximately 66 tons. At 37.5 tons, the vertical load increase at 1 m depth is about 10% of the applied vertical load. The results reveal that most of the load dissipates within the first meter of the pier shaft, with reduced dissipation in the next two meters.

The load is primarily supported by shaft friction instead of being transferred to the pier's tip, indicating higher dissipation occurs within the bulging depth. According to Wissmann (1999), the depth of bulging for an individual column is about 0.9 m, aligning with most of the load being mobilized at  $\sim 2D$  depth. Similarly, Chen et al. (2009) characterized the bulging depth as being equal to  $2D$ , noting that the increase in axial load along the RAP decreases rapidly with increasing depth. This phenomenon suggests that higher lateral resistance acts on the shaft as a result of the installation effect.

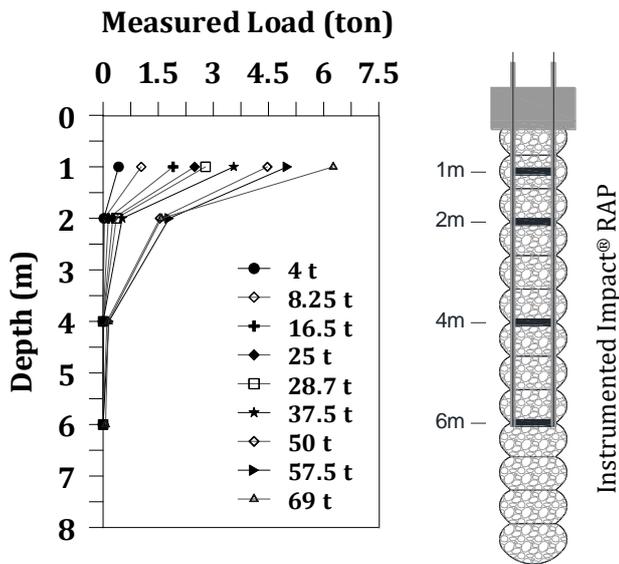


Figure 19. Measurements of Load Distribution Along the RAP During the Loading Test.

**5. Discussion**

Under working loads, vertical stresses are transmitted through aggregate piers in a manner similar to friction piles, yet with two key distinctions. The majority of the load is transferred through the pier to the adjacent soil matrix through shear stresses at the pier-soil interface, similar to the skin resistance observed in friction piles. However, aggregate piers also develop bearing resistance along the underside of undulations at the pier's perimeter, transferring potential shear surfaces into the matrix soil rather than along the pier-soil interface. This results in greater shear resistance than that which would develop along a regular surface. Additionally, as settlement occurs, deformations near the top of the pier manifest as bulging, displacing the matrix soil outward and increasing lateral pressures along the interface. This heightened lateral pressure enhances the pier's stiffness, resembling the stiffening effect seen in strain-hardening materials.

Research by White, Pham, and Hoevelkamp (2007), Wissmann, White, and Lawton (2007), and Gamboa (2022) examined the load-deformation behavior of RAP, with experimental results compared to existing literature to better understand aggregate pier performance across various soil profiles and column depths. A key distinction is that this study uses a displacement Impact® System yielding a 40 cm final diameter, while the earlier studies employed a replacement method with a 76 cm final diameter. The load-settlement results from White et al. (2007), Wissmann et al. (2007), and Gamboa (2022) align with this study, showing minimal settlement at the column base. This indicates that overall settlement at the

column top is largely due to lateral displacement or bulging of the pier head rather than vertical displacement of the overall column. Gamboa (2022) and others highlight that the density/stiffness of the surrounding soil significantly influence performance, more so than placing the pier tip on a bearing layer, provided the pier is long enough to transfer the load imposed by the concrete cap. Consistent with this study, a sufficiently long pier dissipates stress effectively, with little deformation or stress transfer along the pier length (Gamboa, 2022). A notable difference lies in the load dissipation percentages at similar depths. This study found that at a depth of about two pier diameters (~2D), 10% of the applied 37.5 ton load is dissipated. In contrast, at the 2D depth and similar load levels, White et al. (2007) and Gamboa (2022) reported approximately 40% dissipations for a 2.97 m floating pier and a 4.2 m end-bearing column. These columns are significantly shorter than the 8 m pier tested in this study. The discrepancy between the results can be attributed to differences in column length and the resulting end-bearing versus floating behavior of the pile and variations in the strength properties of the surrounding soil. The results suggest that for sufficiently long piers, mobilization occurs primarily through skin friction, with minimal stress transmitted to the column tip. In accordance with literature, the axial load is understood to decrease rapidly along the column with each load increase, particularly within the region extending from the column's bottom elevation to the 2D influence depth. As a summary, the stiffness ratio between the pier and surrounding soil—particularly in the upper 1 meter (~2D depth)—is the most critical factor in load distribution, as most axial load is mobilized in this zone.

The behavior of the RAP element is largely governed by the shear strength and stiffness of the surrounding soil. Most of the load is transmitted from the pier to the soil through shear stress along the pier soil interface, akin to the skin resistance that develops around the perimeter of friction piles. However, the piers also develop bearing resistance along the underside of the undulations at the pier's perimeter, which transfers the potential shear surface into the surrounding soil rather than along the pier soil interface. Consequently, the overall shear resistance is greater than what would develop along a regular surface.

A more rigid native crustal host soil helps create a stiffer pier, which appears to be more effective at dissipating stress and less prone to large bulging or lateral displacements.

The findings indicate that, when determining the capacity and anticipated settlement of aggregate piers, the stiffness of the surrounding soil is more critical

than reaching a bearing layer, provided the pier length is sufficient to dissipate the applied stresses effectively.

## 6. Conclusion

This study evaluated the design, installation, and full-scale load testing of a specialized load cell used in Impact® RAP (Rammed Aggregate Pier®) installation.

Key findings are as follows:

- The full-scale load test, conducted per ASTM D-1143, applied loads of 37.5, 57.5, and 66 tons in three cycles, recording top displacements of 47.28 mm, 91.8 mm, and approximately 123 mm, respectively. At 57.5 tons, displacement at 1 m depth was about 15% of the top-level displacement, while other levels (2 m, 4 m, and 6 m) showed 2–5% of the top displacement. The settlement ratio ( $R_b \gg 1$ ) indicated that settlement primarily resulted from pier shortening and bulging, consistent with literature.
- A well-instrumented RAP, utilizing load cell and tell-tale bar readings, demonstrated that most axial load (10% of 37.5 tons at 1 m depth) dissipated within the first meter, with minimal load transfer to the pier tip, suggesting dominant shaft friction and minimal tip contribution, consistent with a length to diameter ratio ( $L/D$ ) greater than 3.5.
- The study highlights that load transfer in aggregate piers occurs mainly through shear stresses at the pier-soil interface, enhanced by bulging-induced lateral pressures. Compared to prior studies, this 8 m pier showed lower load dissipation (10% at  $\sim 2D$  depth) than shorter piers (40% at  $\sim 2D$ ). The results emphasize the critical role of the surrounding soil's stiffness particularly in the upper 1 m ( $\sim 2D$  depth), in load distribution and pier performance. For sufficiently long piers, load mobilization relies primarily on skin friction, with minimal stress transfer to the pier tip, underscoring the importance of soil stiffness over reaching a bearing layer in design considerations.
- Based on the investigated load transfer mechanisms along the pier shaft, it can be stated that in the design of RAP elements depending on the column length as the influence of shaft friction, with negligible contribution from the pier tip.

The mechanical properties of the surrounding soil significantly influence the behavior of RAP elements. Therefore, more site tests should be conducted on both coarse and fine-grained materials with varying

consistencies to gain a clearer understanding of the load transfer mechanism at the piers.

The instrumented loading test conducted in this study focused on the behavior of a single element, and future studies should be expanded to include understanding the behavior of a group of columns.

Future work will entail a parametric analysis of the collected data, substantiated by finite element simulations and experimental test outcomes.

## Acknowledgements

This research has been funded by Sentez Insaat, Istanbul, Türkiye, whose contribution and support for the publication of the project data is greatly appreciated by the authors.

## Authorship Contribution Statement

Ece KURT BAL: Developed Methodology, Designed, Planned and Conducted Site Study, Managed Resources, and Wrote the original draft.

Mustafa Kubilay KELEŞOĞLU: Conceptualized the Study, Site Study, Validated Results, Reviewed and Edited Manuscript, and Provided Supervision.

Kemal Önder ÇETİN: Conceptualized the Study, Site Study, Validated Results, Reviewed and Edited Manuscript, and Provided Supervision.

## Declaration of Competing Interest

The authors have no conflicts of interest to declare regarding the content of this article.

## References

- ASTM D1143 – 81 (Reapproved 1994). Standard test methods for deep foundations under static axial compressive load. Annual Book of ASTM Standards.
- Barksdale, R.D., & Bachus, R.C. (1983). Design and construction of stone columns. Federal Highway Administration, Final Report SCEGIT, 83-104.
- Chen, J.F., Han, J., Oztoprak, S., & Yang, X.M. (2009). Behavior of single rammed aggregate piers considering installation effects. *Comput. Geotech.*, 36(7), 1191-1199.
- Gamboa, W. (2022). Aggregate piers: stress transfer mechanism and construction effect. Master of Science in Civil Engineering, Montana State University, Montana.
- Greenwood, D.A. (1970). Mechanical improvement of soils below ground surfaces. Proceedings of the Ground Engineering Conference, Institution of Civil Engineers, London, 11-22.

- Handy, R.L., & White, D.J. (2006). Stress zones near displacement piers. II: radial cracking and wedging. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 10.1061/(ASCE) 1090-0241 (2006) 132: 1(63), 63-71.
- Hughes, J.M.O. & Withers, N.J. (1974). Reinforcing of soft cohesive soils with stone columns. *Ground Engineering*, 7(3), 42-49.
- John, B., Tim., C., Hilary, S., & Michael, B. (2012). ICE manual of geotechnical engineering volume II. geotechnical design construction and verification. Chapter 84: Ground Improvement.
- Lawton, E.C., & Fox, N.S. (1994). Settlement of structures supported on marginal or inadequate soils stiffened with short aggregate piers. *Proc., Vertical and Horizontal Deformations of Foundations and Embankments, Geotechnical Special Publication No. 40, ASCE, College Station, Tex., Vol. 2, 962-974.*
- Lawton, E.C., Fox, N.S., & Handy, R.L. (1994). Control of settlement and uplift of structures using short aggregate piers. *Proceedings of ASCE National Convention, Atlanta, Georgia.*
- Madhav, M.R., & Vitkar, P.P. (1978). Strip footing on weak clay stabilized with a granular trench or pile. *Canadian Geotechnical Journal*, 15(4), 605-609.
- Suleiman, M.T., & White, D.J., (2006). Load transfer in rammed aggregate piers. *Int. J. Geomech.*, 10.1061/(ASCE)1532-3641(2006)6:6(389), 389-398.
- Vesic, A.S. (1972). Expansion of cavities in infinite soil mass, *Journal of Soil Mechanics and Foundation Engineering Division, ASCE, No. SM3, Vol. 98, pp. 265-290.* The design of vibro-replacement. *Ground Engineering*, 31-37.
- White, K.J., Pham, H.T.V., & Hoevelkamp, K.K. (2007). Support mechanisms of rammed aggregate piers. I: Experimental results. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 10.1061/(ASCE)1090-0241(2007)133: 12(1503), 1503-1511.
- White, D.J., Wissmann, K.J., Barnes, A.G., & Gaul, A.J. (2002). Embankment support: a comparison of stone column and rammed aggregate pier soil reinforcement. *Transportation Research Board, 81<sup>st</sup> Annual Meeting, Washington, DC.*
- Wissmann, K.J. (1999). Bearing capacity of Geopier-supported foundation systems. *Technical Bulletin No. 2, Geopier Foundation Company, Inc., Blacksburg, VA, USA.*

- Wissmann, K.J., Ballegooy, S. van, Metcalfe, B.C. Dismuke, J.N., & Anderson, C.K. (2015). Rammed aggregate pier ground improvement as a liquefaction mitigation method in sandy and silty soils. 6<sup>th</sup> ICEGE, Christchurch, New Zealand.
- Wissmann, K.J., & Fox, N.S. (2000). Design and analysis of short aggregate piers used to reinforce soil for foundation support. *Proceedings, Darmstadt Technical University Colloquium. Germany.*
- Wissmann, K.J., Moser, K., & Pando, M. (2001). Reducing settlement risks in residual piedmont soil using rammed aggregate pier elements. *Proc., Foundations and Ground Improvement, Geotechnical Special Publication No.113, ASCE, Blacksburg, Va, 943-957.*
- Wissmann, K.J., White, D.J., & Lawton, E. (2007). Load test comparisons for rammed aggregate piers and pier groups. *Univ. of Utah, Salt Lake City, Utah.*
- Wong, H.Y. (1975). Vibroflotation- its effect on weak cohesive soils. *Civil Engineering (London), No.82:44-67.*
- McKelvey, D., Sivakumar, V., Bell, A., & Graham, J. (2004). Modelling vibrated stone columns in soft clay. *Proc ICE Geotech Eng 157(3):137-149.*
- Mitchell, J.K. (1981). Soil improvement-state-of-the-art report. *Proceedings of 10<sup>th</sup> International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Stockholm, Sweden, June 15-19.*
- Naval Facilities Design Command (NAVFAC). (1983). *Design Manual DM 7.2.*