



**ESKİŞEHİR OSMANCAZI ÜNİVERSİTESİ MÜHENDİSLİK VE MİMARLIK FAKÜLTESİ DERGİSİ**  
**JOURNAL OF ENGINEERING AND ARCHITECTURE FACULTY OF ESKİŞEHİR OSMANCAZI UNIVERSITY**

Yıl / Year : 2023

Cilt / Volume : 31

Sayı/ Issue : 3

e-ISSN : 2630 - 5712







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 : 2023**

**CİLT/VOLUME : 31**

**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. Muammer KAYA  
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. Selahattin KADİR <a href="mailto:skadir@ogu.edu.tr">skadir@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. Zuhal 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. İpek ÇETİNBAŞ <a href="mailto:ipekcetinbas@ogu.edu.tr">ipekcetinbas@ogu.edu.tr</a>
Endüstri Müh. / Industrial Engineering	Araş. Gör. Aslıhan KARAŞ <a href="mailto:aslihan.karas@ogu.edu.tr">aslihan.karas@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	Dr. Öğr. Üyesi H. Serkan GÖKCEN <a href="mailto:sgokcen@ogu.edu.tr">sgokcen@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. Başak GÜÇYETER <a href="mailto:basakgucyeter@ogu.edu.tr">basakgucyeter@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>





**YAYIN KURULU / PUBLISHING EDITORS**

<b>Adı ve Soyadı / Name</b>	<b>Bölüm / Department</b>
Prof. Dr. Haldun KURAMA	Editör, ESOGÜ Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Maden Mühendisliği Bölümü ESKİŞEHİR
Prof. Dr. Melih İPHAR	Editör Yrd., ESOGÜ Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Maden Mühendisliği Bölümü ESKİŞEHİR
Dr. Öğr. Üyesi Esra Nergis YOLAÇAN	ESOGÜ Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Bilgisayar Mühendisliği Bölümü ESKİŞEHİR
Dr. Öğr. Üyesi Gökhan DINDİŞ	ESOGÜ Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü ESKİŞEHİR
Prof. Dr. Gültekin ÖZDEMİR	SDÜ Mühendislik Fakültesi Endüstri Mühendisliği Bölümü ISPARTA
Doç. Dr. Cenk KARAKURT	Bilecik Şeyh Edebali Üniv. Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümü BİLECİK
Prof. Dr. Selahattin KADİR	ESOGÜ Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü ESKİŞEHİR
Prof. Dr. Nurgül ÖZBAY	Bilecik Şeyh Edebali Üniv. Mühendislik Fakültesi Kimya Mühendisliği Bölümü BİLECİK
Prof. Dr. Sabiha KOCA	ESOGÜ Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Maden Mühendisliği Bölümü ESKİŞEHİR
Prof. Dr. Ramazan KÖSE	Dumlupınar Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makine Mühendisliği Bölümü KÜTAHYA
Dr. Öğr. Üyesi S. Mine TOKER	ESOGÜ Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Metalurji ve Malzeme Müh. Bölümü ESKİŞEHİR



**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, University of Bridgeport, Bridgeport, Connecticut, ABD, [bbarkana@bridgeport.edu](mailto:bbarkana@bridgeport.edu)  
Cafer Çelik, Atatürk Üniversitesi, Erzurum, Türkiye, [ccelik@atauni.edu.tr](mailto:ccelik@atauni.edu.tr)  
Cahit Helvacı, Dokuz Eylül Üniversitesi, İzmir, Türkiye, [cahit.helvaci@deu.edu.tr](mailto:cahit.helvaci@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)  
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)  
Fatemeh Azmandian, Dell EMC Hopkinton, Massachusetts, ABD, [fatemeh\\_azmandian@yahoo.com](mailto:fatemeh_azmandian@yahoo.com)  
Fatih Altun, Erciyes Üniversitesi, Kayseri, Türkiye, [faltun@erciyes.edu.tr](mailto:faltun@erciyes.edu.tr)  
Fatih Hocaoğlu, Afyon Kocatepe Üniversitesi, Afyon, Türkiye, [hocaoglu@aku.edu.tr](mailto:hocaoglu@aku.edu.tr)  
Gürsoy Arslan, Eskişehir Teknik Üniversitesi, Eskişehir, Türkiye, [garslan@anadolu.edu.tr](mailto:garslan@anadolu.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)  
Ömer Nezir 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

- CLT Panel İle İnşa Edilen Çok Katlı Konutların Yapım ve Çevresel Koşullar Bağlamında Analizi** 760 – 774  
Analysis of Multi-Storey Residential Buildings With CLT Panel in Context of Construction and Environmental Conditions  
Duygu YÜREKLİ, Özgül YILMAZ KARAMAN
- Estimating the Noise-Induced Hearing Losses Under Fuzzy Environment** 775 – 786  
Bulanık Ortamda Gürültüye Bağlı İşitme Kayıplarının Tahmin Edilmesi  
Mert MUTLU
- Alev Sprey Pirolyzi İle İçi Boş AL<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Küreciklerin Sentezlenmesinde Başlangıç Kimyasalı Olarak Kullanılan Emülsiyonların Morfoloji Üzerine Etkileri** 787 – 794  
Effects of Emulsion Precursors on The Morphology of Hollow AL<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Particles Synthesized by Flame Spray Pyrolysis  
Ertuğrul İŞLEK, Hüseyin Boğaç POYRAZ, İsmail Özgür ÖZER
- Kontrol Parametrelerinin Sürekli Frekans Salınım Yöntemleri İle Ayarlanmasının Nötralizasyon Prosesi Örneğinde Geri Besleme Kontrol Performansına Etkisinin İncelenmesi** 795 – 800  
Investigation of the Effect of Adjusting Control Parameters With Continuous Frequency Oscillation Method on Feedback Control Performance in Neutralization Process  
Zeynep YILMAZER HİTİT
- Design and Implementation of An Autonomous Vehicle for Waste Material Collection and Fire Detection** 801 – 807  
Çöp Materyali Toplama ve Yangın Tespiti İçin Bir Otonom Araç Tasarımı ve Gerçekleştirilmesi  
Orkun AYDIN, Ersin MOLLA, Ferhat KARADAĞ, Burak GÜZELTEPE, Hakkı Ulaş ÜNAL, Ömer Nezih GEREK
- NiCr İçerikli Termal Sprey Kaplamaların Katı Partikül Erozyon Davranışlarının Belirlenmesi** 808 – 815  
Determination of Solid Particle Erosion Behaviors of NiCr Containing Thermal Spray Coatings  
Sefa Erdem YILMAZ, Gülfem BİNAL, Yasin ÖZGÜRLÜK, Derviş ÖZKAN, Abdullah Cahit KARAOĞLANLI
- Bazalt Kesim Atıklarının Yer Karosu Mat Sırlarda Kullanım Potansiyelinin Araştırılması** 816 – 825  
An Investigation of Utilization Potential of Basalt Cutting Waste in Floor Tile Matte Glazes  
Semra KURAMA, Ege Anıl GÜRKAN, Zahide BAYER OZTURK, Yusuf KARACA, Elif UBAY
- A New Approach To Tensile Testing of GFRP Bars** 826 – 833  
GFRP Donatıların Çekme Testi İçin Yeni Bir Yaklaşım  
Kerem AYBAR, Meltem ERYILMAZ YILDIRIM, Mehmet CANBAZ
- Fırçasız DA Motorları İle Sürülen ve Hem Dinamik Hem De Kinematik Model Belirsizlikleri İçeren Robot Kollarının Uyarlamalı Denetimi** 834 – 847  
Adaptive Control of Robot Manipulators Driven By Brushless DC Motors With Parametric Uncertainties in Both Kinematic and Dynamic Model  
Şükrü ÜNVER, Erman SELİM, Enver TATLICIOĞLU, Erkan ZERGEROĞLU, Musa ALCI



**Araştırma Makaleleri / Research Articles**

**Sayfa**

**Bir Metal Sanayi İşletmesinde Ergonomik Risk Değerlendirme Yöntemleriyle Bütünleşik İş Yüklerinin Analizi**

848 – 861

Analysis of Integrated Workloads By Using Ergonomic Risk Assessment Methods in A Metal Industrial Enterprise  
Emin KAHYA, Kadriye ALPASLAN, Gizem ŞENYÜZ

**Kuplaj Barası Üzerinden Paralel Bağlanan Yüksek Gerilim Yeraltı Kablolarında İşletme Parametrelerinin Akım Dağılımına Etkisinin İncelenmesi**

862 – 872

Effect of Operating Parameters on Core Currents in High Voltage Underground Cables Connected in Parallel Over Coupling Bus  
Mehmet Aytaç ÇINAR, Yunus Berat DEMİROL, Bora ALBOYACI

**Polilaktik Asit/ Poli (Stiren-ko-Metil Metakrilat) /Haloysit Nanokompozitlerinin Özellikleri Üzerine Haloysit ve Polilaktik Asit Miktarının Etkisi**

873 – 881

The Effect of The Amount of HNT And PLA on The Properties of Polylactic Acid/ Poly (Styrene-co-Methyl Methacrylate)/Haloysite Nanocomposites  
Dilan İSKENDER, Ayla ALTINTEN

**Bozulma Etkili ve Tek Bakım Ekipli Bakım Çizelgeleme Problemi İçin Bir Matematiksel Model**

882 – 892

A Mathematical Model for Maintenance Scheduling Problem With Deterioration and Single Maintenance Crew  
Tuğba SARAÇ, Feriştah ÖZÇELİK

**Evaluation of Asphalt Pavement Performance for Different Diatomite Content**

893 – 904

Farklı Diatomit İçeriği İçin Asfalt Kaplama Performansının Değerlendirilmesi  
Atakan AKSOY, Mustafa Taha ASLAN, Erol İSKENDER, Dundar AYYILDIZ, C. Ensar SENGUL

**Tarımsal Sulamada Rüzgar ve Güneş Enerji Sistemlerinin Kullanım Olanaklarının Araştırılması: Eskişehir Örneği**

905 – 916

Investigation of Usage Opportunities of Wind and Solar Energy Systems in Agricultural Irrigation: The Case of Eskişehir  
Mahmut POLAT, Tolga ARABACI, Adnan CENGİZ

**Odaklama Derinliğinin Artırılmasında Derin Özelliklerin Odaklama Değerlerinin Çıkarılmasındaki Etkilerinin İncelenmesi**

917 – 930

Investigation of Effects of Deep Features on Focus Values Extraction in Extended Depth of Focus  
Sibel DANIŞMAZ, Sümeyye Nur EMİR, Hülya DOĞAN, Ramazan Özgür DOĞAN



## CLT PANEL İLE İNŞA EDİLEN ÇOK KATLI KONUTLARIN YAPIM VE ÇEVRESEL KOŞULLAR BAĞLAMINDA ANALİZİ

Duygu YÜREKLİ<sup>1\*</sup>, Özgül YILMAZ KARAMAN<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Dokuz Eylül Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi Mimarlık Bölümü ORCID No: [0000-0002-3630-6541](https://orcid.org/0000-0002-3630-6541)

<sup>2</sup> Dokuz Eylül Üniversitesi, Mimarlık Fakültesi Mimarlık Bölümü ORCID No: [0000-0002-9083-0766](https://orcid.org/0000-0002-9083-0766)

Anahtar Kelimeler	Öz
Çapraz lamine ahşap Ahşap Çok Katlı Konut	<i>Dünyada endüstrileşmenin başlamasıyla beton ve çelik gibi malzemelerin üretilmesi, artan şehir nüfusundan dolayı dikey/ çok katlı yapılaşmaya gereksinim duyulması, ahşabın yangın ve strüktürel dayanımının beklenen performansı göstermemesi sebebiyle konut strüktürlerinde ahşabın kullanımı bir dönem durma noktasına gelmiştir. Ancak 20.yy başlarında yapı sektöründe sürdürülebilirliğin ön plana çıkması ve endüstriyel ahşapların üretilmesi, ahşabın tekrar yapı strüktürlerinde kullanılmaya başlamasını sağlamıştır. Bu çalışmada Dünyada çapraz lamine ahşap panel (CLT) kullanılarak yapımı tamamlanmış ve devam eden 46 adet 8 kat ve üstü konut yapıları el alınmıştır. Bu yapılara ait nicel ve nitel veriler çeşitli kaynaklardan toplanarak tablolar oluşturulmuş, tablolardaki verilerin grafiklerle analizleri yapılmıştır. Dünyada inşa edilmiş çok katlı ahşap konutların mimari çeşitliliği ve mekânsal olanakları, yapım koşulları, yapısal sistem çözümleri, çevresel koşulları ve karbon tutma özellikleri incelenmiştir. Çalışmanın amacı Dünyada çok katlı konut üretiminde kullanılan bu yeni yapı malzemesinin uygulamalarının detaylı olarak incelenmesi, yapısal çözümünün ve yapım koşullarının daha iyi anlaşılacak hangi koşullarda uygulanabilir olduğunun saptanmasıdır.</i>

### ANALYSIS OF MULTI-STOREY RESIDENTIAL BUILDINGS WITH CLT PANEL IN CONTEXT OF CONSTRUCTION AND ENVIRONMENTAL CONDITIONS

Keywords	Abstract
Cross laminated timber Timber Multistorey residential buildings	<i>With the beginning of industrialization in the world, the use of wood in residential structures has come to a standstill due to the production of materials such as concrete and steel, the need for vertical / multi-storey construction due to the increasing city population, the fire and structural resistance of wood not showing the expected performance. At the beginning of the 20th century, the prominence of sustainability in the building sector and the production of industrial wood enabled the use of wood in building structures again. In this research, 46 residential buildings of 8 floors and above, the construction of which has been completed and ongoing, using cross laminated timber panel (CLT) in the world has been taken into consideration. Quantitative and qualitative data of these structures were collected from various sources and tables were created, and the data in the tables were analyzed with graphics. Architectural diversity and spatial possibilities, construction conditions, structural system solutions, environmental conditions and carbon sequestration properties of multi-storey wooden houses built in the world were examined. The aim of the study is to examine in detail the applications of this new building material used in the production of multi-storey houses in the world, to better understand its structural solution and construction conditions and to determine under which conditions it can be applied.</i>

Araştırma Makalesi

Başvuru Tarihi

Kabul Tarihi

: 17.04.2023

: 21.07.2023

Research Article

Submission Date

Accepted Date

: 17.04.2023

: 21.07.2023

\* Sorumlu yazar: [mimduygu@hotmail.com.tr](mailto:mimduygu@hotmail.com.tr)

<https://doi.org/10.31796/ogummf.1284449>

#### 1. Giriş

Hızlı konut üretimi ihtiyacı, pek çok ülkede olduğu gibi ülkemizde de güncelliğini koruyan bir konudur. Bir taraftan üretim hızının artması istenirken bir taraftan

da sonuç ürünün belirlenen standartlara ve fiziksel ve psikolojik kullanıcı konfor koşullarına uygun olması ve dahası tüm bu gereksinimlerin en düşük maliyetle ve en az çevre hasarı ile gerçekleşmesi beklenmektedir.



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/>).

Halen hızla büyümekte olan kent merkezlerinde ihtiyaç duyulan konut açığının giderilmesi, eskiyen/kullanım ömrünü tamamlayan yapıların yenileri ile değiştirilmesi, deprem, tsunami, kasırga vb. doğa olayları sonucu yıkılan kentsel alanların yeniden inşası gibi pek çok nedenle konvansiyonel malzeme ve yapım tekniklerinin çevreye etkileri bakımından daha sürdürülebilir alternatifler ile değiştirilmesi de sektörün gündemindedir. Çünkü bilindiği gibi, inşaat sektörü sera gazı emisyonlarının yaklaşık %40'undan sorumlu olarak küresel karbon ayak izine en büyük katkıyı yapan sektördür (Lehne ve Preston, 2023). Sektör, küresel kaynak tüketiminin %40'undan, enerji kullanımının %40'undan ve küresel atığın %50'sinden sorumludur (UN, 2009).

Dünyada sürdürülebilirliğin ön plana çıkmasıyla yapı sektöründe ahşabın kullanımı 1995'ten sonra (Kuzman ve Sandberg, 2016) ve özellikle son on yılda (Krötsch ve Müller, 2018; Lehmann ve Hamilton, 2011), yeniden canlanma eğilimindedir. Bunun başlıca nedenleri; endüstriyel ahşabın yapısal performans açısından çelik ve betonla karşılaştırılabilir nitelikte üretim olanaklarının artması ve kıyasla daha sürdürülebilir bir malzeme olması olarak sıralanabilir (Çaştur, 2021). Doğal bir karbon tutucu olan ahşap elemanlar bina ömrü boyunca da CO2 depolamaya devam ettiğinden sürdürülebilirlik açısından önemli bir alternatif malzemedir (Ramage ve diğ., 2017).

2000'li yılların başlarında Avrupa'da konut yapımında kullanılmaya başlayan CLT (Cross Laminated Timber-Çapraz Lamine Ahşap) çok katlı konutların yapımına da olanak sağlamış ve devamında tüm dünyada yayılmıştır (Güzel ve Yesügey, 2017). Yukarıda da belirtildiği gibi; günümüz yapı endüstrisinde yoğun olarak üretilen konutlarda; beklenen yapısal ve fiziksel performansı karşılaması, kullanıcı memnuniyetinin yanında üretim hızının artırılması da önemli parametrelerdendir. Bu bağlamda, "CLT" üretim sürecinin prefabrikasyona dayalı olması hem üretim hızını hem de kalitesini artırırken, sürdürülebilir bir malzeme olarak giderek yaygınlaşmasını da sağlamaktadır.

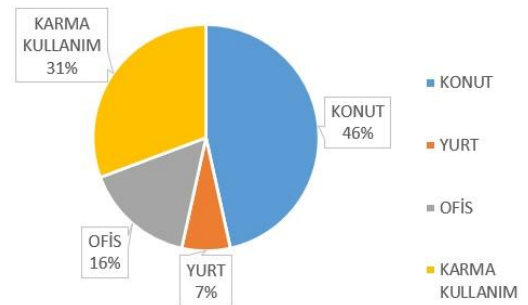
## 2. Amaç, Kapsam ve Yöntem

Ülkemizde yaşanan 19 Ağustos 1999 Marmara ve son olarak da 6 Şubat 2023 Kahramanmaraş gibi büyük depremlerde özellikle de konvansiyonel betonarme yapılarda görülen ağır hasarlar ve devamında yaşanan atık yönetimi sorunları, konut üretiminde hızlı olduğu kadar güvenli ve tüm yaşam döngüsü süreci açısından sürdürülebilir nitelikte malzeme kullanımı konusunun önemini bir kez daha ortaya koymaktadır.

Çalışma kapsamında, özellikle de konut yapılarının hızlı ve güvenli biçimde üretilmesi için CLT panel bir alternatif malzeme olarak ele alınmaktadır. Bu doğrultuda, taşıyıcı sistem de dahil olmak üzere yapı

üretiminde kullanımı yaygınlaşmakta olan CLT malzemenin, kullanım olanaklarının sayısının giderek arttığı tespit edilen çok katlı konut uygulamaları üzerinden değerlendirilmesi yapılmıştır. Böylelikle mevcut konut yapılarının yapım ve tasarım koşulları (hızlı ve dikey yapılaşmaya uygunluk, esnek tasarıma elverişlilik, farklı strüktürel çözümler/malzemeler ile bir arada uygulanabilirlik vb.) ile çevresel koşullarının (farklı coğrafi bölgelerde uygulanabilirliğinin) analizi üzerinden CLT kullanımı konusunda bir soru açmak ve aynı zamanda da özet bir kaynak oluşturmak amaçlanmıştır.

Bu bakımdan, özellikle de konut yapılarının hızlı ve güvenli biçimde üretilmesi için CLT panel bir alternatif malzeme olarak değerlendirilebilir.

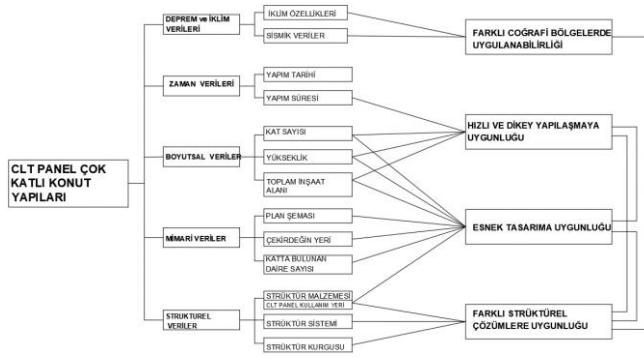


Şekil 1. Fonksiyonuna Göre Dünyada İnşa Edilmiş Olan Ahşap Yüksek Yapılar

Şubat 2022 itibari ile 8 kat ve üstü ahşap yapıların sayısının 101 olduğu görülmektedir (Svatoš-Ražnjevic, Orozco ve Menges, 2022). Bu yapılardan 46 tanesinin konut, 7 tanesinin yurt, 16'sının ofis, 30'unun karma kullanım ve 2'sinin de endüstriyel yapı olarak planlanmış olduğu tespit edilmiştir (Şekil 1) (Svatoš-Ražnjevic, Orozco ve Menges, 2022).

Çalışma kapsamında CLT'nin mevcut kullanım koşullarını değerlendirmek üzere, dünyanın farklı bölgelerinde inşa edilmiş, çok katlı konut yapıları, literatürden derlenen bilgiler ışığında analiz edilmiştir. Bu bağlamda inceleme başlıkları; çevre verilerinin değerlendirilmesi açısından, deprem ve iklim verileri, tasarım ve yapım sürecine yönelik olarak ise; zaman verileri, boyutsal veriler, mimari veriler, strüktürel veriler olarak belirlenmiştir (Şekil 2).

Yapılarla ilgili bilgiler doğrudan kaynaklarda yazılı içerikler yanı sıra yapılara ait görsel verilerden (planlar, kesitler, cepheler, diyagramlar ve çizimler) incelenerek elde edilmiş ve farklı başlıklar altında toplanmıştır. Ancak öncesinde, Çapraz Lamine Ahşap malzeme özellikleri bakımından kısaca ele alınmıştır.



Şekil 2. Çok Katlı CLT Konut Yapılarının Analiz Başlıkları ve Bunların Araştırma Hedefleriyle İlişkisi.

### 3. Çapraz Lamine Ahşap Malzeme Özellikleri

Çapraz Lamine Ahşap (CLT), en az üç ahşap tabakadan oluşturulmuş ön üretimli bir masif ahşap paneldir. CLT panel lifleri birbirine dik olacak şekilde preslenmiş, yapışıl yapıştırıcılar ile yapıştırılmış veya daha az yaygın olarak dübel veya çivilerle mekanik olarak bağlanmış tek sayıdaki tabakadan (3, 5, 7 veya daha fazla) oluşur (Şekil 3).

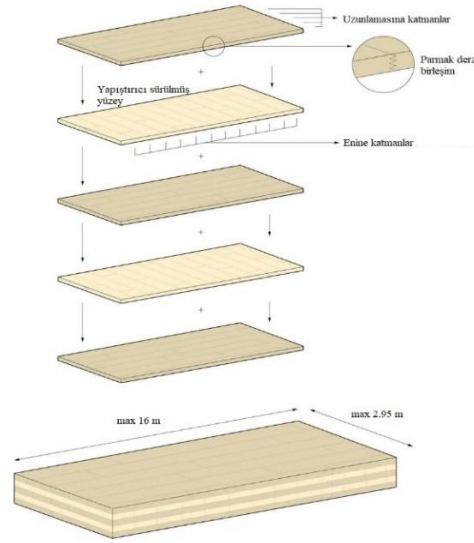
CLT tabakaları, birbirlerine dik tabakalardan oluştuğu için birleşik tabakalar, tüm panelde takviye edici bir işlev görür ve bu da boyutsal düzenlilik sağlar (Şekil 4). Bu özellik aynı zamanda yüklerin panellerde betona benzer şekilde her iki yönde yayılmasına ve taşınmasına izin vermektedir (Turner, 2014; Van de Kuilen ve diğ., 2011).

CLT paneller üzerinde yapılan birçok deneysel test, (Patterson, 2013), bu özelliklerin, diğer ahşap panellerden farklı olarak, CLT panellerin taşıyıcı paneller olarak kullanılabilmesini göstermiştir. Çapraz laminasyon sistemi aynı zamanda tabakaların genişlemesini ve daralmasını kısıtladığından, boyutsal stabilitenin de artmasını sağlamaktadır (Evans, 2021). Fountain'a (2012) göre, CLT'nin direnç-ağırlık ilişkisi, özellikle orta ve yüksek katlı yapılarda çelik ve betonarme yapım sistemlerine bir alternatif olarak ahşabın strüktür malzemesi olarak kullanım olanağını artırmıştır.

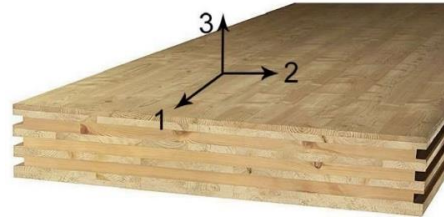
CLT malzeme binalarda yapı elmanı olarak 3 farklı şekilde kullanılmaktadır (Şekil 5). Bunlar;

1. Duvar paneli
2. Döşeme ve çatı paneli
3. Merdiven

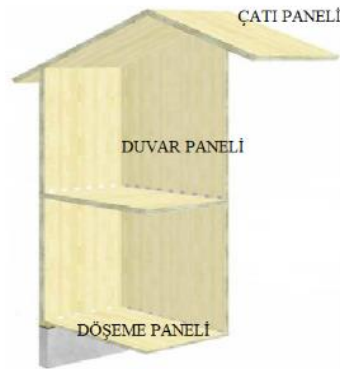
Bu panellerin kalınlıkları ve boyutları yapı elmanın kullanım amacına ve taşıyıcılığına, geçilen açıklığa ve yapım sistemine göre farklılıklar göstermektedir. Dünyada CLT üretiminde standart boyutlar olmakla birlikte ülkelerin nakliye ve yapısal dayanıma göre belirlemiş olduğu birtakım kısıtlamalar da bulunmaktadır.



Şekil 3. CLT Panel Katmanları (Storaenso, 2022)



Şekil 4. CLT Panel Boyutları (Turner, 2014)



Şekil 5. CLT Çatı-Duvar-Döşeme Paneli (Structurlam, 2022)

### 4. Analiz Başlıkları

Çevresel koşullar ile tasarım ve yapım koşullarının değerlendirilebilmesi adına, analiz çalışması aşağıdaki 5 ana başlık altında yapılmıştır.

1. Yapıların üretildikleri bölgedeki sismik veriler ve iklim koşulları
2. Zaman verileri (Üretim Hızı)
3. Boyutsal veriler (Yapı boyutları ve kapasitesi)
4. Mimari veriler (Tasarım olanak ve kısıtları)

#### 5. Strüktürel veriler (CLT malzemenin strüktür elemanı olarak kullanım özellikleri)

Belirlenen başlıklar altında yapılan analizde hedef CLT malzemenin farklı coğrafi bölgelerde uygulanabilirliğini, hızlı ve dikey yapılaşmaya uygunluğunu, esnek tasarıma elverişli olup olmadığını ve farklı strüktürel çözümlerde uygulanabilirliğini ortaya koymaktır.

#### 4.1. Deprem ve İklim Verileri

Binanın bulunduğu şehrin iklim bölgesi özellikleri ve yer ivmesi (PGA) değerleri tasarımın başlıca belirleyicilerinden olması bakımından değerlendirilmiştir.

Yapının konumlandığı yerin sismik tehlikesi, GEM temelinden elde edilen ve 475 yıllık geri dönüş periyoduna sahip Tepe Yer İvmesi (PGA) cinsinden tanımlanmaktadır (Pagani ve diğ., 2018). Sismik tehlike sınıflandırması ise düşük ve çok yüksek aralığında olmak üzere aşağıdaki şekilde derecelendirilmektedir;

- Düşük ( $PGA \leq 0,8 \text{ m/s}^2$ ),
- Orta ( $0,8 \text{ m/s}^2 \leq PGA \leq 2,4 \text{ m/s}^2$ ),
- Yüksek ( $2,4 \text{ m/s}^2 \leq PGA \leq 4,0 \text{ m/s}^2$ )
- Çok yüksek ( $PGA \geq 4,0 \text{ m/s}^2$ ) (Erlat, 2014).

Yapıların inşa edildikleri bölgelere ait iklimsel verilerin değerlendirilmesi için ise dünyada en yaygın kullanılan Köppen-Geiger iklim sınıflandırması kullanılmıştır. Köppen-Geiger iklim sınıflandırması, aylık ve yıllık sıcaklıklar ile yağış miktarı, yağışın yıl içindeki dağılışı ve yağış ile sıcaklığın doğal bitki örtüsü ile olan ilişkilerine dayanmaktadır (Erlat, 2014; Türkeş, 2010). İklim tiplerinin harflerle gösterildiği (Krötsch ve Müller, 2018) bu yöntem alansal tutarlılığı fazla ve doğruluğu denetlenmiş olan bir yöntem olarak tanımlanmaktadır (Türkeş, 2010).

Buna göre; ana iklim tipleri harflerle (A, B, C, D, E) belirtilir ve bu temel iklim tipleri belirlenirken 4 tanesinde sıcaklık, 1 tanesinde ise yağış koşulları dikkate alınır (Tablo 1). Alt tiplerdeki ikinci harfler (s, w, f) yağış özelliğini ve üçüncü harfler (h, k, a, b, c, d) ise sıcaklık özelliklerini temsil eder (Erlat, 2014). Yağış koşullarının dikkate alındığı iklim tipine ait alt tiplerin belirlenmesinde ise, kuraklık eşik değerinden yararlanılır (Erlat, 2014).

#### 4.2. Zaman Verileri

Zamansal veriler, yapım yılı ve yapım süresini içermektedir. Yapım süresi (ay), çok katlı yapıların strüktürlerinin tamamlanma süresini içermektedir. Bu veriler iklimsel veya başka nedenlerle inşaatın devamlılığının aksadığı/yapımın durakladığı süreler çıkarılarak verilmiştir. Yapım yılı verileri çok katlı konutların hangi tarihte inşa edilmeye başlandığı ve en fazla hangi yıllarda inşa edildiği bilgilerine ulaşmamızı

sağlamaktadır. Yapıların toplam inşaat alanlarının ve yapım sürelerinin ortalaması alınarak 1 ayda inşa edilen yapı alanı miktarı hesaplanmıştır. Bu değer; üretim hızının ortaya konulabilmesini sağlamaktadır.

Tablo 1. Köppen-Geiger Ana ve Ara İklim Tipleri (Öztürk, Çetinkaya ve Aydın, 2017).

HARFLER	TANIM	ÖZELLİK
A	Nemli Tropikal	Kış mevsimi yok tüm yıl boyunca ortalama sıcaklık 18 °C üstünde
B	Kurak	Buharlaşma yağıştan daha fazla
	W Çöl	
	S Step (yarı kurak)	
	h Sıcak	
C	k Soğuk	En soğuk ay sıcaklığı ortalama 18 °C ve 0 °C arasında en sıcak ay 10 °C üstünde
	Kışları ılıman nemli	
	s Yazları kurak	
	w Kışları kurak	
	f Her mevsim yağışlı	
	a Sıcak yaz	
D	b Ilık yaz	En soğuk ay sıcaklığı 0 °C ve altında en sıcak ay 10 °C üstünde
	c Serin yaz	
	Karasal İklim	
	s Yazları kurak	
	w Kışları kurak	
	f Her mevsim yağışlı	
E	a Sıcak yaz	Yaz mevsimi yoktur en sıcak ay ortalaması 10 °C altındadır.
	b Ilık yaz	
	c Serin yaz	
	d Çok soğuk kış	
E	Polar	

\*A (tropikal), B (kuru), C (ılıman), D (kitasal), E (kutupsal), f (Yağmur Ormanı), m (Muson), w (Savana, Kuru kış), s (Savana, Kuru yaz), W (Çöl) S (Bozkır), w (Kuru kış), f (Kuru mevsim yok), s (Kuru yaz), h (Sıcak), k (Soğuk), a (Sıcak yaz), b (Sıcak yaz), c (Soğuk yaz), d (Çok soğuk kış)

#### 4.3. Boyutsal Veriler

CLT Panel çok katlı konut yapıları için oluşturulan boyutsal veriler kat sayısı, toplam yükseklik ve toplam inşaat alanı kategorilerini içermektedir. Bu sınıflandırma, bu araştırma için çok katlı CLT konut yapılarının yükseklik aralığını göstermektedir. Yapıların brüt alanı ya yazılı bir kaynaktan elde edilmiş ya da binanın planı dijital ortamda çizilerek oranlanmış ve buna göre tahmin edilmiştir. Bu kategorideki veriler CLT panelin hızlı ve dikey yapılaşmaya uygunluğu konusunda veri sağlamaktadır.

#### 4.4. Mimari Veriler

Bu kategorideki veriler plan şemaları, çekirdeğin plandaki konumu ve bir katta bulunan bağımsız bölüm sayılarını içermektedir. Bu sınıflandırmadaki veriler yazılı kaynakların yanı sıra binaların plan şemaları ölçekli şekilde dijital ortama aktarılarak ve gerektiğinde ölçekli olarak oranlanarak elde edilmiştir.

Bağımsız birimlerin bir araya gelişindeki genel tasarım yaklaşımlarının yanı sıra, ortak ulaşım hattını



barındıran çekirdek bölümünün malzemesi ve konumu çok katlı ahşap yapı tasarımının önemli parametreleridir. Ayrıca, panel boyutlarından ve taşıyıcı/bölücü panel kullanımı gereksinimlerinden kaynaklanan kısıtlar ya da değişebilirlik olanakları da oluşturulan plan şemaları üzerinde yerleştirilen aks özellikleri üzerinden okunabilmektedir.

#### 4.5.Strüktürel Veriler

Endüstriyel ahşap kullanılarak oluşturulan taşıyıcı sistemler genel olarak;

- Karkas (Çerçeve Sistemler)
- Panel Sistemler
- Modüler Sistemler
- Hibrit sistemler olarak sınıflandırılabilirler.

Çalışma kapsamında söz konusu sistemler, CLT panellerin kullanım özellikleri bakımından ele alınmaktadır.

Karkas (çerçeve) sistemler, bir boyutu diğerine göre uzun olan kolon ve kiriş gibi çizgisel elemanlar ile oluşturulan taşıyıcı sistemlerdir (Şekil 6). Endüstriyel ahşap malzemenin kullanıldığı ahşap karkas sistem ile inşa edilen yapılarda kolon ve kiriş elemanlarında çoğunlukla tutkallı tabakalı ahşap malzeme kullanılırken, CLT paneller ise genellikle çekirdekte taşıyıcı duvar, döşeme, bölücü duvar ve merdiven elemanı olarak kullanılmaktadır.



Şekil 6. Prefabrike Ahşap Karkas Sistem (The Future Academic Plaform, 2023)

Panel yapım sisteminde; CLT duvar ve döşeme panel elemanları aynı zamanda yapının taşıyıcı sistemini de oluşturur. Döşeme panelleri duvar panellerinin yüklerini ve yapıya etki eden yatay yükler ile hareketli yükleri duvar panellerine iletirler. Duvar panelleri ise yapıya etki eden yanal yükleri ve döşemelerden gelen ve binanın kendi ağırlığından kaynaklanan yükleri temele iletirler. Taşıyıcı CLT panel elemanları geçtiği açıklığa göre 5 veya 7 katmanlı olabilmektedir. Kalınlıkları da geçilen açıklığa ve yapının bulunduğu yerin zemin özelliklerine değişmektedir. CLT Panel sistem yapım sisteminde döşeme açıklığı için üst limit 7,5 m olarak tanımlanmasına karşın panel kalınlığının ideal seviyelerde tutulması açısından geçilebilecek optimum açıklık 5m olarak tanımlanmaktadır. CLT panel yapım

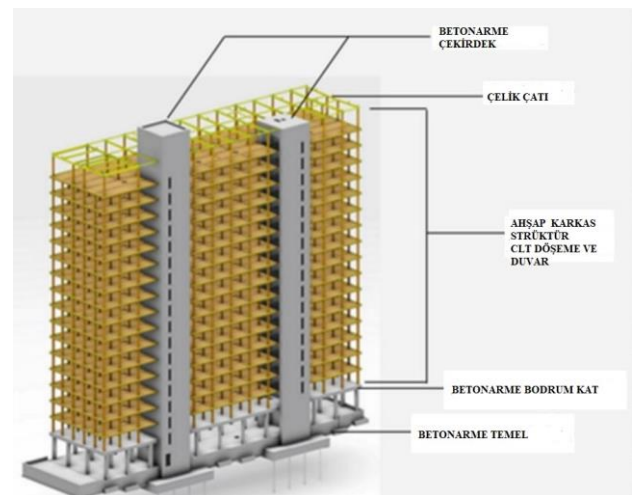
sistemi ile geçilen açıklık sınırlı olduğundan daha çok konut yapılarında tercih edilmektedir.

Modül sistemler; yapı bileşenlerinin hücresel birimlerinden oluştuğu sistemlerdir (Şekil 7). Modüllerin fabrikalarda üretimi tamamlandıktan sonra şantiyeye nakledilerek, yapıdaki yerlerine monte edilmesi ile oluşturulan ileri prefabrikasyon sistemlerdendir. Bu sistemde hacimler bütünsel olarak taşınıp monte edildiği için her bir hacim kiriş gibi çalışmaktadır (Ayaz, 2011).



Şekil 7. Modüler Yapım Sistemi (Treehugger, 2023)

Hibrit sistemler; bir yapıda iki veya daha fazla yapım sisteminin ve/veya malzemenin birlikte kullanıldığı sistemlerdir. Hibrit yapım sistemlerinde amaç kullanılan malzemelerin olumlu yönlerinden maksimum faydayı sağlamaktır. Böylece daha ince kesitlerle daha fazla açıklık geçilerek mekânsal esneklik de sağlanmış olur (Şekil 8).



Şekil 8. Betonarme-CLT-GLT (Tutkallı Tabakalı Ahşap)-Çelik Hibrit Yapım Sistemi (Moudgil, 2014)

Hibrit sistemlerde, CLT panel elemanların; ahşap kolon ve kirişlerden oluşan ahşap iskelet sistemle, çelik

malzeme ile, betonarme malzeme ile ya da bu malzemelerin tümü veya birkaçının bir ya da birden çok yapım tekniği ile bir araya getirildiği bir süreç söz konusudur.

Çok Katlı CLT konut yapılarının strüktür malzemeleri, strüktür sistemi ve strüktür kurguları bu kategoride analiz edilecektir. Bu verilerden yola çıkarak CLT malzemenin farklı strüktürel çözümler içerisinde kullanım olanakları değerlendirilecektir.

## 5. Örnek Yapıların Belirlenen Başlıklar Çerçevesinde Analizi

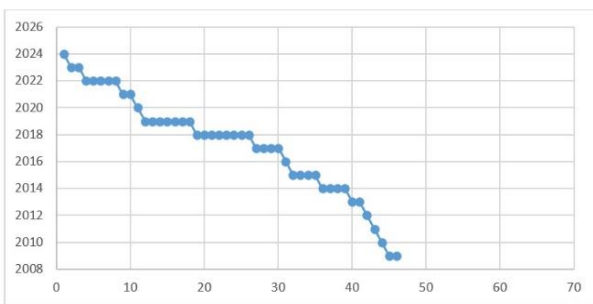
Bu bölümde 8 ve daha çok katlı, 46 konut yapısı, yukarıda tanımlanan alt başlıklarla değerlendirilmektedir. Bilgilerine ulaşılabilen yapılar ve konumları ile yapıların yükseklikleri, buldukları konumun ilkim bölgesi ve sismik tehlikesi bilgileri özet halinde Tablo 2'de aktarılmaktadır. Tablo verilerinin değerlendirilmesi ayrı başlıklar biçiminde devam eden bölümlerde aktarılmaktadır.

2009 yılında yapımı tamamlanan ilk çok katlı konut yapısından, 2023 yılına kadar konut yapısı sayısının yıllara bağlı değişimi Şekil 9'daki grafikte aktarılmaktadır. Buna göre en fazla üretim, 8 adet ile 2018 ve 2019 yıllarında gerçekleşmiştir. Bunu 5 adet yapı ile 2022 yılı, 4'er adet çok katlı konut ile 2014-2015 ve 2017 yıllarının takip ettiğini, en az yapı üretiminin ise 1'er adet ile 2010-2011-2012-2016 ve 2020 yılları olduğunu görmekteyiz. Bu bağlamda, 2009'dan bugüne kadar olan süreç değerlendirildiğinde CLT malzemeli konut üretiminin artmakta olduğunu ve dolayısı ile sürdürülebilir bir alternatif olarak yerini sağlamlaştırdığını söylemek yanlış olmayacaktır.

bulunurken, çok yüksek yer ivmesine sahip Portland-ABD'de inşa edilen 1 adet konut yapısı bulunmaktadır.

Tablo 2. Çok Katlı CLT Konutların İsimleri, Konumları, Yapım Yılı, Yükseklikleri, İlkim Bölgesi ve Sismik Tehlike Bilgileri

YAPI İSMİ	BULUNDUĞU YER	YAPIM YILI	İNŞA SÜRESİ (ay)	YÜKSEKLİK (m)	İKLİM BÖLGESİ	PGA DEĞERİ
Roots Tower	Hamburg, Almanya	2024	12	85	cfc	0.00-0.01
Albizzia	Lyon, Fransa	2023	10	83	Dfc	0.03-0.04
Cederhusen	Stockholm, İsveç	2023	3,5	44	cfb	0.00-0.01
Ascent	Milwaukee, ABD	2022	5	86,8	Dfa	0.00-0.01
HAUT	Amsterdam, Hollanda	2022	8	73	cfc	0.00-0.01
Monterey	Brisbane, Avustralya	2022	9	37	cfa	0.02-0.03
Tallwood 1 at District 56	Victoria, Kanada	2022	5	41,6	csb	0.13-0.20
INTRO Residential Tower	Cleveland, ABD	2022	10	39,6	Dfb	0.00-0.01
Hyperion	Bordeaux, Fransa	2021	5	55	cfc	0.01-0.02
Hoas Tuulintty	Espoo, Finlandiya	2021	7	44	Dfb	0.00-0.01
HOMO	Viyana, Avusturya	2020	7,5	84	Dfa	0.04-0.05
Mjøstâmet	Brumunddal, Norveç	2019	18	85,4	Dfb	0.02-0.03
SKAI O	Heilbronn, Almanya	2019	7	34	cfb	0.00-0.01
Sensations	Strasbourg, Fransa	2019	19	38	cfb	0.00-0.01
Trummens Strand	Växjö, İsveç	2019	17	27	cfb	0.00-0.01
Botanikem	Uppsala, İsveç	2019	10	31	Dfb	0.00-0.01
Kajstaden	Västerås, İsveç	2019	6	30	Dfb	0.00-0.01
Arbora Condominium	Montreal, Kanada	2019	4	25	Dfb	0.03-0.04
Aveo Bella Vista	Sydney, Avustralya	2018	15	36	cfa	0.01-0.02
Maskinparken TRE	Trondheim, Norveç	2018	11,5	27	Dfc	0.01-0.02
Kingsja Studentby	Oslo, Norveç	2018	11	28	Dfb	0.00-0.01
Carbon12	Portland, ABD	2018	14	26,9	csb	0.35-0.55
Docenten	Växjö, İsveç	2018		27	cfb	0.00-0.01
Puukuokka Housing Block	Jyväskylä, Finlandiya	2018	15	27	Dfc	0.00-0.01
Frostaliden	Skövde, İsveç	2018	9	20	Dfb	0.00-0.01
The Gardens Macarthur	Sydney, Avustralya	2018	16	27	Dfa	0.02-0.03
Origine	Quebec, Kanada	2017	14	40,9	Dfb	0.04-0.05
Daiston Works	London, İngiltere	2017	18	33,8	cfb	0.00-0.01
Press House	London, İngiltere	2017	3,5	31	cfb	0.00-0.01
Highpoint Terrace	London, İngiltere	2017	5	22	cfb	0.00-0.01
Moholt SØ/SØ	Trondheim, Norveç	2016	9	28	Dfc	0.01-0.02
Treet	Bergen, Norveç	2015	12	62,8	cfb	0.02-0.03
Trafalgar Place	London, İngiltere	2015	4	36,3	cfb	0.00-0.01
The Cube Building	London, İngiltere	2015	5	33	cfb	0.00-0.01
Vallen	Växjö, İsveç	2015	7	29	cfb	0.00-0.01
Contralaminada	Lleida, İspanya	2014	1,5	21,84	bsk	0.03-0.04
Limnologen	Växjö, İsveç	2014	17	27	cfb	0.00-0.01
Residences J. Ferry	Saint-Denis-Vosges, Fransa	2014	2	21	cfb	0.03-0.04
Strandparken	Stockholm, İsveç	2014	5	27	Dfb	0.00-0.01
Rundeskojen Hus B	Sandness, Norveç	2013	9	55	et	0.02-0.03
Cenni di Cambiamento	Milan, İtalya	2013	18	27	cfb	0.13-0.20
Forté	Melbourne, Avustralya	2012	4	32	cfb	0.02-0.03
HolzB	Bad Albing, Almanya	2011	6	25	cfb	0.02-0.03
Bridport House	London, İngiltere	2010	4	26	cfb	0.00-0.01
Stadthaus	London, İngiltere	2009	12	29	cfb	0.00-0.01
Portvakten Söder	Växjö, İsveç	2009	15	27	cfb	0.00-0.01



Şekil 9. Yıllara Göre İnşa Edilen CLT Çok Katlı Konut Sayısı Grafiği

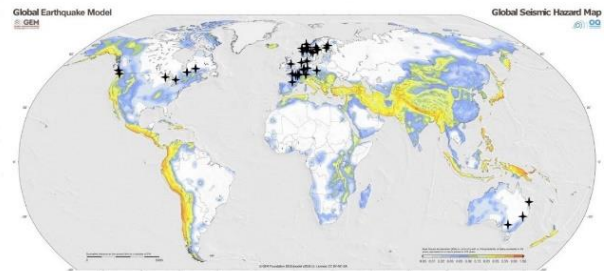
## 5.1. Deprem ve İklim Verileri

### 5.1.1. Sismik Tehlikeye İlişkin Coğrafi Dağılım

Tablo 2'de incelenen yapıların çoğunlukla Avrupa kıtasında yer aldığı görülmektedir. Bu yapıların daha çok (43 adet) düşük deprem riski olan bölgelerde inşa edildiği görülmektedir. Orta riskli bölgede 2 adet yapı

Söz konusu yüksek riskli bölgede konumlanan Carbon 12 yapısı, 8 katlı ve 26,9 metre yüksekliğinde çelik çekirdekli, GLT (tutkallı tabakalı ahşap) ve CLT'nin birlikte kullanıldığı hibrit Bir taşıyıcı sistem ile üretilmiştir.

Yapıların buldukları konumlar, sismik tehlike haritası üzerinde işaretlenmiştir (Şekil 10).



Şekil 10. Projelerin Küresel Sismik Tehlike Haritası Üzerindeki Konumu (Temel harita kaynağı: Pagani ve diğ., 2018)

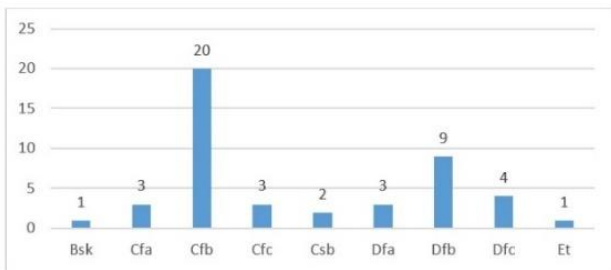
### 5.1.2. İklim Bölgelerine İlişkin Coğrafi Dağılım

Şekil 11’de dünyada çok katlı ahşap konutların %43,47 Cfb (Ilıman Okyanusal) iklim bölgesinde, %19,56 oranında ise Dfb (İlkyaz nemli karasal) iklim bölgesinde, %8,69 Dfc (arktik) iklim bölgesinde, %6,5 Cfa, Cfc ve Dfa iklim bölgelerinde inşa edildiği görülmektedir. Bsk ve Et iklim bölgelerinde ise yalnızca 1’er adet yapı inşa edilmiştir (Şekil 4). Söz konusu iklim tiplerinin açılımları Tablo 3’de verilmiştir. Yapıların bulunduğu konumlar, Köppen-Geiger İklim Sınıflandırmasının Dünya Haritası üzerinde işaretlenmiştir (Şekil 12). Bu bağlamda, genellikle nemli ve ılıman iklim bölgelerinde yaygın olmakla birlikte, çok soğuk ya da sıcak bölgelerde de CLT malzeme kullanımının olanaklı olduğu görülmektedir.

### 5.2. Zaman Verileri

Bu başlıkta, üretim sürecinin önemli bir parametresi olan inşa süreci değerlendirilmektedir. Gerek tutkallı tabakalı (GLT) gerekse çapraz lamine ahşap (CLT) yapı elemanları ön üretim gerektirdiklerinden ve montaj detayları da önceden belirlenmiş oldukları için, yapım süreçleri şantiye alanındaki koşullardan en az düzeyde etkilenirler. Örneklere bakıldığında;

CLT kullanılarak inşa edilen çok katlı konutların en çok 18 ayda tamamlandığı görülmektedir. Bir ayda en az 63,57 m<sup>2</sup>, en fazla 13.878,75 m<sup>2</sup> konut üretimi yapıldığı, ortalama bir aylık konut üretiminin ise 1363 m<sup>2</sup> olduğu saptanmıştır. İnşaat hızı yapının alanı ile ilişkili değildir. Süre ile ilgili anlaşılabilirliği arttırmak adına, yerinde yapım betonarme yapım sistemi ile karşılaştırma yapmak gerekirse; betonarme konutlar için ortalama süre, 1 ayda 27 m<sup>2</sup> ile 36 m<sup>2</sup> olarak tanımlanmaktadır (Chen, 2012).



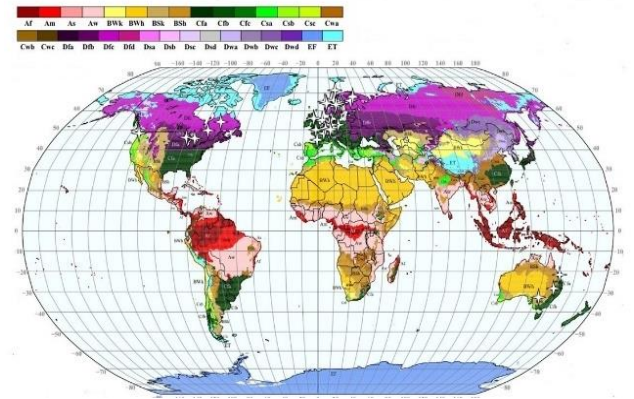
Şekil 11. CLT Çok Katlı Konutların İklim Bölgeleri Grafiği

İnşaat sürecine ilişkin literatürde de benzer bilgiler aktarılmaktadır; Kosmatka ve Wilson, (2011) yaptığı bir çalışmada betonarme sistemle yapılan bir yapının bir katının inşasının 28 günde tamamlanırken, aynı plana sahip CLT panellerle yapılan yapıda bu sürenin 3 ila 4 gün arasında olduğunu saptamıştır. Bu, dokuz katlı bir yapı düşünüldüğünde yapının 3- 4 ay gibi bir zamanda tamamlanması anlamına gelmektedir. Patterson (2013) 10 katlı bir yapı üzerinde yaptığı bir

çalışmada ise, CLT’nin inşa süresinin betonarme yapıya göre neredeyse bir yıla yakın bir zaman daha kısa sürede inşa edildiğini saptamıştır.

Tablo 3. İklim Tipleri (Öztürk, Çetinkaya ve Aydın, 2017)

Cfa	Subtropikal iklim
Cfb	Ilıman okyanusal iklim
Cfc	Subpolar okyanus iklimi
Dfb	İlkyaz nemli karasal iklim
Dfc	Arktik iklim
Dfa	Sıcak-yaz nemli karasal iklim;
Bsk	Soğuk step iklimi (Soğuk Yarı Kurak İklim)
Et	Tundra iklimi



Şekil 12. Projelerin Köppen-Geiger İklim Sınıflandırmasının Dünya Haritası Üzerindeki Konumu (Temel harita kaynağı: Rubel, 2023)

### 5.3. Mimari Veriler

İncelenen yapılar mimari biçimlenişleri açısından ele alındığında, yapı formu, çekirdeğin konumu ve yapı büyüklüğü öne çıkan parametreler olmuştur.

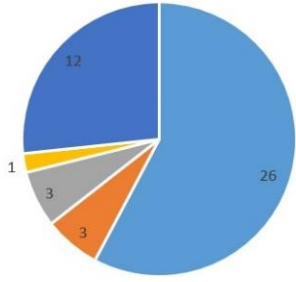
#### 5.3.1. Yapı Formu

İncelenen konut yapılarının 26 tanesi dikdörtgen veya kare formunda, 3 tanesi L formuna yakın, 4 tanesi U formuna yakın, 1 tanesi üçgen formda 12 tanesi ise amorf formda planlanmıştır (Şekil 13). Söz konusu yapıların formları ve çekirdek-form ilişkisi ile aks aralıkları ise elde edilen veriler ile dijital ortamda yapılan yapılara ait şematik çizimlerden okunabilmektedir (Şekil 14, 15).

#### 5.3.2. Çekirdek Malzemesi ve Konumu

İncelenen yapılar mimari biçimlenişleri açısından ele alındığında, öncelikle düşey sirkülasyonu barındıran çekirdekleri bakımından sınıflandırılmıştır. Çünkü çekirdek malzemesi ve konumu yapıların hem mimari hem de strüktürel tasarımında önemli bir parametre olarak ele alınmaktadır.





■ Dikdörtgen veya kare form ■ L form ■ U form ■ Üçgen form ■ Amorf form

Şekil 13. CLT Çok Katlı Konutların Formları

Betonarme çekirdeğe sahip 18 adet çok katlı ahşap konut yapısının, 9 tanesinin çekirdeğinin yapının cephesinde 9 tanesinin ise merkezinde konumlandığı saptanmıştır (Şekil 14). CLT Panel çekirdeğe sahip 25 adet yapının 13 tanesinin çekirdeği yapının cephesinde 12 tanesinin ise merkezde konumlandırıldığı görülmüştür (Şekil 15).

### 5.3.3. Boyutsal Veriler

Çok sayıda konutun hızlı üretilmesi ve aynı zamanda da kentlerdeki parsel boyutları ve ekonomik şartlar gibi pek çok faktör, CLT malzeme kullanımının da çok katlı yapılarda yoğunlaşmış olduğunu göstermektedir. Boyutsal bir değerlendirme yapabilmek adına, bu başlıkta incelenen örneklerin kat sayıları/ yükseklikleri ve bloklar içinde konumlanan bağımsız birim sayıları değerlendirilmiştir.

Dünyada CLT panel kullanılarak yapılan ilk çok katlı konut yapısı, 9 katlı olarak ve 29 metre yükseklikte İngiltere’de inşa edilen Stadthaus olarak bilinmektedir. Güncel en yüksek yapı ise 2022 yılında ABD’de yapımı tamamlanmış olan 25 katlı ve 86,6 m yüksekliğindeki Ascent binasıdır.

Şekil 16’da bu yapıların 16 adet ile en çok 8 katlı olarak inşa edildiği görülmektedir. Bunu 8 adet ile 9 katlı yapılar izlerken 20 kat ve üstü 4 adet yapının üretildiği görülmüştür.

		Betonarme Çekirdek										
YAPI İSİMLERİ		Haut2	Residence J Ferry	Avvo Bella Vista	Hoas Tuinity	Roots Tower	Botanikem	Holz 8	Montney Brisbane			
PLAN ŞEMALARI ÇEKİRDEK CEPHEDE												
Kat Bilgileri												
Kat Alanı (m <sup>2</sup> )		520	458	1270	600	1130	715	380	254	307	360	
Daire Sayısı		2	2	5	16	12	10	2	2	2	3	
Asansör		2	1	2	2	6	1	1	1	1	2	
Merdiven		1	1	2	2	5	2	1	1	1	1	
YAPI İSİMLERİ		Ascent	Hyperion	Albizzia	Cederhusen	Hus B	Ho Hb	The Cube	Skaio	Frostleden		
PLAN ŞEMALARI ÇEKİRDEK MERKEZDE												
Kat Bilgileri												
Kat Alanı (m <sup>2</sup> )		1000	810	580	680	427	541	378	607	570	377	
Daire Sayısı		14	6	4	7	4	5	2	6	2	4	
Asansör		3	2	2	2	2	3	2	2	2	1	
Merdiven		2	1	1	2	1	1	1	2	1	1	

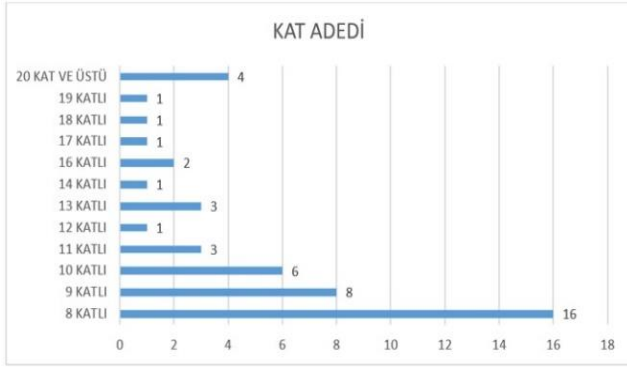
Şekil 14. Betonarme Çekirdeğe Sahip Konut Yapılarının Mimari Verileri

		Çelik Çekirdek	Ahşap Çekirdek								
YAPI İSİMLERİ			Arbora	Vallen	Brüport	Kajaladen	Limögen	Kingsja Studenby	Trest	Trattigar Place	
PLAN ŞEMALARI ÇEKİRDEK CEPHEDE											
Kat Bilgileri											
Kat Alanı (m <sup>2</sup> )		1800	412	600	548	450	1100	445	530		
Daire Sayısı		2	3	8	4	2	22	5	6		
Asansör		2	1	2	1	1	2	1	2		
Merdiven		2	1	2	1	1	2	2	1		
YAPI İSİMLERİ		Carbon 12	INTRO Residential Tower		Dalston Works	Moholt 50	Fote	Press House	Va Jenni		
PLAN ŞEMALARI ÇEKİRDEK MERKEZDE											
Kat Bilgileri											
Kat Alanı (m <sup>2</sup> )		470	5000		1900	527	278	432	250		
Daire Sayısı		2	46		17	15	3	4	3		
Asansör		1	7		7	2	1	2	2		
Merdiven		2	3		5	1	1	1	2		

		Çelik Çekirdek	Ahşap Çekirdek								
YAPI İSİMLERİ			Mysalmet	Strandparken	Macarthur Gardens	Thunners Strand	Dand 56				
PLAN ŞEMALARI ÇEKİRDEK CEPHEDE											
Kat Bilgileri											
Kat Alanı (m <sup>2</sup> )		646	521	649	499	510					
Daire Sayısı		6	3	4	3	9					
Asansör		3	2	2	1	2					
Merdiven		2	2	2	1	1					
YAPI İSİMLERİ		Carbon 12	Stadthaus	Contaminanda	Origine	Sensations	Pulouka	Maskiparten			
PLAN ŞEMALARI ÇEKİRDEK MERKEZDE											
Kat Bilgileri											
Kat Alanı (m <sup>2</sup> )		470	330	194	1556	545	600	635	790	750	830
Daire Sayısı		2	3	2	9	5	6	7	8	8	5
Asansör		1	2	1	2	2	1	1	1	1	1
Merdiven		2	2	1	2	1	1	1	1	1	1

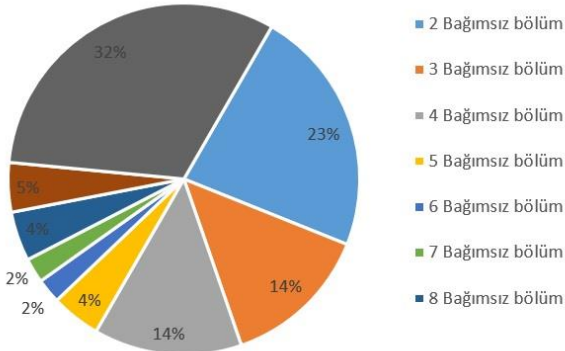
Şekil 15. Ahşap (CLT) ve Çelik Çekirdeğe Sahip Konut Yapılarının Mimari Verileri





Şekil 16. CLT çok katlı konut kat adedi grafiği

Yapılar plan yerleşimleri bakımından incelendiğinde bir katta 2 bağımsız birim bulunan 10; 3 bağımsız birim bulunduran 6; 4 tane bağımsız birim bulunduran 6; 5 adet bağımsız birim bulunduran 2 yapı olduğu görülmektedir. 1 yapıda 6, 1 yapıda 7, 2 yapıda 8, 2 yapıda da 9 bağımsız bölüm konumlanmakta ve geri kalan 15 yapıda ise bir katta 10'dan fazla bağımsız bölüm olduğu görülmüştür (Şekil 17). Bu bağlamda hem düzeyde hem de plan düzleminde çok çeşitli üretim olanakları bulunduğu görülmektedir.



Şekil 17. CLT çok katlı konutların katta bulunan bağımsız bölüm sayıları

#### 5.4.Strüktürel Veriler

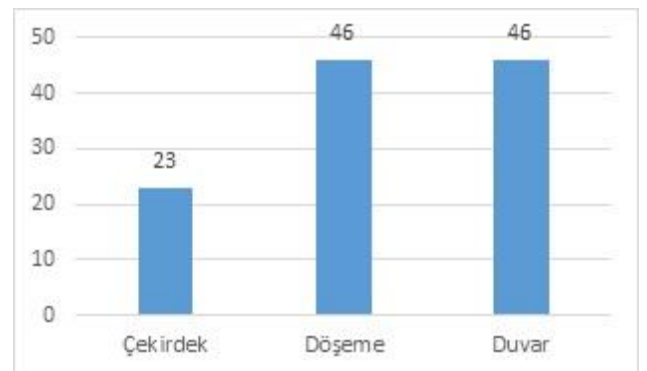
Bu başlıkta yapılar kullanılan taşıyıcı sistem türü açısından sınıflanmaktadır. Öte yandan kullanılan malzeme miktarı da taşıyıcı sistem etkinliğinin bir göstergesi olması bakımından bir veri olarak değerlendirilmiştir.

Strüktürel verilere ek olarak çok katlı ahşap konutların kullanılan CLT miktarına bağlı CO<sub>2</sub> tutma miktarını gösteren veriler de Tablo 4'te aktarılmaktadır.

Çok katlı ahşap konutların tümünde CLT panelin döşeme ve duvar paneli olarak kullanıldığı görülmüştür (Şekil 18). Aynı zamanda 23 adet yapıda CLT panelin çekirdek strüktüründe de kullanıldığı saptanmıştır. 1 adet yapı hariç CLT çekirdekte hem merdiven olarak hem de asansör perde duvarı olarak kullanılmıştır.

Tablo 4. Çok Katlı CLT Konutların Strüktürel Bilgileri

YAPİ İSMİ	ÇEKİRDEK ÇÖZÜMÜ	ZEMİN KAT ÇÖZÜMÜ	PGA DEĞERİ	STRÜKTÜR KURGUSU	STRÜKTÜR SİSTEMİ	KULLANILAN CLT MİKTARI (m <sup>2</sup> )	CO <sub>2</sub> TUTMA MİKTARI (ton)
Roots Tower	Betonarme	Betonarme	0,00-0,01	Ahşap-Beton Hibrit	Karkas	4430	4500
Albizzia	Betonarme	Betonarme	0,03-0,04	Ahşap-Beton Hibrit	Karkas	3155	3000
Cederhusen	Betonarme+Çelik	Ahşap	0,00-0,01	Ahşap-Çelik-Beton Hibrit	Panel sistem	3500	3500
Ascend	Betonarme	Betonarme	0,00-0,01	Ahşap-Beton Hibrit	Karkas	3.700	3800
HAUT	Betonarme	Ahşap	0,00-0,01	Ahşap-Beton Hibrit	Karkas	2000	1900
Monterey	Betonarme	Ahşap	0,02-0,03	Ahşap-Beton Hibrit	Karkas	1207	1150
Tallwood 1 at District 56	Ahşap	Betonarme	0,13-0,20	Ahşap-beton Hibrit	Karkas	1300	1500
INTRO Residential Tower	Betonarme	Betonarme	0,00-0,01	Ahşap-Beton Hibrit	Karkas	3000	3000
Hyperion	Betonarme	Betonarme	0,01-0,02	Ahşap-Çelik-Beton Hibrit	Karkas	1400	1350
Hoas Tuulimäity	Betonarme	Betonarme	0,00-0,01	Ahşap	Modüler	1500	1300
Holo	Betonarme	Ahşap	0,04-0,05	Ahşap-Beton Hibrit	Karkas	2300	2500
Mjæstærnet	Ahşap	Ahşap	0,02-0,03	Ahşap-Beton Hibrit	Karkas	535	800
SKAIO	Betonarme	Betonarme	0,00-0,01	Ahşap-Beton-Çelik Hibrit	Karkas	1500	1600
Sensations	Ahşap	Betonarme	0,03-0,04	Ahşap	Karkas	3500	3500
Tunnere Strand	Ahşap	Betonarme	0,00-0,01	Ahşap	Karkas+Panel	6300	6000
Botanikern	Ahşap	Ahşap	0,00-0,01	Ahşap-Beton Hibrit	Karkas	4100	4000
Kajstaden	Ahşap	Ahşap	0,00-0,01	Ahşap	Panel sistem	1700	1800
Arbora Condominium	Ahşap	Betonarme	0,03-0,04	Ahşap-Beton Hibrit	Karkas	9500	9000
Aveo Bella Vista	Betonarme	Betonarme	0,01-0,02	Ahşap-Beton Hibrit	Panel sistem	2200	2000
Maskinparken TRE	Ahşap	Ahşap	0,01-0,02	Ahşap	Panel sistem	820	800
Kingsja Studentby	Ahşap	Ahşap	0,00-0,01	Ahşap	Karkas	1300	1200
Carbon12	Çelik	Ahşap	0,35-0,55	Ahşap-Çelik Hibrit	Karkas	1350	1400
Docenten	Betonarme	Ahşap	0,00-0,01	Ahşap-Beton Hibrit	Karkas		
Puukukka Housing Block	Ahşap	Betonarme	0,00-0,01	Ahşap	Modüler	1700	1600
Frostäliden	Betonarme	Betonarme	0,00-0,01	Ahşap-Beton Hibrit	Panel sistem	1300	1200
The Gardens Macarthur	Ahşap	Betonarme	0,02-0,03	Ahşap	Panel sistem	2600	2500
Origine	Ahşap	Ahşap	0,04-0,05	Ahşap	Panel sistem	3111	3000
Dalston Works	Ahşap	Betonarme	0,00-0,01	Ahşap	Panel sistem	4649	4500
Press House	Ahşap	Ahşap	0,00-0,01	Ahşap	Panel sistem	3750	3800
Highpoint Terrace	Çelik+Ahşap	Ahşap	0,00-0,01	Ahşap-Çelik Hibrit	Panel sistem	2850	3000
Mohol 50/50	Ahşap	Betonarme	0,01-0,02	Ahşap	Panel sistem	6500	6000
Treet	Ahşap	Ahşap	0,02-0,03	Ahşap	Modüler +Karkas	1000	900
Trafalgar Place	Ahşap	Ahşap	0,00-0,01	Ahşap	Panel sistem	750	800
The Cube Building	Betonarme	Betonarme	0,00-0,01	Ahşap-Çelik-Beton Hibrit	Karkas+Panel	1313	1300
Vallen	Ahşap	Ahşap	0,00-0,01	Ahşap-Beton Hibrit	Karkas	4200	4000
Contralaminada	Ahşap	Ahşap	0,03-0,04	Ahşap	Panel sistem	2200	2000
Limnologen	Ahşap	Ahşap	0,00-0,01	Ahşap-Çelik Hibrit	Karkas+Panel	6300	6000
Residences J. Ferry	Ahşap	Ahşap	0,03-0,04	Ahşap	Karkas+Panel	600	500
Strandparken	Ahşap	Ahşap	0,00-0,01	Ahşap-Çelik Hibrit	Panel sistem	1950	2000
Rundeskojen Hus B	Betonarme	Betonarme	0,02-0,03	Ahşap-Beton Hibrit	Panel sistem	2350	2200
Cenni di Cambiamento	Ahşap	Betonarme+Ahşap	0,13-0,20	Ahşap	Panel sistem	6100	6000
Forté	Ahşap	Ahşap	0,02-0,03	Ahşap	Panel sistem	1025,32	1000
Holül	Betonarme	Ahşap	0,02-0,03	Ahşap-Beton Hibrit	Platform	650	500
Brødport House	Ahşap	Ahşap	0,00-0,01	Ahşap	Platform	1576	1500
Stadthaus	Ahşap	Betonarme	0,00-0,01	Ahşap	Platform	901	900
Portvakten Söder	Ahşap	Betonarme	0,00-0,01	Ahşap-Beton Hibrit	Panel sistem	1350	1300



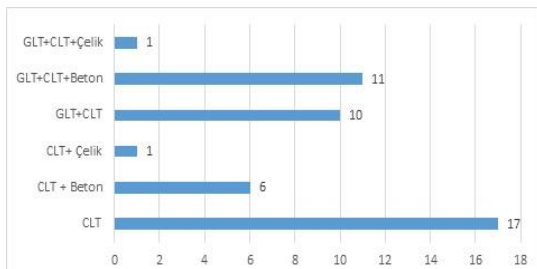
Şekil 18. CLT çok katlı konutlarda CLT panellerin kullanım yeri grafiği

Döşeme paneli olarak CLT panel tek başına 40 adet yapıda kullanılmıştır. Beton-CLT kompozit döşeme ise 6 adet konut yapısında tercih edilen bir sistem olmuştur (Tablo 5).

Tablo 5. CLT Panelin Çok Katlı Yapılarda Kullanım Yeri

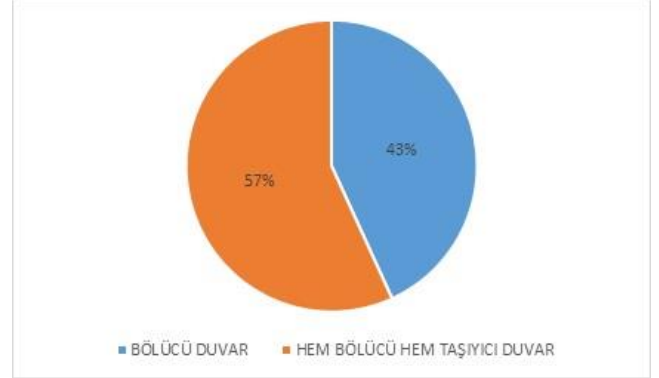
YAPI İSMİ	CLT PANELİN KULLANIM YERİ					
	ÇEKİRDEK		DÖŞEME		DUVAR	
	Merdiven	Asansör	CLT-Beton Kompozit	CLT	BÖLÜCÜ	TAŞIYICI
Roots Tower				●	●	●
Albizzia				●	●	●
Cederhusen			●	●	●	●
Ascent				●	●	●
HAUT			●	●	●	●
Monterey				●	●	●
Tallwood 1 at District 56	●	●		●	●	●
INTRO Residential Tower				●	●	●
Hyperion				●	●	●
Hoas Tuuliniitty				●	●	●
HoHo			●	●	●	●
Mjöstärnet	●	●	●	●	●	●
SKAIO			●	●	●	●
Sensations	●	●		●	●	●
Trummens Strand	●	●		●	●	●
Botanikern				●	●	●
Kajstaden	●	●		●	●	●
Arbora Condominium	●	●		●	●	●
Aveo Bella Vista				●	●	●
Maskinparken TRE	●	●		●	●	●
Kringsja Studentby				●	●	●
Carbon12		●		●	●	●
Docenten				●	●	●
Puukuokka Housing Block				●	●	●
Frostaaliden				●	●	●
The Gardens Macarthur				●	●	●
Origine	●	●		●	●	●
Dalston Works	●	●		●	●	●
Press House				●	●	●
Highpoint Terrace				●	●	●
Moholt 50/50	●	●		●	●	●
Treet	●	●	●	●	●	●
Trafalgar Place	●	●		●	●	●
The Cube Building				●	●	●
Vallen	●	●		●	●	●
Contralaminada	●	●		●	●	●
Limnologen	●	●		●	●	●
Residences J. Ferry	●	●		●	●	●
Strandparken	●	●		●	●	●
Rundeskojen Hus B				●	●	●
Cenni di Cambiamento	●	●		●	●	●
Forte	●	●		●	●	●
Holz8				●	●	●
Bridport House	●	●		●	●	●
Stadthaus	●	●		●	●	●
Portvakten Söder	●	●		●	●	●

Strüktür malzemeleri analizinde çoğunlukla CLT panelin tek başına kullanıldığı saptanmıştır. GLT (tutkallı tabakalı ahşap) +CLT+ Beton hibrit sistemin CLT'den sonra en fazla, CLT+Çelik hibrit sistemin ise en az tercih edilen sistem olduğu görülmektedir (Şekil 19).

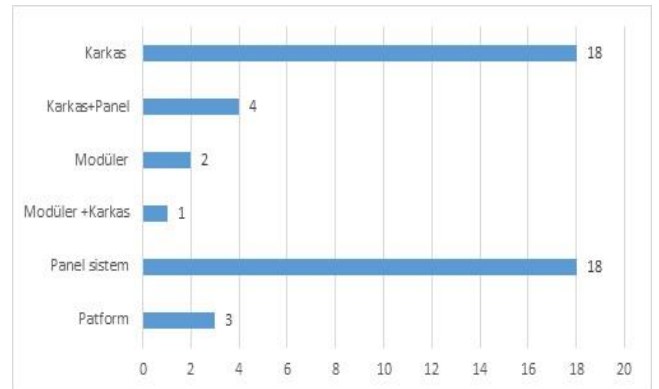


Şekil 19. CLT Çok Katlı Konutların Strüktür Malzemesi Grafiği

Duvar paneli olarak CLT panelin %43 oranında bölücü olarak, % 57 oranında hem bölücü hem de taşıyıcı duvar paneli olarak kullanıldığını Şekil 20'de görmekteyiz.

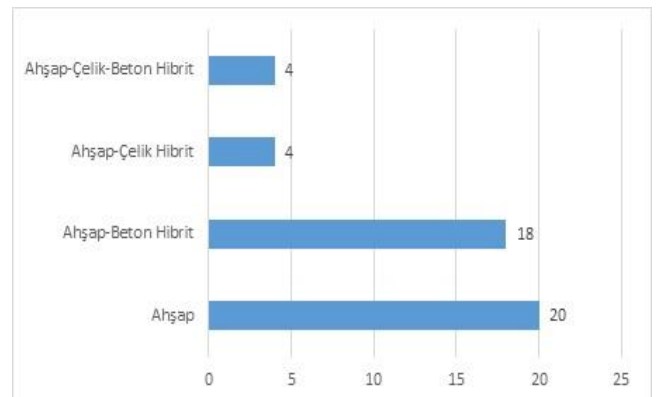


Şekil 20. CLT Çok Katlı Konutlarda CLT Panellerin Duvar Elemanı Olarak Kullanımı Grafiği



Şekil 21. CLT Çok Katlı Konutların Strüktür Sistemi Grafiği

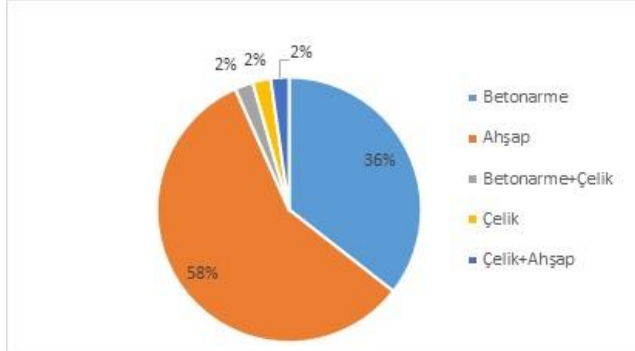
Strüktür sisteminde panel sistem ve karkas sistemin eşit sayıda ve en fazla kullanılan sistemler olduğu (%39,00), bunu karkas + panel sistemin birlikte kullanıldığı strüktür kurgusunun (%8,7) takip ettiği saptanmıştır (Şekil 21). Çok katlı ahşap konutların strüktür sistem çözümlerinde modüler+ karkas (%2,17) ve modüler sistemlerin (%4,35) çok az tercih edildiği görülmektedir.



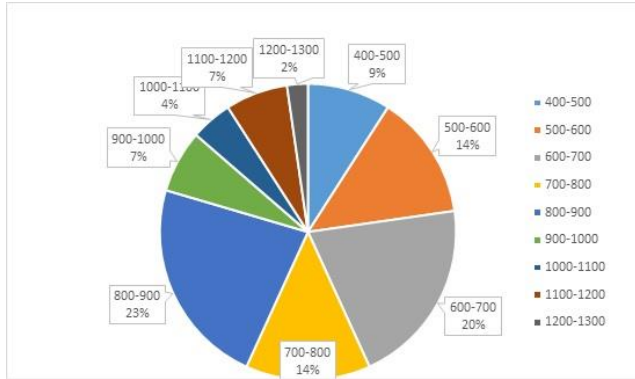
Şekil 22. CLT Çok Katlı Konutların Strüktür Kurgusu Grafiği

Şekil 22'de ahşabın tek başına strüktür malzemesi olarak kullanımının daha fazla olduğunu (%43,50) bunu ahşap ve betonun birlikte kullanıldığı hibrit sistemin

(%39,13) takip ettiğini görmekteyiz. Çekirdek çözümlerinde de ahşap %58 oranında kullanılırken bunu %36 ile betonarme ve %2'lik oranlarla çelik, betonarme-çelik hibrit ve ahşap-çelik hibrit sitem takip etmektedir (Şekil 23).



Şekil 23. CLT Çok Katlı Konutların Çekirdek Çözümü Grafiği



Şekil 24. CLT Çok Katlı Konutların Aks Aralıkları Grafiği (cm)

Geçilen açıklıkların analizinde 800-900 cm ve 600-700 cm aks aralıklarının daha fazla tercih edildiği saptanmıştır. Maksimum 1300 cm, minimum 400 cm açıklık geçildiği görülmüştür (Şekil 24).

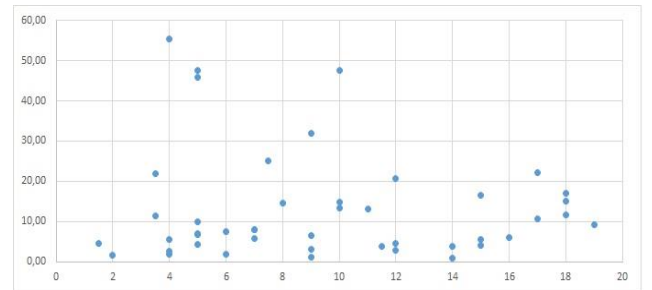
## 6. Karşılaştırmalı Analizler

Tablo 6, kullanılan yapısal sisteme göre altı satır halinde gruplandırılmış çok katlı ahşap konutların strüktür sistemi/inşaat süresini göstermektedir. Karkas sistemle yapılan yapıların çoğunlukla 8-12 ay, panel sistemle yapılan yapıların 3-7 ay gibi bir süre zarfında tamamlandığı görülmektedir. 3 aydan kısa sürede tamamlanan 2 adet yapının strüktürü Panel sistem ve karkas + panel hibrit sistem ile çözülmüştür. En uzun tamamlanma süresi plan 18-20 ay aralığındaki 4 adet yapının 2'sinin strüktürü karkas sistem diğer 2'sinin strüktürü ise panel sistemdir. Tablo 6'dan anlaşıldığı gibi strüktür sisteminin tamamlanma süresine doğrudan etkisi bulunmamaktadır.

Tablo 6. Çok Katlı CLT Konutların Strüktür Sistemine Göre Tamamlanma Süresi Grafiği

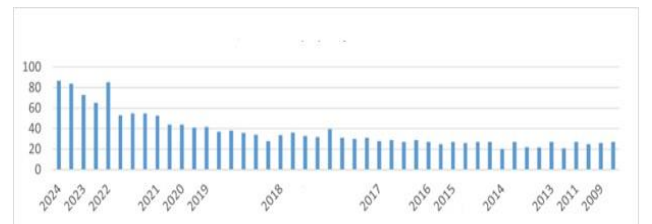
STRÜKTÜR SİSTEMİ	TAMAMLANMA SÜRESİ				
	< 3 AY	3-7 AY	8-12 AY	13-17 AY	18-20 AY
Karkas		*****	*****	*	**
Panel sistem	*	*****	****	****	**
Modüler		*		*	
Karkas+Panel	*	*		**	
Modüler +Karkas			*		
Platform		**	*		

Şekil 25 'de en fazla inşaat alanına sahip yapının 4 ay gibi bir sürede en az alana sahip yapının ise 2 ayda tamamlandığı görülmektedir. Grafikteki dağılımdan toplam inşaat alanının toplam inşaat süresini etkilemediği söylenebilir.



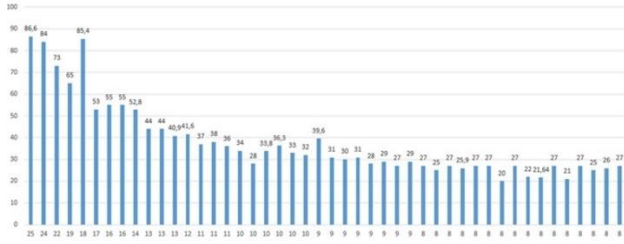
Şekil 25. Toplam İnşaat Alanı (M²) / İnşa Süresi (Ay) Grafiği

Şekil 26, 2009-2024 yılları arasında çok katlı CLT konut projelerinin yükseklik / yapım yılı ilişkisini göstermektedir. Yüksekliğin her yıl istikrarlı bir şekilde arttığı saptanmıştır.

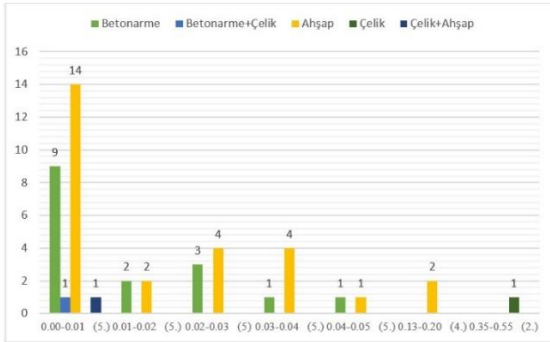


Şekil 26. CLT Çok Katlı Konut Yükseklik-Yapım Yılı Grafiği

Kat adedi- yükseklik analizinde 8 katlı yapıların en fazla 27m, en az 21m, 9 katlı yapıların en fazla 39,6 m, en az 27m, 10 katlı yapıların en fazla 36,3m, en az 28m, 11 katlı yapıların en fazla 38m, en az 36m, 12 kat ve üstündeki yapıların en az 37m ve en fazla 86,6m olarak inşa edildiği saptanmıştır (Şekil 27). Çok katlı ahşap konut yapılarının ortalama kat yüksekliği 3,43m hesaplanmıştır.

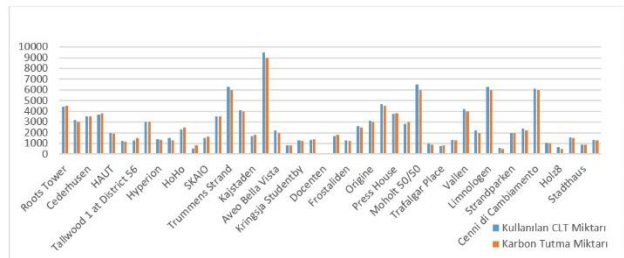


Şekil 27. CLT Çok Katlı Konut Yükseklik- Kat Adedi Grafiği



Şekil 28. CLT Çok Katlı Konutların Deprem Bölgeleri Çekirdek Çözümü İlişkisi Grafiği

Şekil 28'de ahşap çekirdeğe sahip konut yapılarının en fazla (14 adet) 0.00-0.01 yer ivmesine sahip bölgelerde yapıldığı, bunu betonarme çekirdeğe sahip konut yapılarının (9 adet) takip ettiği görülmektedir. Ahşap çekirdeğe sahip konut yapılarının yer ivmesinden bağımsız olarak her bölgede yapıldığı dikkat çekmektedir.



Şekil 29. CLT Malzeme- Karbon Tutma Oranı Grafiği  
Şekil 29'daki grafikte yapıda kullanılan CLT miktarı arttıkça yapının CO<sup>2</sup> tutma kapasitesinin de aynı oranda arttığı tespit edilmiştir. 1m<sup>3</sup> CLT panelin yaklaşık olarak 1ton CO<sup>2</sup> tuttuğu söylenebilir.

## 7.Sonuçlar

Bu araştırma, kapsam bölümünde tanımlanan özellikteki CLT konut yapısı örneklerine ait verilerinin analizi üzerinden uygulama koşullarının saptanmasını hedeflemiştir. Bu bağlamda da yapıların çevresel koşulları ile mimari ve yapısal özellikleri değerlendirilmiştir.

Özetlemek gerekirse; CLT çok katlı konut projelerinin çoğu, CLT panel malzemenin geliştirildiği Avrupa'da bulunmaktadır. Amerika ve Avustralya'da birkaç proje

bulunurken, Asya, Güney Amerika ve Afrika'da CLT çok katlı konut yapı pazarı henüz gelişmediğinden bu bölgelerde CLT malzemeli proje verisine ulaşılammıştır.

Dünyada çapraz lamine ahşap endüstrisinin en çok geliştiği yerler, Almanya'nın Bavyera bölgesi, Avusturya, İsviçre ve Kuzey İtalya dahil olmak üzere Orta Avrupa'dadır. Buna rağmen Amerika ve Avustralya'da CLT çok katlı konutların inşa edilmesi şantiyeden imalatçıya olan mesafenin önemini azalttığından, Avrupa'da çok katlı CLT yapılarının yaygınlaşması, konut seçiminde kültürel farklılıklara ve endüstrinin daha fazla gelişmiş olmasına bağlanabilir (Muszynski. ve diğ., 2017).

Endüstrinin gelişmişliği ve kültürel farklılıkların yanı sıra, bir yerin depremselliği, malzeme veya yapısal sistem seçimini etkileyebilecek faktörlerden biridir. İncelenen projelerin çoğu düşük sismik tehlike bölgelerinde inşa edilmiştir ancak yüksek sismik bölgede yapılmış olan hibrit bir yapı da mevcuttur. Bu sismik tehlikesi bulunan bölgelerde de CLT çok katlı konutların uygulanabilir olduğunun bir göstergesi olarak değerlendirilebilir.

Dünyada CLT panel kullanılarak inşa edilen çok katlı konut yapılarının uygulama koşulları ile ilgili başlıca bulgular ve değerlendirmeler aşağıdaki gibi özetlenmiştir.

Boyutsal verilerin analizinde;

- Yapı yüksekliğinin her geçen yıl arttığı saptanmıştır. Bu noktadan hareketle, CLT ile ilgili teknik gelişmelerin, yapım olanaklarını ve yapı yüksekliğini artırdığı söylenebilir.
- Yapıların en az 20 m en fazla 86,6 m olarak inşa edildiği ve ortalama kat yüksekliğinin en az 2,95 en fazla 3,77 m olduğu görülmüştür. Bu verilere dayanarak, CLT panel sitemdeki kat yüksekliğinin konut yapımında kullanılan diğer yapım sistemleri ile benzerlik gösterdiği söylenebilir.
- 8 kat olarak inşa edilen konut sayısının belirgin biçimde fazla olduğu görülmektedir. CLT malzemeli konutlarda farklı tasarım parametreleri örneğin yangın, rüzgâr ya da deprem yükleri vb. açısından yapılacak tasarım denemelerinde 8 kat yüksekliğin bir başlangıç noktası olabileceğini göstermektedir.

Zamansal verilerin analizinde;

- Yapıların minimum 2 ay, maksimum 18 ayda tamamlanması, CLT panel yapım sistemlerinin hızlı konut üretimine uygun olduğunun bir göstergesidir. Bu bağlamda da, özellikle kısa zamanda büyük bir nüfusu barındırmak için uygun bir çözüm alternatifi olduğunu göstermektedir.



**Deprem ve iklim verilerinin analizinde;**

- Daha çok 0.00-0.01 yer ivmesine sahip bölgelerde inşa edilmiş olup, hibrit çözümlerle yüksek riskli deprem bölgesinde de uygulandığı için, hibrit çözümlerle dünyada yer ivmesi yüksek olan diğer bölgelerde de uygulanması mümkün görünmektedir. Bu noktada, ilgili deprem hesaplarının, tanımlanan normlar çerçevesinde tasarım sürecine dahil edilmesi ile farklı çözüm olanaklarının geliştirilebileceği düşünülmektedir.
- En fazla Cfb iklim bölgesinde olmak üzere 8 farklı iklim bölgesinde inşa edildiği saptanmıştır. Bu verilerden yola çıkarak dünyada çok farklı iklim koşullarında uygulanabilir olduğu söylenebilir.

**Strüktürel verilerin analizinde;**

- Ahşabın tek başına strüktür malzemesi olarak kullanımının daha fazla olduğu, bunu ahşap-beton hibrit sistemin takip ettiği saptanmıştır. Çekirdek çözümlerinin ise, 23 adet CLT Panel, 17 adet betonarme, 1 adet çelik, 1 adet ahşap-çelik hibrit, 1 adet ise betonarme- çelik hibrit olarak çözüldüğü görülmüştür.
- Döşeme olarak çoğunlukla tek başına CLT panelin kullanıldığı, 6 adet yapıda beton-CLT kompozit döşeme sisteminin uygulandığı saptanmıştır.
- CLT yapım sistemlerinin ahşap, betonarme ve çelik yapım sistemleri ile kullanılabilir olması çok farklı strüktürel çözümlere olanak sağladığının bir göstergesidir. Özellikle, yaygın olarak kullanılan betonarme yapım sistemi ile hem çekirdek çözümünde hem de döşemede hibrit çözümlere olanak sağlaması, yeni ürün benimseme sürecindeki kaygıları azaltırken, aynı zamanda statik hesaplamalarda mevcut programların kullanımını da mümkün kılacaktır.
- 600-700 ve 800-900 cm aks aralıklarının daha fazla tercih edildiği ve maksimum 1300 cm, minimum 400 cm açıklık geçildiği saptanmıştır. Bu aks aralıkları konut yapımında sıklıkla kullanılan strüktürel çözümlerle benzerlik gösterdiğinden, CLT yapım sisteminin, aks aralıkları ile de alışkanlıklara uyumlu, alternatif bir yapım sistemi olarak kullanıldığını göstermektedir.
- CLT panelin %57 oranında taşıyıcı, %43 oranında hem taşıyıcı hem bölücü duvar paneli olarak kullanıldığı tespit edilmiştir. Bu bağlamda, tek bir malzeme ile hem taşıyıcılık hem de mekan örtme görevi sağlanmış olmaktadır.

**Mimari verilerin analizinde;**

- Plan çözümlerinin %58 oranında kare veya dikdörtgen, %27 oranında amorf ve %15 diğer formlarda tasarlandığı ve %32'sinin stüdyo tipi, %23'ünün iki bağımsız bölüm olarak çözüldüğü görülmüştür. Bu veriler CLT yapım sistemlerinin, plan çözümlerinde esnek tasarıma elverişli bir yapım sistemi olduğunun göstergesidir. Ayrıca ön tasarım aşamasında, bölücü paneller doğru konumlandırılarak mekân sınırlarının değişimi/ dönüşümü de söz konusu olabilecektir.
- Yaklaşık olarak 1m<sup>3</sup> CLT panelin 1 ton CO<sup>2</sup> tutma kapasitesine sahip olduğu sonucuna ulaşılmıştır. CLT, betonarme ya da çelik gibi konvansiyonel malzemelerin aksine yapı malzemesi olarak da çevreye zarar vermek yerine havayı temizlemeye yardım eder, CO<sup>2</sup> salınımı yerine, tutma eğilimindedir ve yaşam döngüsünün sonunda da doğada yok olabilir.

Özetle; CLT malzemenin mevcutta çok katlı konut yapımında her türlü plan formunda kullanılabilirdiği, birçok iklim bölgesinde uygulanabildiği, strüktürel olarak hem tek başına hem de diğer strüktür malzemeleri ile hibrit çözümlere uygun olduğu ve dolayısıyla deprem riski yüksek bölgelerde de uygulanabildiği, hızlı konut üretimine imkân sağladığı ve CO<sup>2</sup> tutma oranıyla sürdürülebilir bir malzeme olduğu saptanmıştır. Tüm bu sonuçlar CLT panelin alternatif bir strüktür malzemesi olarak hem ülkemizde hem de tüm dünyada birçok çevresel koşulda farklı strüktürel ve plan çözümleriyle çok katlı konut üretiminde kullanılmasının mümkün olduğunu göstermektedir.

**Araştırmacıların Katkısı**

Bu araştırmada; Duygu Yürekli, bilimsel yayın araştırması tabloların ve grafiklerin oluşturulması; Özgül Yılmaz Karaman, çalışmanın yönlendirilmesi ve makalenin oluşturulması, konularında katkı sağlamışlardır.

**Çıkar Çatışması**

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir.

**Kaynaklar**

Albee R., Muszyński L., Hansen N., Knowles C., Larasatie P., ve Guerrero J. (2018). Recent Developments In Global Cross-Laminated Timber (CLT) Market.

Architecture 2030. (2023). Erişim adresi: <https://architecture2030.org/why-the-building-sector/> Architecture2030 Why the Building Sector?

- Ayaz, C., (2011). "Çok Katlı Sürdürülebilir Yapı Tasarımında Ahşabın Strüktürel Olarak Kullanım Olanakları ve Dünyadaki Örnek Uygulamalar", Yüksek Lisans Tezi, Mimar Sinan Güzel Sanatlar Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Bhandari S., Riggio M, Jahedi S, Fischer E.C. ,- Muszynski L. , Luo Z. (2023). A Review Of Modular Cross Laminated Timber Construction: Implications For Temporary Housing In Seismic Areas. *Journal Of Building Engineering*, 63, 105485, <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.105485>
- Built Offsite. (2023). Erişim adresi: <https://builtoffsite.com.au/news/clt-manufacturing/>
- Çaştur Ş.N. (2021). Günümüz Mimarisinde Kullanılan Endüstriyel Ahşap Yapı Elemanları ve Yapı Örneklerinin İncelenmesi Yüksek Lisans Tezi Fatih Sultan Mehmet Vakıf Üniversitesi, İstanbul,
- Chen Y.J. (2012) Comparison of Environmental Performance of a Five-Storey Building Built with Cross-Laminated Timber and Concrete - Reported to: Sustainable Building Science Program Department of Wood Science, University of British Columbia.
- Churkina, G., Organschi, A. Reyer, C.P.O. Ruff, A., Vinke, K. Liu, Z. Reck, B.K. Graedel, Schellnhuber & H.J. (2020). Buildings as a Global Carbon Sink. *Nat. Sustain*, 3, 269-276.
- Climate Change & Infectious Diseases. (2022). Erişim adresi: <https://koeppen-geiger.vuwien.ac.at/present.html>.
- Erlat, E. (2014). Dünya iklimleri. İzmir: Ege Üniversitesi Edebiyat Fakültesi Yayınları.
- Evans, L. (2021). Cross-laminated Timber: Taking Wood Buildings to the Next Level. *Architectural Record*. <http://continuingeducation.construction.com/article.php?L=312&C=1138>
- Fountain, H. (2012) Wood that Reaches New Heights. The New York Times. Erişim adresi: <https://www.nytimes.com/by/henry-fountain>
- Güzel N. ve Yesügey S.C. (2017). Çapraz Lamine Ahşap (CLT) Malzeme ile Çok Katlı Ahşap Yapılar. *Mimarlık*, 382.
- Hess, D., ve Tasa, D. (2011). *Mcknight's physical geography: A landscape appreciation*. New Jersey, NJ: Prentice Hall, 2011.
- Kosmatka S. ve Wilson M. (2011) Design and Control of Concrete Mixtures: The guide to applications, methods, and materials. Portland Cement Association
- Krötsch, S. ve Müller, L. The Development of Multi-Storey Timber Construction. In *Manual of Multi-Storey Timber Construction* (Kaufmann, H., Krötsch, S., Winter, S., Eds.) Edition Detail, Detail Business Information: Munich, Germany, 2018.
- Kuzman, M.K. ve Sandberg, D. A. (2016). New Era for Multi-Storey Timber Buildings in Europe. In *New Horizons for the Forest Products Industry, Proceedings of the 70th Forest Products Society International Convention*, Portland, OR, USA, kongresinde sunulmuş bildiri.
- Kuzmanovska, I., Gasparri, E., Tapias Monné, D. ve Aitchison, M. (2018). Tall Timber Buildings: Emerging Trends and Typologies. World Conference on Timber Engineering kongresinde sunulmuş bildiri.
- Lehmann, S. ve Hamilton, C. (2011). *Sustainable Infill Development using Low Carbon CLT Prefabrication: Adaptation for the South Australian Context; Zero Waste SA Research Centre for Sustainable Design and Behaviour*. University of South Australia, Adelaide, Australia.
- Lehne, J. ve Preston, F. (2023) Making Concrete Change: Innovation in Low-Carbon Cement and Concrete, Chatham House. Royal Institute of International Affairs: Cambridge, UK. <https://www.chathamhouse.org/2018/06/making-concrete-change-innovation-low-carbon-cement-and-concrete>
- Moudgil, M., (2014) Feasibility study of using Cross-Laminated Timber core for the UBC Tall Wood Building *Bachelor of Technology*, <https://doi.org/10.14288/1.035522>
- Muszynski L., Hansen E., Fernando S., Schwarzmann G., ve Rainer J. (2017). Insights into the global cross-laminated timber industry, *BioProducts Business*, ss. 77-92.
- Öztürk M.Z., Çetinkaya G. ve Aydın S. (2017). Köppen-Geiger İklim Sınıflandırmasına Göre Türkiye'nin İklim Tipleri. *Journal of Geography*. 35, 17-27 <https://doi.org/10.26650/JGEOG295515>
- Pagani, M., Garcia-Pelaez, J., Gee, R., Johnson, K., Poggi, V., Styron, R., Weatherill, G., Simionato, M., Viganò, D., Danciu, L. ve Monelli, D. (2018). Global earthquake model (GEM) seismic hazard map (Version 2018.1-Aralık 2018).

- Patterson, D. Forté. (2013). Creating the World's Tallest CLT Apartment Building. US CLT Sempozyumunda sunulmuş bildiri.
- Ramage, M.H., Burridge, H., Busse-Wicher, M. Fereday, G. Reynolds, T. Shah, D.U. Wu, G. Yu, L., Fleming, P., Densley-Tingley, D.; vd. (2017). The Wood from the Trees: The Use of Timber in Construction. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 68, 333–359. <https://doi.org/10.17863/CAM.6411>
- Rubel, F. (02 Ocak 2023). *World Maps Of Köppen-Geiger Climate Classification*. <https://koeppen-geiger.vu-wien.ac.at/present.htm>
- Steiger, R., Gülzow, A., ve Gsell, D. (2008). *Non destructive evaluation of elastic material properties of cross laminated timber (CLT)*. Conference COST E53 kongresinde sunulmuş bildiri. 29-30 Ekim 2008, Delft, Hollanda.
- Storaenso, (2022). Erişim adresi: <https://www.storaenso.com/en/products/mass-timber-construction/building-products/clt>
- Structurlam, (2022). Design Guide. Erişim adresi: [https://www.structurlam.com/wp-content/uploads/2019/04/Structurlam-DesignGuide\\_FINAL\\_Spreads.pdf](https://www.structurlam.com/wp-content/uploads/2019/04/Structurlam-DesignGuide_FINAL_Spreads.pdf)
- Svatoš-Ražnjevíc, H., Orozco L. ve Menges A. (2022). Advanced Timber Construction Industry: A Review of 350 Multi-Storey Timber Projects from 2000–2021. *Buildings*, 12, 404.
- The Future Architecture Platform. (2023). Erişim adresi: <https://futurearchitectureplatform.org/projects/3c2ed451-0da7-402b-81d5-5834fcec8b46/>
- Turner, A. (2014). Structural Performance of Cross Laminated Timber Panels as Walls. University of Southern Queensland.
- Türkeş, M. (2010). *Klimatoloji ve meteoroloji*. İstanbul: Kriter Yayınevi.
- United Nations. *Buildings and Climate Change: Summary for Decision Makers*. (2009). United Nations: New York, NY, USA, 2009; pp. 1–62.
- Van de Kuilen J.W.G., Ceccotti A., Xia, Z. ve He, M. (2011). Very tall wooden buildings with cross laminated timber, *Procedia Engineering*. 14, 1621-1628.2011

## ESTIMATING THE NOISE-INDUCED HEARING LOSSES UNDER FUZZY ENVIRONMENT

Mert MUTLU<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Aksaray University, Engineering Faculty, Department of Mining Engineering, Aksaray,  
ORCID No : <https://orcid.org/0000-0002-6040-1186>

Keywords	Abstract
Open-pit mining, Noise-induced hearing loss, Fuzzy logic, Fuzzy inference system	Noise causes many negative effects both in our daily life and working life, reduces our quality of life, and affects our mental health directly or indirectly. The most common consequence of noise exposure is especially permanent hearing loss called noise-induced hearing loss (NIHL). NIHL is very prevalent in almost every stage of the mining industry. Therefore, the assessment of noise levels of mining operations and the estimation of NIHLs of employees is an important issue to prevent and minimize them. This study is aimed to the modeling of NIHL prediction at a quarry located in Aksaray, Turkey. Initially, noise levels were measured with a sound level meter for employees working in different positions for the quarry, and daily exposure levels ( $L_{ex,8h}$ ) were determined. Audiometry tests were also performed on all employees and NIHLs were evaluated and determined by an audiometrist. According to the results, 5 employees had NIHL in this enterprise. A fuzzy inference system (FIS)-based NIHL estimating model implemented on fuzzy logic using the Sugeno inference mechanism was developed. The model predicts NIHLs for given occupation, age, experience, and $L_{ex,8h}$ parameters. To determine the accurate prediction ability of the model, field noise measurements and audiometry test results data were used. The obtained results indicated that the model has accurate a prediction ability with a 94% success rate. This study proposes a method with high predictive ability using fuzzy sets theory, and will be a guide for the top management in considering the damage effects of noise in enterprises.

## BULANIK ORTAMDA GÜRÜLTÜYE BAĞLI İŞİTME KAYIPLARININ TAHMİN EDİLMESİ

Anahtar Kelimeler	Öz
Açık işletme madenciliği, Gürültüye bağlı işitme kaybı, Bulanık mantık, Bulanık çıkarım sistemi	Gürültü, hem günlük yaşamımızda, hem de çalışma hayatımızda birçok olumsuz etkilerle neden olmakta, yaşam kalitemizi düşürmekte ve ruh sağlığımızı doğrudan veya dolaylı yoldan etkilemektedir. Gürültüye maruz kalmanın en yaygın sonucu, özellikle gürültüye bağlı işitme kaybı adı verilen kalıcı işitme kaybıdır. Gürültüye bağlı işitme kaybı madencilik sektörünün hemen her aşamasında çok yaygındır. Bu nedenle, maden işletmelerinde gürültü düzeylerinin değerlendirilmesi ve çalışanların gürültüye bağlı işitme kayıplarının tahmini, bunların önlenmesi ve en aza indirilmesi için önemli bir konudur. Bu çalışma, Türkiye'de Aksaray ilinde bulunan bir taş ocağında gürültüye bağlı işitme kaybının tahmininin modellenmesini amaçlamaktadır. Başlangıçta taş ocağı için farklı pozisyonlarda çalışan işçiler için gürültü ölçüm cihazı ile gürültü ölçümleri yapılmış ve günlük gürültü maruziyetleri ( $L_{ex,8h}$ ) belirlenmiştir. Ayrıca tüm çalışanlara odyometrik testler uygulanmış ve gürültüye bağlı işitme kayıpları bir odyometrist ile birlikte değerlendirilmiş ve belirlenmiştir. Sonuçlara göre, bu işletmede 5 çalışanda gürültüye bağlı işitme kaybı mevcuttur. Sugeno çıkarım mekanizmasıyla bulanık mantık üzerinde uygulanan bir bulanık çıkarım sistemi tabanlı gürültüye bağlı işitme kaybı tahmin modeli geliştirilmiştir. Model, verilen meslek, yaş, deneyim ve $L_{ex,8h}$ parametrelerini kullanarak gürültüye bağlı işitme kayıplarını tahmin etmektedir. Modelin doğru tahmin yeteneğini belirleyebilmek için, sahadaki gürültü ölçümleri ve odyometrik test sonuçları verileri kullanılmıştır. Elde edilen sonuçlar, modelin %94 başarı oranı ile doğru tahmin yeteneğine sahip olduğunu göstermiştir. Bu çalışma, bulanık kümeler teorisini kullanarak doğru tahmin yeteneği yüksek bir yöntem önermektedir ve işletmelerde gürültünün olumsuz etkilerini dikkate almada üst yönetim için bir rehber olacaktır.

Araştırma Makalesi

Research Article

Başvuru Tarihi

: 13.05.2023

Submission Date

: 13.05.2023

Kabul Tarihi

: 24.07.2023

Accepted Date

: 24.07.2023

\* Sorumlu yazar: [mertmutlu@aksaray.edu.tr](mailto:mertmutlu@aksaray.edu.tr)  
<https://doi.org/10.31796/ogummf.1296740>



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

Nowadays, developing technology has negative aspects compared to many positive developments brought to our lives. One of the most important hazards that exerts occupational disease in the mining industry is noise (Önder, 2018). Large-size mining machines with high technology in opencast coal mines operate with high noise level. This situation can cause a temporary or permanent noise-induced hearing loss (NIHL) on mine employees.

Sound is defined as a physical phenomenon which is the pressure changes that ear can perceive caused by fluctuations in the air pressure of a vibrating source. On the other side, noise is defined as unwanted and unpleasant sounds. NIHL is the most common occupational disease in the EU (EU-OSHA, 2002).

A high level of noise in the working environment prevents communication between mine workers and causes an unfavorable working environment. Noise may also result in different a type of physical, physiological, work-related stress and, psychological effects on the workers. The most common consequence of noise exposure is especially permanent hearing loss called NIHL.

Noise levels that exceeding 89 dB(A) can cause NIHL and also working at high noise levels increase occupational accidents (Picard, Girard, Simard, Larocque, Leroux and Turcotte, 2008; Önder and İbrahimoglu, 2021).

According to DIRECTIVE 89/391/EEC, noise exposure level  $L_{ex,8h}$  defined as a-weighted equivalent sound pressure level for A during a working day. Noise parameters were defined as lower exposure action value  $L_{ex,8h}$  (dB(A))=80 dB(A); upper exposure action value  $L_{ex,8h}$  (dB(A))=85 dB(A) and exposure limit value  $L_{ex,8h}$  (dB(A))=87 dB(A) according to EU-Directive 2003/10/EC. In Turkey, the same lowest, highest exposure action levels and exposure limit levels were accepted considering this directive (Official Gazette, 2013).

Since the reasons of NIHLs of mine employees is a kind of complex and uncertain phenomenon, there is a need flexible and consistent methods to cope with it. A FIS based fuzzy logic method is one of the most popular artificial intelligence soft computing tools in almost all engineering research areas. This method can give more realistic results easily and with a higher success rate of accurate prediction than other methods including complexity and uncertainty. Thus, a FIS based fuzzy logic method was used to the modeling of NIHL prediction in this study.

## 2. Literature Review

When the literature is examined, several studies have been done for NIHL in the mining sector. McBride

(2004) reviewed current best practices in NIHL prevention and emphasized essential of audiometric monitoring in the working environment of mining. According to this study, the pure tone audio diagram method is still the method of choice and the researcher also made attention to the fact that only a little work has been done about NIHL in the last 10 years. In another study, Sensogut and Cinar (2007) measured in total 95,000 noise levels in different panels of Western Lignite Corporation (WLC), Turkey. The obtained data were used to investigate noise propagation. Onder, Onder and Mutlu (2012) evaluated the factors affecting NIHL by using the hierarchical loglinear technique. The data set was categorized by occupation, age, experience, dB(A) noise level, and having NIHL on miners. According to the noise measurements and hearing tests on employees at a quarry and stone crushing-screening plant in Bilecik-Turkey, drivers in the 46-54 age group have a high probability of exposure to 70-79 dB(A) noise levels, and 4-11 years of experienced crusher employees were more prone to having NIHL due to exposing high noise levels as 90-99 dB(A). Chadambuka, Mususa and Muteti (2013) researched NIHL on employees at a major underground mine located in Zimbabwe-Africa. From the audiometric test results of 169 mine employees, 62 employees of this mine had NIHL. They stated that employees in plant engineering, plant processing, and underground workshop were exposed to hazardous noise level. Cinar and Sensogut (2013) have conducted noise measurements in 4 different mining sites located in Turkey. They also have conducted surveys on a total of 126 employees to define how much they are disturbed by the occupational noise. According to the results of surveys and noise level measurements, employees should be encouraged to use personal protective equipment (PPE) like earmuffs and plugs by researchers. Moroe, Khoza-Shangase, Kanji, and Ntlhakana (2018) investigated trends in the management of occupational NIHL in the African mining industry between 1994 to 2016 years. They emphasized that, need for more studies on the management of NIHL in the mining sector.

The fuzzy logic method is also used in similar studies for predicting and evaluating NIHL in the mining sector up to now. Nanda, Tripathy and Patra (2009) developed FIS-based noise prediction models for predicting far-field noise levels because of the operation of a specific set of mining machinery. Researchers stated that the Sugeno and Kang (TS) fuzzy model gives better results in predicting NIHLs than the Mamdani fuzzy model. Nanda and Tripathy (2007); Nanda, Tripathy and Patra (2008) used Sugeno and Kang (TS) and Mamdani fuzzy models to investigate field surveys of the United States Environmental Protection Agency (EPA) and National Institute for Occupational Safety & Health (NIOSH) results. Researchers predicted almost similar results in both models.

In this study, noise measurements were conducted with MASTECH MS6300 Multi-Functional Sound Level Meter and hearing loss tests were carried out for all employees in the enterprise. The FIS model was used on the fuzzy logic toolbox of the MATLAB environment to achieve the NIHL predicting purpose. The developed NIHL predicting fuzzy model has four inputs as; occupation of employee, age of employee, experience of employee, noise exposure level of employee ( $L_{ex,8h}$  (dB(A))); one output as NIHL test result of the employee. The fuzzy model was developed in six steps: (1) identification of input and output variables, (2) determination of the ranges of input and output variables, (3) fuzzing of input and output parameters (selecting the fuzzy class intervals) (4) designing a FIS model, (5) constructing if-then rules (relationships between inputs and output) and (6) choosing a suitable defuzzification procedure. Since this method used in the study used less in literature, this study may also lead to different future studies.

### 3. Fuzzy Logic Methodology

The fuzzy logic method was designed by Zadeh in 1965, firstly. FIS is a soft computing technique is suitable for subjective judgment and qualitative evaluation in dealing with processes of decision-making problems (Mutlu and Sarı, 2017; Mutlu, 2019). FIS based on digitizing human thoughts and judgments using membership degrees or functions and can be defined as strong tools to simulate nonlinear behaviors by employing linguistic fuzzy rules (Kuşan, AYTEKİN and ÖZDEMİR, 2010; Kurşunoğlu, 2022). FISs are recently more popular tools and have gained popularity for solving engineering issues because of their unique ability to predicting in difficult complex events (Razani, Yazdani-Chamzini and Yakhchali, 2013). In a classical set, an element is expressed as either belonging to a set or does not belong to a set. A third case is impossible, but such situations are often described as a paradox. Zadeh (1965) defined a fuzzy set as a class of objects with degrees of membership in a continuous array. In classical sets, the membership function can take the value 0 or 1, in fuzzy sets, the membership function takes a value in the closed range [0,1]. This case shows its flexibility in linguistic expressions, whereas in the crisp set each element takes a membership value of zero or one ( $\mu \in \{0,1\}$ ) (Yes, No condition), and the  $\mu_F$  function is expressed by the following equation (Danish and Onder, 2020):

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 1 & \text{if } x \in F \\ 0 & \text{if } x \notin F \end{cases} \quad (1)$$

where  $A$  is crisp set and  $\mu_A$  is membership of an element  $x$  in the crisp set  $A$ .

$$A = \{x, \mu_A(x) | x \in U\} \quad (2)$$

where  $U$  refers to the discourse universe defined for a particular problem; and  $\mu_A$  is the membership degree of the variable  $x$  is described as;

$$x(\mu_A(x) \rightarrow [0,1]) \quad (3)$$

According to the mathematical expression of fuzzy logic (Equation 3), if  $\mu_A(x) = 0$ ,  $x$  does not belong to  $A$ ; otherwise  $\mu_A(x) = 1$ , Indicates that  $x$  is a member of  $A$ .  $\mu_A(x) = 0.5$  value is the transition point of fuzzy set  $A$ . Concluding given values from the classical set is called fuzzification. In fuzzy systems, the decision and conclusion are possible with the if-then rule produced because inputs in fuzzy systems consist of more than two variables. The results obtained in fuzzy systems are interpreted with these rules and reached a new result. So, the construction of if-then rules based on expert knowledge and experience to achieve the purpose is the most important part of designing FIS. Membership degrees at the entrance determine the validity of the results and there is an implication logic in this determination. By combining the results obtained from institutions, aggregation is obtained, this is called the FIS engine. All these operations are shown visually in Figure 1.

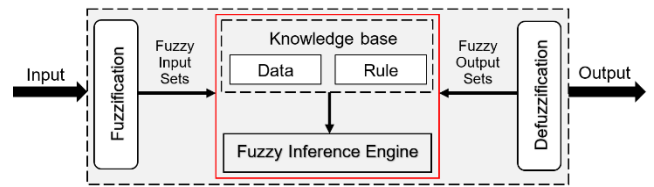


Figure 1. Structure of FIS

In the MATLAB environment, there are many types of membership functions are defined. The form of membership function of fuzzy sets can be linear (triangular or trapezoidal) or various non-linear forms depending on the goal (Acaroglu, Ozdemir and Asbury, 2008). These functions can describe as Equations (4-7) (Nanda et al., 2009). In this study, triangular and sometimes trapezoidal membership function of fuzzy sets were used.

$$Triangular(x; a, b, c) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b}, & b \leq x \leq c \\ 0, & c \leq x \end{cases} \quad (4)$$

$$Triangular(x; a, b, c) = \left( \max(\min\left(\frac{x-a}{b-a}, \frac{c-x}{c-b}\right), 0) \right) \quad (5)$$

$$Trapezoidal(x; a, b, c, d) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ 1, & b \leq x \leq c \\ \frac{d-x}{d-c}, & c \leq x \leq d \\ 0, & d \leq x \end{cases} \quad (6)$$

$$Trapezoidal(x; a, b, c, d) = \max\left(\min\left(\frac{x-a}{b-a}, 1, \frac{d-x}{d-c}\right), 0\right) \quad (7)$$

here  $a, b, c, d$  are the parameters of the linguistic value and  $x$  is the range of the input parameters. In the applications, there are mainly three applications based on linguistic rules, namely, the Mamdani systems, Sugeno or Takagi, Sugeno and Kang (TS) models, and Tsukamoto models (Mamdani and Assilian, 1975; Takagi and Sugeno, 1985; Sugeno and Kang, 1988). The differences between these FISs are in the consequents of their fuzzy rules, aggregation, and defuzzification. TS model is especially suitable for mathematical analysis, and is the calculation and gives exact numerical results (Takagi and Sugeno, 1985). A typical fuzzy rule is presented in Equation 8. Also, the functioning and mathematical system of the Sugeno inference systems are demonstrated in Figure 2.

$$TS: \text{If } X_1 \text{ is } A_{i1} \text{ and } A_{i2} \text{ THEN } Y \text{ is } Y = f(a, b) \quad (8)$$

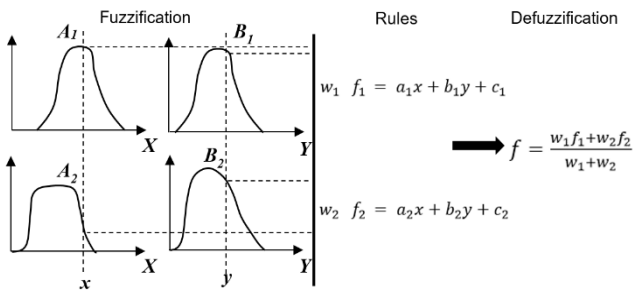


Figure 2. Sugeno FIS System (Jang, 1997)

$x$  and  $y$  input values specified in Figure 2 and the sample rule,  $A$  and  $B$  denote fuzzy sets for  $x$  and  $y$  inputs. The rules are the coefficient  $a, b$ , and  $c$  (can be obtained by the least-squares method) and  $w$   $d$  the degree of membership. In the defuzzification phase, results are generally obtained by using the weighted average method.

The reason why Sugeno inference system has been preferred in this study is that the structure of the Sugeno inference system is more flexible and against possible future changes in model, the complex defuzzification process in the Mamdani inference system is not present in the Sugeno inference system, and the Sugeno inference system is more suitable for functional analysis than the Mamdani inference system due to its simple rule outputs (Sylaios, Gitsakis, Koutroumanidis, and

Tsihrintzis, 2008; Razani et al., 2013). Apart from these reasons, in this study the data type is suitable for Sugeno inference system and also researchers stated that the Sugeno fuzzy inference system gives better results for predicting NIHLs (Nanda et al., 2009).

#### 4. Application Study

The increasing demand for raw materials in the construction and building sector, which is due to the fact that the building stock is not sufficient with the population increase in the cities, this causes the number of stone quarries to increase gradually in parallel with the needs of the sector (Mutlu and Kalkan, 2023). According to the current mine production data of the General Directorate of Mining and Petroleum Affairs (MAPEG), cement and construction raw materials constitute the main minerals needed in the sector (MAPEG, 2022).

The stone quarry (limestone) enterprise selected for the study produces with open-pit production method and is located in the eastern part of Aksaray province in the Central Anatolian Region of Turkey. The location map of the quarry is given in Figure 3. There is also a crushing-screening plant in the enterprise, and the annual production is approximately 550,000 tons. However, this planned production amount may vary depending on the increase or decrease in demand. Production activities is planned for this open-pit mine in the current license area for about 10 years. There are currently 19 employees working in different positions.

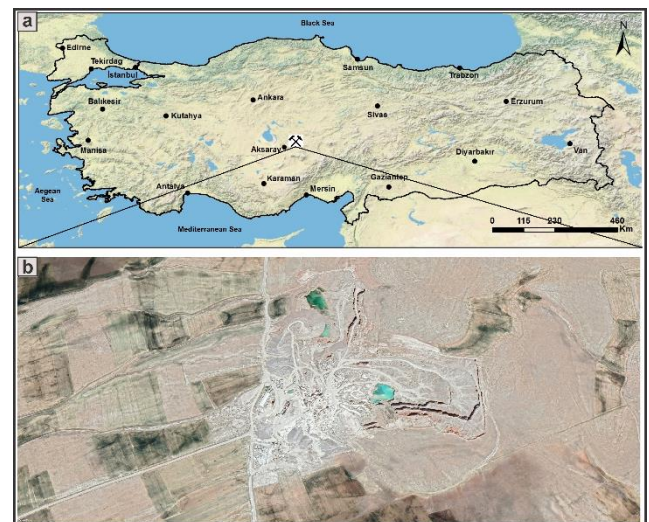


Figure 3. Location Map of the Study Area

The production phase consists of drilling the holes, producing run-of-mine ore by detonating the explosives placed in the drilled holes, in order to reduce run-of-mine ore with crusher excavators, and loading the crushed ore on trucks with excavators and sending it to the crushing-screening plant (Figure 4). Run-of-mine ore feed to the jaw crusher and re-sized in this plant.



While the +22 mm ore crushed in the impact crusher returns to the crusher, the limestone under the screen is classified into 0-4, 4-12 and 12-22 mm dimensions. Sizing process can also change depending to customer demands and supplied to the market.



Figure 4. Production in the Open-Pit Quarry

#### 4.1. Measurement Methodology and Audiometry Tests

Within the occupational health and safety law in Turkey, Regulation on Protection of Employees from Noise-Induced Risks, the determination of noise exposure levels of all employees is a legal requirement (Official Gazette, 2013). In such studies carried out in today's modern world, the trend of a standardization expectation is increasing day by day (Önder and İbrahimoglu, 2021). TS ISO 1999 standard, which was developed for the estimation of hearing loss caused by noise in the workplace, was also published in 2013 firstly to estimate the probability of employees experiencing hearing loss and it has taken TS 2607 ISO 1999 standard's place in 2020 again.

In order to measure the noise level of the different environments where 19 employees work, noise levels were measured by using "MASTECH MS6300 Multi-Functional Sound Level Meter" (Figure 5(a)). All noise measurements were made according to TS EN ISO 9612 "Measurement of Noise Exposure in Acoustic Working Environment and Principles for Evaluation" standard. Measurements were made based on task as in the TS EN ISO 9612 standard. Each measurement was made for at least 5 minutes. Also it is stated in the standard that at least 3 measurements should be made for each task (Figure 5 (b)) In this study, in order to create a more representative the FIS-based noise prediction model, 6 noise measurements were made for each task.

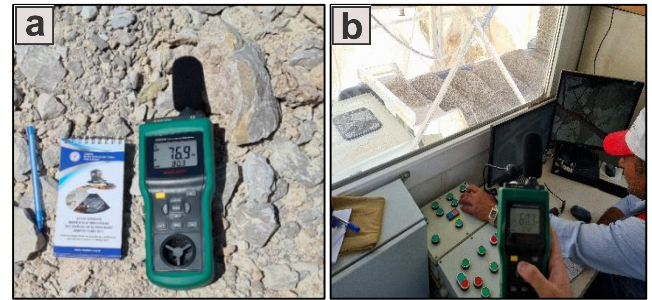


Figure 5. (a) MASTECH MS6300 Multi-Functional Sound Level Meter, (b) Sound Level Measurements in the Quarry Operations

For the accuracy and reliability of the measurements, the days when weather is windless and the temperature is optimum were preferred. There is no electrostatic and magnetic field that might affect the calibration of the device in the working environment. There was no one other than the expert who makes the noise level measurement and the personnel working in the environment. All measurements were made at the operators' and employees in the enterprise at ear position where there is most exposed to noise (Çalış, 2022). Equation 9 is used when converting the measured different noise levels to equivalent noise levels  $L_{eq}$  (Pathak, 1996; Şensöğüt and Çınar, 2006; Cinar and Sensogut, 2009).

$$L_{eq} = 10 \log \left( (1/n) (10^{L_1/10} + 10^{L_2/10} + \dots + 10^{L_n/10}) \right) \quad (9)$$

where  $n$  means the number of noise measurements in the enterprise,  $L_1 - L_n$  means the noise measured values dB(A) and  $L_{eq}$  means the measure equivalent noise level dB(A) (the average sound level for a certain period of time) (Cinar and Sensogut, 2013). Daily (8h) exposure noise level ( $L_{ex,8h}$  (dB(A))) can be calculate by using Equation 10 (TS 2607 ISO 1999, 2005; Erol, 2022a).

$$L_{ex,8h} = L_{eq} + 10 \log \frac{T_e}{T_o} \quad (10)$$

Where  $L_{eq}$  means equivalent noise level dB(A),  $T_e$  means active exposure on the working day period (hour) and  $T_o$  means reference exposure period (=8 hours).

Furthermore, audiometric tests (hearing tests) applied for all employees in the enterprise by hearing test center (Figure 6). Thus, the effect of the noise level in the working environment of the employees hearing functions were investigated.



The pure tone diagram method was used to determine hearing losses for left and right ears (Onder et al., 2012). Measured noise levels and audiometric test results of employees are given together in Table 1.

According to Table 1, 5 employees had NIHL in this enterprise. The average age was computed as 39.11 and the average experience was computed as 11.37 years approximately among employees. On the other hand, these employees commonly over 75.20 dB(A) daily sound level in different working areas.



Figure 6. Application of Audiometry Test for Employees

Table 1. Measured Noise Levels and Audiometric Test Results of Employees

Employee No	Occupation	Age (years)	Experience (years)	$L_{eq}$ (dB(A))	$L_{ex,8h}$ (dB(A))	NIHL (Yes/No)
1	Worksite Chief	28	5	57.7	57.2	No
2	Driver	53	7	81.3	80.7	No
3	Driver	46	10	79.6	79.0	No
4	Driver	45	8	80.8	80.2	No
5	Driver	48	13	82.2	81.6	No
6	Driver	32	11	84.1	83.5	Yes
7	Mining Machine Operator	25	6	74.4	73.9	No
8	Mining Machine Operator	32	8	77.8	77.2	No
9	Mining Machine Operator	51	25	91.6	91.0	Yes
10	Drilling Operator	32	12	87.1	84.1	Yes
11	Crusher Worker	53	24	94.8	94.2	Yes
12	Crusher Worker	47	22	94.8	94.2	Yes
13	Technical Personnel	41	17	76.4	75.2	No
14	Technical Personnel	30	9	76.4	75.2	No
15	Technical Personnel	58	12	76.4	75.2	No
16	Weigher	22	2	59.9	59.4	No
17	Weigher	26	2	59.9	59.4	No
18	Cook	39	15	58.5	57.9	No
19	Office Worker	35	8	50.3	49.7	No

#### 4.2. Designing the Fuzzy Inference System and Predicting Noise-Induced Hearing Losses

To examine the NIHL within the scope of this study by examining previous studies in the literature, the variables were determined such as occupation, age, experience, daily exposure level ( $L_{ex,8h}$ ) (Fişne, 2008; Mutlu, 2010; Onder et al., 2012; Önder, 2018; Erol, 2022b; Onder, Iroz and Onder, 2022;) The main structure of the hearing loss prediction FIS model is established in Figure 7. According to Figure 7, NIHL is a mathematical function of occupation, age, experience,  $L_{ex,8h}$  dB(A) in this study. In this model, input variables and output variables are linguistic variables that are described as words or sentences in a natural or synthetic language.

The occupation input variable, and hearing loss prediction output variable are coded to the FIS model. Table 2 presented these linguistic variable descriptions and fuzzy class intervals used in the FIS model. Worksite chief, cook and office worker occupation groups employees were excluded from this model because the measured noise levels in their working environment is very low. And, ranges of input variables have been determined by taking into account the maximum and minimum limits of the measured noise levels. Thus, the first three steps called (1) identification of input and output variables, (2) determination of the ranges of input and output variables and (3) fuzzing of input and output parameters (selecting of the fuzzy class intervals)) of designing the hearing loss prediction FIS model have been completed.

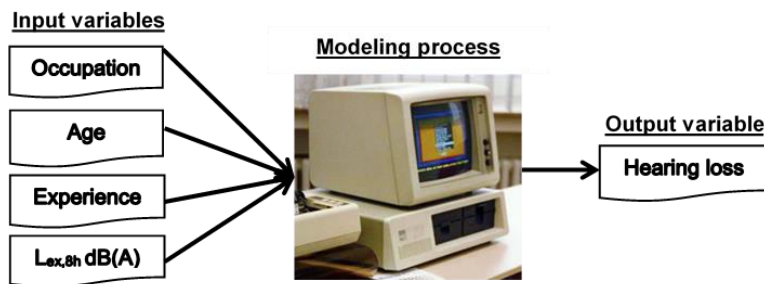


Figure 7. The Main Structure of Hearing Loss Prediction FIS Model

Table 2. Input and Output Linguistic Variables and Fuzzy Class Intervals Used in the FIS Model

Linguistic Variable Type	Linguistic Variable	Linguistic Variable Descriptions	Coding or Description of Linguistic Variable	Fuzzy Class Intervals
Output	NIHL	Noise-Induced Hearing Loss	0 = No	0
			1 = Yes	1
Input	$X_{\text{occupation}}$	Occupation	1 = Driver	[1, 1, 2]
			2 = Mining Machine Operator	[1, 2, 3]
			3 = Drilling Operator	[2, 3, 4]
			4 = Crusher Worker	[3, 4, 5]
			5 = Technical Personnel	[4, 5, 6]
			6 = Weigher	[5, 6, 6]
	$X_{\text{age(years)}}$	Age (years)	Young Age	[22, 22, 30, 34]
			Middle Age	[30, 34, 44]
			Elderly Age	[34, 44, 58, 58]
	$X_{\text{experience(years)}}$	Experience (years)	Low	[1, 1, 10, 15]
			Medium	[10, 15, 20]
			High	[15, 20, 25, 25]
	$L_{\text{ex,8h}} \text{dB(A)}$	Daily (8h) Exposure level dB(A)	Low	[59.4, 59.4, 70, 80]
			Moderate	[70, 80, 85]
			High	[80, 85, 94.2, 94.2]

Occupation categories have six categories as driver, mining machine operator, drilling operator, crusher worker, technical personnel and weigher. The age variable has four categories as young age, middle age, and elderly age (EUROSTAT, 2001; Dyussenbayev, 2017). Experience of employees' variable has three categories as low experienced, medium experienced, and high experienced. And lastly, the daily exposure level variable has four categories as low, moderate, and high (Table 2).

In the fourth step of FIS designing, Sugeno fuzzy algorithm was employed in the fuzzing process. In the literature, it was seen that triangular fuzzy sets and sometimes trapezoidal membership functions were chosen as a suitable membership function. According to Table 2, input and output variables have been defined in the FIS-based NIHL prediction model.

Fuzzy modeling was carried out under MATLAB environment. The main structure of the FIS-based NIHL prediction is shown in Figure 7, before. Also, the membership functions for occupation, age, experience, daily exposure level input parameters are shown in Figure 8 respectively. Due to their easy application and simplicity in soft computing, triangular membership functions (TMFs) and trapezoidal shape membership functions are applied in practice extensively.

Finally, in the last two steps of designing the FIS process, the if-then rules stage is the most critical. For this purpose, in total 162 (6x3x3x3) fuzzy if-then rules for predicting NIHL were entered into the model cautiously. Samples of the first 12 if-then rules for the FIS model are illustrated in Figure 9.

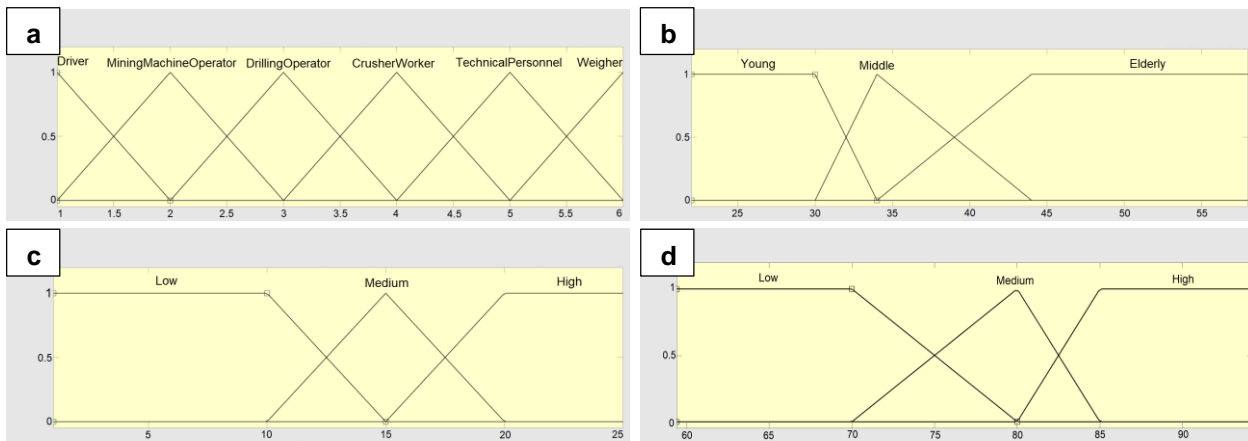


Figure 8. (a) Membership Functions of  $X_{occupation}$ , (b) Membership Functions of  $X_{age(years)}$ , (c) Membership Functions of  $X_{experience(years)}$ , (d) Membership Functions of  $X_{Lex,8h dB(A)}$

After forming the initial FIS structure, the NIHL predicting training step is accomplished, the FIS model was checked with real noise level measurements and audiometric tests results of employees. For employee whose input parameters are as: occupation = 3 (drilling

operator), age = 32, experience = 12 years, and  $L_{ex,8h} = 84.1$  dB(A); the output predicted as 0.82. For this prediction, this employee will have occupational NIHL (Figure 10).

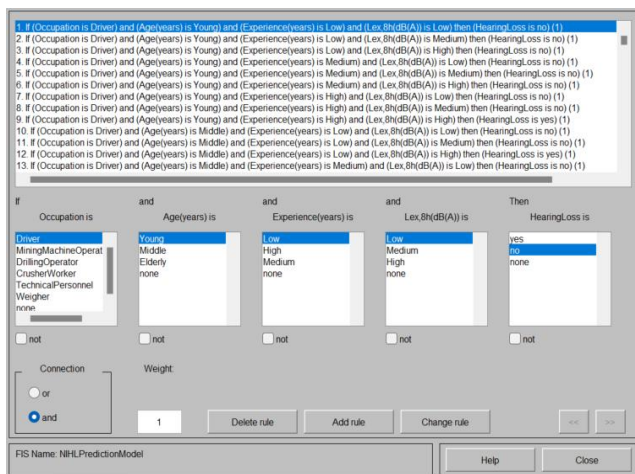


Figure 9. A Sample of If-Then Rules Generated for the FIS Model

**5. Results and Discussion**

The interdependency of input and output parameters obtained from the if-then rules are shown by using the control surface plot views are depicted in Figure 11. Figure 11 (a) demonstrates the interdependency of hearing loss on occupation and age, Figure 11 (b) demonstrates the inter dependency of hearing loss on occupation and experience, Figure 11 (c) demonstrates the interdependency of hearing loss on occupation and

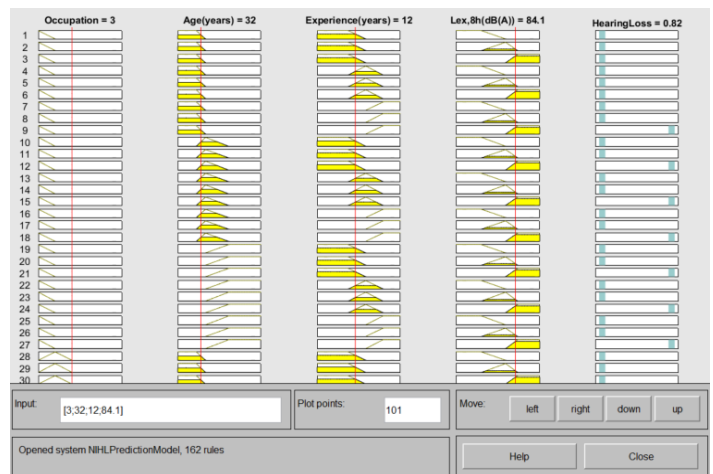


Figure 10. Graphical Indication of Fuzzy Reasoning Mechanism for the NIHL Predicting Model

$L_{ex,8h}$ , Figure 11 (d) demonstrates the interdependency of hearing loss on age and experience, Figure 11 (e) demonstrate the interdependency of hearing loss on age and  $L_{ex,8h}$ , and Figure 11 (f) demonstrate the interdependency of hearing loss on experience and  $L_{ex,8h}$ . To check performance and effectiveness of the developed FIS based fuzzy logic NIHL prediction model, field noise measurements and audiometry test results of employees were entered to the model. The comparison of real results and predicted fuzzy results were given in Table 3 together.

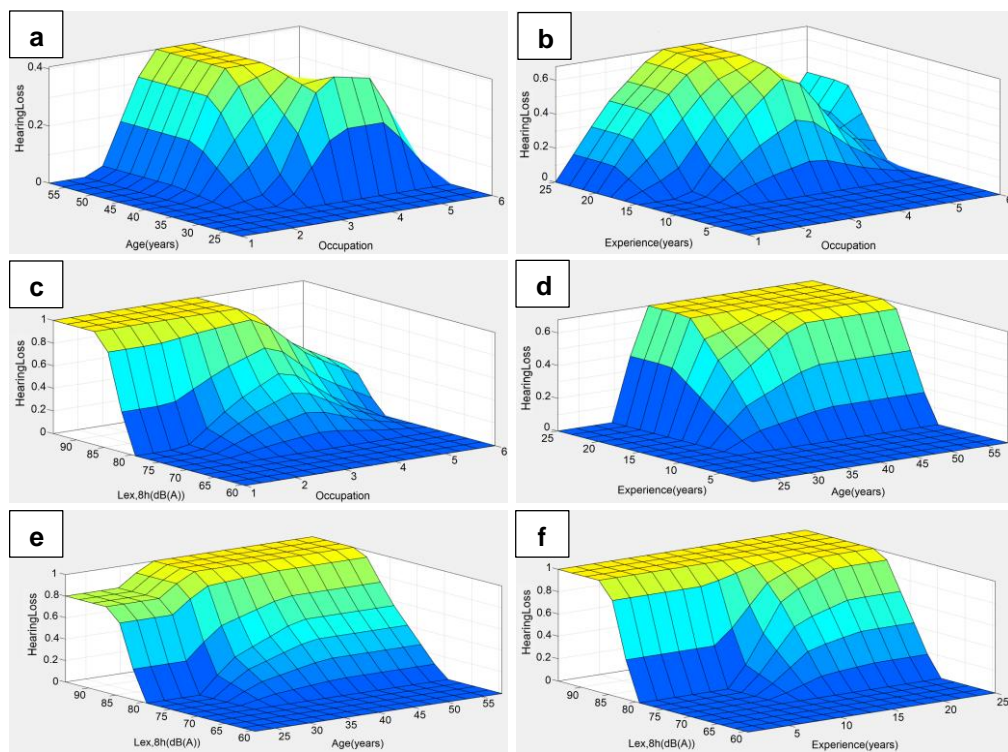


Figure 11. Surface Plot Views of Sugeno for the NIHL Predicting Model

Table 3. Comparison of the Real Audiometric Test Results and Fuzzy Logic Model Predictions

Inputs			Outputs		
Occupation Category Code	Age (years)	Experience (years)	Lex,8h (dB(A))	Audiometric Test Results	Fuzzy Logic Model Predictions
1	53	7	80.7	No	No (0.14)
1	46	10	79.0	No	No (0.00)
1	45	8	80.2	No	No (0.04)
1	48	13	81.6	No	No (0.32)
1	32	11	83.5	Yes	No (0.35)
2	25	6	73.9	No	No (0.00)
2	32	8	77.2	No	No (0.00)
2	51	25	91.0	Yes	Yes (1.00)
3	32	12	84.1	Yes	Yes (0.82)
4	53	24	94.2	Yes	Yes (1.00)
4	47	22	94.2	Yes	Yes (1.00)
5	41	17	75.2	No	No (0.09)
5	30	9	75.2	No	No (0.00)
5	58	12	75.2	No	No (0.00)
6	22	2	59.4	No	No (0.00)
6	26	2	59.4	No	No (0.00)

According to Table 3, the proposed FIS based fuzzy logic NIHL prediction model was used to predict the NIHLs of employees in this enterprise. When the fuzzy logic model prediction result is computed as  $\geq 0.5$ , that employee will likely has NIHL (this result indicated as "Yes"), otherwise not ( $< 0.5$ ) (this result indicated as "No"). As seen from this table, NIHLs of all employees in this enterprise have been correctly estimated, except for only one employee whose input parameters are as: occupation = 1 (driver), age = 32, experience = 11 years, and  $L_{ex,8h} = 83.5$  dB(A). The obtained results indicated

that the model has accurate prediction with a 94% success rate. This computed success rate shows that, the constructed FIS based fuzzy logic NIHL prediction model can predict the NIHLs of employees in this enterprise easily and effectively under fuzziness and ambiguity. And this model can be developing by adding new input parameters and changing the fuzzy class intervals range limits according to working conditions. It can be said that, such soft computing techniques like fuzzy logic has predicting ability in complex phenomena, as in this



paper, and can cope with engineering problems in easy way including complexity and uncertainty.

## 6. Conclusions

This paper describes a method of estimating NIHL of employees using fuzzy sets theory. A FIS-based NIHL estimating model has been considered as a function of occupation, age, experience, and daily exposure level ( $L_{ex,8h}$  dB(A)) was established.

The developed fuzzy model was constructed based on the Sugeno inference mechanism, and TMFs were usually chosen but sometimes trapezoidal membership functions were also preferred as an appropriate membership function in this study. According to the results, employees in crusher worker, drilling operator and mining machine operator occupational groups are more likely to be exposed to occupational NIHL in this enterprise. Having occupational NIHL age was computed as 43 and the average experience was computed as 18.8 years approximately among employees. On the other hand, these employees commonly over 83.5 dB(A) daily sound level in working areas. To check and validate the accuracy of the NIHL prediction FIS model, real measurement and audiometric tests results of employees were used and NIHLs have been predicted correctly with 94% success rate.

If it is not possible to eliminate, reduce, or control the noise at their source, it is necessary to protect the employees away from noise by encouraging the use of PPEs. Considering the measurement results, it is mandatory to use PPE for employees in the risk group in this enterprise. Employees should be trained and encouraged in the regular use of PPE. Another measure that can be taken against NIHL in the enterprise may be the provision of insulated equipment that will minimize the noise while providing the PPS in the new subcontractor employment contract. With a good work organization, the working hours of the employees can be adjusted according to the noise level in the workplace, and the employees can be prevented from getting temporary or permanent NIHL by taking a break for an appropriate period of time. Also, noise maps drawn according to the measurement results of noise sources should be updated periodically.

The established model can be further enriched by adding the new measurement results over time. The advantage of the fuzzy model is that human judgment and intuition can be effectively used for NIHL predicting, which helps field applications. Using similar methods, enterprises can take important steps toward predicting and reducing the NIHL that may occur in their employees. This study will guide the application of the fuzzy-based system by the company managers and occupational and safety experts and provide new

approaches and methodologies as the fuzzy system has enough flexibility in specific cases.

## Contribution of Researchers

The author contributed to the publication with the conceptualization, literature review, methodology, field measurements and investigation, software, writing - original draft, writing - review & editing, supervision, formal analysis and visualization.

## Conflict of Interest

No conflict of interest was declared by the author. This study complies with scientific research and publication ethics and principles.

## References

- Acaroglu, O., Ozdemir, L., & Asbury, B. (2008). A fuzzy logic model to predict specific energy requirement for TBM performance prediction. *Tunn. Undergr. Space Technol.* 23(5), 600-608. doi: <https://doi.org/10.1016/j.tust.2007.11.003>
- Chadambuka, A., Mususa, F., & Muteti, S. (2013). Prevalence of noise induced hearing loss among employees at a mining industry in Zimbabwe. *Afr. Health Sci.*, 13(4) 899-906. doi: <http://dx.doi.org/10.4314/ahs.v13i4.6>
- Cinar, I., & Sensogut, C. (2009). Evaluation of Environmental Factors Affecting Noise Propagation. *Environmental Monitoring and Assessment*, 153, 377-382. doi: <https://doi.org/10.1007/s10661-008-0364-9>
- Cinar, I., & Sensogut, C. (2013). Evaluation of noise measurements performed in mining sites for environmental aspects. *International Journal of Environmental Research*, 7(2), 383-386. Retrieved from [https://ijer.ut.ac.ir/article\\_616\\_a7e43c6ed4886249\\_57059e7839a7659c.pdf](https://ijer.ut.ac.ir/article_616_a7e43c6ed4886249_57059e7839a7659c.pdf)
- Çalış, S. (2022) Measurement in occupational health and safety noise, Ankara: İKSAD Publishing House, ISBN: 978-625-8423-96-9. Retrieved from [https://iksadyayinevi.com/wpcontent/uploads/2022/01/IS-SAGLIGI-VE-GUVENLIGINDE-OLCUM\\_GURULTU.pdf](https://iksadyayinevi.com/wpcontent/uploads/2022/01/IS-SAGLIGI-VE-GUVENLIGINDE-OLCUM_GURULTU.pdf).
- Danish, E., & Onder, M. (2020). Application of fuzzy logic for predicting of mine fire in underground coal mine. *Saf. Health Work* 11(3), 322-334. <https://doi.org/10.1016/j.shaw.2020.06.005>

- DIRECTIVE 89/391/EEC of 12 June 1989 on the introduction of measures to encourage improvements in the safety and health of workers at work [Internet]. Retrieved from [https://oshwiki.eu/wiki/Noise#cite\\_note-Lit\\_31-](https://oshwiki.eu/wiki/Noise#cite_note-Lit_31-)
- DIRECTIVE 2003/10/EC of 6 February 2003 on the minimum health and safety requirements regarding the exposure of workers to the risks arising from physical agents (noise) [Internet]. Retrieved from <https://eurlex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2003:042:0038:0044:EN:PDF>
- Dyussenbayev, A. (2017). Age periods of human life. *Advances in Social Sciences Research Journal*, 4(6). doi: <https://doi.org/10.14738/assrj.46.2924>
- Erol, İ. (2022a). Investigation of noise and vibration exposure of underground coal mining machinery operators. *Cukurova University Journal of the Faculty of Engineering*, 37(1), 55-65. doi: <https://doi.org/10.21605/cukurovaumfd.1094945>
- Erol, İ., (2022b). Investigation of occupational noise-induced hearing loss of underground coal mines. *Mining, Metallurgy & Exploration*, 39, 1045-1060 (2022). doi: <https://doi.org/10.1007/s42461-022-00585-1>
- EU-OSHA. (2002) European Agency for Safety and Health at Work. Data to describe the link between OSH and employability [Internet]. Retrieved from <https://osha.europa.eu/en/publications/report-data-describe-link-between-osh-and-employability-working-paper>
- EUROSTAT. (2001). European statistics on accidents at work (ESAW) methodology. 2001 Edition. Luxembourg: European Commission, Eurostat. Retrieved from [http://www.hsa.ie/eng/Topics/Statistics/ESAW\\_Methodology.pdf](http://www.hsa.ie/eng/Topics/Statistics/ESAW_Methodology.pdf)
- Fişne, A. (2008). Investigation of noise conditions, statistical analysis of noise exposure levels and risk assessment in Turkish Hard Coal Enterprise (Ph.D. thesis). Istanbul Technical University Graduate School of Natural and Applied Sciences, Istanbul (in Turkish)
- Jang, R.J.S., Sun, C.T., & Mizutani, E. (1997). Neuro-fuzzy and soft computing. Prentice-Hall, Upper Saddle River.
- Kurşunoğlu, N. (2022). Estimation of coal seam methane contents using fuzzy logic method. *Journal of Engineering and Architecture Faculty of Eskisehir Osmangazi University*, 30(3), 471-480. doi: <https://doi.org/10.31796/ogummf.1135126>
- Kuşan, H., Aytekin, O., & Özdemir, İ. (2010). The use of fuzzy logic in predicting house selling price. *Expert Syst. with Appl.*, 37(3) 1808-1813. doi: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2009.07.031>
- Mamdani, E.H., & Assilian, S. (1975). An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller. *Int. J. Man-Machine Stud.*, 7(1), 1-13. doi: [https://doi.org/10.1016/S0020-7373\(75\)80002-2](https://doi.org/10.1016/S0020-7373(75)80002-2)
- MAPEG. 2022. Retrieved from [https://www.mapeg.gov.tr/maden\\_istatistik.aspx](https://www.mapeg.gov.tr/maden_istatistik.aspx).
- McBride, D.I. (2004). Noise-induced hearing loss and hearing conservation in mining. *Occup. Med.*, 54(5), 290-296. doi: <https://doi.org/10.1093/occmed/kqh075>
- Moroe, N., Khoza-Shangase, K., Kanji, A., & Ntlhakana, L. (2018). The management of occupational noise-induced hearing loss in the mining sector in Africa: A systematic review-1994 to 2016. *Noise & Vibration Worldwide*, 49(5), 181-190.
- Mutlu, A. (2010). Determination of noise induced hearing lost in mining: a sample of stone crushing and screening plant (M.Sc. thesis) Eskisehir Osmangazi University Graduate School of Natural and Applied Sciences, Eskişehir (in Turkish)
- Mutlu, M. & Sarı, M. (2017). Multi-criteria decision making methods and use of in mining industry. *Scientific Mining Journal*, 56(4), 181-196. doi: <https://doi.org/10.30797/madencilik.391953>
- Mutlu, M. (2019) Classification of underground coal mine basins in Turkey with multicriteria decision making methods (Ph.D. thesis). Aksaray University Graduate School of Natural and Applied Sciences, Aksaray (in Turkish).
- Mutlu, M., & Kalkan, M. (2023). Evaluation of psychosocial risk factors of quarrying crushed stone employees. *Firat University Journal of Engineering Science*, 35(2), 443-453. doi: <https://doi.org/10.35234/fumbd.1257734>
- Nanda, S.K., & Tripathy, D.P. (2007). Noise-induced hearing loss modelling using fuzzy system in mining industry. *Noise & Vibr. Worldwide*, 38(2), 11-19. doi: <https://doi.org/10.1260/095745607780154336>

- Nanda, S.K., Tripathy, D.P., & Patra, S.K. (2008). A sugeno fuzzy model for noise induced hearing loss in the mining industry. *Noise & Vibr. Worldwide*, 39(10), 25-36. doi: <https://doi.org/10.1260/095745608786927368>
- Nanda, S.K., Tripathy, D.P., & Patra, S.K. (2009). Fuzzy inference system-based noise prediction models for opencast mines. *Int. J. of Min., Reclam. Environ.*, 23(4), 242-260. doi: <https://doi.org/10.1080/17480930802613969>
- Official Gazette. 2013. Regulation on protection of employees from noise-induced risks. No. 28721. Retrieved from <https://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2013/07/20130728-11.htm>
- Onder, M., Onder, S., & Mutlu, A. (2012). Determination of noise induced hearing loss in mining: an application of hierarchical loglinear modelling. *Environ. Monit. Assess.*, 184(4), 2443-2451. doi: <https://doi.org/10.1007/s10661-011-2129-0>
- Onder, M., Iroz, B.D., & Onder, S. (2022). Investigation of factors affecting hearing loss of open pit coal mine employees with categorical data analyses. *Scientific Mining Journal*, 61(1), 19-24. doi: <https://doi.org/10.30797/madencilik.977752>
- Önder, S. (2018) Investigation of noise induced hearing loss with logistic regression analyses in an underground metal mine. *Cukurova University Journal of the Faculty of Engineering*, 33(3), 11-22. doi: <https://doi.org/10.21605/cukurovaummfd.500496>
- Önder, S., & İbrahimoglu, F. (2021). Evaluation of noise induced hearing loss of a marble factory employees according to TS 2607 standard. *Scientific Mining Journal*, 60(2), 107-113. doi: <https://doi.org/10.30797/madencilik.796800>
- Pathak, K. (1996). Modelling and prediction of environmental noise levels near mechanised surface mines and quarries (Ph.D. Thesis), Imperial College, London.
- Picard, M., Girard, S. A., Simard, M., Larocque, R., Leroux, T., & Turcotte, F. (2008). Association of work-related accidents with noise exposure in the workplace and noise-induced hearing loss based on the experience of some 240,000 person-years of observation. *Accident Analysis & Prevention*, 40(5), 1644-1652. doi: <https://doi.org/10.1016/j.aap.2008.05.013>
- Razani, M., Yazdani-Chamzini, A., & Yakhchali, S.H. (2013). A novel fuzzy inference system for predicting roof fall rate in underground coal mines. *Saf. Sci.*, 55, 26-33. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ssci.2012.11.008>
- Sensogut, C., & Cinar, I. (2007). An empirical model for the noise propagation in open cast mines—A case study. *Appl. Acoust.*, 68(9), 1026-1035. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2006.04.016>
- Sugeno, M., & Kang, G.T. (1988). Structure identification of fuzzy model. *Fuzzy Sets Syst.*, 28(1), 15-33. doi: [https://doi.org/10.1016/0165-0114\(88\)90113-3](https://doi.org/10.1016/0165-0114(88)90113-3)
- Sylaios, G. K., Gitsakis, N., Koutroumanidis, T., & Tsihrintzis, V. A. (2008). CHLfuzzy: a spreadsheet tool for the fuzzy modeling of chlorophyll concentrations in coastal lagoons. *Hydrobiologia*, 610, 99-112. doi: <https://doi.org/10.1007/s10750-008-9358-4>
- Şensögüt, C., & Çınar, İ. (2006). Investigation of the noise propagation in the surface mines by a model developed. *Mining*, 45(3) 37-33. Retrieved from <http://www.mining.org.tr/en/download/articlefile/375505>
- Takagi, T., & Sugeno, M. (1985). Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 15(1), 116-132. doi: <https://doi.org/10.1109/TSMC.1985.6313399>
- TS 2607 ISO 1999. (2005). Acoustics - Determination of occupational noise exposure and estimation of noise-induced hearing impairment. ISO, Ankara (in Turkish).
- TS EN ISO 9612. (2015). Measurement of Noise Exposure in Acoustic Working Environment and Principles for Evaluation" standards. Ankara (in Turkish).
- TS ISO 1999. (2020). Estimation of Acoustic-Noise-induced hearing loss. ISO, Ankara (in Turkish).
- Zadeh, L.A. (1965). Fuzzy sets. *Inf. and Control*, 8(3), 338-353. doi: [https://doi.org/10.1016/S0019-9958\(65\)90241-X](https://doi.org/10.1016/S0019-9958(65)90241-X)

## ALEV SPREY PİROLİZİ İLE İÇİ BOŞ $Al_2O_3$ KÜRECİKLERİN SENTEZLENMESİNDE BAŞLANGIÇ KİMYASALI OLARAK KULLANILAN EMÜLSİYONLARIN MORFOLOJİ ÜZERİNE ETKİLERİ

Ertuğrul İŞLEK<sup>1</sup>, Hüseyin Boğaç POYRAZ<sup>2</sup>, İsmail Özgür ÖZER<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup>Eskişehir Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Bölümü, Eskişehir, Türkiye

<sup>1</sup> ORCID No: <https://orcid.org/0000-0001-6151-8047>

<sup>2</sup> ORCID No: <https://orcid.org/0000-0001-5351-6658>

<sup>3</sup> ORCID No: <https://orcid.org/0000-0002-5935-4474>

Anahtar Kelimeler	Özet
Alev Sprey Pirolizi Emülsiyon İçi Boş Kürecik Alümina PEG-30	<i>Bu çalışmada, Alev Sprey Pirolizi (ASP) metodunun içi boş <math>Al_2O_3</math> küreciklerin sentezinde kullanılabilirliği incelenmiştir. Nihai partikül sentezini sağlayacak başlangıç kimyasal reaktöre emülsiyon formunda beslenmiştir. Emülsiyonlar, alüminyum nitrat sulu çözeltilerinin, hacimce %9,4 ile %18,8 arasında değişen konsantrasyonlarda yüzey etken madde (PEG-30 dipolihidroksistearat) içeren ksilen sisteminde dağıtılması ile elde edilmiştir. Nitrat çözeltisi/ksilen oranı 1:2 – 1:4 aralığında değiştirilmiş ve çalışılan her oranda artan PEG-30 miktarının dağılan faz boyutunu azalttığı ve emülsiyon kararlılığını arttırdığı gözlenmiştir. Hazırlanan emülsiyonlar sabit yanma koşullarında reaktöre beslenmiştir. Partiküllerin fiziksel ve kimyasal analizleri taramalı elektron mikroskobu (SEM) ile yapılmıştır. Analizlerde, kullanılan her bir sistem için, dolu partiküller ile birlikte içi boş küreciklerin bir arada bulunduğu heterojen bir yapı gözlenmiştir. Emülsiyonlardaki normal dağılıma göre daha geniş ve bimodal dağılıma sahip partiküller, emülsiyon üniform yapısının reaktörde korunamadığını ve/veya oluşan farklı yanma koşullarının damlacıktan-partiküle ve gazdan-partiküle olmak üzere iki farklı mekanizmaya sebep olduğunu göstermiştir. Bütünlüğünü koruyan içi boş partiküllerin belirli boyutun altında oluşabildiği, iri boş partiküllerin ise deforme oldukları gözlenmiştir.</i>

### EFFECTS OF EMULSION PRECURSORS ON THE MORPHOLOGY OF HOLLOW $Al_2O_3$ PARTICLES SYNTHESIZED BY FLAME SPRAY PYROLYSIS

Keywords	Abstract
Flame Spray Pyrolysis Emulsion Hollow Particles Alumina PEG-30	<i>In this study, Flame Spray Pyrolysis (ASP) method was used to synthesize hollow <math>Al_2O_3</math> particles. The precursors were fed to the reactor in emulsion form. Emulsions were obtained by dispersing aluminum nitrate aqueous solutions in a xylene system containing surfactant (PEG-30 dipolyhydroxystearate) at concentrations ranging from 9.4 vol. % to 18.8 vol. %. The nitrate solution/xylene ratio was changed in the range of 1:2 – 1:4. It was observed that increasing amount of PEG-30 in all emulsion concentrations decreased the dispersed phase size and increased the emulsion stability. Prepared emulsions were fed to the reactor under constant combustion conditions. Physical and chemical analyzes of the particles were made by scanning electron microscopy. In the analyses, a heterogeneous structure consisting of solid and hollow particles was observed. Particles with a larger and bimodal distribution than the normal distribution in emulsions showed that the uniform structure of the emulsion could not be maintained in the reactor. These results may also indicate a large temperature gradient in the reactor causing two different mechanisms: droplet-to-particle and gas-to-particle. It has been observed that hollow particles that maintain their integrity can form below a certain size, while large hollow particles are deformed.</i>

Araştırma Makalesi

Research Article

Başvuru Tarihi : 28.03.2023

Submission Date : 28.03.2023

Kabul Tarihi : 25.07.2023

Accepted Date : 25.07.2023

\* Sorumlu yazar: [ertugrulislek@eskisehir.edu.tr](mailto:ertugrulislek@eskisehir.edu.tr)

<https://doi.org/10.31796/ogummf.1272408>



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

İnorganik içi boş kürecikler farklı uygulamalarda proses verimliliğinin artırılması ve enerji kayıplarının azaltılması için kullanılan ısı yalıtım malzemeleridir. Organik benzerlerine göre daha yüksek yapısal ve ısı dayanım gerektiren koşullarda kullanılabilirler. Isı yalıtım dışında ilaç taşınımı, biyo-kapsülleme, fonksiyonel kompozit toz üretimi ve katalizör gibi uygulamalarda da kullanım potansiyelleri bulunmaktadır (Chen, Ding, Wang ve Shao 2004; Fuji, Han ve Takai 2013; Prieto ve diğ., 2016; Sandberg, Gao, Jelle ve Gustavsen 2013; Tartaj, Morales, Veintemillas-Verdaguer, Gonzalez-Carreno ve Serna 2003; Sharma ve Polizos 2020).

İnorganik içi boş partiküllerin sentezi basit iki temel mekanizma üzerine kuruludur; i) bir şablon üzerinde kısmi sürekliliği sağlanarak sentezlenen matrinden, sentez sonunda şablonun ısı veya kimyasal işlemler ile uzaklaştırılması, ii) kullanılan şablonun nihai fazı oluşturacak reaksiyon sırasında harcanması. Bu yöntemlerin ilkinde şablon olarak organiklerin kullanımı oldukça yaygındır. Caruso, Caruso ve Möhwald (1998), koloidal polistiren üzerine kontrollü ve tekrarlı bir şekilde SiO<sub>2</sub> partiküllerini biriktirdikten sonra uyguladıkları kalsinasyon işlemiyle farklı duvar kalınlıklarına sahip nanometre mertebesinde içi boş partiküller elde etmişlerdir. Imhof (2001) ise, hazırladığı katyonik polistiren kürecikler üzerine TiO<sub>2</sub> partiküllerini başarıyla biriktirmiş ve ardından hem kalsinasyon hem de kimyasal çözünme yoluyla polistiren şablonları uzaklaştırarak içi boş küreler elde etmiştir. Boş kürecik üretiminde kullanılan ikinci mekanizmaya Yin ve arkadaşlarının Kirkendall etkisini kullandıkları proses çarpıcı bir örnek olarak verilebilir (Mel, Nakamura ve Bittencourt 2015). Kirkendall etkisine dayalı proses, metal nanopartikülün yüksek sıcaklık altında genellikle kükürt, selenyum, oksijen, fosfor temelli başlangıç kimyasallarına maruz bırakılması sonucu difüzyon çifti oluşturmasıyla başlar (Wang, Dahl ve Yin 2013; Vais ve Heli 2016). Metal katyonlarının dışa doğru difüzyonu, görece büyük çaptaki anyonların içe doğru difüzyonundan çok daha hızlı olduğu için elektrostatik denge, katyon difüzyonuna boşluk taşınımının eşlik etmesi ile sağlanır. Bu boşluklar aşırı doygun hale gelerek birleşir ve içi boş partikül oluşumu ile sonuçlanır. Yin ve arkadaşları sülfür solüsyonunun sıcak kobalt kristallerine enjekte edilmesiyle içi boş CoS partikülleri elde etmiştir (Mel ve diğ., 2015). Kirkendall etkisi, CdS (Cabot ve diğ., 2008), CdSe (Cabot, Ibanez, Guardia ve Alivisatos 2009), Co<sub>3</sub>O<sub>4</sub> (Ha, Islam ve Robinson 2012), SnO<sub>2</sub> (Lee ve diğ., 2012), Ni<sub>2</sub>P (Popczun ve diğ. 2013) gibi farklı bileşimlerde içi boş partiküllerin sentezinde de kullanılmıştır. Bu yöntemlere ek olarak, nano boyutta partiküllerin sentezinde kullanılan Alev Sprey Pirolizi (ASP) yöntemi de son yıllarda içi boş küreciklerin üretiminde kullanılmaya başlanmıştır. Yöntem yanma prosesi esaslı

olması ile yukarıdaki örneklerden ayrılrsa da süreçteki içi boş partikül oluşum mekanizmaları temelinde aynıdır. ASP yönteminde yanma entalpisi yüksek bir çözücü içerisinde çözünmüş başlangıç hammaddesi reaktöre taşıyıcı bir gaz (oksijen, hava vb.) yardımıyla aerosol formunda iletilir. Reaktör çevresinde oluşturulan pilot alevi aerosol halindeki başlangıç hammaddesini tutuşturur. Başlangıç hammaddesinin buharlaşması veya dekompozisyonu sonrası meydana gelen çekirdeklenme, sinterlenme veya yine difüzyona dayalı farklı mekanizmaları takip ederek nihai partikülleri oluşturur (Madler, 2004; Strobel, Baiker ve Pratsinis 2006; Teoh, 2007; Teoh, Amal ve Madler 2010; Wegner, Schimmöller, Thiebaut, Fernandez ve Rao 2011; Strobel ve Pratsinis 2011). ASP'de çözücünün buharlaşma sıcaklığına göre daha yüksek dekompozisyon sıcaklığına sahip metal tuzu veya metal-organik başlangıç kimyasalı ve ilgili çözücü ile başlangıç kimyasalından oluşmuş düşük yanma entalpili bir çözelti, doğrudan damlacıktan çekirdeklenmeye neden olabilir. Damlacık yüzeyinde çökelen katı faz, çözücünün sistemden uzaklaşması ile içi boş partiküllerle sonuçlanır. Ancak, çözücünün sistemden uzaklaşırken yarattığı buhar basıncı genelde bu partikülleri deforme edecek veya parçalayacak kadar yüksektir (Teoh, 2007; Teoh ve diğ., 2010). Tani, Watanabe ve Takatori (2003) çok daha kontrollü proseslerin, başlangıç kimyasalı olarak emülsiyon kullanımı ile mümkün olduğunu göstermişlerdir. Çalışmalarında farklı alüminyum tuzlarının sulu çözeltilerini, heksadirisinolat kullanarak kerosen içinde dağıtmışlar ve hazırladıkları emülsiyonları ASP reaktörüne besleyerek mikron altı içi boş alümina kürecikler üretmişlerdir. Tani ve diğ. (2003), boş küre oluşumunu, yanma süresince emülsiyondaki dağılan faz etrafında çökelen katıdan çözücünün uzaklaşması ve yanma süresince ergiyen nitratin kabarması şeklinde iki farklı mekanizma ile açıklamışlardır. Kullanılan tuz konsantrasyonunun, sorumlu mekanizma üzerinde etkin olduğu bilinmesine rağmen çalışmada tek bir konsantrasyon kullanılmıştır. Hem oluşum mekanizmalarının anlaşılması hem de içi boş kürecik sentezinde potansiyel gösteren ASP sisteminde kontrolün artırılması için farklı kimyasal ve konsantrasyonların partikül üzerindeki etkilerinin araştırılması gerekmektedir. Bu çalışmada, farklı bir emülsiyon sisteminin değişen dağıtıcı ve dağılan faz oranları ile değişen tuz konsantrasyonuna karşı toz özellikleri üzerine etkileri incelenmiştir. Tani ve diğerlerinin (2003) çalışmalarından farklı olarak hem değişen tuz konsantrasyonunun hem de farklı yanma koşullarının etkileri literatüre yeni sonuçlar kazandıracaktır.

## 2. Yöntem

Bu çalışmada, araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur. Deneysel çalışmalar kapsamında nihai  $Al_2O_3$  bileşenine ulaşmak için başlangıç kimyasalı olarak alüminyum nitrat nanohidrat ( $Al(NO_3)_3 \cdot 9H_2O$ , Merck, Almanya) tuzu kullanılmıştır. Alüminyum nitrat tuzları deiyonize suda çözülerek 0.2 M ve 0.3 M derişimlere sahip sulu çözeltiler elde edilmiştir. Elde edilen nitrat çözeltileri hacimce %9,4, %14 ve %18,8 oranında yüzey etken malzeme (PEG-30 dipolihidroksistearat, Cithrol DPHS, Croda) içeren ksilen (Baker Xylene, J.T. Baker, ABD) sistemine ilave edilerek sabit karıştırma hızı ve süresinde dağıtılmış ve reaktöre beslenecek emülsiyonlar hazırlanmıştır. Hazırlanan emülsiyonlarda nitrat çözeltisi/ksilen oranı ise 1:2 - 1:4 aralığında değiştirilmiştir. Hazırlanan emülsiyonlarda dağılan faz boyut ölçümü, iki cam lamel arasına belirli hacimde damlatılan sistemin optik mikroskop analizi ile yapılmıştır. Analizlerde iki boyutlu olarak ölçülen boyut emülsiyonda küresel olarak dağılan fazın gerçek boyutuna,  $V$ 'nin emülsiyon hacmi ve  $A$ 'nın lamel yüzey alanını gösterdiği;

$$D_{küre\ çapı} = 0,91 \times (D_{ölçülen} \times V/A)^{1/3} \quad (1)$$

eşitliği (Eş.1) ile çevrilmiştir. Burada rapor edilmeyen düşük etken madde denemelerinde düşük emülsiyon kararlılığı gözlemlendiği için hazırlanan tüm emülsiyonlar sedimentasyon testine tabi tutulmuştur. Sedimentasyon testleri 10 ml hacmindeki cam tüplerde askıda kalan yüksekliğin gözlemlenmesi ile yapılmıştır.

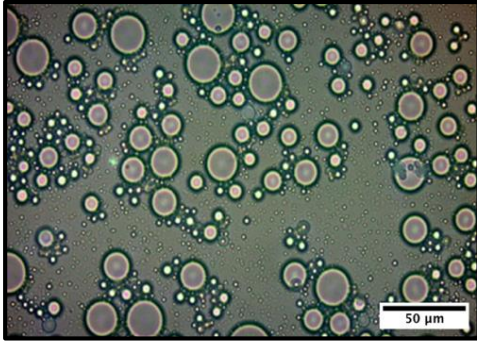
Toz sentezi çalışmalarında genel görünümü Şekil 1'de sunulan ASP reaktörü kullanılmıştır. Reaktörde pilot alevini oluşturan metan ve oksijen gazları sırasıyla 3 l/dk. ve 4.5 l/dk. akış hızlarında kullanılmıştır. Emülsiyonlar reaktöre peristaltik pompa yardımıyla 5 ml/dk. hızı ile beslenmiştir. Emülsiyon nozul çıkışına 10 l/dk. akış hızı ile beslenen oksijen gazı ile aerosol formuna getirilmiştir. Gaz akış hızları kütle akış kontrol cihazlarıyla sağlanmış ve deney süresince emülsiyon besleme hızlarıyla birlikte sabit tutulmuştur. Denemeler küçük hacimlerde gerçekleştirildiği için tozlar, toz toplama ünitesi yerine Şekil 1'de görüldüğü gibi reaktör tüpündeki birikimden toplanmıştır. SEM (Zeiss, Supra VP50) analizlerinde kullanılacak miktar reaktör içerisine yerleştirilen cam lameller üzerinde biriktirilmiş ve lamellerin altın/paladyum kaplanması ile doğrudan analize sokulmuştur. Elde edilen partiküllerin yüzey morfolojisi ve partikül boyutları 5 kV hızlandırma voltajında ikincil elektron detektörüyle incelenirken, kimyasal analizleri ise 20 kV hızlandırma voltajında enerji dağılımlı x-ışınları spektroskopisiyle (EDX) gerçekleştirilmiştir.



Şekil 1. Sentezlerde kullanılan ASP reaktörünün genel görünümü (Tozun toplandığı bölgenin raporlanması için sunulmuştur).

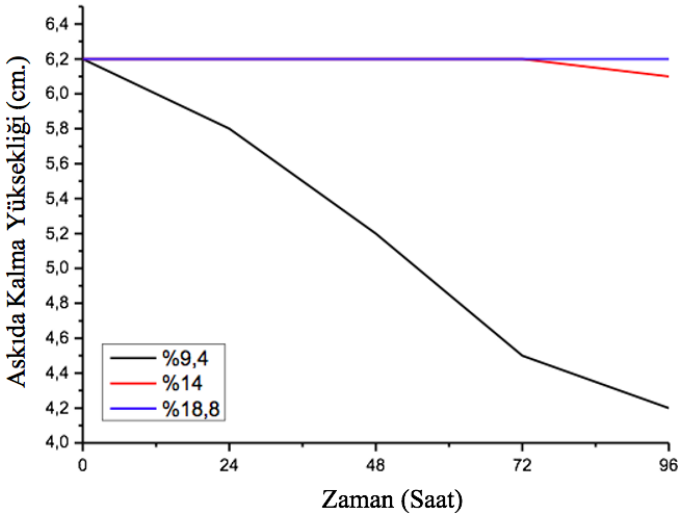
## 3. Bulgular ve Tartışma

Şekil 2'de düşük yüzey etken madde oranı ile hazırlanmış emülsiyona ait optik mikroskop görüntüsü sunulmuştur. Mikroskop görüntüsünden görüldüğü üzere dağılan fazın boyutu oldukça geniş aralıkta değişmektedir. İnce damlacıklar güvenilir bir ölçüm alınmasını zorlaştırdığı için veriler şu aşamada ortalama boyut ve dağılım yerine kümülatif olarak değerlendirilmiştir. Çalışılan tüm yüzey etken madde oranlarında ölçüm değerlerinin dönüştürülmesi (Eş.1) sonucu elde edilen  $d_{90}$  değeri  $10 \mu m$ 'nin altındadır. Emülsiyondaki dağılan fazlardan her biri, yanma sırasında reaksiyonun gerçekleşeceği "sistem" olarak tanımlanabilir. Bu durumda dağıtıcı faz, yani bu çalışmada yakıt olarak kullanılan ksilen, yanma süresince "çevre" olarak davranacaktır. Çevre ile sistem arasındaki ısı ve kütle transferinde temel rolü oynayacak "sınır" ise; ksilen ile nitrat çözeltisi yüzey enerjilerini dengeleyerek emülsiyon oluşmasını sağlayan yüzey etken madde zarından ziyade yüksek olasılık ile yanma sırasında çözüldüğü su buharı olacaktır. Tanımlanan sistem, çevre ve sınırın karmaşık yapısı ve alevdeki akışın getirdiği dinamik koşullar emülsiyon özellikleri ile nihai partikül özelliklerini ilişkilendirmeyi güçleştirmektedir. Ancak, reaksiyon sistemi olması bakımından dağılan faz boyut kontrolünün nihai partikül boyut kontrolü anlamına da geleceği açıktır. Bu nedenle, emülsiyon sistemlerinin güvenilir karakterizasyonu üzerine çalışmalarımız sürdürülmektedir.



Şekil 2. Düşük yüzey etken madde oranı ile hazırlanmış emülsiyona ait optik mikroskop görüntüsü (çalışmada raporlanan yüzey etken madde oranları dışında net görüntü veren bir orana aittir).

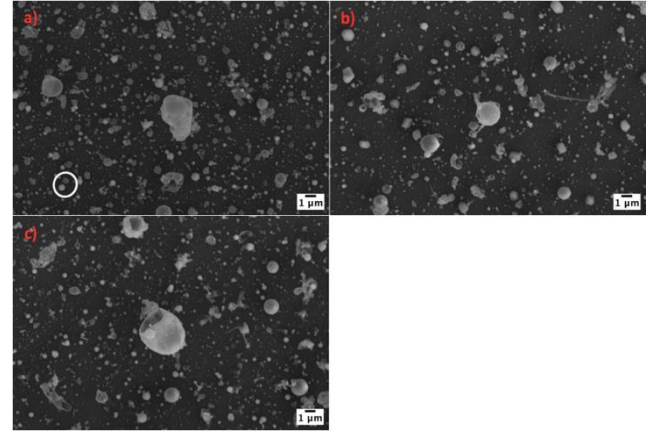
Şekil 3'te farklı oranlarda yüzey etken madde içeren (hacimce %9,4, %14 ve %18,8) emülsiyonların sedimentasyon sonuçları sunulmuştur. Sonuçlar, artan yüzey etken madde oranına bağlı olarak emülsiyon kararlılığının arttığını göstermektedir. Hacimce %9,4 oranında yüzey etken madde içeren emülsiyonda 6 saatte belirgin çökme gözlenirken diğer iki sistem 72 saate kadar kararlı kalmışlardır. Artan emülsiyon kararlılığı aynı zamanda dağılan faz boyutunun da düştüğüne işaret etmektedir. Dolayısıyla %9,4 etken madde içeren emülsiyonun diğer iki sistemden belirgin derecede yüksek dağılan faz boyutuna sahip olduğu söylenebilir.



Şekil 3. Hacimce %9,4, 14 ve 18,8 oranında yüzey etken madde içeren emülsiyonların sedimentasyon sonuçları.

Şekil 4'te sırası ile a) %9,4, b) %14 ve c) %18,8 oranlarında yüzey etken madde ile hazırlanan emülsiyonların ASP reaktörüne beslenmesi ile elde edilen partiküllere ait SEM görüntüleri sunulmuştur.

Emülsiyon sistemlerinin her birinde nitrat çözeltisi/ksilen oranı 1:2 ve çözelti konsantrasyonu 0,3 M olarak tutulmuştur.



Şekil 4. a) %9,4, b) %14 ve c) %18,8 oranında yüzey etken madde ile hazırlanan emülsiyonlardan sentezlenmiş tozlara ait SEM görüntüleri.

Şekil 4'te sunulan her bir SEM görüntüsü, emülsiyonlarda gözlenen geniş damlacık boyut dağılımına benzer şekilde mikro merteben nano mertebeye kadar geniş bir partikül dağılımı sergilemektedir. Gözlenen geniş dağılım ASP sistemlerinde partikül oluşum mekanizmalarını açıklamada kullanılan gazdan-partiküle ve damlacıktan-partiküle taşınım sistemleri ile ilişkilendirilebilir. Gazdan-partiküle oluşum mekanizması başlangıç hammaddesinin buharlaşarak veya dekompoze olarak metal buharlarına dönüşmesini gerektirir ve nano-boyutta tozların sentezlenmesine imkân tanır. Diğer taraftan damlacıktan-partiküle dönüşümde ise reaktöre beslenen başlangıç hammaddesi kuruma ve katı hal reaksiyonlarından geçer ve tamamıyla buharlaşmamış damlacıklar mikron boyuttaki partikülleri meydana getirir. ASP reaktörlerinde sıklıkla oluşan geniş ısıl gradyan bu iki mekanizmanın aynı anda aktif olması ile sonuçlanabilir. Bu gradyana, reaktörün radyal eksen boyunca farklılık gösteren tozların askıda kalış süresi eklendiğinde geniş bir partikül dağılımı kaçınılmaz olabilir. SEM görüntüleri incelendiğinde gözlenen bir diğer sonuç; %9,4 oranında etken madde içeren sistemin emülsiyon davranışında sergilediği farklılığın bu sistemden elde edilen partikül özelliklerine yansımamasıdır. Bu gözlem, emülsiyonların aerosol haline getirildikten sonra özelliklerini koruyamadıklarına işaret ediyor olabilir. Bununla birlikte, emülsiyon karakteri aerosol haline getirildikten sonra korunmuş olsa dahi, ASP reaktöründeki geniş ısıl gradyan (alevin ortasındaki yüksek sıcaklık bölgesi ve uzun askıda kalış süresi ve çevresindeki nispeten daha düşük sıcaklık ve kısa askıda kalış süresi) elde edilen partiküllere emülsiyon davranışının yansımamasının diğer bir nedeni olabilir. Bu etkilerin araştırılması,

başka çalışmaların yapılması gerekliliğini ortaya koymaktadır. Partiküllerin morfolojileri incelendiğinde her bir sistemde boyut olarak genelden ayrılan deforme olmuş içi boş parçaların varlığı dikkat çekmektedir. Tespit edilen en büyük boyut emülsiyonlarda ölçülen maksimum dağılan faz boyutunu geçmemektedir. Emülsiyon sistemleri ile üretilen içi boş partiküller, literatürde açıklandığı üzere, çözücü buharlaşması sırasında damlacık yüzeyinde oluşan çekirdeklenme ve takibinde çözücünün sistemden uzaklaşması ile meydana gelebilir (Teoh, 2007; Teoh ve diğ., 2010). Çökelen katı fazın yeterli geçirgenliğe sahip olmadığı veya buharlaşmanın çok hızlı gerçekleştiği durumlarda partikül içinde biriken basınç içi boş küreciklerin patlamasına neden olabilir. Bu morfolojideki deforme olmuş veya parçalanmış partiküller her sistemde gözlenmiştir. Diğer taraftan, sentezlenen sistemlerde bütünlüklerini koruyan içi boş partiküllerin de yer alması beklenebilir. Şöyle ki; çözeltinin dağılan faz etrafında oluşan kabuktan kurtulma süresi partikül boyutu ile yakından ilişkilidir. Küçük boyutlu partiküllerde çözeltinin kabuk içerisinden uzaklaşması iri partiküllere göre daha hızlı olur. Bu da sürecin, sıcaklık çok yükselmeden tamamlanabileceği anlamına gelir. Sıcaklığın hem kabuk yoğunluğunu hem de basıncı etkilemesi beklenir. Düşük sıcaklıkta yüksek sıcaklığa göre daha düşük yoğunluğa sahip olan kabuk daha geçirgendir. Bu tipte bir kabuk basınç çok yükselmeden çözeltinin kaçmasına izin verebilir. Bununla birlikte, küçük boyuttaki kabukların büyük boyuttakilere göre mekanik olarak daha dayanıklı olması beklenir. Dolayısıyla, boyut küçüldükçe deforme olmamış içi boş partiküle rastlama ihtimalinin artması gerekir. SEM analizlerinde bu tür partiküllerin tespiti için dolaylı yöntemler kullanılabilir. Bunlardan ilki kontrast farkını referans alır. Bilindiği üzere ikincil elektron görüntüsünde kontrastın temeli topografi farkına dayanır. Ancak, her ikinci elektron görüntüsüne geri yansıyan elektron görüntüsü de katkıda bulunduğu için geri yansıyan elektron şiddetindeki farklılık kontrastı bazı durumlarda etkileyebilir. Örneğin; ikincil elektronlara göre daha derinden gelen geri yansıyan elektronlar, boş partiküllerin analizinde dolu partiküllerin analizine göre sinyale daha düşük katkı sağlarlar. Bu durumda aynı boyutta (veya aynı eğrilikte) iki partikülden boş olanı, dolu olana göre daha koyu renkte gözükebilir. Şekil 4 a'da çember içine alınan partiküllerin kontrast farkı aynı konum ve aynı boyuta sahip olmaları nedeni ile doluluk farkına bağlanabilir. Boş partikül tespitinde kullanılacak ikinci dolaylı yöntem farklı derinliklerden alınacak EDX verilerini referans alır. SEM'de hızlandırma voltajı kontrol edilerek demet-etkileşim hacmi ayarlanabilir ve gelen sinyaller partikül iç hacminin yorumlanmasında kullanılabilir. Şekil 4 a ve c'de sunulan SEM görüntülerindeki benzer boyut ve farklı kontrasta sahip tanelerde EDX analizleri yürütülmüştür. Boş tanelerin duvar kalınlığı yüksek olasılıkla çok ince olduğu için tek

bir hızlandırma voltajı ile alınan veriler sonuçların yorumlanmasında yeterli olmuştur. Analiz sonuçları Tablo 1 ve 2'de sunulmuştur. Her iki tablonun da ilk sütununda görülen Na, Mg, Si ve Ca pikleri tozların kaplandığı cam lamellerden gelmektedir. Benzer boyutlarda farklı kontrasta sahip partiküllerde yürütülen EDX analizlerinin sonuçlarında (Tablo 1 ve 2, ikinci sütunlar) ise bu elementlerde belirgin bir düşüş görülmektedir. Bu analizlerde cam bileşiminde yer alan elementlerin kayda değer miktarda azalması dolu hacmin elektron demeti-cam etkileşimini engellemesi şeklinde yorumlanabilir (Her iki tablonun her iki sütununda da yer alan oksijen miktarları tespit edilen katyonlara denk gelen stokiometriyi yaklaşık olarak karşılamaktadır).

Tablo 1. Hacimce %9,4 yüzey etken madde ile hazırlanmış emülsiyondan sentezlenen tozlara ait EDX analiz sonuçları.

Element (Atomik %)	İçi boş	İçi dolu
O	62,47	53,77
Na	7,27	1,08
Mg	1,44	-
Al	3,26	29,82
Si	23,51	2,89
Ca	2,06	-

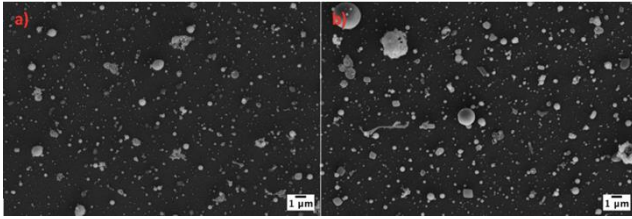
Tablo 2. Hacimce %18,8 yüzey etken madde ile hazırlanmış emülsiyondan sentezlenen tozlara ait EDX analiz sonuçları.

Element (Atomik %)	İçi boş	İçi dolu
O	64,15	66,07
Na	7,06	2,62
Mg	1,39	0,52
Al	6,98	23,28
Si	18,77	7,04
Ca	1,64	0,48

Şekil 5, a ve b'de sırası ile nitrat çözeltisi konsantrasyonunun 0,2 M ve 0,3 M olduğu emülsiyon koşulları ile yürütülen sentezlerde elde edilen partiküllere ait SEM görüntüleri sunulmuştur. İlgili emülsiyonlarda nitrat çözeltisi/ksilen oranı bir önceki sistemden farklı olarak 1:4 değerinde tutulmuştur. Sonuçlar kendi içlerinde nitrat molaritesi farkı, bir önceki sistem ile de yakıcı konsantrasyonu farkı gözetilerek karşılaştırılmıştır. SEM görüntülerinden

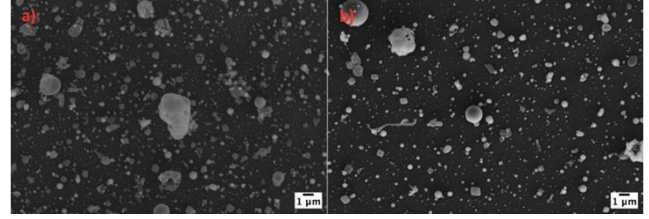


görüldüğü gibi nitrat konsantrasyonunun azaltılması ile (Şekil 5 a) genelden ayrılan iri boyutta partikül miktarı da azalmıştır. Bu sonuç, çözelti konsantrasyonunun düşmesi ile birlikte aşırı doygunluk noktasına daha geç ulaşılması ve ilişkili olarak ilk katı oluşumunun gecikmesine bağlanmıştır. İlk katı oluşumu gecikmesinin iri partikül oluşumu yanında genel partikül boyutunu da etkilemesi beklenir. Ancak, SEM görüntülerinde yer alan yüksek miktardaki ince partikül konsantrasyonunun, partikül boyut dağılımı analizlerini zorlaştırması, bu ilişkinin de ortaya koyulmasını güçleştirmektedir.



Şekil 5. Alüminyum nitrat çözeltisinin a) 0,2 M ve b) 0,3 M derişime sahip olduğu emülsiyon koşulları ile yürütülen sentezlerde elde edilen partiküllere ait SEM görüntüleri. İlgili emülsiyonlarda nitrat çözeltisi/ksilen oranı bir önceki sistemden farklı olarak 1:4 değerindedir.

Şekil 6, a ve b'de nitrat çözeltisi/ksilen oranının a) 1:2 ve b) 1:4 olduğu emülsiyon sistemlerinden elde edilen partiküllere ait SEM görüntüleri karşılaştırılmıştır. Her iki sistemde de nitrat çözeltisi derişimi 0,3 M olarak tutulmuştur. SEM görüntüleri yakından incelendiğinde azalan nitrat çözeltisine bağlı olarak ürün eldesinde belirgin bir düşüş görülmektedir. Nitrat çözeltisi yaklaşık %33'ten %20'ye düşürüldüğünde lamel kaplanma oranında da %25'e varan düşüş ölçülmüştür. Bu da aynı miktarda ürün eldesi için reaktör çalışma süresinin yine yaklaşık %25 oranında arttırılması anlamına gelmektedir. Yürütülen çalışmaların tümündeki ürün eldesinin genel düşüklüğü, nitrat çözeltisi/ksilen oranına bağlı olarak değişen toplam yanma entalpisi ve oluşan nihai faz arasındaki ilişkinin araştırılmasını da engellemiştir. Ancak, ulaşılan genel sonuçlar, ASP sisteminde başlangıç kimyasalı olarak emülsiyon kullanımının tek basamakta içi boş partikül sentezi için kullanılabilmesine ve emülsiyon özelliklerinin ayarlanması ile nihai partikül özelliklerinin istenen yönde kontrol edilebileceğine işaret etmektedir.



Şekil 6. Nitrat çözeltisi/ksilen oranının a) 1:2 ve b) 1:4 olduğu emülsiyon sistemlerinden elde edilen partiküllere ait SEM görüntüleri. Her iki sistemde de nitrat çözeltisi derişimi 0,3 M'dır.

#### 4. Sonuçlar

Bu çalışmada, ASP metodu ile içi boş  $Al_2O_3$  kürecikler sentezlenmiş ve sentezlerde kullanılan emülsiyon özelliklerinin nihai partikül özellikleri üzerine etkileri temel düzeyde incelenmiştir. Emülsiyonlarda dağılan faz boyutu yüzey etken madde konsantrasyonu ile kontrol edilmiştir. Sentezlenen partiküllerde tespit edilen maksimum boyut dağılan faz boyutunun daima altındadır. Dağılan fazın reaksiyon sistemi rolü oynaması gereği nihai partikül boyutu üzerinde belirgin etkisi olması beklenmektedir. Ancak, dağılan faz boyutunda güvenilir genel dağılım analizi yapılamadığı için nihai ürün-emülsiyon ilişkisi sadece maksimum boyut üzerinden değerlendirilmiştir. Çalışılan her bir sistemde içi boş partikül eldesi sağlanmıştır. Boyut olarak genelden belirgin şekilde ayrılan iri boş partiküller çoğunlukla parçalanmış formda elde edilmiştir. Partikül boyut dağılım analizi yapılamasa da ilk modun yer aldığı dağılım içinde bulunan partiküller bütünlüklerini korumuşlardır. Görece düşük boyutlu dağılan fazlardan oluştuğu düşünülen bu partiküller, çözeltinin daha erken sistemden uzaklaşmasına izin verme potansiyelleri ve iri partiküllere göre daha yüksek mekanik dayanımları ile bütünlüklerini korumuş olabilirler. Bu sonuç, emülsiyonlarda dağılan faz boyut kontrolü ile üniform dağılıma sahip bütünlüklerini koruyan içi boş partiküller sentezlenebileceğine işaret etmektedir.

#### Teşekkür

Bu çalışma, Türkiye Bilimsel Teknik Araştırma Kurumu (TÜBİTAK) tarafından desteklenen 315M528 numaralı proje kapsamında tasarlanıp imal edilmiş Alev Sprey Pirolyzi reaktörüyle ve yapılan çalışmalardan elde edilen birikimle gerçekleştirilmiştir. Yazarlar, deneysel çalışmalara katkıda bulunan Elif ÇELİKKARDEŞ'e, Sarp Yalın VURAL'a, Sema ALTUN'a ve Ahmet Furkan VAYNI'ye teşekkürlerini sunar.

#### Araştırmacıların Katkısı

Bu çalışmada; Ertuğrul İŞLEK, literatür araştırması, deneylerin gerçekleştirilmesi, sonuçların yorumlanması ve makale yazımı, Hüseyin Boğaç POYRAZ, sonuçların değerlendirilmesi ve makalenin yazılması, İsmail Özgür

ÖZER bilimsel yayın araştırması, makalenin oluşturulması, bir araya getirilmesi ve yorumlanması aşamalarında katkı sağlamışlardır.

### Çıkar Çatışması

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir.

### Kaynaklar

- Cabot, A., Ibanez, M., Guardia, P. & Alivisatos, A.P. (2009). Reaction regimes on the synthesis of hollow particles by the kirkendall effect. *Journal of American Chemical Society*, 131, 11326-11328. doi: <https://doi.org/10.1021/ja903751p>
- Cabot, A., Smith, R.K., Yin, Y., Zheng, H., Reinhard, B.M., Liu, H. & Alivisatos, A.P. (2008). Sulfidation of cadmium at the nanoscale. *ACS Nano*, 2 (7), 1452-1458. doi: <https://doi.org/10.1021/nn800270m>
- Caruso, F., Caruso, R.A. & Möhwald, H. (1998). Nanoengineering of inorganic and hybrid hollow spheres by colloidal templating. *Science*, 282 (5391), 1111-1114. doi: [10.1126/science.282.5391.1111](https://doi.org/10.1126/science.282.5391.1111)
- Chen, J.F., Ding, H.M., Wang, J.X. & Shao, L. (2004). Preparation and characterization of porous hollow silica nanoparticles for drug delivery application. *Biomaterials*, 25, 723-727. doi: [https://doi.org/10.1016/S0142-9612\(03\)00566-0](https://doi.org/10.1016/S0142-9612(03)00566-0)
- Fuji, M., Han, Y.S. & Takai C. (2013). Synthesis and applications of hollow particles. *KONA Powder and Particle Journal*, 30, 47-68. doi: <https://doi.org/10.14356/kona.2013009>
- Ha, D.H., Islam, M. A. & Robinson, R.D. (2012). Binder-free and carbon-free nanoparticle batteries: a method for nanoparticle electrodes without polymeric binders or carbon black. *Nano Letters*, 12, 5122-5130. doi: <https://doi.org/10.1021/nl3019559>
- Imhof A. (2001). Preparation and characterization of titania-coated polystyrene spheres and hollow titania shells. *Langmuir*, 17, 3579-3585. doi: <https://doi.org/10.1021/la001604j>
- Lee, Y., Jo, M.R., Song, K., Nam, K.M., Park, J.T. & Kang, Y.M. (2012). Hollow Sn-SnO<sub>2</sub> nanocrystal/graphite composites and their lithium storage properties. *ACS Applied Materials and Interfaces*, 4, 3459-3464. doi: [10.1021/am3005237](https://doi.org/10.1021/am3005237)
- Madler, L. (2004). Liquid-fed aerosol reactors for one-step synthesis of nano-structured particles. *KONA Powder and Particle Journal*, 22, 107-120. doi: <https://doi.org/10.14356/kona.2004014>
- Mel A.A.E., Nakamura, R. & Bittencourt, C. (2015). The Kirkendall effect and nanoscience: hollow nanospheres and nanotubes. *Beilstein Journal of Nanotechnology*, 6, 1348-1361. doi: [10.3762/bjnano.6.139](https://doi.org/10.3762/bjnano.6.139)
- Popczun, E.J., McKone, J.R., Read, C.G., Biacchi, A.J., Wiltrott, A.M., Lewis & N.S. Schaak, R.E. (2013). Nanostructured nickel phosphide as an electrocatalyst for the hydrogen evolution reaction. *Journal of the American Chemical Society*, 135, 9267-9270. doi: [10.1021/ja403440e](https://doi.org/10.1021/ja403440e)
- Prieto, G., Tüysüz, H., Duyckaerts, N., Knossalla, J., Wang, G.H. & Schüth, F. (2016). Hollow nano- and microstructures as catalysts. *Chemical Reviews*, 116 (22), 14056-14119. doi: [10.1021/acs.chemrev.6b00374](https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.6b00374)
- Sandberg, L.I.C., Gao, T., Jelle, B.P. & Gustavsen, A. (2013). Synthesis of hollow silica nanospheres by sacrificial polystyrene templates for thermal insulation applications. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2013, 1-6. doi: <https://doi.org/10.1155/2013/483651>
- Sharma, J. & Polizoş G. Hollow silica particles: recent progress and future perspectives (2020). *Nanomaterials*, 10 (8), 1-22. doi: <https://doi.org/10.1155/2013/483651>
- Strobel, R., Baiker, A. & Pratsinis, S.E. (2006). Aerosol flame synthesis of catalysts. *Advanced Powder Technology*, 17 (5), 457-480. doi: <https://doi.org/10.1163/156855206778440525>
- Strobel, R. & Pratsinis, S.E. (2011). Effect of solvent composition on oxide morphology during flame spray pyrolysis of metal nitrates. *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 13, 9246-9252. doi: 10.1039/c0cp01416h
- Tani, T., Watanabe, N. & Takatori, K. (2003). Morphology of oxide particles made by the emulsion combustion method. *Journal of the American Ceramic Society*, 86 (6), 898-904. doi: <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.2003.tb03394.x>
- Tartaj, P., Morales, M.P., Veintemillas-Verdaguer, S., Gonzalez-Carreno, T. & Serna, C.J. (2003). The preparation of magnetic nanoparticles for applications in biomedicine. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 36, 182-197. doi: <https://doi.org/10.1088/0022-3727/36/13/202>
- Teoh, W.Y. (2007). *Flame spray pyrolysis of catalyst nanoparticles for photocatalytic mineralisation of organics and fischer-tropsch synthesis* (Doctoral dissertation, The University of New South Wales,

Australia). Retrieved from  
<https://doi.org/10.26190/unsworks/17252>

Teoh, W.Y., Amal, R. & Madler, L. (2010). Flame spray pyrolysis: an enabling technology for nanoparticles design and fabrication. *Nanoscale*, 2, 1324-1347. doi: <https://doi.org/10.1039/C0NR00017E>

Vais, R.D. & Heli, H. (2016). The kirkendall effect: its efficacy in the formation of hollow nanostructures. *Journal of Biology and Today's World*, 5 (8), 137-149. doi: 10.15412/J.JBTW.01050802

Wang, W., Dahl, M. & Yin, Y. (2013). Hollow nanocrystals through the nanoscale kirkendall effect. *Chemistry of Materials*, 25 (8), 1179-1189. doi: <https://doi.org/10.1021/cm3030928>

Wegner, K., Schimmöller, B., Thiebaut, B., Fernandez, C. & Rao, T.N. (2011) Pilot plants for industrial nanoparticle production by flame spray pyrolysis. *KONA Powder and Particle Journal*, 29, 251-265. doi: <https://doi.org/10.14356/kona.2011025>

# KONTROL PARAMETRELERİNİN SÜREKLİ FREKANS SALINIM YÖNTEMLERİ İLE AYARLANMASININ NÖTRALİZASYON PROSESİ ÖRNEĞİNDE GERİ BESLEME KONTROL PERFORMANSINA ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Zeynep YILMAZER HİTİT<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Ankara Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Kimya Mühendisliği Bölümü, ORCID No : <http://orcid.org/0000-0001-9078-191X>

Anahtar Kelimeler	Öz
pH kontrol PID kontrol Tyreus Luyben Ziegler Nichols Sürekli Frekans Salınım Yöntemi	HCl üretim endüstrisinde atık su arıtma işleminde kullanılan pH nötralizasyonu prosesi sürekli frekans salınım yöntemi kullanılarak parametreleri ayarlanmış bir kontrol edici ile set noktasında kontrol edilmiştir. PID kontrol edici parametreleri için iki farklı PID ayarlama tekniği Ziegler-Nichols ve Tyreus-Luyben uygulanmış ve performansları karşılaştırılmıştır. Kimyasal prosesin doğrusal olmaması ve kararsızlığı nedeniyle, ayar noktasına ulaşmak için minimum oturma süresi, azaltılmış salınımlar, kısa yükselme süresi, ofseti ortadan kaldırma, minimum yüzde aşma, yüksek stabilite gürültü sinyalleri ve yük etkileri varlığında optimum ve istenen kontrol performansı elde edilmesi hedeflenmiştir. Elde edilen deneysel sonuçlardan, Oransal İntegral Türev (PID) denetleyicisinin farklı ayarlama yöntemleri için zaman alanı özellikleri hesaplanmıştır. Sonuçlar, Tyreus-Luyben ayar formülünün Ziegler-Nichols yöntemine kıyasla daha küçük set noktasına oturma süresi ve pik tepe aşım değerine sahip olduğunu göstermiştir.

## INVESTIGATION OF THE EFFECT OF ADJUSTING CONTROL PARAMETERS WITH CONTINUOUS FREQUENCY OSCILLATION METHOD ON FEEDBACK CONTROL PERFORMANCE IN NEUTRALIZATION PROCESS

Keywords	Abstract
pH control PID control Tyreus Luyben Ziegler Nichols Continuous Frequency Oscillation Method	The set point of the pH neutralization process used in the wastewater treatment process in the HCl production industry was controlled with a controller where the controller parameters were adjusted using the continuous frequency oscillation method. Two different PID tuning techniques, Ziegler-Nichols and Tyreus-Luyben, were applied for the PID controller parameters and their performances were compared. Due to the nonlinearity and instability of the chemical process, it is aimed to achieve optimum and desired control performance in the presence of minimum settling time, reduced oscillations, short rise time, elimination of offset, minimum percent overshoot, high stability noise signals and load effects to reach the set point. From the obtained experimental results, the time domain properties of the Proportional Integral Derivative (PID) controller for different tuning methods were calculated. The results showed that the Tyreus-Luyben tuning formula has a smaller set point settlement time and peak overshoot compared to the Ziegler-Nichols method.

Araştırma Makalesi

Başvuru Tarihi : 31.01.2023

Kabul Tarihi : 02.08.2023

Research Article

Submission Date : 31.01.2023

Accepted Date : 02.08.2023

\* Sorumlu yazar: [zyilmazer@ankara.edu.tr](mailto:zyilmazer@ankara.edu.tr)  
<https://doi.org/10.31796/ogummf.1245448>

### 1. Giriş

Hidroklorik asit üretim tesisleri üretimin farklı aşamalarından kaynaklanan büyük miktarlarda atık su üretmektedir. Hidroklorik asit üretiminde kimyasal işlemlerin düşük verimliliği önemli bir kirlilik tehlikesine neden olmakta ve deşarj edilen atık suyun arıtılmasını, üstesinden gelinmesi gereken zor bir

sorun haline getirmektedir (Babu & Swarnalath, 2017; Sakthiya Ram, Dinesh Kumar, & Meenakshipriya, 2016). Bir atık su arıtma ünitesinden çıkan atık su için gerekli pH değeri su kirliliği yönetmeliğine göre 7-9 aralığındadır. Bu esas olarak hem sudaki canlı yaşamını, hem de insan yaşamını korumak için uygulanmaktadır.



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/>).



Nötralizasyon işlemi, atık suyun deşarj edildiğinde çevreye etkisi olmaması adına pH değerini mevzuatın gerektirdiği değere getirmek için kullanılmaktadır. Bununla birlikte, proses dinamiğinin doğrusal olmaması, zamanla değişen fiziksel özellikleri ve eşdeğerlik noktasına (pH=7) yakın çalışırken küçük yük etkilerine yüksek duyarlılığı nedeniyle pH sürecini yeterli performansla kontrol etmek zor olmaktadır (Garcia & De Godoy, 2011; Sakthiya Ram et al., 2016). Bu nedenle pH nötralizasyon işlemi için güvenilir, doğru, verimli ve esnek kontrol sistemleri gereklidir. Bir çözeltilin pH değerini belirli bir seviyede tutmak için pH kontrol sistemi kullanılır. Kontrol edici çözeltilin pH'ını ölçer ve çözeltiliyi nötr pH'da veya kabul edilebilir belirli sınırlar içinde tutmak için nötralleştirici bir maddenin eklenmesini sağlar.

Hidroklorik asit üretim proseslerinden kaynaklanan atıklarda gerekli pH kontrolünü sağlamak için pH değerinin 7-9 arasında kontrol edilmesi gerekir. 9'un üzerindeki pH ve 4'ün altındaki pH, çevreye zararlı atık olarak kabul edilmektedir. Asit ve baz akış hızındaki değişim, ortamın pH değerini ve sıvı seviyesini etkilemektedir. Bu nedenle, atık su arıtma, çöktürme ve elektrokimya tesisleri, kimyasal ve biyolojik reaksiyon ve ilaç üretimi, fermantasyon ve gıda üretimi gibi alanlarda pH nötralizasyon işleminin kontrolü önemli bir yer tutmaktadır (Garcia & De Godoy, 2011; Sakthiya Ram et al., 2016; Sharmila & Vidhyanandhan, 2016).

Oransal integral türevsel kontrol (PID), endüstriyel kontrol uygulamalarında yaygın olarak kullanılan uygulanması kolay geri besleme kontrol mekanizmasıdır. Bir PID kontrol edici, proses ayar değişkeni ile istenen değerle set noktası arasındaki farkı (hata) azaltmaya yardımcı olmaktadır (Babu & Swarnalath, 2017). PID kontrol edici üç ana bölümden ve etkilerinden oluşmaktadır. Orantılı (P) eylem, giriş değişkenine (ayar değişkeni) hata sinyaliyle doğru orantılı bir değişiklik vermektedir. İntegral (I) eylemi, giriş değişkenine hatanın integraliyle orantılı bir değişiklik verir ve asıl amacı ofseti ortadan kaldırmaktır. Daha az kullanılan türev (D) eylemi, yanıtı hızlandırmak veya sistemi kararlı hale getirmek için kullanılır ve girişte hata sinyalinin türeviyle orantılı bir değişiklik verir. Genel kontrol edici çıktısı bu üç terimin toplamıdır. PID kontrol edicinin genel formu Eşitlik 1'de verilmiştir (Stephanopoulos, 1984).

$$u(t) = u_p(t) + u_i(t) + u_d(t) = k_c(y_s(t) - y(t)) + \frac{k_c}{\tau_i} \int_0^t (y_s(\tau) - y(\tau)) d\tau + k_c \tau_d \frac{d(y_s(t) - y(t))}{dt} \quad (1)$$

Burada  $y_s(t)$ ,  $y(t)$  ve  $u(t)$  sırasıyla set noktasını, proses çıktısını ve PID kontrol edicinin kontrol çıkışını gösterir.  $k_c$ ,  $\tau_i$  ve  $\tau_d$  sabitleri sırasıyla "oransal kazanç", "integral zaman" ve "türev zamanı" olarak adlandırılır.

Ziegler-Nichols (ZN) tasarım yöntemi, bir PID denetleyicisinin parametrelerini belirlemek için proses kontrolde kullanılan yöntemlerden biridir. Sürekli salınımlara dayanan bir deneme yanılma yöntemidir.

Sürekli döngü yöntemi olarak da bilinir (Babu & Swarnalath, 2017). ZN ayar kuralı, birçok proses için kabul edilebilir kontrol performansları göstermektedir. Bununla birlikte, düşük frekanslı bölgede işlem olağandışı frekans tepkisi özelliklerine sahip olduğundan, ZN ayarlama kuralı düşük sönümlü veya büyük zaman gecikmeli prosesler için zayıf kontrol performansları göstermektedir. I (integral) ve D (türev) kazançlarını sifira ayarlayarak gerçekleştirilir (Sharmila & Vidhyanandhan, 2016). Daha sonra oransal kazanç  $k_c$  sıfır değerinden itibaren kontrol döngüsünün çıktısının sabit genlikle salındığı nihai kazanç  $K_u$ 'ya ulaşana kadar artırılmaktadır. Kontrol edici parametreleri, nihai kazanç ( $K_u$ ) ve nihai periyot  $P_u$  kullanılarak elde edilir. Tablo 1, prosesin elde edilen nihai veri seti için PID kontrol edici ayar parametrelerini göstermektedir (Sung, Lee, & Lee, 2009).

Tyreus-Luyben yöntemi çevrimiçi ayar yöntemi olarak da adlandırılmaktadır. Bu yöntem, kapalı çevrim modunda nihai kazanç ve nihai süreyi kullandığı için Zeigler-Nichols'a benzemektedir. Bu kapalı döngü ayarlama yöntemi geniş proses sınıfları için sürekli olarak kullanılabilir (Luyben & Luyben, 1997; Shahrokhii & Zomorodi, 2013). Ölü zamanın değeri büyük olduğunda yavaş bir performans vermektedir (Bequette, 2003). Kontrol edici parametreleri, Tablo 1'de gösterildiği gibi Ziegler-Nichols'tan farklılık göstermektedir (Nicholson, 2020).

Tablo 1. PID kontrol parametreleri ayarlama yöntemleri

Ayarlama Yöntemleri		$k_c$	$\tau_i$	$\tau_d$
<b>Ziegler Nichols (ZN)</b>		$K_u/1.7$	$P_u/2.0$	$P_u/8.0$
<b>Tyreus Luyben</b>		$K_u/2.2$	$P_u * 2.2$	$P_u/6.3$

pH kontrolü üzerine yapılan çalışmalar, son yıllarda büyük bir artış göstermiştir. pH kontrol sistemleri, başta kimyasal prosesler, biyoteknolojik endüstriler, atık su arıtma ve ilaç sanayileri olmak üzere birçok endüstride başarıyla kullanılmıştır. Bu nedenle pH prosesinde tanımlama ve kontrol üzerine araştırmalar devam etmektedir. Birinci mertebeli ölü zamanlı bir prosesin set noktası takibi ve gürültü kontrolü IMC tekniği ile ayarlanmış PID kontrolü ile gerçekleştirilmiş ve performansı integral hatası karelerinin toplamı ile analiz edilmiştir. Kazan kızgın buhar sıcaklık sisteminin ele alındığı simülasyon çalışmasında zaman gecikmesi ve zaman sabitinin PID kontrol parametre ayarlama tekniklerinin performansı üzerinde etkili olduğu gösterilmiştir. IMC ile yapılan ayar parametrelerinin diğer ayarlama yöntemleri ile elde edilen kontrol sonuçlarına göre daha başarılı olduğu gösterilmiştir (Fadzlullah\* et al., 2020; Sarif, Kumar, Venu, & Rao, 2018).

Doğrusal olmayan sistemlerin kontrolünün gerçekleştirilmesi çok zor bir iştir. pH nötralizasyon prosesi için, Ziegler Nichols-PI, Ziegler Nichols-PID, Tyreus Luyben-PID, Internal Model Control-PID kontrol edicileri ile çeşitli kontrol şemaları kullanılarak simülasyon çalışmaları yapılmıştır (Sharmila & Vidhyandhan, 2016).

Bu çalışmada, pH nötralizasyon prosesi, sürekli frekans salınım yöntemi kullanılarak parametreleri ayarlanmış bir PID kontrol edici ile kontrol edilmiştir. PID kontrol edici için iki farklı ayar yönteminin karşılaştırmalı bir çalışması yapılmıştır. Elde edilen deneysel sonuçlardan, Oransal İntegral Türev (PID) denetleyicisinin farklı ayarlama yöntemleri için performansı incelenmiştir.

## 2. Yöntem

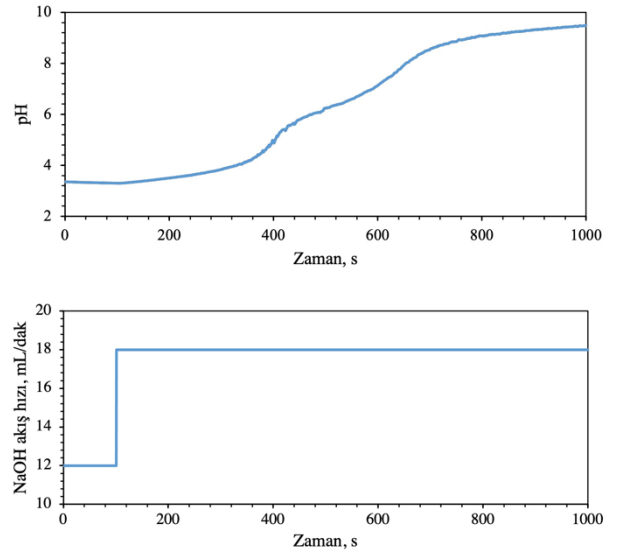
Optimum işletme koşullarında prosesi gerçekleştirmek için, pH nötralizasyon sistemi sıvı asit ve baz akışının olduğu karıştırmalı sürekli karıştırıcı reaktörden oluşmaktadır. Eklenen sıvı, kontrol edici tarafından bir pompa vasıtasıyla ayarlanır. Karışımı homojen hale getirmek ve tam karışma sağlamak için mekanik dört bıçaklı Rushton türü bir karıştırıcı kullanılmıştır. pH, reaktör çıkışına yakın yerleştirilmiş bir cam pH probu yardımıyla ölçülmüştür.

Deneysel çalışmalar için 2L sabit hacimli bir karıştırmalı tanka asit akımı (HCl çözeltisi) ve bir alkali akımı (NaOH çözeltisi) beslenmiştir. 0.014M kuvvetli asit (HCl) ve 0.028 M kuvvetli baz (NaOH) hazırlanmış ve gerçek zamanlı deneyler yapmak için kullanılmıştır. Peristaltik pompa ile tanka 180 mL/dak asit/baz gönderilmiştir. Eklenen asit/baz'ın 300 rpm hızda mekanik bir karıştırıcı kullanılarak tam karışması sağlanmıştır. Elde edilen ürün tahliye borusu ile boşaltılmıştır. Sistemin temel amacı, baz akış hızı ayarlanarak istenilen pH değerini elde etmek ve korumaktır.

## 3. Bulgular

Laboratuvar ölçekli deney sisteminin dinamik tepkisi analiz edilmiştir. Reaktör tankı çözelti ile doldurulup, sıvı seviyesi sabit tutulmuştur. Reaktördeki çözeltinin başlangıç pH değeri, asit ve baz akışları için iki pompanın manuel olarak kontrol edilmesiyle istenen bir değere ayarlanmıştır. Baz akış hızına basamak artış ile yük etkisi verilmiştir.

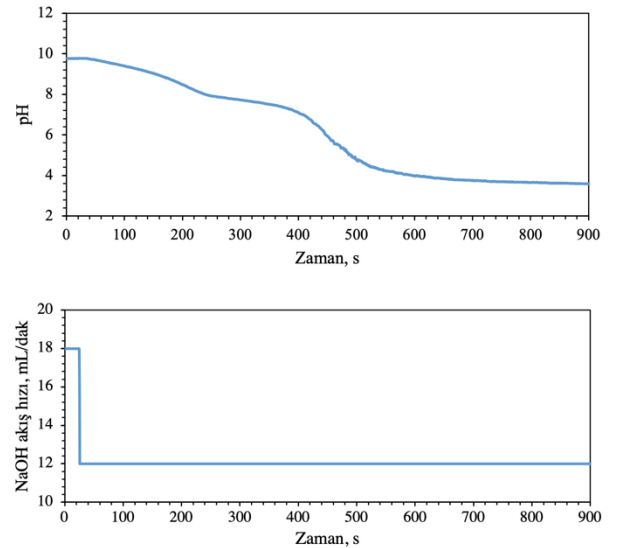
Şekil 1, pH nötralizasyon işleminin dinamik tepkisini göstermektedir. Prensip olarak, bu deneyde başlangıç pH'ı, mümkün olan en düşük değere ayarlanmalıdır. Ancak en düşük pH değerini elde etme süreci, bu bölgedeki reaksiyon süreci çok yavaş olduğundan oldukça zaman alıcıdır.



Şekil 1. Pozitif basamak etki ile proses dinamik deneyi

Benzer bir deneysel dinamik inceleme negatif basamak etki için yapılmıştır. Baz akış hızı 18 mL/dak değerinden 12 mL/dak değerine getirilmiş ve pH değerleri kaydedilmiştir. Deneysel sonuçlar Şekil 2'de verilmiştir.

Kontrol edici ayarı, istenen kontrol yanıtını elde etmek için kontrol parametrelerinin optimum değerlere ayarlanmasıdır. Kararlılık temel bir gerekliliktir.

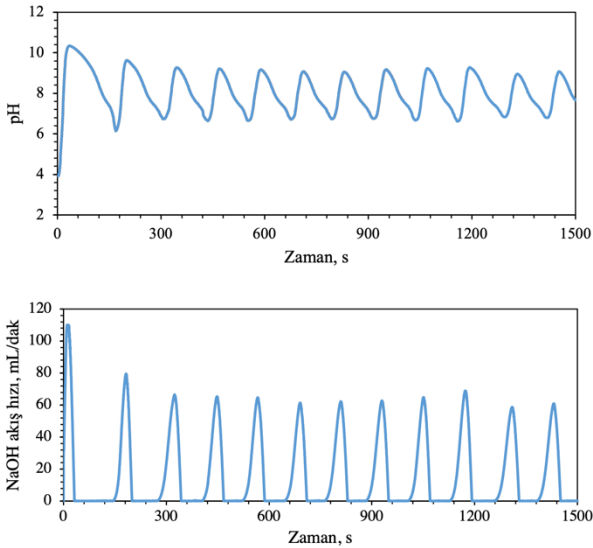


Şekil 2. Negatif basamak etki ile proses dinamik deneyi

Bu çalışmada laboratuvar ölçekli pH nötralizasyon sistemi için ZN (kapalı çevrim)-PID ve Tyreus Luyben-PID'in incelenmesi yapılmıştır. Ziegler-Nichols ve Tyreus-Luyben yöntemleri, sürekli salımlara dayanan ve sürekli döngü yöntemleri olarak bilinir. İntegral zaman sabiti ve türev zaman sabiti sıfır değerine getirilir. Oransal kazanç  $K_c$  daha sonra sıfır değerinden

kontrol döngüsünün çıktısının sabit genlikle salındığı nihai kazanç  $K_u$ 'ya ulaşana kadar arttırılır. Kontrol edici parametreleri, nihai kazanç ( $K_u$ ) ve nihai periyot  $P_u$  kullanılarak elde edilir. Deneysel sonuçlar Şekil 3'te ve hesaplanan PID parametreleri Tablo 2'de verilmiştir.

Asit (HCl), reaktöre sabit hızda beslenmiş ve PID kontrol edici tarafından hesaplanan değerin uygulandığı son kontrol elemanı olan pompa ile baz (NaOH) akış hızı ayarlanmıştır. Burada atık suyun pH değeri, sırasıyla Şekil 4-6'da gösterildiği gibi farklı ayar değerlerinde (nötr ve baz bölgesi için sırasıyla 7, 7.5 ve 8.5) tutulur. Önerilen farklı ayar yöntemleri ile elde edilen parametrelere sahip kontrol edicinin karşılaştırmalı kapalı döngü yanıtı, kontrol edici tasarımına dayalı olarak nötral ve baz bölgeleri için yine Şekil 4-6 'da gösterilmektedir.



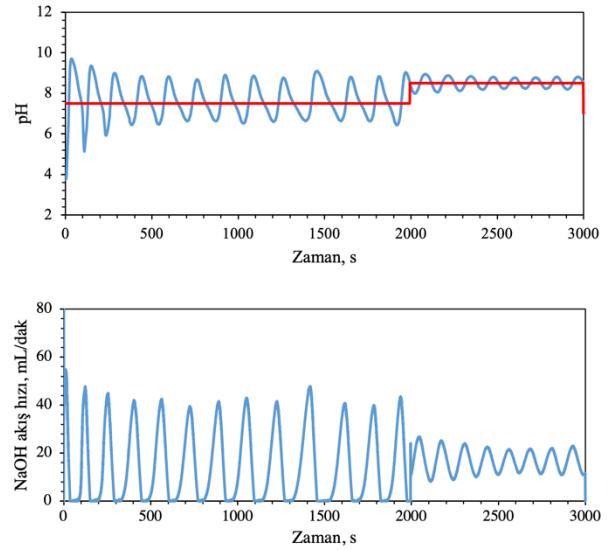
Şekil 3. Sürekli salinim yöntemi ile PID ayar parametrelerinin bulunması

Tablo 2'deki  $k_c$ ,  $\tau_I$  ve  $\tau_D$  değerleri kullanılarak elde edilen iki farklı ayarlama yönteminin set noktasına basamak tepkisi Şekil 4-6'da gösterilmektedir. Farklı PID ayarlama teknikleri için elde edilen yükselme zamanı, yerleşme zamanı ve yüzde aşım gibi zaman yanıt parametreleri Tablo 3'te özetlenmiştir.

Sonuçlar, PID denetleyicinin farklı ayarlama yöntemleri için pik zamanı, yükselme zamanı, yerleşme oturma zamanı, tepe aşımı olan zaman alanı spesifikasyonları hesaplanmıştır. Kontrol edici performansının yükselme zamanı, oturma zamanı, pik zamanı, pik tepe aşımına dayalı karşılaştırmalı analizi tanımlanmış ve Tablo 3'te listelenmiştir.

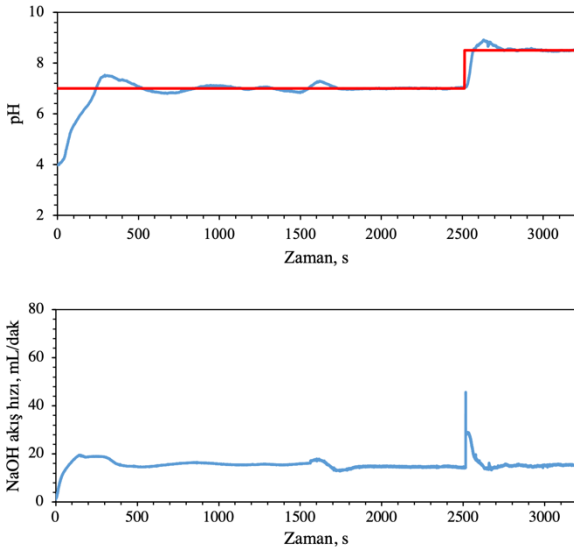
Tablo 2. Ziegler Nichols ve Tyreus Luyben yöntemleri ile belirlenen PID parametreleri

Ayarlama Yöntemi	$k_c$	$\tau_I$	$\tau_D$
Ziegler Nichols (Z-N)	$K_u/1.7$	$P_u/2.0$	$P_u/8.0$
	3.52	30.875	7.718
Tyreus Luyben (T-L)	$K_u/2.2$	$P_u * 2.2$	$P_u/6.3$
	2.72	135.85	9.8

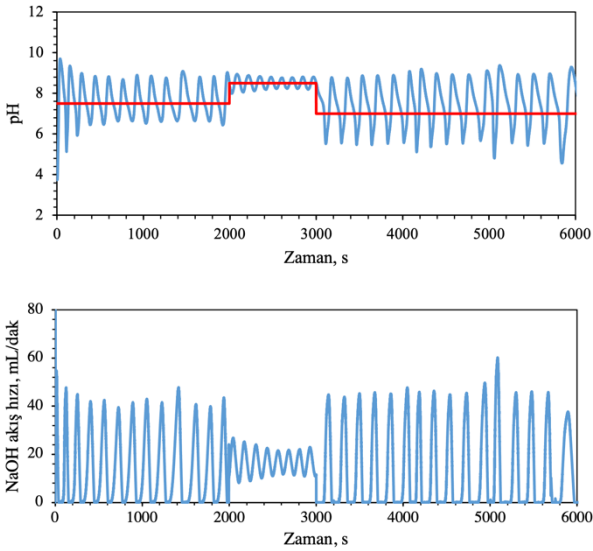


Şekil 4. Set noktası kontrol probleminde Ziegler Nichols ayarlamalı PID kontrol

Birinci mertebeli sistem olarak modellenen pH nötralizasyonu için PID kontrol edici, farklı ayarlama yöntemleri kullanılarak ayarlanmış ve elde edilen sonuçlar incelenerek en iyi ayarlama yöntemi için analiz edilmiştir. Tablo 3' den ZN yönteminde nötral bölgede yükselme süresinin 20 s ve pik zamanının 50 s olduğu gözlemlenebilir. Bu, Tyreus-Luyben yöntemine göre küçük olmasına rağmen oturma süresi ve yüzde aşım miktarı hem nötral hem de bazik bölge için çok yüksektir. Bu nedenle ZN yöntemi tavsiye edilmez. Bu iki ayar yöntemi arasında, Tyreus-Luyben hem bazik hem de nötral bölgede daha küçük yüzde aşım oranı ve oturma süresini verdiği için avantajlıdır. Dolayısıyla Tyreus-Luyben ayarlama yöntemi yükselme süresi, oturma süresi ve yüzde aşım açısından pH nötralizasyon prosesi için Ziegler-Nichols'a göre iyi performans vermiştir. Tyreus-Luyben yönteminin, Ziegler-Nichols yöntemine göre PID parametrelerinin ayarlanması için açık bir avantaja sahip olduğu gösterilmiştir.



Şekil 5. Set noktası kontrol probleminde Tyreus Luyben ayarlamalı PID kontrolü



Şekil 6. Ziegler Nichols ve Tyreus Luyben yöntemleri birlikte nötralizasyon prosesi kontrolü

Tablo 3. PID kontrol edicilerin zaman alanı spesifikasyonlarına göre performans karşılaştırması

Ayarlama metodu	Bölge	Yükselme zamanı (s)	Pik zamanı (s)	Tepe Aşımı	Oturma zamanı (s)
Ziegler Nichols (Z-N)	Nötral	20	50	3	2000
	Baz	50	100	1.5	750
Tyreus Luyben (T-L)	Nötral	250	300	1	800
	Baz	50	100	0.8	250

#### 4. TARTIŞMA ve YORUM

Bu çalışmada, nötralizasyon sürecindeki performanslarını karşılaştırmak için Ziegler-Nichols ve Tyreus-Luyben yöntemlerinin iki farklı PID ayarlaması tekniği uygulanmıştır. Nötral ve bazik bölgelerde hem pik tepe aşımı hem de oturma süresi açısından Tyreus-Luyben Ziegler-Nichols'dan daha performanslıdır. ZN yöntemi nötral bölgede yükselme zamanı ve pik zamanı açısından daha küçük değerler vermiştir. Ancak kontrol problemlerinde pik tepe aşımının ve oturma zamanının küçük olması daha fazla istenen durumdur. Tyreus-Luyben parametre ayarlaması yönteminin, Ziegler-Nichols yöntemine kıyasla daha küçük pik aşma yüzdesi ve daha küçük bir oturma süresi vermesinden dolayı performansının daha iyi olduğu söylenebilir.

#### Araştırmacıların Katkısı

Bu araştırmada; Zeynep YILMAZER HİTİT deney tasarımı, deneylerin gerçekleştirilmesi, makalenin incelenmesi, gözden geçirilmesi, düzenlenmesi, yazımı ve yüklenmesi konularında katkı sağlamıştır.

#### Çıkar Çatışması

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir.

#### Kaynaklar

- Babu, R., & Swarnalath, R. (2017). Comparison of Different Tuning Methods for pH Neutralization in Textile Industry. *Journal of Applied Sciences*, 17(3), 142–147. doi:10.3923/jas.2017.142.147
- Bequette, B. W. (2003). *Process control: modeling, design, and simulation*. Prentice Hall Professional.
- Fadzlullah\*, A., Yusof, M. I., Zainal, A., Azhar, A., Karim, A. H., Aliff, M., & Safie, S. I. (2020). Design and Simulation of PID Controller for PH Neutralization Process. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering*, 9(3), 2740–2743. doi:10.35940/ijitee.c9236.019320
- Garcia, C., & De Godoy, R. J. C. (2011). *Modelling and Simulation of pH Neutralization Plant Including the Process Instrumentation. Applications of MATLAB in Science and Engineering*. IntechOpen. doi:10.5772/24718
- Luyben, M. L., & Luyben, W. L. (1997). *Essentials of Process Control. On Chemical engineering series*. McGraw-Hill. Retrieved from <https://books.google.com.tr/books?id=ONBTAAAAMAAJ>
- Nicholson, T. A. J. (2020). *Chemical process control*.



*Optimization in Industry* (Vol. 2). Prentice hall  
Englewood Cliffs, NJ.  
doi:10.4324/9781315125831-8

- Sakthiya Ram, S., Dinesh Kumar, D., & Meenakshipriya, B. (2016). *Designing of PID controllers for pH neutralization process*. In *Indian Journal of Science and Technology* (Vol. 9, pp. 1–5). IEEE. doi:10.17485/ijst/2016/v9i12/89940
- Sarif, M., Kumar, D. V. A., Venu, M., & Rao, G. (2018). Comparison Study of PID Controller Tuning using Classical/Analytical Methods. *International Journal of Applied Engineering Research*, 13(8), 5618–5625. Retrieved from <http://www.ripublication.com5618>
- Shahrokhi, M., & Zomorodi, A. (2013). Comparison of PID Controller Tuning Methods. *International Journal of Management, Information Technology and Engineering*, 2(8), 1–12. Retrieved from [http://www.ie.itcr.ac.cr/einteriano/control/clase/Zomorodi\\_Shahrokhi\\_PID\\_Tunning\\_Comparison.pdf](http://www.ie.itcr.ac.cr/einteriano/control/clase/Zomorodi_Shahrokhi_PID_Tunning_Comparison.pdf)
- Sharmila, B., & Vidhyanandhan, L. (2016). Modeling and designing of controllers for pH process. *Journal of Advances in Chemistry*, 12(15), 4872–4883.
- Stephanopoulos, G. (1984). *Chemical Process Control: An Introduction to Theory and Practice*. Prentice-Hall.
- Sung, S. W., Lee, J., & Lee, I. B. (2009). *Process Identification and PID Control*. *Process Identification and PID Control*. John Wiley & Sons. doi:10.1002/9780470824122

## DESIGN AND IMPLEMENTATION OF AN AUTONOMOUS VEHICLE FOR WASTE MATERIAL COLLECTION AND FIRE DETECTION

Orkun AYDIN<sup>1</sup>, Ersin MOLLA<sup>2</sup>, Ferhat KARADAĞ<sup>3</sup>, Burak GÜZELTEPE<sup>4</sup>, Hakkı Ulaş ÜNAL<sup>5\*</sup>, Ömer Nezh GEREK<sup>6</sup>

<sup>1</sup> Eskişehir Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Eskişehir  
ORCID No: 0000-0001-8458-8910

<sup>2</sup> Eskişehir Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Eskişehir  
ORCID No: 0000-0003-0431-5862

<sup>3</sup> Eskişehir Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Eskişehir  
ORCID No: 0000-0001-5197-0419

<sup>4</sup> Eskişehir Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Eskişehir  
ORCID No: 0000-0003-3609-200X

<sup>5</sup> Eskişehir Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Eskişehir  
ORCID No: 0000-0001-8979-4625

<sup>6</sup> Eskişehir Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Eskişehir  
ORCID No: 0000-0001-8183-1356

Keywords	Abstract
<i>Autonomous vehicle, real-time object detection, YOLO.</i>	<i>Autonomous vehicles are becoming increasingly popular in a variety of applications, including waste collection and fire detection. In this work, we present the design and implementation of an autonomous vehicle for these tasks in urban environments. The vehicle is equipped with sensors and control algorithms to navigate, detect and collect plastic bottle wastes, and detect fires in real-time. The system uses an off-the-shelf, small-sized, battery-operated vehicle, a simple conveyor belt, and a vision-based, computerized system. Machine learning (ML-) based vision tasks are implemented to direct the vehicle to waste locations and initiate the waste removal process. A fire detection and alarm system are also incorporated, using a camera and machine learning algorithms to detect flames automatically. The vehicle was tested in a simulated urban environment, and the results demonstrate its effectiveness in waste material collection and fire detection. The proposed system has the potential to improve the efficiency and safety of such tasks in urban areas.</i>

## ÇÖP MATERYALİ TOPLAMA VE YANGIN TESPİTİ İÇİN BİR OTONOM ARAÇ TASARIMI VE GERÇEKLEŞTİRİLMESİ

Anahtar Kelimeler	Öz
<i>Otonom araçlar, gerçek-zamanda obje tespiti, YOLO.</i>	<i>Otonom araçların, çöp toplama ve yangın tespitini de içeren çok çeşitli uygulamalarda popülerliği artmaktadır. Bu çalışmada, kentsel alanlarda kullanılmak üzere bu uygulamalar için bir otonom araç tasarımı ve gerçekleştirilmesi sunulacaktır. Araç, üzerinde bulunan algılayıcılar ve tasarlanan kontrol algoritmaları ile gerçek zamanda etrafını tarayıp plastik çöp şişelerini tespit edip toplayacak ve yangın tespiti yapacaktır. Sistem, özel olarak tasarlanmış ve akü ile çalışabilen küçük boyutlu bir araba, basit bir konveyör bant, görüntü tabanlı küçük bir bilgisayar sistemi kullanmaktadır. Aracı, çöplerin olduğu yere yönlendirip çöpü ayırma işlemini başlatması için Makine öğrenimi (ML-) tabanlı görüntü algoritmaları uygulanmıştır. Bir kamera ve alevleri otomatik tespit edecek makine öğrenme algoritmaları ile, yangın tespiti ve alarm sistemi de sisteme entegre edilmiştir. Araç, kentsel ortama benzetilmiş bir alanda test edilmiş ve edilen sonuçlar çöp materyali toplama ve yangın tespitinde ne kadar etkili olduğu göstermiştir. Önerilen sistem, kentsel alanlarda daha verimli ve güvenli olacak şekilde geliştirilebilir potansiyeli vardır.</i>

Araştırma Makalesi

Başvuru Tarihi : 13.01.2023

Kabul Tarihi : 14.08.2023

Research Article

Submission Date : 13.01.2023

Accepted Date : 14.08.2023

\* Sorumlu yazar: [huunal@eskisehir.edu.tr](mailto:huunal@eskisehir.edu.tr)  
<https://doi.org/10.31796/ogummf.1233759>



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

Plastic is a widely used and essential material in manufacturing and packaging, with applications ranging from medical devices to renewable energy technologies (Giacovelli, 2018; Andrady and Neal, 2009). However, the rapid growth in global plastic production has also led to a significant increase in plastic waste, with humans currently producing approximately 400 million tons of plastic per year, half of which is single-use plastic such as packaging and bottles. This plastic pollution has become a major threat to life on earth, with only 10% of plastic products being recycled (Padervand, Lichtfouse, Robert and Wang, 2020). Plastics are not biodegradable and break down into smaller particles called microplastics, which are harmful to all types of land and aquatic life, including humans (Azoulay et al., 2019).

Public parks and picnic areas are often impacted by plastic waste, as visitors carelessly dispose of trash and leave these areas polluted. Despite laws aimed at keeping these areas clean, enforcement is often insufficient. In addition, recreational areas are usually pastoral places with trees, bushes, and wood. They are occasionally left empty, or sometimes, there are only inexperienced or unattended young. The carelessly disposed water bottles sometimes cause optical heating and generate fire.

In this work, an autonomous vehicle design to achieve the following objectives is considered:

- Detection and collection of plastic bottles using machine vision,
- Navigation towards waste using optimized robotic routing,
- Collection of waste using a conveyor,
- Transportation of waste to a central location,
- Automatic detection of flames using machine learning algorithms.

The vehicle is designed with the capability of highly skilled maneuvers and mobility in regions with planted trees and bushes. Moreover, by the proposed algorithm and its choice of vehicle size, it can locate the garbage items even in occluded corners within the whole scanning area. Since the area scanning algorithm is exhaustive, the vehicle is very likely to detect and alarm in case of fire within a very short time.

## 2. Literature Review

Autonomous vehicles have the potential to address this problem by reducing unnecessary costs, saving time, and performing tasks in potentially hazardous environments without human intervention (Wall, Bennett and Eis, 2002; Anderson et al., 2016). Autonomous vehicles have been used for a variety of purposes, including agriculture (Nielsen, Andersen,

Pedersen, Bak and Nielsen, 2002), surveillance missions (Naranjo et al., 2016), logistics and shipping (Yu and Lam, 2018), and garbage collection (Arai, Miyagusuku and Ozaki, 2021).

There have been studies on autonomous garbage collection vehicles, and some companies have even developed commercial autonomous garbage collection vehicles (Evan, 2018). In addition to these works, there exist numerous works on autonomous vehicle design for garbage collection (Jha et al., 2019; Mayorga et al., 2019; Banu and Florence, 2022; Diyva and Latha, 2021; Pyo et al. 2022; Ying and Zhang, 2018; Kulshreshtha et al. 2022; Assis, Biju, Alisha, Dhanadas, Kuria, 2012; Bai, Lian, Liu, Wang and Liu, 2018; Huang et al., 2022). However, many of these vehicles are large and require GPS localization to collect waste in specific locations, on the other hand, there exist only a few works considering fire detection. In (Pyo et al., 2022), an autonomous vehicle is designed to achieve garbage collection using a camera, radar, and lidar. In addition, recognition, lane recognition, route planning, vehicle manipulation, and abnormal situation detection were considered in that work. In (Bai, Lian, Liu, Wang, and Liu, 2018), deep neuronal networks are used for object detection. However, different than our work, object detection algorithms in that work are not real-time. Recently, an autonomous vehicle design for certain garbage detection is given in (Jha et al. 2019), which uses infrared and ultrasonic sensors to detect garbage. However, the approach in that work does not specify the nature of the garbage. Besides, the proposed robot is not low-cost.

Depending on the composition of disposed chemicals, a fire could even ignite quite randomly. Therefore, automatic and vision-based detection of fire or flames is also a valuable operation in related places (Park et al., 2019). Since garbage-collecting vehicles already contain a camera system with computers, the addition of an extra automatic fire detection algorithm is a common practice (Savla, Parab, Kekre, Gala and Narvekar, 2020).

This work presents the design approaches and implementation details of an autonomous vehicle for waste material collection in recreational areas, with a focus on optimizing the size and location independence of the system.

In the remainder of this paper, Section 3 starts by describing the hardware design, followed by the software design, and finally, continuing with the experimental setup and results. Conclusions and possible use cases are discussed in Section 4.

## 3. METHOD

### 3.1 Mechanical Design

The designed vehicle is required to detect, navigate to, and collect plastic bottles of certain sizes and move them into its container. A conveyor system is designed to

carry these bottles into the container. In order to locate the bottles over the conveyor, four nylon strip brushes, each with a width equal to that of the vehicle, are designed and mounted on a plastic cylinder to collect average-sized plastic bottles. A SOLIDWORKS™ illustration of this prototype is shown in Fig.1.

This prototype was designed by taking the wheel and shaft system of a battery-operated child vehicle, which is shown in Fig. 2(a), as a reference. In order to let the vehicle reach to mode tricky corners and increase its mobility, the length, width, and height of the vehicle are taken as 100 cm, 60 cm, and 50 cm, respectively. It should be noted that carrying the plastic bottle to a conveyor is not a trivial task. It is observed that the brushes may occasionally be too intense for very light bottles for smooth and accurate collection. In order to overcome this issue, the brushes are covered by lightweight material, as shown in Fig 2(b). In order for the vehicle to perform its cleaning function on sloping terrain and in environments with obstacles such as stones, three wheels are considered to be installed under the conveyor system.

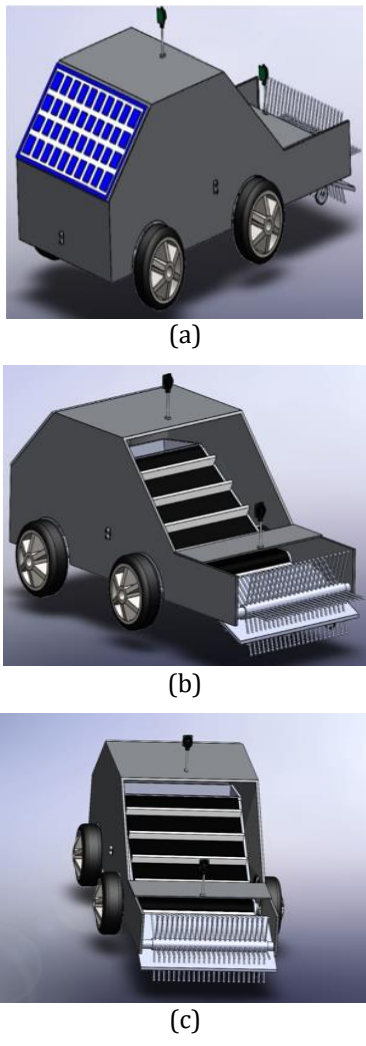


Figure 1. Different views of the solid model: (a) back view; (b) side view; (c) front view.

Once the electronic circuit diagram of the vehicle was prepared, the necessary assembly and support designs were made to fix the parts, such as the driver, engines, sensors, and cables in the vehicle. The prepared support parts were manufactured with a 3D printer and mounted on the vehicle according to the designed mounting patterns. The limiting factor in determining the slope and length of the conveyor system was that the waste should be conveyed to the storage without rolling or drifting. Finally, the prototype was obtained, as shown in Fig 2(c).

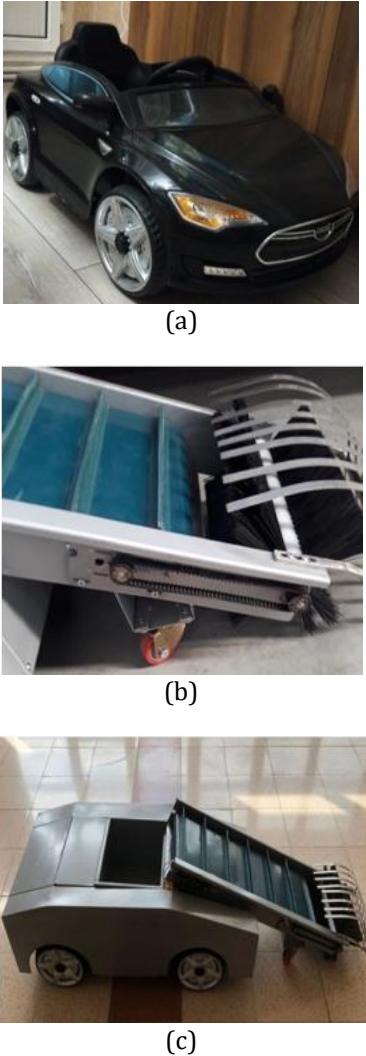


Figure 2. Steps to real model: (a) A battery-operated toy vehicle; (b) Conveyor-Brush system; (c) Prototype.

**3.2 Hardware**

The hardware requirements are determined by assuming that the vehicle scanning area must leave no gaps within its operational range. In order to collect bottles and move them to the container by the conveyor, respectively, 12 V 500 rpm and 12 V 30 rpm geared DC motors are used. The underlying reason to choose DC motor having high speed and torque stems from the fact



that the weight of bottles is light, hence, it may be difficult to transmit the captured bottle to the conveyor. In order to provide the required power for driving dc motors and for other parts, which are explained in the sequel, 12V – 24Ah gel batteries have been used. The batteries have acid gel density, which significantly increases the discharge and vibration tolerance of the battery. The speed of the dc motors is controlled by dc motor control modules, which are the relay module and L298N motor driver controller. By taking into account the weight of the conveyor and the batteries, a third high torque 60 kg-cm DC servo motor is used to turn the vehicle in the desired direction. The power of the motor was delivered by a 12V-24Ah gel battery, and its control is done over PCA 9685 servo driver unit. The direction, hence, control of the vehicle, is determined by carrying out the proposed robotic navigation algorithms on the NVIDIA Jetson AGX Xavier processor module. This module is equipped with Raspberry Pi 8 Mp Original Camera Module, which has 8Mp Sony IMX219 image sensor with a fixed focus lens. The camera is used to object detection, and a schematic representation of the vehicle is as shown in Figure 3.

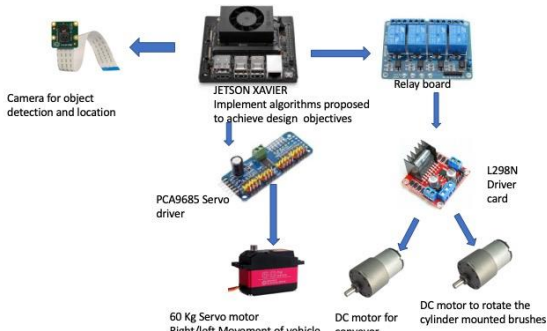


Figure 3. The schematic representation of control unit

In addition, via the implemented algorithm and DC motor control card, the speed of the vehicle is adjusted (Aydn, Molla, Karadağ and Güzeltepe, 2021).

**3.3 Software**

The primary purpose of the project is the detection and collection of plastic bottles, with an additional feature of flame detection for quick detection of tree fires. In order to achieve these tasks, one way is to use object detection from images. The developed object detection algorithms perform object classification and localization inside the image (Zhao et al., 2019). Recent developments in deep learning methods have yielded new, fast and accurate object detection techniques when compared to conventional image processing methods (Zhao et al., 2019; Zou et al., 2019; Tivelius, 2021). These recent object detectors can be categorized into two major groups according to the number of flow networks: (1) a one-stage detector, which uses only one convolutional network, and (2) a two-stage detector, which is built using two separate networks (Zou et al., 2019). One-

stage detectors are, naturally, very fast; however, they are less accurate than two-stage detectors (Zou et al., 2019). Nevertheless, by accurate training and parametric fine-tuning, recent one-stage detectors have started to outperform two-stage detectors on certain tasks (Zou et al., 2019). One such successful one-stage detector is YOLO (Redmon et al., 2016). This detector divides the image into a grid of smaller cells, and each convolutional layer assigns a probability that a cell contains a particular object. Next, the neighboring cells with a high probability of containing the desired object are combined to re-form into larger boxes. The final large boxes that contain the detected objects are tagged and labeled. Since YOLO is able to process the entire image, it performs well at investigating images with more than one object (Redmon et al., 2016).



Figure 4. Object detection algorithm training steps

The process steps given in Fig. 4 were applied to achieve the main goals of the work. Experiments were done by training hundreds of acquired and downloaded images that were fed into the training algorithm. The images were selected to contain various bottle shapes, sizes, and surrounding environments. In addition, the pictures used in the advertising shots of plastic bottles with many different types and designs are also included in our data. A further dataset that contains further thousands of various flame and fire images was used for the training regarding flame detection. The specific version of YOLOv5 with the Darknet Model Library was used. The architecture was already pre-trained with the MS COCO dataset that detects about 100 distinct and well-known objects. On top of the pre-training, we obtained about 800 photos taken in different environments from dissimilar angles for fine-tuning. The photos were gathered from regions with various backgrounds. In addition, several pictures used in various advertisements of several products with plastic bottles were also included in our data. For the flame detection part, an online dataset consisting of approximately 1000 images was used for training with flame images. It must be noted that “flame” is not a compact object, and it can appear in a wide variety of places. Besides, it is not a defined object in the MS COCO pre-training dataset.

Therefore, we have tried to utilize as many flame images as possible in the training process.

The particular implementation (roboflow) of the software environment, called Spyder, requires the image size to be 416x416. Despite having hundreds of training data, the data set was enriched through classical data augmentation techniques such as varying brightness, saturation, shifts, and rotations. The resulting data were divided into two groups: 90% for the training and 10% for testing, corresponding to the famous ten-fold cross-validation. As an economic platform, Google Colab was used. The roboflow site was configured as a custom dataset with YOLOv5. In Colab, the training took about 1.5 hours for 100 epochs. It was estimated that the training could take 7-8 hours, if done with older YOLO versions, such as YOLOv4. The weight and configuration files obtained at the end of the training were made ready for use in Spyder. Since the resulting images contain rectangular boxes (i.e., blobs), certain post processes were applied to convert the resulting test images into useful commands for the automated guided vehicle's computer. The first process starts by eliminating detections of unnecessary objects. Then, an array of detected desired objects together with their coordinates were converted to physical coordinates for the motion of the vehicle, starting the movement according to the largest bottle object, as it is assumed that the larger bottle is expected to be the nearest one to the vehicle.

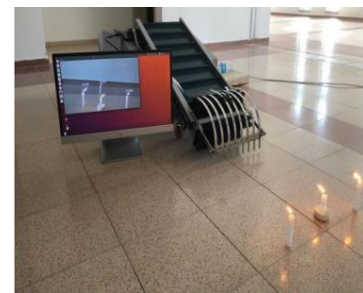
#### 4. Results & Discussion

In this study, the object detection confidence intervals were set according to the detection probability figures that were provided by the YOLO object recognition algorithm. If the confidence score coming from YOLO is obtained to be greater than the determined confidence threshold, the object is tagged together with its bounding box, whose coordinates also come from YOLO. Together with the available computational hardware, the frame rate for these operations was obtained to be well above 20 fps.

Since the vehicle inspects the whole area, the fire detection process is just a side property of the system. While wandering, once a flame is detected, the vehicle stops and sends an alarm signal to the server computer, which is forwarded to city authorities. It must be noted that the proposed vehicle is not equipped with any fire extinguishing tools. The achieved flame detection probabilities using real-life cases are illustrated in Fig. 4.

As seen in Fig. 5, flame regions are usually detected with an object recognition probability of above 0.70, depending on the distance from the camera. At a faraway distance, where the camera may have difficulty in detecting, flame detection can still be done even if the detection confidence score drops to 0.55.

The view that triggers and activates the vehicle towards a specific location is the detection of plastic bottles. Fig. 6 shows the detection probabilities of plastic bottles in simple environments. A clean sight of an intact bottle has a confidence score of approximately 0.85, while a compressed bottle has a higher confidence score of 0.90 behind a relatively smooth background. Views from parks with complicated bush backgrounds indicate that these bottles could still be detected with confidences above 0.80. We assess that a confidence interval threshold of 0.5 is sufficient for detecting all the plastic bottles with close to zero false detection rates, even at complicated backgrounds.



(a)



(b)

Figure 5. Flame Detection. (a) The distance between flames and vehicle; (b) The accuracy rates in flame detection.



Figure 6. Accuracy rates for bottle detection.

After fine-tuning the recognition confidence thresholds, once a waste object is detected, the vehicle moves along to direction of the waste by centralizing the detected object region within the angle of camera view, using dc motor control cards. Using simple controllers and the conveyor, the waste bottles are collected by rotating brushes whenever the vehicle is sufficiently close to

them. A video of the actual prototype device can be reached from the following link:

[https://www.dropbox.com/s/med94diny2rqmtr/IMG\\_0029.MP4?dl=0](https://www.dropbox.com/s/med94diny2rqmtr/IMG_0029.MP4?dl=0)

The YOLO algorithm locates the object inside the image frame by a bounding box. The robot simply aims to move and navigate in a way that the center of the object's bounding box is vertically aligned with the center line of the vehicle mechanism. It is an adaptive process as the vehicle moves. Therefore, the vehicle does not need to coordinate-wise locate the object. As the vehicle moves "towards" the center of the object, at one point, the object is mechanically removed, and the camera confirms that the object removal process is complete. Consequently, the control structure is a minimum-cost open-loop control, and a full self-location or object location is not necessary.

## 5. Conclusions

This work presents an autonomous solution for the real-world problem of plastic bottle collection and fire detection in recreational areas. The proposed solution involves the design and implementation of an autonomous vehicle that uses electro-mechanical components and software to navigate, detect, and collect plastic bottles and detect flames. The vehicle uses computer vision techniques and control algorithms to scan the environment, and approach detected waste bottles. The prototype demonstrates the mechanical and algorithmic feasibility of using an autonomous vehicle for these tasks and has potential for commercial application, as the algorithms can be extended to collect other types of pollutants or objects based on size, type, and properties.

This work can be considered as a guide to designing an autonomous vehicle, which aims to detect certain objects in real-time and carry them to somewhere while avoiding obstacles. As a future work, path-planning algorithms and robust controller design techniques should be considered to minimize some cost functions and also renewable energy sources should be discussed.

## Acknowledgement

This work was performed as a graduation project under courses EEM 413 (P) and EEM 414 (P) in the Dept. of Electrical and Electronics Eng. at Eskisehir Technical University. It was supported by Eskisehir Technical University Scientific Research Projects Commission under grant no: 21LTP040. It was also supported by TUBITAK 2209/A with grant no 1919B012004030. The authors would like to thank DEPARES for the mechanical part and Hisarlar Makine Inc. for providing us with all the required components.

## Conflict of Interest

No conflict of interest was declared by the authors.

## References

- Giacovelli C. (2018). Single-Use Plastics: A Roadmap for Sustainability (rev. 2). <https://www.unep.org/resources/report/single-use-plastics-roadmap-sustainability>
- Andrady AL, Neal MA (2009). Applications and societal benefits of plastics. *Phil. Trans. R. Soc. B364*, 1977–1984. doi: 10.1098/rstb.2008.0304
- Padervand M, Lichtfouse E, Robert D, Wang C. (2020). Removal of microplastics from the environment. A review. *Environ Chem Let.* 18(3): 807-828. <https://doi.org/10.1007/s10311-020-00983-1>
- Azoulay D, Villa P, Arellano Y, Gordon MF, Moon D, Miller KA, Thompson K. (2019). Plastic & health: the hidden costs of a plastic planet. *CIEL*. <https://www.ciel.org/wp-content/uploads/2019/02/Plastic-and-Health-The-Hidden-Costs-of-a-Plastic-Planet-EXECUTIVE-SUMMARY-February-2019.pdf>
- Wall RW, Bennett J, Eis G. Creating a low-cost autonomous vehicle (2002). *IEEE 2002 28th Annual Conference of the Industrial Electronics Society. IECON 02, 2002; 3112-3116. DOI: 10.1109/IECON.2002.1182894*
- Anderson JM, Nidhi K, Karlyn DS, Paul S, Constantine S, Oluwatola TA (2016) *Autonomous Vehicle Technology: A Guide for Policymakers*. Santa Monica, CA: RAND Corporation. DOI: <https://doi.org/10.7249/RR443-2>
- Nielsen KM, Andersen P, Pedersen TS, Bak T, Nielsen JD (2002). Control of an autonomous vehicle for registration of weed and crop in precision agriculture. *Proceedings of the International Conference on Control Applications*, 909-914. DOI: 10.1109/CCA.2002.1038723
- Naranjo JE, Clavijo M, Jiménez F, Gómez O, Rivera JL, Anguita M. Autonomous vehicle for surveillance missions in off-road environment (2016). *2016 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)*; 98-103. DOI: 10.1109/IVS.2016.7535371
- Yu JJQ, Lam AYS. Autonomous Vehicle Logistic System: Joint Routing and Charging Strategy (2018). *IEEE Trans. Intell. Transp.* 2175-2187. DOI: 10.1109/TITS.2017.2766682
- Arai Y, Miyagusuku R, Ozaki K. Development and Testing of Garbage Detection for Autonomous Robots in



- Outdoor Environments (2021). 2021 IEEE/SICE International Symposium on System Integration; 138-143.  
**DOI:** 10.1109/IEEECONF49454.2021.9382646
- Evan A., Volvo Takes the Right First Step in Autonomous Garbage Collection. IEEE Spectrum, 2017.
- Jha A, Singh A, Kerketta R, Prasad D, Neelam K, Nath V. Development of Autonomous Garbage Collector Robot. In: Nath V., Mandal J. (eds) (2019). Proceedings of the Third International Conference on Microelectronics, Computing and Communication Systems. Lecture Notes in Electrical Engineering, (556). Springer, Singapore.  
[https://doi.org/10.1007/978-981-13-7091-5\\_46](https://doi.org/10.1007/978-981-13-7091-5_46)
- Mayorga C, et al. GABOT: Garbage Autonomous Collector for Indoors at Low Cost (2019). 2019 International Conference on Mechatronics, Electronics and Automotive Engineering (ICMEAE), 56-61. DOI: 10.1109/ICMEAE.2019.00018
- Banu NMI, Florence SM. Convergence of Artificial Intelligence in IoT Network for the Smart City—Waste Management System. In: Jeena, JI, Gonzalez-Longatt FM, Kolandapalayam SS., Izonin I. (eds) (2022). Expert Clouds and Applications. Lecture Notes in Networks and Systems;(209). Springer, Singapore. [https://doi.org/10.1007/978-981-16-2126-0\\_21](https://doi.org/10.1007/978-981-16-2126-0_21)
- Divya B V and Latha N, "Smart Garbage Collection Autonomous Vehicle," 2021 4th International Conference on Recent Developments in Control, Automation & Power Engineering (RDCAPE), Noida, India, 2021, pp. 615-618, doi: 10.1109/RDCAPE52977.2021.9633553.
- Pyo J-W, Bae S-H, Joo S-H, Lee M-K, Ghosh A, and Kuc T-Y. Development of an Autonomous Driving Vehicle for Garbage Collection in Residential Areas. Sensors. 2022; 22(23):9094.  
<https://doi.org/10.3390/s22239094>
- Ying Wang, Xu Zhang. Autonomous garbage detection for intelligent urban management. MATEC Web Conf. 232 01056 (2018) DOI: [10.1051/mateconf/201823201056](https://doi.org/10.1051/mateconf/201823201056)
- Kulshreshtha M, Chandra SS, Randhawa P, Tsaramirsis G, Khadidos A, Khadidos AO. OATCR: Outdoor Autonomous Trash-Collecting Robot Design Using YOLOv4-Tiny. Electronics. 2021; 10(18):2292.  
<https://doi.org/10.3390/electronics10182292>
- Assis A, Biju A R, Alisha N, Dhanadas A, Kurian N. Garbage Collecting Robot Using YOLOv3 Deep Learning Mode. 2021 International Conference on Advances in Computing and Communications (ICACC), Kochi, Kakkannad, India, 2021, pp. 1-5, doi: 10.1109/ICACC-202152719.2021.9708298.
- Bai J, Lian S, Liu Z, Wang K, and Liu D., Deep Learning Based Robot for Automatically Picking Up Garbage on the Grass. in IEEE Transactions on Consumer Electronics, vol. 64, no. 3, pp. 382-389, Aug. 2018, doi: 10.1109/TCE.2018.2859629.
- Huang X R-, Chen W H, Pai W Y, Huang, G Z, Hu W C, and Chen L B. An AI Edge Computing-Based Robotic Automatic Guided Vehicle System for Cleaning Garbage," 2022 IEEE 4th Global Conference on Life Sciences and Technologies (LifeTech), Osaka, Japan, 2022, pp. 446-447, doi: 10.1109/LifeTech53646.2022.9754931.
- Aydın O, Molla E, Karadağ F, Güzeltepe B. (2021). Autonomous Garbage Vehicle for Public Parks. BSc, Eskişehir Technical University, Eskişehir, Turkey.
- Zhao ZQ, Zheng P, Xu ST, Wu X. (2019) Object detection with deep learning: A review. IEEE T Neur Net Lear. 30(11): 3212-3232.  
**DOI:** [10.1109/TNNLS.2018.2876865](https://doi.org/10.1109/TNNLS.2018.2876865)
- Zou Z, Shi Z, Guo Y, Ye J. (2019). Object detection in 20 years: A survey. arXiv preprint arXiv:1905.05055.  
<https://doi.org/10.48550/arXiv.1905.05055>
- Tivelius M. (2021) Real-time Small Object Detection using Deep Neural Networks. MSc thesis, KTH Royal Institute Of Technology School, Stockholm, Sweden.  
<https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1587035/FULLTEXT01.pdf>
- Redmon J, Divvala S, Girshick R, Farhadi A. (2016). You only look once: Unified, real-time object detection. In: IEEE conference on computer vision and pattern recognition, 779-788. [https://www.cv-foundation.org/openaccess/content\\_cvpr\\_2016/html/Redmon\\_You\\_Only\\_Look\\_CVPR\\_2016\\_paper.html](https://www.cv-foundation.org/openaccess/content_cvpr_2016/html/Redmon_You_Only_Look_CVPR_2016_paper.html)
- Park HJ, Lee S, Yun S, Kim H, Kim W-T. (2019) Dependable Fire Detection System with Multifunctional Artificial Intelligence Framework. Sensors; 19(9). Doi: [10.3390/s19092025](https://doi.org/10.3390/s19092025)
- Savla DV, Parab AN, Kekre KY, Gala JP, Narvekar M. (2020). IoT and ML based Smart System for Efficient Garbage Monitoring: Real Time AQI monitoring and Fire Detection for dump yards and Garbage Management System. Third International Conference on Smart Systems and Inventive Technology (ICSSIT).  
**DOI:** [10.1109/ICSSIT48917.2020.9214202](https://doi.org/10.1109/ICSSIT48917.2020.9214202)



## NiCr İÇERİKLİ TERMAL SPREY KAPLAMALARIN KATI PARTİKÜL EROZYON DAVRANIŞLARININ BELİRLENMESİ

Sefa Erdem YILMAZ<sup>1</sup>, Gülfem BİNAL<sup>2</sup>, Yasin ÖZGÜRLÜK<sup>3</sup>, Derviş ÖZKAN<sup>1\*</sup>, Abdullah Cahit KARAOĞLANLI<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Bartın Üniversitesi, Mühendislik, Mimarlık ve Tasarım Fakültesi, Makine Mühendisliği,

ORCID No : <http://orcid.org/0000-0002-6560-2554>, <http://orcid.org/0000-0002-4978-290X>

<sup>2</sup>Bartın Üniversitesi, Mühendislik, Mimarlık ve Tasarım Fakültesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği,

ORCID No : <http://orcid.org/0000-0003-4750-8787>, <http://orcid.org/0000-0002-1750-7989>

<sup>3</sup>Bartın Üniversitesi, Sağlık Hizmetleri Meslek Yüksekokulu, Tıbbi Hizmetler ve Teknikler, Optisyenlik,

ORCID No : <https://orcid.org/0000-0003-1121-5018>

Anahtar Kelimeler	Öz
NiCr Yüksek Hızlı Oksi Yakıt Termal Sprey Kaplama Katı Partikül Erozyonu Hasar Oluşumu	<i>Mühendislik uygulamalarında katı partikül erozyonu nedeniyle malzemeler çalışma koşulları altında hasara uğramaktadır. Malzeme yüzeylerinin erozyon, oksidasyon ve korozyon gibi hasar mekanizmalarına karşı korunması için kullanılan yöntemlerden birisi de termal sprey kaplama uygulamalarıdır. Bu çalışmada, yüksek hızlı oksi-yakıt termal sprey kaplama yöntemi ile 316L paslanmaz çelik altlık üzerine biriktirilen NiCr kaplamaların katı partikül erozyon davranışları incelenmiştir. Katı partikül erozyon deneyleri aşındırıcı alümina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) partikülleri ve farklı çarpma açıları kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Deneyler, özel bir test düzeneği yardımı ile yapılmıştır. Değişen çarpma açılarının yüzeyler üzerindeki etkisi, taramalı elektron mikroskobu ve 3D profilometre kullanılarak incelenmiş ve literatür çalışmaları ile karşılaştırmalı olarak tartışılmıştır. Katı partikül erozyon testleri sonrası en yüksek erozyon oranı 60°'lik çarpma açısında görülürken, bu değeri sırasıyla 30° ve 90°'lik çarpma açılarındaki erozyon oranları takip etmiştir. Taramalı elektron mikroskobu analizleri sonucu gerçekleştirilen tüm katı partikül erozyonu testlerinde numune yüzeylerine aşındırıcı Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> partiküllerinin gömüldüğü ve farklı hasar oluşumlarının meydana geldiği tespit edilmiştir.</i>

## DETERMINATION OF SOLID PARTICLE EROSION BEHAVIORS OF NiCr CONTAINING THERMAL SPRAY COATINGS

Keywords	Abstract
NiCr High Velocity Oxy-Fuel Thermal Spray Coating Solid Particle Erosion Damage Formation	<i>In engineering applications, materials are damaged under operating conditions due to solid particle erosion (SPE). One of the methods used to protect material surfaces against damage mechanisms are erosion, oxidation, and corrosion is thermal spray coating application. In this study, the solid particle erosion (SPE) behavior of NiCr coatings deposited on 316L stainless steel substrates by high velocity oxy-fuel (HVOF) thermal spray coating method was investigated. SPE experiments were performed using abrasive alumina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) particles and different impact angles. The experiments were carried out at room temperature with the help of a special test setup. The effect of varying impact angles on the surfaces was investigated using scanning electron microscopy (SEM) and a 3D profilometer and discussed in comparison with literature studies. After SPE tests, the highest erosion rate was realized at an impact angle of 60°, followed by erosion rates at impact angles of 30° and 90°, respectively. As a result of SEM analysis, it was determined that abrasive Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particles were embedded in the sample surfaces in all SPE tests performed, and different damage formations occurred.</i>

Araştırma Makalesi

Başvuru Tarihi

: 28.04.2023

Kabul Tarihi

: 14.08.2023

Research Article

Submission Date

: 28.04.2023

Accepted Date

: 14.08.2023

\* Sorumlu yazar: [dervisozkan@bartin.edu.tr](mailto:dervisozkan@bartin.edu.tr)

<https://doi.org/10.31796/ogummf.1289508>



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

Katı partikül erozyonu (KPE), havacılık, petrol, kimya ve enerji üretimi gibi birçok endüstride büyük ekonomik kayıplara neden olan yaygın bir malzeme bozunma mekanizmasıdır (Zhang, Dong ve Chen, 2017). Eroziyon aşınma esas olarak katı ve sıvı parçacıkların mekanik bileşenlerin yüzeyi üzerindeki tekrarlanan etkilerinden kaynaklanır (Thakur ve Arora, 2013). Yüzeyin, aşındırıcının momentumu ve kinetik enerjisi ile etkileşimi nedeniyle hasar meydana gelir (Swain, Mantry, Mohapatra, Mishra ve Behera, 2022). Aşındırıcının doğası, parçacık boyutu, çarpma hızı, çarpma açısı eroziyon aşınma oranını etkileyen önemli parametrelerdir (Debasish, Panigrahi, Sengupta ve Bajpai, 2022). Toz bulutları içinde uçan bir uçağın gaz türbini kanatları ve hidrolik pompaların pervaneleri gibi çeşitli makinelerde sıklıkla eroziyon aşınma görülür. Bu bileşenleri korumak için genellikle termal sprey kaplamalar kullanılır (Thakur ve Arora, 2013). Kaplamalar, altlık malzemelerin mekanik özelliklerinin korunmasına izin verir; aşınma, korozyon ve oksidasyona karşı direnç sağlarken malzemelerin kullanım sınırlarını da genişletirler (Ramesh, Prakash, Nath, Sapra ve Venkataraman, 2010; Karaoglanli, 2023). Termal sprey tekniğinde, kaplama malzemesi farklı kaynaklar aracılığıyla erime noktasına yakın veya daha yüksek bir sıcaklığa ısıtılır. Kaplama tozu partikülleri hızlandırılarak altlık tabakasının yüzeyine çarptırılır ve burada biriktirilir. Bu işlem sırasında yüksek sertliğe sahip katmanlı bir yapı oluşur. Termal sprey işleminde altlık tabakasının sıcaklığındaki artış minimum düzeyde olduğundan altlığın metalurjik özellikleri etkilenmeden kalır (Pradeep, Venkatesh ve Nithin, 2022). Termal sprey prosesleri, hammadde ve enerji kaynaklarına (elektrik ve kimyasal enerji) göre sınıflandırılır (Guduru, Dixit ve Kumar, 2022; Derelizade ve diğ., 2022). Termal sprey yöntemlerinden biri olan yüksek hızlı oksijen-yakıt (HVOF) yöntemi, esnekliği ve maliyet etkinliği nedeniyle tercih edilmektedir (Tan, Looney ve Hashmi, 1999). HVOF yöntemi ile üretilen kaplamalar, önemli ölçüde yüksek parçacık hızı ve nispeten düşük parçacık sıcaklığının bir sonucu olarak düşük oksijen içeriği, düşük gözeneklilik yüzdesi, yüksek yoğunluk, bağ kuvveti, tokluk ve sertlik gibi olağanüstü özelliklere sahiptir. HVOF fonksiyonel kaplamalar, performansı artırmak, ürün ömrünü uzatmak ve bakım maliyetini azaltmak için çeşitli endüstrilerde yaygın olarak kullanılmaktadır (Li ve Christofides, 2009; Prashar ve Vasudev, 2022; Ozkan, 2023; Odabas ve diğ., 2022; Ozgurluk, 2022). HVOF termal sprey yöntemi, NiCr kaplamalar üretmek için en uygun yöntemlerden biridir. Nikel bazlı alaşımlar erozyona, korozyona ve aşınmaya karşı mükemmel direnç sağlamaktadır (Sidhu, Sidhu ve Prakash, 2007). Bu nedenle yüksek sıcaklık uygulamalarında tercih edilen kaplamalardır.

Bu çalışmanın amacı, 316L paslanmaz çelik altlık malzeme üzerine HVOF yöntemi kullanılarak üretilen

80Ni-20Cr kaplamaların katı partikül erozyonu davranışlarının incelenmesidir. Kaplamaların KPE davranışı oda sıcaklığında 30°, 60° ve 90° çarpma açılarında, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> aşındırıcı partiküller kullanılarak belirlenmiştir. Erozyon oranları ağırlık kaybı yöntemi ile hesaplanmış ve sonuçlar optik profilometre çalışmaları ile desteklenmiştir. Ayrıca aşınmış yüzeyler SEM kullanılarak incelenmiş ve literatürde gerçekleştirilen çalışmalar ile değerlendirilerek karşılaştırılmıştır.

## 2. Yöntem

Bu çalışmada altlık malzeme olarak 25,4 mm çapında ve 5 mm kalınlığa sahip AISI 316L paslanmaz çelik kullanılmıştır. Altlık malzemeler, 40 ± 5 µm partikül boyutlu Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> tozu ve 2,5 bar basınç kullanılarak kumlama işlemine tabi tutulmuştur. Daha sonra etil alkol ile ultrasonik temizleme uygulanmıştır.

GTV (Almanya) Şirketi'nden temin edilen 80Ni-20Cr içerikli kaplama tozu kaplama malzemesi olarak kullanılmıştır. Tozlarının partikül boyut dağılımları Malvern Mastersizer 3000 partikül boyutu ölçüm cihazı yardımıyla belirlenmiştir. Bu ölçüme göre d(10) değeri 28,15 µm, d(50) değeri 44,35 µm ve d(90) değeri 72,95 µm'dir. Tozlar endüstriyel bir HVOF sprey tabancası (Hipojet 2700-M, Hindistan) ve Tablo 1'de listelenen parametreler kullanılarak, AISI 316L paslanmaz çelik yüzeylerde biriktirilmiştir. Kaplama sürecinde parametreler, literatür çalışmaları, sprey ekipmanı ve kaplama tozunun temin edildiği firma tarafından sağlanan veriler esas alınarak belirlenmiştir (Yılmaz, 2023; Özkan vd., 2023). Biriktirilen kaplamalar yaklaşık 100 µm kalınlığa sahiptir. Kaplanmış numunelerin, mikroyapı analizleri SEM (Tescan MAIA3 XMU, Çek Cumhuriyeti) cihazı kullanılarak yapılmıştır. Kaplanmış numunelerin faz yapısı 10° ile 90° 2θ tarama aralığı ve Cu Ka radyasyonu kullanılarak X-ışını kırınım (Rigaku, Dmax 2200 PC, Japonya) cihazı ile belirlenmiştir.

Tablo 1. HVOF İşleme Parametreleri

Kaplama	Yanma Gazları	Toz Taşıyıcı Gaz	Toz Besleme Gazı Akışı (slpm)	Kaplama Mesafesi (mm)
80Ni-20Cr	O <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub>	12,5	250

KPE testleri, ayarlanabilir numune fikstürü, nozul sabitleyici ve basınçlı hava kompresörü içeren özel olarak tasarlanmış bir deney düzeneğinde oda sıcaklığında gerçekleştirilmiştir. Deneyler sırasında kullanılan parametreler Tablo 2'de verilmiştir.

Tablo 2. Katı Partikül Erozyon Deney Parametreleri

Aşındırıcı Partikül	Aşındırıcı Partikül Boyutu (µm)	Basınç (Bar)	Kütlesel Debi (g/sn)	Çarpma Açısı (Derece)	Çarpma Mesafesi (mm)	Nozul Çapı (mm)
Alümina (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	65-80	1,5	3,89	30-60-90	20	3

Deney numunelerinin ağırlıkları  $\pm 0,0001$  mg hassasiyete sahip Kern & Sohn marka hassas terazi kullanılarak ölçülmüştür. Numunelerin KPE testlerinden önce ağırlıkları ( $m_1$ ) belirlenmiştir. KPE testlerinden sonra ağırlık ( $m_2$ ) ölçüm işlemi tekrarlanmıştır. Eşitlik 1 yardımıyla katı partikül erozyon oranı (E) hesaplanmıştır. Burada ( $\dot{m}$ ) aşındırıcı partiküllerin kütsel debisini (g/sn) ve (t) test süresini (sn) ifade etmektedir. Kütsel debiyi hesabında KPE testi sırasında kullanılan  $Al_2O_3$  miktarının belirlenmesi gerekmektedir. Harcanan  $Al_2O_3$  tozlarının depolanacağı bir hazne deney düzeneğinde bulunmaktadır. Yapılan her test sonrasında haznede toplanan  $Al_2O_3$  tozlarının ağırlığı (m) hassas terazi yardımı ile ölçülmüştür. Kütsel debi Eşitlik 2 yardımıyla hesaplanmıştır.

$$E = \frac{(m_1 - m_2)}{\dot{m} \times t} \quad (1)$$

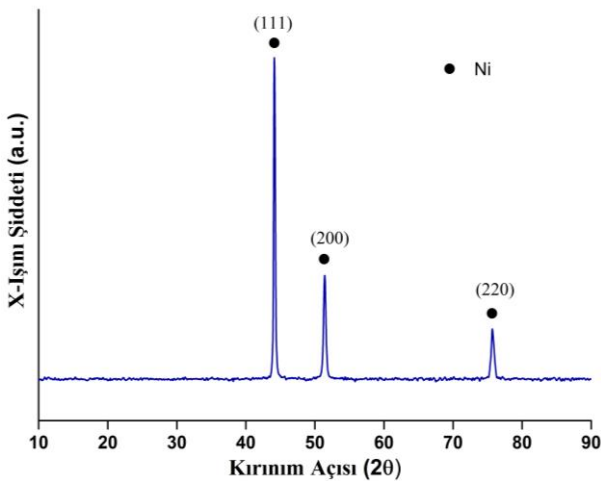
$$\dot{m} = \frac{m}{t} \quad (2)$$

SPE testlerinden sonra numune yüzeyleri SEM yardımıyla mikroyapısal inceleme işlemine tabi tutulmuştur. Ayrıca, KPE testleri sonrasında numunelerin iz derinlikleri ve aşınma ölçümleri 3D optik profilometre (Profil3D brand-ABD) kullanılarak incelenmiştir. Bu çalışmada, araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

### 3. Bulgular

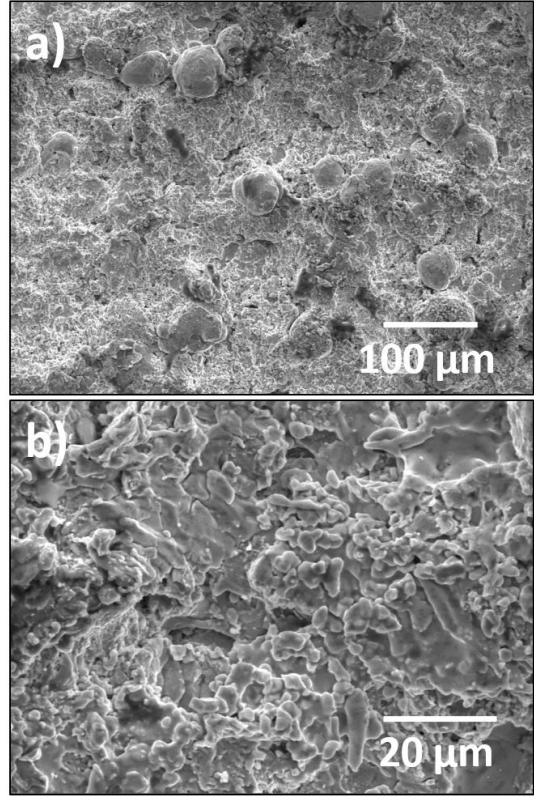
#### 3.1. Kaplama Tabakasının Karakterizasyonu

316L paslanmaz çelik altlık tabakası üzerinde biriktirilen 80Ni-20Cr kaplamanın XRD yüzey analizi, Şekil 1'de gösterilmektedir. Kaplamanın tek fazlı yüzey merkezli kübik (YMK) Y-Ni (Ni-Cr katı eriyiği) fazından oluştuğu benzer çalışmada da görülmektedir (Binal, 2023).



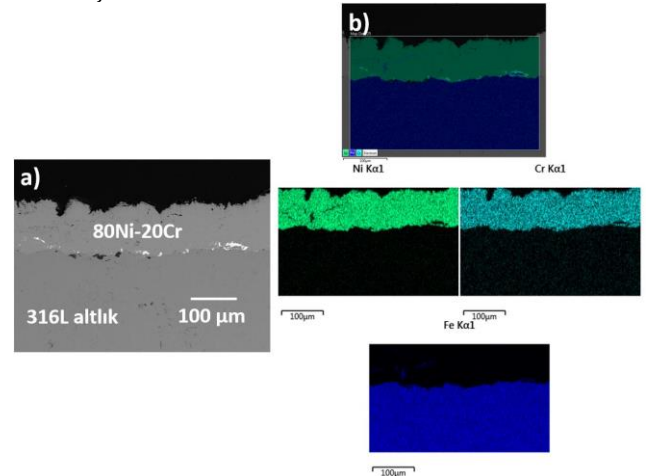
Şekil 1. NiCr Kaplamaya Ait XRD Paterni

Şekil 2'de, HVOF yöntemi ile üretilmiş, NiCr kaplamanın işlemsiz üst yüzey SEM görüntüsü verilmiştir. Kaplama yapısı incelendiğinde, düzensiz morfolojiye sahip birbirine kenetlenmiş ve kısmen erimiş partiküllerden oluştuğu görülmektedir. Kaplama yapısı yoğun görünmektedir ve partiküllerin düzgün bir şekilde birleştiği anlaşılmaktadır.



Şekil 2. NiCr Kaplamaların İşlemsiz Üst Yüzey 500 ve 3000x büyütmedeki SEM Görüntüleri

Şekil 3'de, HVOF yöntemi ile üretilmiş, 80Ni-20Cr kaplamanın arayüzey ve elementel haritalama mikroyapı görüntüleri 500 ve 3000x büyütmede verilmiştir.



Şekil 3. 80Ni-20Cr kaplama mikroyapısı; a) ara yüzey kesit görüntüsü ve b) elementel haritalama görüntüleri

### 3.2. NiCr Kaplamaların SPE Davranışları

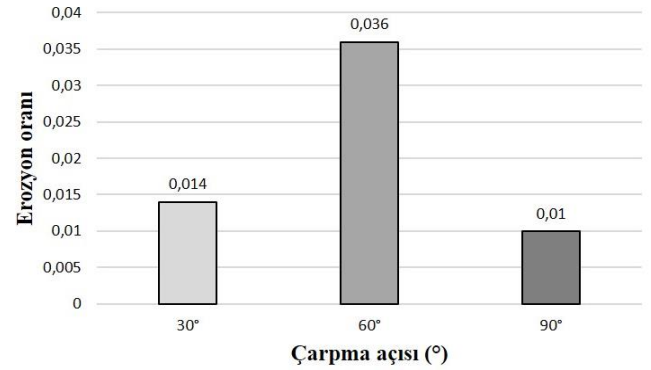
NiCr kaplamalı numunelerinin KPE testleri öncesi ve sonrasında ölçülen ağırlıkları, ağırlık kayıpları ve erozyon oranları Tablo 3'de verilmiştir.

Tablo 3. NiCr Kaplamaların KPE Testleri Sırasında Ölçülen Ağırlık Kaybı ve Aşınma Oranları

Altlık Kaplama	Çarpma Açısı	Çarpma Süresi (sn)	Kütleli Debi $\dot{m}$ (g/sn)	Ağırlık Kayıpları			Erozyon Oranları
				$m_1$ (g)	$m_2$ (g)	$\Delta m$ (g)	
316L 80Ni-20Cr	30°	20	3,89	2,8865	2,8866	0,0011	0,014
	60°			3,6917	3,6889	0,0028	0,036
	90°			2,1494	2,1486	0,0008	0,010

Şekil 4'de KPE testlerinde kullanılan çarpma açıları ve meydana gelen erozyon oranları (Tablo 3) arasındaki ilişkiyi gösteren grafik verilmiştir. Maksimum erozyon oranı 60° çarpma açısında yapılan test sonucu gerçekleşmiştir. Bu durum yüzey doyurma oranı ve partiküllerin deformasyon korelasyonu ile ilişkilidir. 60°'de meydana gelen erozyon oranını sırasıyla 30° ve 90°'de yapılan testler sonrasında oluşan erozyon oranları takip etmektedir. Çarpma açısı, hedef malzeme ile aşındırıcıların yörüngesi arasındaki açı olarak tanımlanır. Erozyon oranının çarpma açısına bağımlılığı büyük ölçüde hedef malzemenin doğası tarafından belirlenmektedir (Sundararajan ve Roy, 1997). Tipik olarak, bir malzemenin KPE davranışı sünek veya gevrek olarak sınıflandırılabilir (Bousser, Martinu ve Klemberg-Sapieha, 2014). NiCr kaplamalar KPE sırasında sünek yüzey özellikleri sergilemektedir. Sünek bir hedef malzeme için maksimum erozyon, normale göre yaklaşık 70-80°'lik geliş açılarında meydana gelir (Molinari ve Ortiz, 2002). Genel olarak, yeterince sığ geliş açılarında, erozyonun oyuklanma ve kesme eylemlerinin bir kombinasyonu ile gerçekleştiğine inanılmaktadır. Bu durumda plastik akış ve sürtünme, deformasyon ve enerji dağılımının temel mekanizmalarını oluşturmaktadır (Molinari ve Ortiz, 2002; Bousser ve diğ., 2014). Sünek bir malzeme 90°'lik çarpma açısı ile darbe aldığı daha az hasar görür. Çünkü bu malzemeler katı partiküller tarafından 90° (dikey yönde) darbe aldığı, yanal çekme gerilimi sünek malzemenin yüksek kırılma gerilmesi nedeniyle etkili bir şekilde hasara neden olmayabilir (Chen ve Li, 2003). Vicenzi, Marques ve Bergmann (2008) yaptıkları çalışmada, AISI 310 paslanmaz çelik altlık üzerine HVOF ve plazma sprey NiCr bazlı kaplamaların sıcak ve soğuk erozif aşınma mekanizmalarını değerlendirmiştir. Erozyon testleri özel olarak geliştirilmiş ekipmanlar farklı sıcaklıklar ve 30°, 45°, 60° ve 90° çarpma açıları kullanılarak erimiş alüminyum oksit aşındırıcı ile gerçekleştirilmiştir. Sonuçlar NiCr kaplamaların, monolitik metalik malzemelere benzer şekilde sünek özelliklere sahip olduğunu göstermiştir. 25°C sıcaklıkta en yüksek aşınma oranı 30°, en düşük aşınma oranı ise

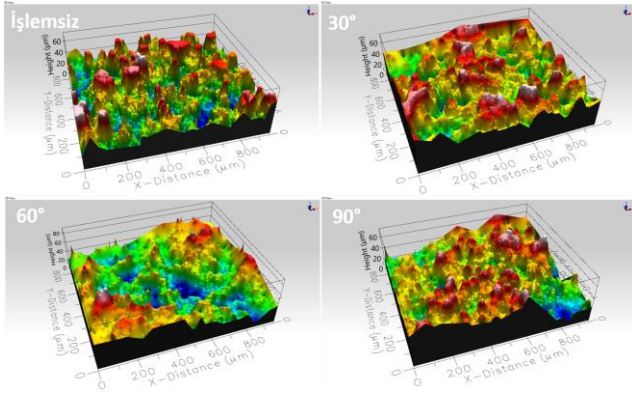
90° çarpma açıları gerçekleşmiştir. Plazma sprey kaplamaların gözeneklilik oranları HVOF kaplamalara göre yüksektir. Daha gözenekli kaplama daha yüksek aşınma oranları göstermektedir. Sidhu, Sidhu ve Prakash (2006), yaptıkları çalışmada HVOF yöntemi ile NiCr kaplanan kazan borusu çeliklerini KPE testlerine tabi tutmuşlardır. Kaplama işlemi hem toz formunda hem de tel formunda NiCr kullanılarak gerçekleştirilmiştir. KPE testleri bir hava jeti üzerinde erozyon test cihazı kullanılarak 150 ila 200 µm silika kum partikülleri ile 30° ve 90° çarpma açıları yapılmıştır. NiCr toz kaplama, NiCr tel kaplamaya kıyasla yüksek bir erozyon oranına sahiptir. 30°'lik çarpma açısında nispeten daha yüksek bir erozyon oranı gözlemlenmiştir, bu da kaplamanın sünek bir şekilde aşındığını göstermektedir.



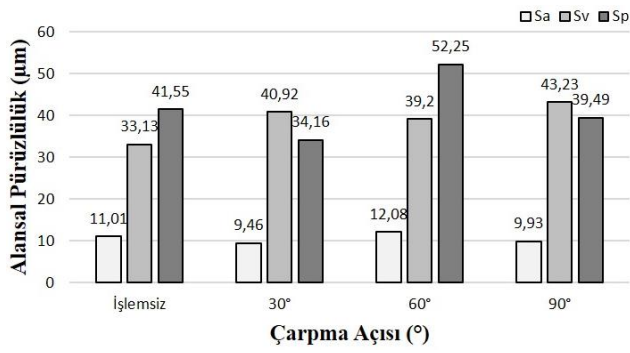
Şekil 4. Farklı çarpma açıları KPE testine tabi tutulmuş NiCr kaplamaların erozyon oranları

Şekil 5 ve Şekil 6'da KPE testi öncesi (işlemsiz) ve farklı çarpma açıları test edilmiş NiCr kaplamaların 3D profilometre analizi sonuçları görülmektedir. 3D profilometre cihazı ile ortalama alansal pürüzlülük (Sa), maksimum çukur derinliği (Sv), maksimum pürüz yüksekliği (Sp) değerleri tespit edilmiştir. Şekil 5'de verilen pürüzlülük değerleri ve Şekil 4'de verilen erozyon oranları arasında benzerlik olduğu görülmektedir. Pürüzlülük değerleri, yüksek erozyon oranlarında artmış, düşük erozyon oranlarında ise azalmıştır. En yüksek pürüzlülük verisi 60°'lik çarpma açısında gerçekleşmiştir. Pürüzlülük oranları partiküllerin yüzey doyurma ve deformasyon oranına bağlı olarak daha yüksek çıkmaktadır.





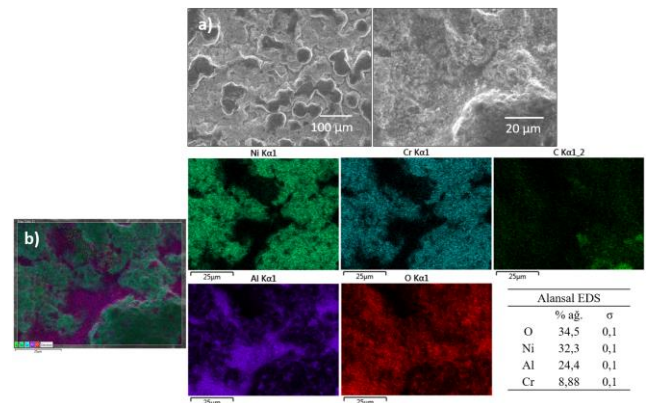
Şekil 5. Farklı çarpma açılarında KPE testine tabi tutulmuş NiCr kaplamaların 3D profilometre analizi sonuçları



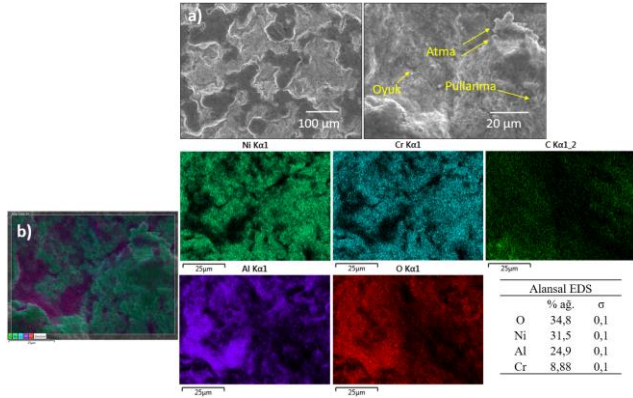
Şekil 6. Farklı çarpma açılarında KPE testine tabi tutulmuş NiCr kaplamaların pürüzlülük değerleri

Sünek malzemelerde erozyonun malzemenin plastik deformasyon gösterdiği oyuklanma ve kesme hasarları şeklinde meydana geldiği bilinmektedir. Maksimum erozyon oranı katı partiküller hedef malzemelere eğik olarak çarptığında ortaya çıkar. KPE için bu açı, hedef malzeme özelliklerinin bir fonksiyonudur ve aşındırıcı özelliklerine bağlı değildir. Seramik gibi gevrek malzemelerde ise, katı partiküllerden hedef malzemelerin yüzeyine enerji aktarımı söz konusu olmaktadır. Bu süreç malzeme deformasyonunu, çatlak oluşumunu ve yayılmasını tetiklemektedir (Wang ve Yang, 2008). Şekil 7, Şekil 8 ve Şekil 9'da farklı çarpma açılarında KPE testlerine tabi tutulmuş NiCr kaplamaların üst yüzey SEM görüntüleri, elementel haritalama ve EDS analizi sonuçları verilmektedir. Verilen SEM görüntüleri ile haritalama ve EDS analizleri incelendiğinde tüm çarpma açılarında kaplama yüzeylerine yüksek miktarda aşındırıcı partikül ( $Al_2O_3$ ) gömüldüğü görülmektedir. Gömülen aşındırıcı partiküller kaplama yüzeylerinde meydana gelen hasar mekanizmalarının tespitini zorlaştırmaktadır. En fazla aşındırıcı partikül gömülmesi  $60^\circ$  çarpma açısında gerçekleştirilen KPE testi sonucunda ortaya çıkmıştır. Yüksek hızlı partiküller sünek hedeflere çarptığında, bunların bir kısmı genellikle gömülü kalır (Hadavi, Arani

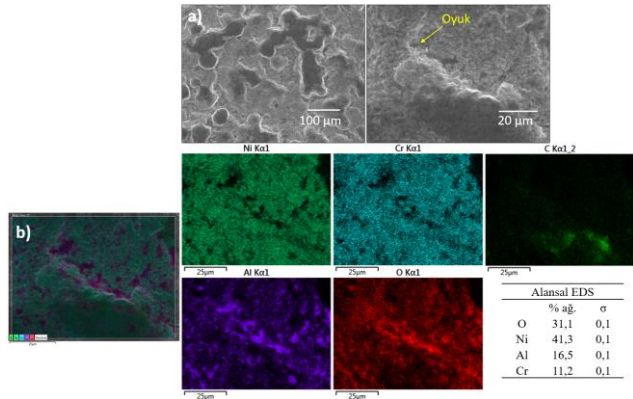
ve Papini, 2019). Gömülme, erozyon oranını azaltabilir ve yüzey pürüzlülüğünde istenmeyen değişimlere neden olabilir (Hadavi ve Panini, 2015). Sünek erozyonda başlangıçta partiküller hedef yüzeye gömülerek ağırlık kazanımına neden olabilir. Bu dönem kuluçka dönemi olarak bilinir. Kuluçka dönemi geçtikten sonra, aşınma genellikle sabit bir hızda ilerler. Maksimum ağırlık kaybı, gevrek ve sünek malzemeler için sırasıyla yaklaşık  $90^\circ$  ve  $30^\circ$  çarpma açısında bulunabilir (Tewari, Harsha, Häger ve Friedrich, 2003). Gömülen aşındırıcı partiküller Tablo 3'de verilen ağırlık kayıpları ve erozyon oranları üzerinde de önemli bir etki göstermiştir. Meydana gelen kütle kaybı oldukça azdır. Partikül gömülmesine yol açan proses parametrelerini belirlemek için yapılmış literatür çalışmaları mevcuttur. Partikül boyutunun artması (daha yüksek kinetik enerjili büyük partiküllerin çarpması) metalik hedeflerde gömülmenin artmasına yol açmaktadır (Day, Huang ve Richards, 2005; Akbarzadeh, Elsaadawy, Sherik, Spelt ve Papini, 2012; Hadavi ve diğ., 2019). Literatür çalışmaları, gömülmenin nispeten düşük hızda çarpan küçük partiküller ile de meydana gelebileceğini ortaya koymuştur. Getu, Spelt ve Papini, (2012), gömülme için minimum eşik hızının, gelen parçacığın hız vektörü çarpan parçacığın ana eksenine ile hizalandığında meydana geldiğini varsaymıştır. Çarpma açısı da parçacıkların gömülmesini etkileyen önemli bir faktördür ve maksimum gömülme dik gelişte meydana gelmektedir (Getu ve diğ., 2012; Hadavi ve Panini, 2015). Şekil 8'de verilen  $60^\circ$  çarpma açısında KPE testi sonrası SEM görüntüsü incelendiğinde aşındırıcı partikül gömülmesinin yanı sıra atma, oyuklanma ve pullanma şeklinde hasarlar meydana geldiği görülmektedir. Şekil 9'da verilen  $90^\circ$  çarpma açısında KPE testi sonrası SEM görüntüsünde ise aşındırıcı partikül gömülmesinin yanı sıra oyuklanma şeklinde hasar olduğu fark edilmektedir.



Şekil 7.  $30^\circ$ 'lik çarpma açısı ile KPE testine tabi tutulan NiCr kaplamasının a) üst yüzey SEM görüntüleri (500 ve 3000 büyütme), b) elementel haritalama ve EDS analizi



Şekil 8. 60°'lik çarpma açısı ile KPE testine tabi tutulan NiCr kaplamaların a) üst yüzey SEM görüntüleri (500 ve 3000 büyütme), b) elementel haritalama ve EDS analizi



Şekil 9. 90°'lik çarpma açısı ile KPE testine tabi tutulan NiCr kaplamaların a) üst yüzey SEM görüntüleri (500 ve 3000 büyütme), b) elementel haritalama ve EDS analizi

#### 4. Sonuçlar

Bu çalışmada, 316L paslanmaz çelik altlık malzeme üzerine NiCr kaplamalar üretilerek 30°, 60° ve 90° çarpma açıları KPE davranışları SEM, elementel haritalama ve 3D profilometre analizleri ile ayrıntılı olarak incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar maddeler halinde aşağıda verilmiştir.

- HVOF termal sprey kaplama yöntemi kullanılarak NiCr kaplamalar başarılı bir şekilde üretilmiştir. Kaplama yapısı geleneksel HVOF karakteristik mikroyapısına sahip ve yoğun niteliktedir.
- NiCr kaplamaların KPE testleri neticesinde en yüksek katı partikül erozyon oranı 60°'lik çarpma açısında gerçekleşmiş, bu değeri sırasıyla 30° ve 90°'lik çarpma açılarındaki erozyon oranları izlemiştir. KPE testleri sonrasında SEM görüntüleri incelendiğinde, kaplama yüzeylerine aşındırıcı Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> partiküllerinin gömüldüğü görülmüştür. NiCr kaplamalar, aşındırıcı Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> partikülünün

gömülmesi nedeniyle oldukça az kütle kaybı göstermiştir.

- En yüksek pürüzlülük değeri 60°'lik çarpma açısında elde edilmiş ve bu değeri 90° ve 30° çarpma açıları izlemektedir.
- Yüksek erozyon oranları pürüzlülük değerini artırırken, düşük erozyon oranları pürüzlülük değerini azaltmaktadır. Aşındırıcı partikül gömülmesinin, erozyon oranlarını azalttığı ve yüzey pürüzlülüğünde değişimlere neden olduğu öngörülmektedir. Aşındırıcı partikül gömülmesinin yanı sıra 60° çarpma açısında KPE testi sonrası kaplamada atma, oyuklanma ve pullanma şeklinde, 90° çarpma açısında ise oyuklanma şeklinde hasarlar meydana geldiği görülmektedir.

#### Teşekkür

Bu çalışma Bartın Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından 2021-FEN-A-009' nolu proje kapsamında desteklenmiştir.

#### Araştırmacıların Katkısı

Bu çalışmada; Sefa Erdem YILMAZ, deneylerin gerçekleştirilmesinde ve bilgisayar ortamına aktarılmasında, Gülfem BİNAL, literatür araştırmasında, sonuçların değerlendirilmesi, yorumlanması ve yazımında, Yasin ÖZGÜRLÜK, sonuçların değerlendirilmesi ve yazımında, Derviş ÖZKAN, özgün değerlerinin ortaya konulması, deneylerin tasarlanması, sonuçların değerlendirilmesi ve yazımında, Abdullah Cahit KARAOĞLANLI, özgün değerlerinin ortaya konulması, sonuçların değerlendirilmesi ve yazımı konularında katkı sağlamışlardır.

#### Çıkar Çatışması

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir.

#### Kaynaklar

- Akbarzadeh, E., Elsaadawy, E., Sherik, A. M., Spelt, J. K., Papini, M. (2012). The solid particle erosion of 12 metals using magnetite erodent. *Wear*, 282, 40-51. doi: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2012.01.021>
- Binal, G. (2023). Isothermal oxidation and hot corrosion behavior of HVOF sprayed 80Ni-20Cr coatings at 750° C. *Surface and Coatings Technology*, 454, 129141. doi: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2022.129141>
- Bousser, E., Martinu, L., Klemberg-Sapieha, J. E. (2014). Solid particle erosion mechanisms of protective coatings for aerospace applications. *Surface and*

- Coatings Technology*, 257, 165-181. doi: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2014.08.037>
- Chen, Q., Li, D. Y. (2003). Computer simulation of solid particle erosion. *Wear*, 254(3-4), 203-210. doi: [https://doi.org/10.1016/S0043-1648\(03\)00006-1](https://doi.org/10.1016/S0043-1648(03)00006-1)
- Day, J., Huang, X., Richards, N. L. (2005). Examination of a grit-blasting process for thermal spraying using statistical methods. *Journal of Thermal Spray Technology*, 14, 471-479. doi: 10.1361/105996305X76469
- Debasish, D., Panigrahi, A., Sengupta, P., Bajpai, S. (2022). Erosive wear characteristic of Mo-TiN composite coatings on turbocharger compressor wheel using Taguchi experimental design. *Materials Today: Proceedings*, 66, 534-539. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.06.114>
- Derelizade, K., Rincon, A., Venturi, F., Wellman, R.G., Kholobystov, A., Hussain, T. (2022). High temperature (900 C) sliding wear of CrNiAlCY coatings deposited by high velocity oxy fuel thermal spray. *Surface and Coatings Technology*, 432, 128063. doi: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2021.128063>
- Getu, H., Spelt, J. K., Papini, M. (2012). Conditions leading to the embedding of angular and spherical particles during the solid particle erosion of polymers. *Wear*, 292, 159-168. doi: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2012.05.017>
- Guduru, R. K., Dixit, U., Kumar, A. (2022). A critical review on thermal spray based manufacturing technologies. *Materials Today: Proceedings*, 62(13), 7265-7269. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.04.107>
- Hadavi, V., Arani, N. H., Papini, M. (2019). Numerical and experimental investigations of particle embedment during the incubation period in the solid particle erosion of ductile materials. *Tribology International*, 129, 38-45. doi: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2018.08.013>
- Hadavi, V., Papini, M. (2015). Numerical modeling of particle embedment during solid particle erosion of ductile materials. *Wear*, 342, 310-321. doi: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2015.09.008>
- Karaoglanli, A. C. (2023). Structure and durability evaluation of blast furnace slag coatings and thermal barrier coatings (TBCs) under high temperature conditions. *Surface and Coatings Technology*, 452, 129087. doi: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2022.129087>
- Li, M., Christofides, P.D. (2009). Modeling and Control of High-Velocity Oxygen-Fuel (HVOF) Thermal Spray: A Tutorial Review. *Journal of Thermal Spray Technology*, 18, 753-768. doi: <https://doi.org/10.1007/s11666-009-9309-2>
- Molinari, J. F., Ortiz, M. (2002). A study of solid-particle erosion of metallic targets. *International Journal of Impact Engineering*, 27(4), 347-358. doi: [https://doi.org/10.1016/S0734-743X\(01\)00055-0](https://doi.org/10.1016/S0734-743X(01)00055-0)
- Odabas, O., Ozgurluk, Y., Ozkan, D., Binal, G., Calis, I., Karaoglanli, A.C. (2022). Investigation of vermiculite infiltration effect on microstructural properties of thermal barrier coatings (TBCs) produced by electron beam physical vapor deposition method (EB-PVD). *Surface and Coatings Technology*, 443, 128645. doi: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2022.128645>
- Ozgurluk, Y. (2022). Investigation of oxidation and hot corrosion behavior of molybdenum coatings produced by high-velocity oxy-fuel coating method. *Surface and Coatings Technology*, 444, 128641. doi: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2022.128641>
- Ozkan, D. (2023). Structural characteristics and wear, oxidation, hot corrosion behaviors of HVOF sprayed Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-NiCr hardmetal coatings. *Surface and Coatings Technology*, 457, 129319. doi: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2023.129319>
- Özkan, D., Erdoğan, G., Özgurluk, Y., Binal, G., Yılmaz, S. E., Karaoglanli, A. C. (2023). YSZ seramik üst kaplamaya sahip termal bariyer kaplamaların (TBCs) katı partikül erozyon (SPE) davranışlarının incelenmesi. *Journal of Materials and Mechatronics: A*, 4(1), 100-115. doi: <https://doi.org/10.55546/jmm.1232869>
- Pradeep, D. G., Venkatesh, C. V., Nithin, H. S. (2022). Review on Tribological and Mechanical Behavior in HVOF Thermal-sprayed Composite Coatings. *Journal of Bio and Tribo Corrosion*, 8, 30. doi: <https://doi.org/10.1007/s40735-022-00631-x>
- Prashar, G., Vasudev, H. (2022). A review on the influence of process parameters and heat treatment on the corrosion performance of Ni-based thermal spray coatings. *Surface Review and Letters*, 29(01), 2230001. doi: <https://doi.org/10.1142/S0218625X22300015>
- Ramesh, M. R., Prakash, S., Nath, S. K., Sapra, P. K., Venkataraman, B. (2010). Solid particle erosion of HVOF sprayed WC-Co/NiCrFeSiB coatings. *Wear*, 269(3-4), 197-205. doi: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2010.03.019>



- Sidhu, H. S., Sidhu, B. S., Prakash, S. (2006). Comparative characteristic and erosion behavior of NiCr coatings deposited by various high-velocity oxyfuel spray processes. *Journal of materials engineering and performance*, 15, 699-704. doi: 10.1361/105994906X150713
- Sidhu, H. S., Sidhu, B. S., Prakash, S. (2007). Solid particle erosion of HVOF sprayed NiCr and Stellite-6 coatings. *Surface and Coatings Technology*, 202(2), 232-238. doi: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2007.05.035>
- Sundararajan, G., Roy, M. (1997). Solid particle erosion behaviour of metallic materials at room and elevated temperatures. *Tribology international*, 30(5), 339-359. doi: [https://doi.org/10.1016/S0301-679X\(96\)00064-3](https://doi.org/10.1016/S0301-679X(96)00064-3)
- Swain, B., Mantry, S., Mohapatra, S. S., Mishra, S. C., Behera, A. (2022). Investigation of Tribological Behavior of Plasma Sprayed NiTi Coating for Aerospace Application. *Journal of Thermal Spray Technology* 31, 2342-2369. doi: <https://doi.org/10.1007/s11666-022-01452-7>
- Tan, J. C., Looney, L., Hashmi, M. S. J. (1999). Component repair using HVOF thermal spraying. *Journal of Materials Processing Technology*, 92, 203-208. doi: [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(99\)00113-2](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(99)00113-2)
- Tewari, U. S., Harsha, A. P., Häger, A. M., Friedrich, K. (2003). Solid particle erosion of carbon fibre-and glass fibre-epoxy composites. *Composites Science and Technology*, 63(3-4), 549-557. doi: [https://doi.org/10.1016/S0266-3538\(02\)00210-5](https://doi.org/10.1016/S0266-3538(02)00210-5)
- Thakur, L., Arora, N. (2013). Solid particle erosion behavior of WC-CoCr nanostructured coating. *Tribology Transactions*, 56(5), 781-788. doi: <https://doi.org/10.1080/10402004.2013.797532>
- Vicenzi, J., Marques, C. M., Bergmann, C. P. (2008). Hot and cold erosive wear of thermal sprayed NiCr-based coatings: influence of porosity and oxidation. *Surface and Coatings Technology*, 202(15), 3688-3697. doi: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2008.01.010>
- Wang, Y. F., Yang, Z. G. (2008). Finite element model of erosive wear on ductile and brittle materials. *Wear*, 265(5-6), 871-878. doi: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2008.01.014>
- Yılmaz, S. E. (2023). HVOF tekniği kullanılarak üretilen WC-Co ve NiCr kaplamaların katı partikül erozif aşınma davranışlarının incelenmesi (Yüksek Lisans Tezi). Bartın Üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Bartın.
- Zhang, H., Dong, X., Chen, S. (2017). Solid particle erosion-wear behaviour of Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-NiCr coating on Ni-based superalloy. *Advances in Mechanical Engineering*, 9(3), 1-9. doi: 10.1177/1687814017694580



## BAZALT KESİM ATIKLARININ YER KAROSU MAT SIRLARDA KULLANIM POTANSİYELİNİN ARAŞTIRILMASI

Semra KURAMA<sup>1</sup>, Ege Anıl GÜRKAN<sup>1</sup>, Zahide BAYER OZTURK<sup>2\*</sup>, Yusuf KARACA<sup>3</sup>, Elif UBAY<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Eskişehir Teknik üniversitesi, Malzeme Bilimi ve Mühendisliği Bölümü, Eskişehir, ORCID No : <https://orcid.org/0009-0003-8261-4814>; <https://orcid.org/0000-0002-7554-3419>

<sup>2</sup> Nevşehir Hacı Bektaş Veli Üniversitesi, Metalurji ve Malzeme Mühendisliği Bölümü, Nevşehir, ORCID No : <https://orcid.org/0000-0001-8069-0694>

<sup>3</sup>Ar-Ge Merkezi, Seranit Granit Seramik A.Ş., Bilecik, ORCID No : <https://orcid.org/0000-0002-4885-6612>; <https://orcid.org/0000-0001-8008-7772>

Anahtar Kelimeler	Öz
<p>Basalt Seramik karo Pigment Atık değerlendirme</p>	<p>Seramik sırlarında, renk ve estetik etkileri artırmak amacıyla atık malzemelerin kullanımı önemli bir araştırma alanıdır. Bu atıkların seramik sırlarında renklendirici olarak potansiyel kullanımı, sürdürülebilirlik ve geri dönüşüm açısından büyük öneme sahiptir. Bu çalışmada, yer karosu mat sırlarında bazalt kesim atığı ilavesinin renk, faz ve mikroyapı üzerindeki etkisi araştırılmıştır. Bazalt kesim atığının kimyasal, faz ve tane boyut analizi ile karakterizasyonu yapılmış ve ağı. %1-9 oranında bazalt kesim atığının endüstriyel karo mat sırna eklenmesiyle, sırlar beyazdan açık kahve bej tonlarına dönüşmüş ve yüzeylerde benekli bir yapı oluşmuştur. Bazalt kesim atığının sır bünyesine ilavesinde direkt kullanımının yanı sıra 900-1100°C aralığında farklı sıcaklıklarda kalsinasyonu sonrasında kullanımı sonucu sır yapısında anortit, kristobalit ve diopsit fazları tespit edilmiştir. Standart mat sır ve ağı. %9 oranında atık (BKA) içeren mat sırlı yer karolarının mikroyapı analizlerinde (SEM/EDS) anortit kristalleri ve Ca, Fe içeriğinin arttığı tespit edilmiştir. Bu çalışma sonucunda, yer karosu mat sırlarının bej tonlarında bazalt atığıyla renklendirilmesinin, ekonomik açıdan avantaj sağlayabileceği ve atığın geri dönüşümüne katkıda bulunabileceği, sır üretiminde potansiyel bir renklendirici olarak kullanılabilmesi sonucuna varılmıştır.</p>

## AN INVESTIGATION OF UTILIZATION POTENTIAL OF BASALT CUTTING WASTE IN FLOOR TILE MATTE GLAZES

Keywords	Abstract
<p>Basalt Ceramic tile Pigment Waste assessment</p>	<p>The utilization of waste materials in ceramic glaze formulations to enhance color and aesthetic characteristics represents a significant area of research. Emphasizing sustainability and recycling, the exploration of these waste materials as colorants in ceramic glazes hold paramount importance. This study aimed to investigate the impact of incorporating basalt-cutting waste into floor tile matte glazes on color, phase composition, and microstructure. The basalt-cutting waste was subjected to thorough characterization, involving chemical analysis, phase identification, and particle size assessment. By introducing 1-9% of this waste into the industrial tile matte glaze, shifting the glaze color from white to appealing light brown beige tones, while generating a captivating mottled surface structure. The glaze structure analysis revealed the presence of anorthite, cristobalite, and diopside phases, both from the direct incorporation of basalt-cutting waste and its usage after calcination at various temperatures ranging from 900-1100 °C, using standard matte glaze and mesh. Microstructure analyses (SEM/EDS) of the floor tiles with 9% waste addition (BKA) demonstrated an increase in anorthite crystal formation and elevated levels of Ca and Fe content. These results substantiate the feasibility of coloring floor tile matte glazes with basalt waste in attractive beige tones, offering economic advantages, contributing to waste recycling, and presenting a viable option as a colorant in glaze production.</p>

Araştırma Makalesi

Başvuru Tarihi : 02.08.2023

Kabul Tarihi : 31.08.2023

Research Article

Submission Date : 02.08.2023

Accepted Date : 31.08.2023

\* Sorumlu yazar: [z.ozturk@nevsehir.edu.tr](mailto:z.ozturk@nevsehir.edu.tr)  
<https://doi.org/10.31796/ogummf.1336323>



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

Seramik endüstrisinde hijyen, temizlik ve estetik gibi özellikleri iyileştirmek ve geliştirmek amacı ile kaplama malzemesi olarak seramik sırlar tercih edilmektedir. Kullanılan seramik sırlar, belirli kompozisyondaki hammaddelerin, seramik bünye üstüne uygulanması ve pişirilmesi ile ortaya çıkan homojen silikat esaslı karışımlardır. Sırların sertlikleri, kimyasal dayanımları ve gaz ile sıvılara karşı geçirmezlikleri yüksektir, bu nedenle camlara benzerlik gösterirler. Bu özellikleri sayesinde seramik sırlar, seramik endüstrisinde kullanım için tercih edilen kaplama malzemeleridir (Parmelee ve Harman, 1973). Bu seramik sırlar, seramik ürünlerin aşınma ve mukavemet direncini artırma, kimyasallara karşı dayanıklılığını güçlendirme, yapıdaki renk hatalarını gizleme ve dekorasyon çeşitliliğini artırma gibi birçok özelliği geliştirmek için kullanılmaktadır (Eppler ve Eppler, 2000; Kartal, 1998; Taş Anlı vd., 2022).

Seramik endüstrisinde, yüzeylere parlaklık ve opaklık sağlayan sır malzemelerinin üretimi sürekli olarak artmaktadır. Ayrıca, tasarım alanındaki ilerlemelere bağlı olarak zemin-duvar kaplamaları ve sağlık gereçlerinde renkli ürünlere olan talebin arttığı gözlemlenmektedir. Özellikle mat renkli ürünlerde, siyah ve benzer tonlara olan talebin artması ile üretim ve aynı zamanda hammadde ve enerji maliyetleri büyük ölçüde etkilenmektedir (Rasteiro, Gassman, Santos ve Auntos 2006). Renkli seramik ürünlerin üretiminde yüzeye uygulanan sırların üretiminde, doğal hammaddeler, metal oksitler ve özel olarak hazırlanmış inorganik sentetik pigmentler kullanılmaktadır. Farklı renkler elde etmek için çeşitli pigmentlerin kullanıldığı bu bileşimler, farklı oksitlerden oluşmaktadır (Tanışan ve Turan, 2010). Pigmentlerin üretiminde genellikle saf oksitler kullanılmakta olup, bu da pigment maliyetini arttırmaktadır. Bununla birlikte, üretim maliyetinde önemli bir payı olan pigment maliyetini azaltmak için son yıllarda alternatif hammadde kullanımıyla ilgili çalışmalar önemli hale gelmiştir.

## 2. Bilimsel Yazın Taraması

Pigmentler için alternatif hammadde araştırma ve kullanımı amaçlı yapılan çalışmalarda, daha ekonomik doğal hammaddeler ve/veya değerli metalleri içeren atıklar kullanılarak renkli pigmentler üretildiği ve bu pigmentlerin çeşitli sır ve malzemelerde renk performansının araştırıldığı görülmektedir. Turan, İnceefe ve Ozel (2004) dökme demir dökümhanesinden çıkan öğütme atıklarını demir kaynağı olarak kullanılarak demir-krom pigmentleri ve kromit karışımları üretmiştir. Elde edilen pigmentleri, hem duvar karosu şeffaf sırlarında hem de yer karosu saten sırlarında kullanmışlardır. Ozel, Turan, Çoruh ve Ergün (2006) bakır cürufundan flotasyon atıklarının termal yöntemle arıtılması ve seramik endüstrisinde inorganik

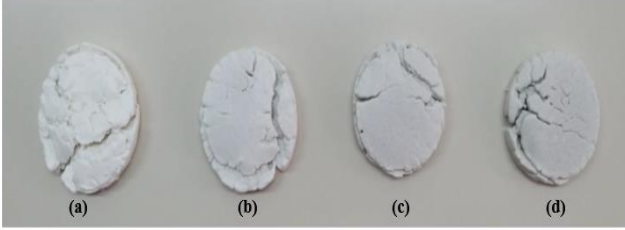
kahverengi ve siyah pigmentlerin üretiminde demir kaynağı olarak atıkların kullanımını incelemiştir. Pigmentler farklı miktarlarda flotasyon atıkları ile kromit, Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, ZnO ve CoO karışımlarının kalsine edilmesiyle üretilmiştir. Elde edilen pigmentler şeffaf seramik sırlara ve porselen karo bünyelere katılmıştır. Bayer Ozturk ve Ay (2010); Bayer Ozturk, Pekkan, Taşçı ve Yılmaz (2020) ve Bayer Ozturk ve Dal (2022) ferrokrom uçucu kül, granüle kurşun-çinko cürufu ve kromit proses atığının karo sırlarında kullanılabilirliğini araştırmıştır. Her üç çalışmada da kahve tonlarının elde edilebilirliğinde alternatif ucuz bir pigment malzemesi olarak endüstriyel atıkların değerlendirilebileceğini tespit etmişlerdir.

Doğada kristalimsi veya camsı yapıda bulunan bazalt, esas olarak feldispat bileşeninden oluşan koyu gri ve siyah renkte bir volkanik kayadır. Bazalt bloklarının kullanım amaçlarına göre kesilip boyutlandırma sürecinde kesme işlemi sırasında, atık olarak nitelendirilen bazalt tozları ortaya çıkmaktadır. Taş işletmelerinde bu atık tozların depolanma, tozlaşma gibi sorunları için gerekli önlemler alınmalıdır (Koçyiğit ve Çay, 2019). Yapılan literatür araştırmasında bu atık tozların seramik sırlarında kullanımına ilişkin çalışmaların sınırlı olduğu görülmektedir. Yapılan çalışmalarda bazaltın çömlek opak sırası ve düşük pişirim karo sırasında renklendirici olarak, firit sıcaklıklarının 50-100°C düşürülebilmesinde kullanılabilir olduğu tespit edilmiştir (Eren Gültekin, 2020; Prstic, Acimovic-Pavlovic, Pavlovic, Andric ve Terzic, 2007). Bu çalışmada, bazalt kesim atığının literatürde yapılan çalışmalardan farklı olarak işleme tabi tutmadan (direkt) ve kalsine işlemine tabi tutulduktan sonra olmak üzere iki farklı uygulama ile endüstriyel bir firmada kullanılan yer karosu mat sıradaki etkisi ve pigmentle birlikte kullanımı değerlendirilmiştir.

## 3. Yöntem

Çalışmada, araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur. Pigment yerine kullanılacak olan ve Emre Taş Madencilik (Kayseri) Firmasından temin edilen bazalt kesim atığı (BKA) kimyasal analizi (XRF-Rigaku ZSX Primus) ve pigment formunda kullanılacağı için 32 mikron altına havanda öğütülen atığın tane boyut dağılımı analizi (Malvern 2000 model) yapılmıştır. Bazalt kesim atığı ve hazırlanan sırlı numunelerin kristal fazları incelemesi için XRD-Rigaku Rint 2000 marka cihaz ile (2°/dk tarama hızı ve 2θ=10° -70° açı aralığında) ölçüm yapılmıştır. Endüstriyel firmada (Seranit Seramik Fabrikası, Bilecik), yer karosu üretiminde kullanılan mat sırda farklı oranlarda (ağ. %3-9) BKA katkısı kullanılarak sır denemeleri yapılmıştır. Ayrıca, atığın sır içinde standart kompozisyonda kullanılan siyah renk pigmenti ile karşılaştırılarak renk değerleri incelenmiştir. Yer karosu mat sır içerisine ilave edilen BKA uygulaması ile ürünün renk, yüzey ve parlaklık değerleri incelenmiştir.

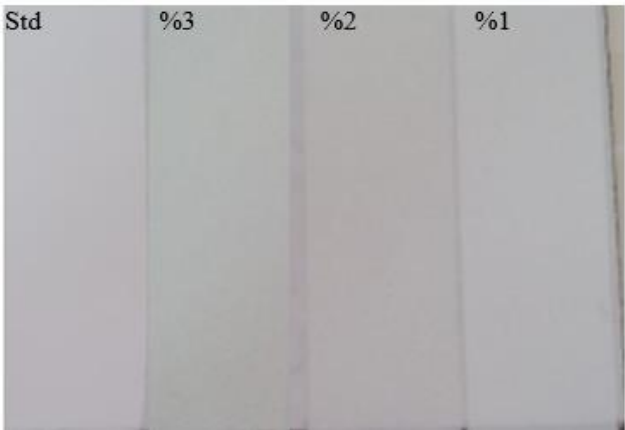
Şekil 1'de yer karosu mat sırası içerisinde ağ. %1-3 oranlarında BKA'nın ilave edilmesi ile rengin koyulaştığı gözlenmiştir. Çalışmada kullanılan yer karosu mat sırası reçetesindeki hammaddeler Tablo 1'de gösterilmiştir. Hazırlanan sırlar çekme aleti yardımı ile işletme şartlarına uygun olarak yer karolarına uygulanmıştır. Şekil 2'de mat sırası içerisinde ağ. % 1-3 ilaveli bazalt kesim atığı içeren 1213°C-43 dakika endüstriyel pişirime tabii tutulan numunelerin yüzey görüntüleri verilmiştir.



Şekil 1. Yer karosu mat sırası içerisinde farklı oranlarda BKA katkısı uygulamaları (a) katkısız; (b) ağ. %3; (c) ağ. %6; (d) ağ. % 9.

Tablo 1. Endüstriyel mat sırası içeriği

Hammaddeler	Oranlar (ağ.%)
Frit 1	20-25
Frit 2	8-10
Dolomit	18-20
Alümina	8-10
Zirkonyum Silikat	5-7
Wollostonit	7-10
Albit	26-30
Kaolin	8-10



Şekil 2. BKA katkılı mat sırası yer karosu.

Pişirme sonrası yüzey renginin %3 ilaveden sonra koyulaştığı görülerek mat sırası ağ. %3, 6 ve 9 oranlarında bazalt kesim atığı ilave edilerek uygulama yapılmıştır. Sırlı numune kodları ve tanımları Tablo 2'de verilmektedir. Yer karosu (YK) mat sırası ile ağ. %3-6-9 oranında atık ilavesi ile karıştırılarak 0,4'lük çekme aleti yardımı ile yer karosu mat engoplu karo üzerine

uygulanmıştır. Denemeler standart ağ. %3 oranında boya içeren YK mat sırası ve boya içermeyen standart mat sırası ile beraber karşılaştırmalı olarak analiz edilmiştir. Numuneler, yer karosu mat rejiminde

(1201°C-43') pişirilmiştir. Ayrıca, BKA'nın farklı sıcaklıklarda kalsinasyonu yapılarak mat sırası etkileri incelenmiştir. BKA numunesi, 900, 1000 ve 1100°C'de Protherm marka kül fırınında (15 dakika tepe noktasında bekleme süresi) kalsine edilmiştir. Mat sırası reçete çalışmalarının numune kodları Tablo 3'de görülmektedir.

Tablo 2. Sırlı numuneler ve kodları

Kodlama	Numuneler İçeriği
STD	YK Mat sırası
BM-P	ağ. %3 STD Siyah boya + Mat sırası
BM-3	ağ. %3 BKA + Mat sırası
BM-6	ağ. %6 BKA + Mat sırası
BM-9	ağ. %9 BKA+ Mat sırası

Tablo 3. Kalsine Edilmiş BKA Katkılı Reçete Kodları ve Tanımlaması

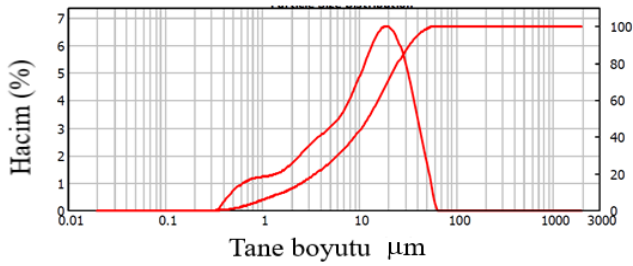
Kodlama	Kalsinasyon sıcaklığı, (°C)	BKA, (ağ. %)
B93	900	3
B96	900	6
B99	900	9
B103	1000	3
B106	1000	6
B109	1000	9
B113	1100	3
B116	1100	6
B119	1100	9

#### 4. Bulgular

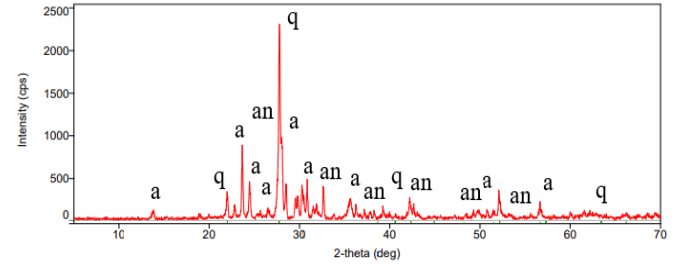
Bazalt taşı kesim atığının kimyasal analiz sonuçları Tablo 4'de, tane boyut dağılımı grafiği Şekil 3'de sunulmuştur. Kimyasal analiz sonucuna göre bazalt kesim atığı ağ. %10 üzerinde demir oksit ( $Fe_2O_3$ ) içermektedir. Tane boyut dağılımı  $d(0,5 \mu m)$ : 12,3;  $d(0,9 \mu m)$ : 33,3 olarak belirlenmiştir olup, bazalt kesim atığının X-ışını kırınımı ile belirlenen kristal fazları andesin, anortit ve kuvars olarak tespit edilmiştir (Şekil 4).

Tablo 4. BKA'nın XRF analiz sonucu

Bileşen	Bileşim (ağ.%)
Na <sub>2</sub> O	3,42
MgO	6,24
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	17,24
SiO <sub>2</sub>	49,47
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,22
SO <sub>3</sub>	0,07
Cl	0,04
K <sub>2</sub> O	0,61
CaO	10,35
TiO <sub>2</sub>	1,33
MnO	0,16
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10,26
AZ.	0,53



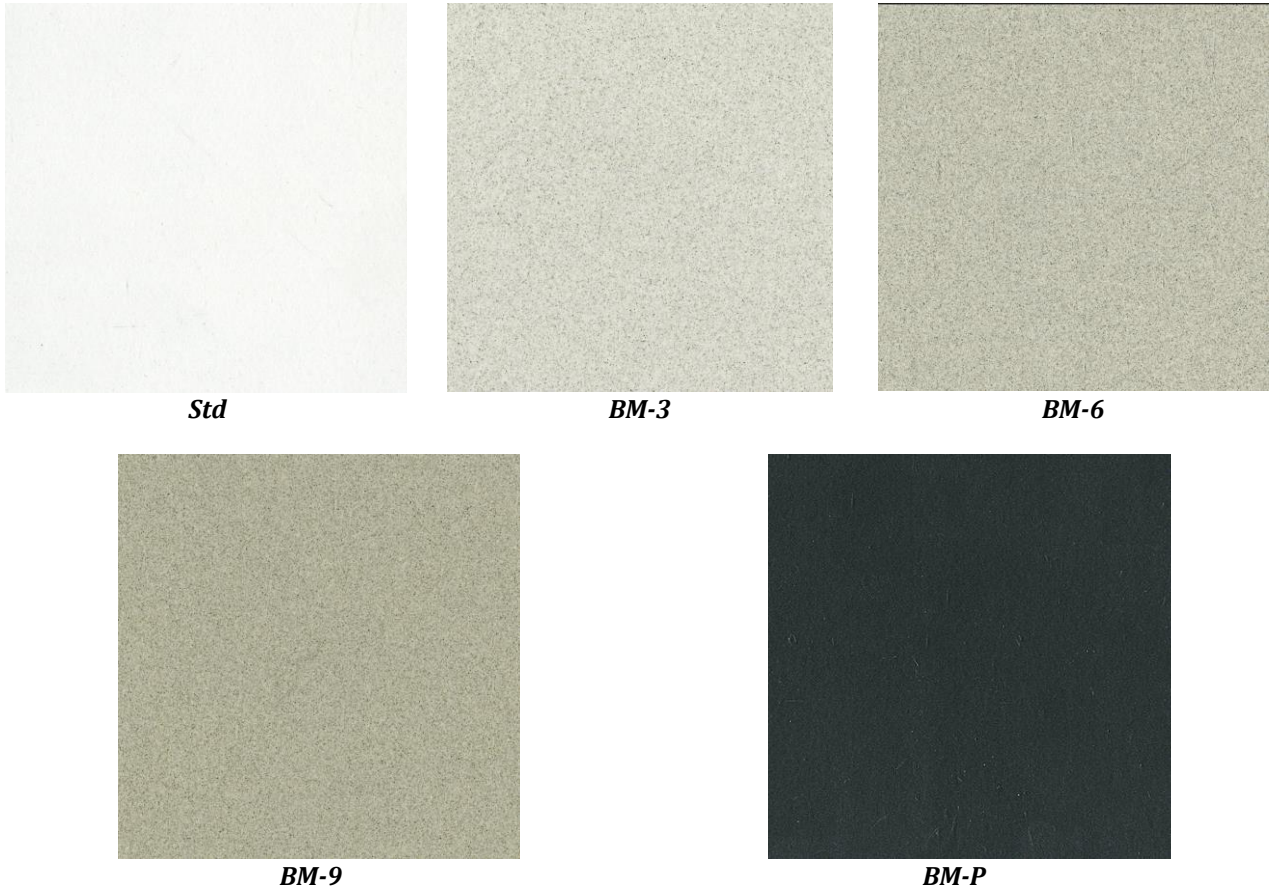
Şekil 3. BKA'nın tane boyut dağılım grafiği



Şekil 4. BKA'nın kristal fazları (an: Andesin, a: Anortit, q: Kuvars)

#### 4.1. Ağırlıkça %3-9 bazalt atığı içeren mat sırlı yüzeyler

Pişme sonrası yüzey renginin ağ. %3 ilaveden sonra koyulaştığı görüldüğü mat sıra ağ. %3, 6 ve 9 oranlarında BKA ilave edilerek uygulama yapılmıştır. Şekil 5'de pişirilen karoların yüzey görünümleri verilmiştir. BKA miktarının artması ile yüzeyde benekler meydana gelmiştir. Bunun yanı sıra ağ. %3 oranında siyah pigment ilaveli sır ile karşılaştırıldığında renk şiddetinin siyah boya kadar etkili olmadığı tespit edilmiştir.



Şekil 5. BKA ilavesinin mat karosu parlak sırda renk ve dokuya etkisi



#### 4.2. Kalsinasyon sonrası bazalt kesim atıklarının mat sırda kullanımı

Benek dokusunun bazı seramik yüzeylerde farklı etki (efekt) oluşturabilmesi nedeniyle denemelerde BKA'nın farklı sıcaklıklarda kalsinasyonu yapılarak mat sırda etkileri incelenmiştir. Farklı sıcaklıklarda kalsine edilen bazalt kesim atıklarının içeriğinde oluşan fazları tespit etmek için XRD analizi yapılmıştır. Şekil 6'da farklı sıcaklıklarda kalsine edilen bazalt atığının mat sırda uygulaması ve endüstriyel pişirim (1206°C-43 dakika) sonrası yüzey görüntüleri gösterilmiştir. Farklı sıcaklıklarda kalsinasyon yapılmasının renk değişimine etkisi olmamakla birlikte sır içinde bulunma oranının artması ile rengin koyulaştığı ve beneklerin arttığı tespit edilmiştir. Farklı sıcaklıklarda yapılan kalsinasyon işlemi sonrası (900-1100°C) bazalt kesim atıklarının (kalsinasyon sıcaklığına göre sırasıyla kodlaması B-900; B-1000, B-1100 olan) XRD ile tespit edilen faz analizi sonuçları Şekil 7' de verilmiştir. Analiz sonuçlarına göre sır bünyesinde üç ana faz olarak anortit, hematit ve diopsit fazları gözlemlenmektedir. 900-1110°C sıcaklık aralığında kalsine edilen bazalt kesim atıklarının faz analiz eğrilerinin genel olarak benzer eğilim sergilediği, kalsinasyon sıcaklığının artışıyla anortit ve diopsit fazlarının çok etkilenmediği ancak hematit fazına ait pik şiddetinin arttığı göze çarpmaktadır. BKA'nın kalsine işlemi öncesi ve sonrası kullanıldığı mat sırlı yüzeylerin renk analiz sonuçları Tablo 5'de görülmektedir. Numunelerin L değerlerine bakıldığında karışımdaki atık katkı miktarının artışıyla ve kalsinasyon sıcaklığı artışı ile rengin koyulaştığı açıkça görülebilmektedir. Ayrıca yüzeylerde benekli bir dokunun olduğu göze çarpmaktadır. Standartta bu yüzeyin görülmemesi, diğer sırlarda benekli yüzeyin oluşması, BKA içeriğindeki demir oksit kaynaklı olarak bu oluşumun gerçekleştiğini düşündürmektedir. Kalsine BKA 'nın kristal faz analizinde tespit edilen hematit fazı bu düşünceleri destekler niteliktedir.

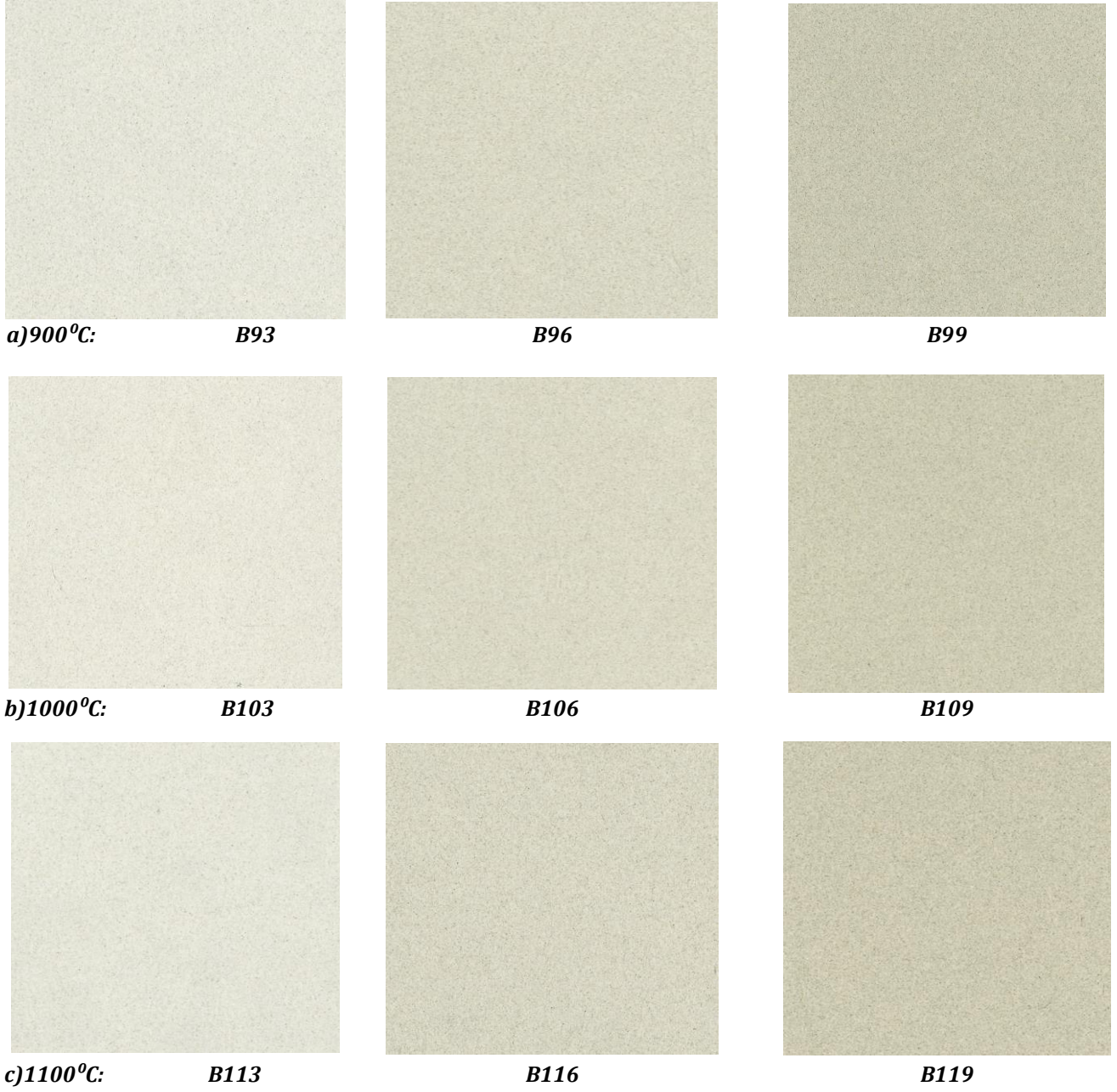
Kalsinasyon sonrası yer karosu mat sırlı içerisinde oluşan benek dokusunu görmek için ağırlıkça değişen oranlarda BKA'nın ilavesi ile hazırlanan sırlı yer karolarının endüstriyel pişirimi (1206°C-43') yapılmıştır. BKA'nın farklı sıcaklıklarda, kalsinasyon işlemine tabi tutulması ile sır yüzeylerinde belirgin bir renk değişimi veya benek efekti oluşumu etkisi gözlemlenmemiştir. Bunun yanı sıra, sır içinde ki BKA

oranının artması ile yüzey renginin koyulaştığı ve benek efektinin arttığı tespit edilmiştir. Sırlı yüzeylerin sertlikleri karşılaştırıldığında 1100°C'de kalsine edilen numune ile yapılan denemenin yüzeyinin sertleştiği (dokusal olarak) ve leke tutacağı, 1000 °C'de kalsine edilen numunenin yüzey yumuşaklığı (dokusal olarak) bakımından en uygun yüzey olduğu, 900°C'de kalsine edilen numunenin yüzeyinde ise küçük iğne deliği hatalarının oluştuğu tespit edilmiştir.

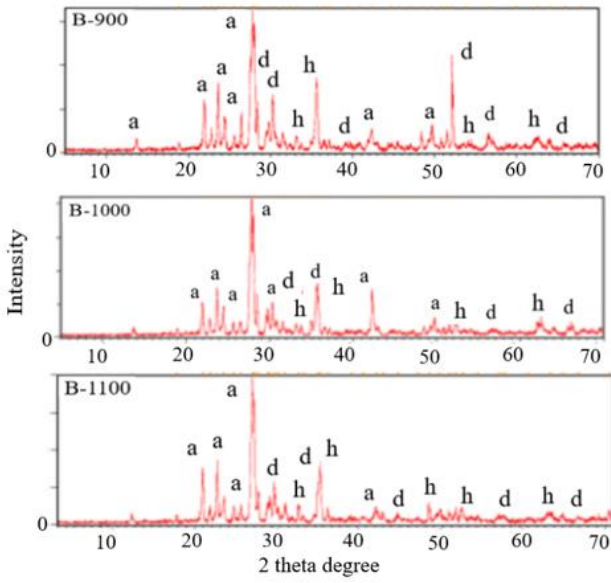
STD mat sır numunesinin XRD analiz sonucu Şekil 8' de verilmiştir. Tespit edilen fazlar; anortit, zirkon ve diopsit olarak görülmektedir. Farklı sıcaklıkta kalsine bazalt atığı içeren sırlı numunelerin XRD sonuçları Şekil 9'da verilmiştir. Analiz sonuçlarında da görüldüğü gibi, 900°C'de kalsine edilmiş, B-900 katkılı sır numunelerinde farklı oranlarda (ağ. %3-9) anortit (a), kristobalit (c) ve diopsit (d) fazları meydana gelmiştir. B96 numunesinde ağ. % 6 oranında BKA ilavesi kristobalit fazı oluşumu ile ağ. % 9 oranında BKA ilavesinde ise diopsit fazı oluşumu ile sonuçlanmıştır. Aynı fazlar 1000°C ve 1100°C'de kalsinasyon işlemine tabi olan diğer numunelerin sır içerisine katıldığı mat sırlı numunelerde de tespit edilmiştir. Sırlı numunelerin XRD analizlerinde, anortit ve diopsit fazlarının yanı sıra kristobalit fazının bulunmasının nedeni olarak, bazalt atığı ilavesi ile artan SiO<sub>2</sub> ve Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> içeriğine bağlı olarak sırlı erime sıcaklığının arttığı düşünülmektedir.

Tablo 5. Sırlı numunelerin renk parametreleri

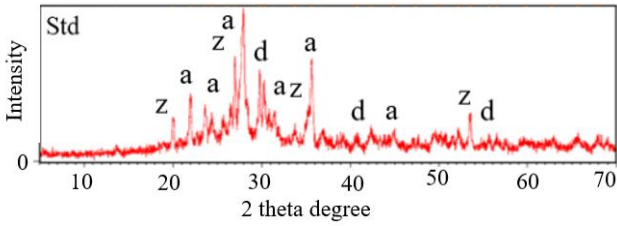
Kodlama	L	a	b
STD	91,73	-0,11	-1,96
BM1	89,70	-0,21	-0,49
BM2	87,96	-0,25	0,75
BM3	86,44	0,26	1,53
BM6	75,29	-0,15	5,09
BM9	70,28	-0,09	7,53
B93	84,64	-0,28	3,98
B96	81,18	-0,22	5,78
B99	78,81	-0,15	7,55
B103	84,90	-0,33	4,34
B106	86,46	-0,29	6,18
B109	77,42	-0,20	8,05
B113	84,92	-0,35	3,72
B116	80,90	-0,18	5,85
B119	76,84	0,09	7,84



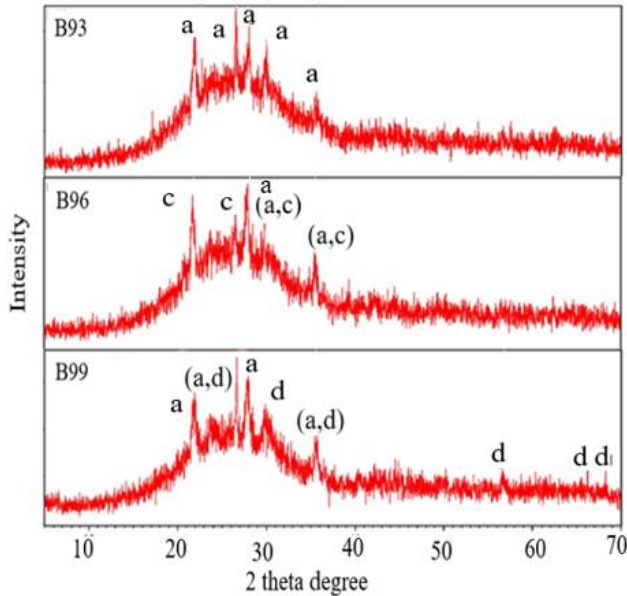
Şekil 6. (a)900°C'de (b)1000°C'de (c) 1100°C'de Kalsine-BKA katkılı mat sır yüzey görüntüsü: ağ. %3; ağ. %6 ve ağ. %9



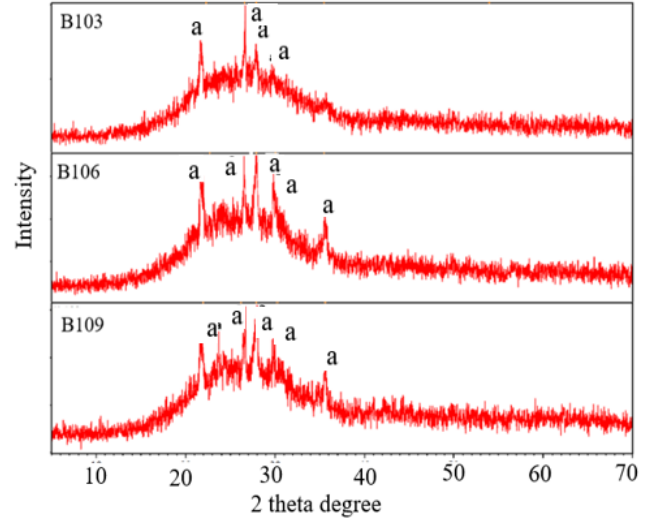
Şekil 7. Kalsine edilmiş BKA'nın XRD faz analiz sonuçları (a: Anortit, d: Diopsit, h: Hematit)



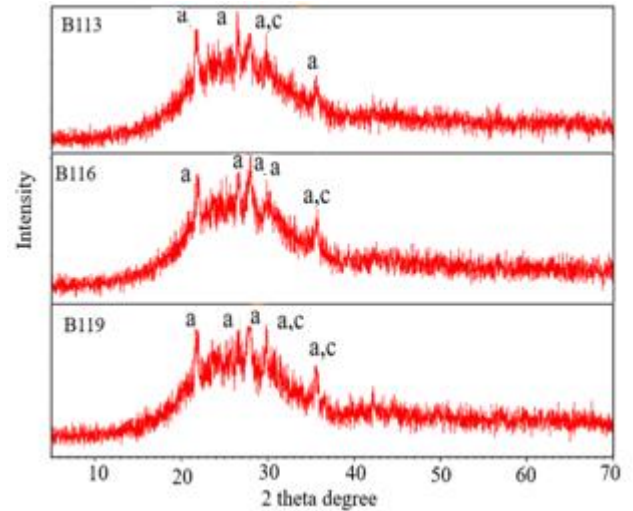
Şekil 8. Mat sırlı faz analiz sonucu (a: Anortit, z: Zirkon, d: Diopsit)



Şekil 9a. B-900 katkılı sırlı mat yüzeylerin faz analizi (a: Anortit, d: Diopsit, c: Kristobalit)

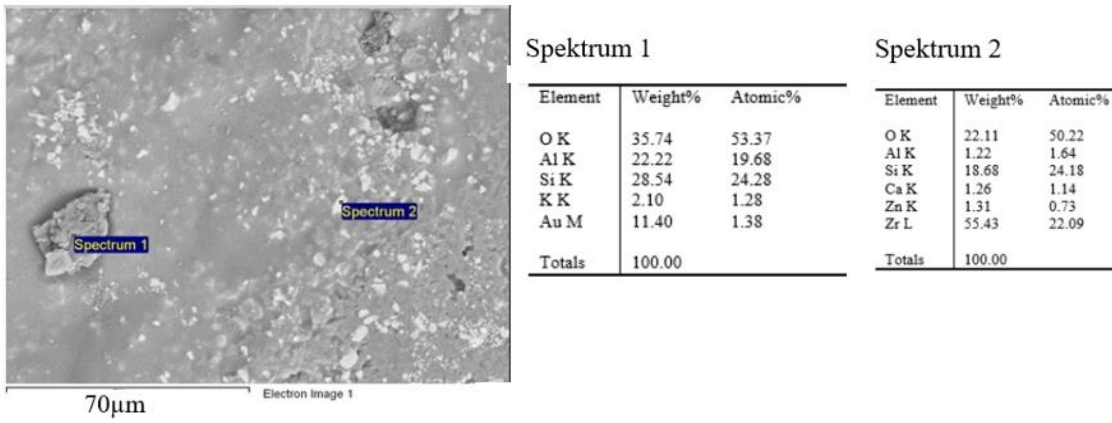


Şekil 9b. B-1000 katkılı sırlı mat yüzeylerin faz analizi (a: Anortit)

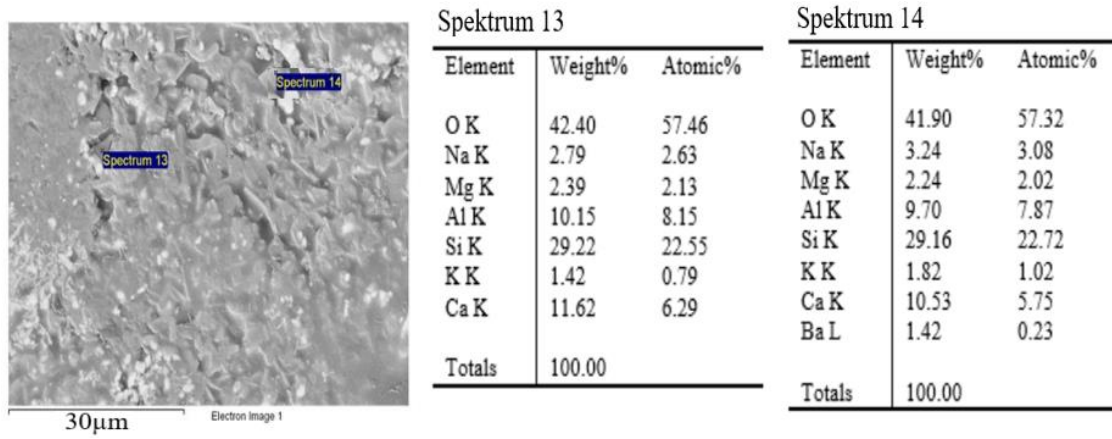


Şekil 9c. B-1100 katkılı sırlı mat yüzeylerin faz analizi (a: Anortit, c: Kristobalit)

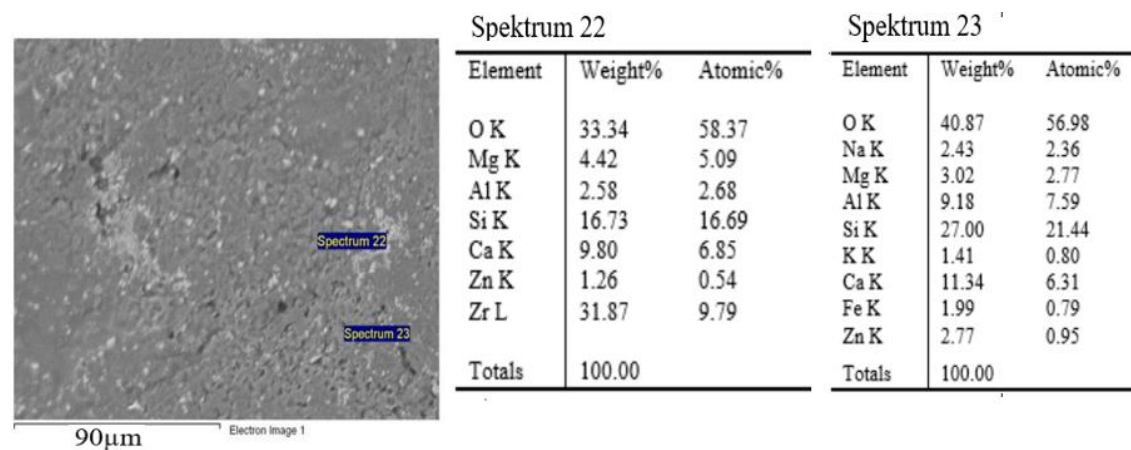
Mikroyapı analizleri için standart mat sırlı yüzey (STD) ve 1000°C'de kalsine edilen, minimum miktarda, ağı. %3 (B103) ve maksimum miktarda, ağı. %9 (B109) BKA katkısı ile geliştirilen sırlı numunelerinin yüzeyleri SEM/EDS analizi ile incelenmiştir (Şekil 10). SEM sonuçlarında çoğunlukla kuvars, anortit fazları ve sırdan gelen zirkon fazlarına rastlanmıştır. Özellikle EDS analiz sonuçlarına göre BKA katkısının ağı. %3 olduğu numunede STD'ye göre kalsiyum içeriği, ağı. %9 katkılandırılmış sırlı numunede ise her iki numuneye kıyasla demir içeriği ve anortit kristallerine bağlı Ca içeriğinin yüksekliği dikkat çekmektedir.



Şekil 10a. Standart mat sırlı numunenin (STD) mikroyapısı (SEM/EDS analizi)



Şekil 10b. B103 mat sırlı numunenin mikroyapısı (SEM/EDS analizi)



Şekil 10c. B109 mat sırlı numunenin mikroyapısı (SEM/EDS analizi)



## 5. Tartışma

Prstic ve diğ. (2007) bazaltı 980-1020°C'ye ulaşan hızlı pişirim karo sırlarının içindeki frit içeriğinde ağırlık % 25-60 oranında kullanmıştır ve sır içeriğinde ticari demir oksit, kobalt ve mangan oksit pigmentleri ile birlikte değerlendirmişlerdir. Bazaltın daha az pigment kullanımı sağlaması, frit pişirim sıcaklığını da 50-100°C düşürebildiğini, hammaddelere bağlı olarak daha ucuz, kaliteli sırların elde edilebildiği tespit edilmiştir. Ögütülmüş bazaltın, %0, %5, %10, %15, %20, %40, %60 oranlarında opak çömlek sırasına ilave edildiği çalışmada ise bazalt içeriğine bağlı olarak sır içeriğindeki zirkon fazına ek olarak anortit fazının elde edildiği, sırların L\* parametrelerinin düştüğü tespit edilmiştir. Doğal bir pigment olarak çömlek sırlarının renklendirilmesinde bazaltın kullanılabilir olduğu belirlenmiştir (Eren Gültekin, 2020). Bu çalışma, katkı miktarı artışı ile L\* değerinin düşmesi, anortit fazının oluşması sonuçları ile literatürü destekler nitelikte olup, mat sırda kullanımının değerlendirilmesi, benekli bir sır yüzeyi oluşumu ile farklı dekorlama etkileri, ham ve kalsine edilerek kullanım koşullarının incelenmesi özellikleri ile literatürdeki çalışmalardan farklıdır.

## 6. Sonuçlar

Yer karosu mat sırasına BKA'nın ağırlık % 3-9 oranında ilave edilmesiyle sırlı yüzey renginde beyazdan açık kahve bej tonlarına dönüşüm sağlandığı gözlenmiştir. Bu durum aynı zamanda yüzeylerde benekli bir efekt etkisinin elde edilmesini de sağlamıştır. Bu çalışma ile alternatif bir ürün olarak benekli dekoratif kaplamaların da kullanılabilirliği değerlendirilmiştir.

Bazalt kesim atığının 900, 1000 ve 1100 °C'de kalsine edilmesiyle, diopsit, kuvars ve anortit içeren mat sır reçetesi üzerine ağırlık %3-6-9 oranlarında ilave edildiğinde, anortit, kristobalit ve diyopsit fazlarının tespit edildiği görülmüştür.

Mikroyapısal analizlerde, 1000°C'de kalsine edilen %9 oranında bazalt atığı içeren sırlı örneklerin, standart mat sırlara kıyasla anortit kristalleri ve kimyasal bileşimde artan Ca, Fe içeriği ile dikkat çektiği belirlenmiştir.

Mat sırların renklendirilmesinde bej tonlarında bazalt atığının kullanımının, aynı zamanda farklı pigmentlerle karıştırılarak kullanılmasının maddi açıdan katkı sağlayabileceği ve atığın geri dönüşümüne de yardımcı olabileceği tespit edilmiştir.

## Teşekkür

Bu çalışma Eskişehir Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Koordinasyon Birimi tarafından "Kayseri Yöresi Bazalt Kesim Atığının Renkli Karo Üretiminde Kullanımının İncelenmesi", No:22ADP321 nolu proje ve "Seramik Surlarda Siyah/Kahverengi Pigmentlere Alternatif Olarak Kayseri Yöresi Bazalt

Kesim Atığının Kullanımının İncelenmesi" TÜBİTAK Projesi 2209-B Üniversite Öğrencileri Sanayiye Yönelik Araştırma Projeleri Destekleme Programı - B (2022/2 Dönemi), Proje No: 1139B412201419 kapsamında desteklenmiştir. Endüstriyel süreçler ve hammadde temini desteği için Seranit Granit Seramik Ar-Ge Merkezine, bazalt kesim atığı temini desteği için Emre Taş Madencilik A.Ş.'ye (Kayseri) ve Tanju ÇALIMLI'ya çok teşekkür ederiz.

## Araştırmacıların Katkısı

Bu çalışmada; E.A. Gürkan deney sürecinin planlanması, temin edilen ve hazırlanan numunelerin karakterizasyonu, makalenin düzenlenmesi, S.Kurama sonuçların takibi, deneylerin gerçekleştirilmesi, Z.Bayer Ozturk endüstriyel üretim sürecinin takibi, bilimsel yayın araştırması ve makalenin oluşturulması, Y.Karaca ve E.Ubay endüstriyel denemelerin gerçekleştirilmesi, ilgili standartlara uygunluğunun kontrolü konularında katkı sağlamışlardır.

## Çıkar Çatışması

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir.

## Kaynaklar

Bayer Ozturk, Z. and Ay, N. (2010) The effect of ferrochromium fly ash as a pigment on wall tile glaze, *Adv. Sci. Tech.* 68, 213-218. Erişim adresi: <https://www.scientific.net/AST.68.213>

Bayer Ozturk, Z. and Dal, S. (2022). Characterization of industrial ceramic glazes containing chromite processing waste: Experimental factorial design effects on color parameters, *Materials Chemistry and Physics*, 282, 125928. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2022.125928>.

Bayer Ozturk, Z., Pekkan, K., Taşcı, E. and Yılmaz, S. (2020). The effect of granulated lead-zinc slag on aesthetic and microstructural properties of single-fired wall tile glazes, *Journal of Australian Ceramic Society*, 56, 609-617. doi: <https://doi.org/10.1007/s41779-019-00372-0>.

Eppler, R.A. ve Eppler, D.R. (2000). Glazes and Glass Coatings. *American Ceramic Society*.

Eren Gultekin, E. (2020) Investigation of Basalt Addition to Opaque Pottery Glaze, *International Journal of Engineering Research and Development*, 12, 91-97. Doi: <https://doi.org/10.29137/umagd.481501>

Kartal, A. (1998). Sır ve Sırlama Teknikleri. Çizgi Matbaacılık.

- Koçyiğit, S. and Çay, V.V. (2019) Investigation of mechanical and thermal behavior cutting waste added clay brick, *European Journal of Technique*, 9 (2), 209-2018. Doi: <https://doi.org/10.36222/ejt.643209>
- Ozel, E., Turan, S., Çoruh, S. and Ergun, O.N. (2006). Production of brown and black pigments by using flotation waste from copper slag, *Waste Manage. Res.*, 24, 125-133. Doi: <https://doi.org/10.1177/0734242X06062690>
- Parmelee, C.W. ve Harman, C.G. (1973). Ceramic Glazes. 3rd ed. Cahnners Books.
- Prstic, A., Acimovic-Pavlovic, Z., Pavlovic, L., Andric, L. and Terzic, A. (2007) The application of basalt in the manufacturing of ceramic glazes, *Journal of Mining and Metallurgy*, 43 A (2007) 53 - 60. Erişim adresi: <https://www.jmma.tfbor.bg.ac.rs/Volumes/2007/06.pdf>.
- Rasteiro, M.G., Gassman, T., Santos, R. & Auntes, E. (2006). Crystalline phase characterization of glass-ceramic glazes, *Ceramic International*, 33, 345-354.
- Taş Anlı, S., Taplı, M.C., Köroğlu, A., Gülalan, F.N., Korkmaz, A., Yağcı, T., Çulha, O. (2022). Recipe development for matte glaze application on floor tiles, 13. UBAK Kongresinde sunulmuş bildiri, Ankara.
- Tanışan, B., Turan, S. (2010) Use of ferrochrome in Fe-Cr Black ceramic pigment production, *Journal of Engineering and Architecture Faculty of Eskişehir Osmangazi University*, 23 (2), 53-65. Erişim adresi: <https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/320345>
- Turan, S., Inceefe, Y., and Ozel, E. (2004) Production and characterisation of pigments produced using grinding waste from cast iron foundry, *Key Eng. Mater.*, 264-268, 2473- 2476. Erişim adresi: <https://www.scientific.net/KEM.264-268.2473>.

## A NEW APPROACH TO TENSILE TESTING OF GFRP BARS

Kerem AYBAR<sup>1\*</sup>, Meltem ERYILMAZ YILDIRIM<sup>2</sup>, Mehmet CANBAZ<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Eskisehir Osmangazi University, Metallurgical and Materials Engineering, Eskisehir,

ORCID No : <https://orcid.org/0000-0001-6347-843X>

<sup>2</sup> Eskisehir Osmangazi University, Civil Engineering, Eskisehir,

ORCID No : <https://orcid.org/0000-0003-2750-0235>

<sup>3</sup> Eskisehir Osmangazi University, Civil Engineering, Eskisehir,

ORCID No : <https://orcid.org/0000-0002-0175-6155>

Keywords	Abstract
GFRP rebars Mechanical Properties Tensile Testing Experimental Analysis Sustainable Construction	<i>Tensile testing is a critical procedure for evaluating the mechanical properties of Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP) bars, which emerged as an alternative to traditional steel reinforcement in reinforced concrete structures. While significant research has led to the development of testing standards for GFRP bars, their implementation often necessitates additional specimens and specialized equipment compared to their steel counterparts. This study proposes a new method for conducting GFRP tensile tests using standard equipment designed for conventional structural steel rebar testing. By employing existing devices, our approach offers a practical and cost-effective solution for assessing the tensile properties of GFRP reinforcement. This simplified testing method aims to enhance efficiency, facilitate wider adoption of GFRP bars in reinforced concrete structures, and contribute to the advancement of sustainable construction practices. As a result of the study, it has been observed that this testing method can be effectively used.</i>

## GFRP DONATILARIN ÇEKME TESTİ İÇİN YENİ BİR YAKLAŞIM

Anahtar Kelimeler	Öz
GFRP donatılar Mekanik Özellik Çekme Testi DeneySEL Analiz Sürdürülebilir Yapı	<i>Çekme testi, geleneksel çelik donatıya alternatif olarak kullanılan Cam Elyaf Takviyeli Polimer (GFRP) çubukların Mekanik özelliklerin değerlendirilmesinde kritik bir rol oynamaktadır. GFRP çubuklar için test standartlarının geliştirilmesi için yapılan araştırmalar önemli bir aşamaya gelmiş olmasına rağmen, çelik donatıların testlerine kıyasla, bu testlerin uygulanması genellikle daha çok sayıda numune ve özel ekipman gerektirmektedir. GFRP çekme testleri için bu çalışmada, çelik donatılar için kullanılan mevcut test ekipmanlarının kullanıldığı yeni bir yöntem önerilmektedir. Geliştirilen bu yenilikçi yaklaşım, GFRP takviye elemanlarının mekanik özelliklerinin değerlendirilmesi için pratik ve maliyet-etkin bir çözüm sunmaktadır. Bu test yöntemi, GFRP çubukların betonarme yapılarda daha yaygın olarak kullanılmasını kolaylaştırarak verimliliği artırmayı ve sürdürülebilir inşaat uygulamalarının ilerlemesine katkıda bulunmayı hedeflemektedir. Yapılan deneyler sonucunda bu test yönteminin etkili olarak kullanılabileceği görülmüştür.</i>

Research Article

Submission Date

: 03.07.2023

Acceptation Date

: 11.09.2023

Research Article

Submission Date

: 03.07.2023

Accepted Date

: 11.09.2023

\* Corresponding author: [kaybar@ogu.edu.tr](mailto:kaybar@ogu.edu.tr)  
<https://doi.org/10.31796/ogummf.1322110>

### 1. Introduction

Fiber Reinforced Polymer (FRP) bars have gained significant attention as an alternative to traditional steel reinforcement in reinforced concrete structures due to their excellent corrosion resistance, high strength-to-weight ratio, and potential for improving the durability and sustainability of constructions (Bakis et al., 2002;

Balendran, Rana, Maqsood and Tang, 2002; Benmokrane, Chaallal and Masmaudi, 1995; Gudonis et al., 2014; Nanni, 1993). Although a great amount of research promotes the application of FRP bars in structures, the widespread use of FRP bars is limited due to the anisotropic nature and some mechanical drawbacks, such as lower elasticity modulus and different mechanical behavior under tension and



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/>).

compression compared to steel rebars (Kodur, Venkatachari, Matsagar and Singh, 2022; Liu et al., 2021). Tensile testing of GFRP bars is a fundamental requirement for evaluating their mechanical properties and ensuring their safe and efficient utilization in a wide range of structural applications. Mechanical properties and performance of FRP bars have been investigated through tensile testing by recent studies (Al-Salloum, El-Gamal, Almusallam, Alsayed and Aqel, 2012; D'Antino and Pisani, 2023; Feng et al., 2022; Hitesh Kumar, Mohandoss and Anjana, 2023; Kocaoz, Samaranyake and Nanni, 2005; Lu, Yang and He, 2021; Spagnuolo, Rinaldi, Donnini and Nanni, 2021; Wiater and Siwowski, 2020; You, Kim, Park, Seo and Lee, 2017). These studies have focused on various parameters, such as ultimate tensile strength, modulus of elasticity, strain capacity, and failure modes.

Several codes and standards have been implemented different methods to assess the tensile characteristics of FRP bars (ASTM D7205/D7205M-21, 2021; CNR-DT 203/2006, 2007; CSA S806-12, 2012; JSCE-E 531, 1995). Table 1 lists different standards for tensile testing of FRP bars and compares their specifications. In the table,  $\phi$  represents the nominal diameter,  $f_u$  is the ultimate strength, and A is the cross-section area of the FRP

rebar. These standards specify specimen dimensions, loading rates, and testing conditions to ensure reliable and consistent results. However, adherence to these standards often requires specialized equipment and increased specimen quantities, making the testing process complex and costly. Furthermore, individual standards also vary in their tensile test requirements, such as the length of the test specimen, gage length of extensometer, test duration, and speed of the test. Another issue is the length of the specimen. As given in Table 1, free length of the specimen should be at least 100 mm or 40 times of the nominal diameter. If anchorage length is added to the required free length, the total length of the specimen exceeds the allowable length of the most of the conventional tensile testing machines widely available at laboratories globally.

Wiater and Siwowski (2020) investigated tensile properties of glass fiber reinforced polymer (GFRP) bars under different testing methods suggested by various standards. The authors imply the difficulties in comparing the results gathered from each standard due to differences in calculating elasticity modulus and determination of nominal and effective diameter of the bars, which affects the tensile strength values.

Table 1. Different standards for tensile testing of FRP bars

Test Standard	Length of Free Specimen (mm)	Number of Test Pieces	Anchorage, $L_g$ (mm)	Gauge Length (mm)	Test Duration (minutes)	Speed of the Test
ASTM D7205 (2021)	$\geq 380$ or $\geq 40\phi$	At least 5	$\phi < 13 \rightarrow L_g \geq 300$ $13 \leq \phi < 19 \rightarrow L_g \geq 380$ $19 \leq \phi < 32 \rightarrow L_g \geq 460$ $\phi \geq 32 \rightarrow L_g \geq 800$	$\geq 8\phi$	1-10	-
ISO 1046-1 (2015)	$\geq 300$ or $\geq 40\phi$	At least 5	The anchorage must be capable of transmitting solely the tensile force along the longitudinal axis of the test specimens.	$\geq 100$  $\geq 8\phi$	-	0.5% - 1.5% per minute (Strain rate)
CSA S806 (2012)	$\geq 40\phi$	At least 5	$L_g \geq 250$ or $L_g \geq f_u A / 350$	$\geq 5\phi$	-	250-500 MPa/min (Stress rate)
CNR-DT 206 (2007)	$\geq 100$ or $\geq 40\phi$	At least 5	The anchorage must be capable of transmitting solely the tensile force along the longitudinal axis of the test specimens and to cause the test piece to fail at the test section	$\geq 8\phi$	1-10	-
JSCE-E 531 (1995)	$\geq 100$ or $\geq 40\phi$	At least 5	The anchorage must be capable of transmitting solely the tensile force along the longitudinal axis of the test specimens and to cause the test piece to fail at the test section	$\geq 8\phi$	-	100-500 MPa/min (Stress rate)



The differences between test methods and not having a universal testing for FRP rebars limits their implementation in the field. Understanding the tensile characteristics of FRP rebars is essential for design purposes and it needs to be easy and accessible for both manufacturers and end users to get their materials to be tested reliably. To compare different factors that affects tensile behavior of GFRP rebars, Kumar et al. (2023) conducted a literature review on the tensile and creep behavior of FRP bars. The authors investigated surface treatments, bar diameter and temperature effects on tensile behavior of GFRP bars. They highlighted the need for the development of universal tensile testing method for the wider adaptation of GFRP rebars in construction.

Kocaoz et al. (2005) conducted tests using anchorage method proposed by Micelli and Nanni (2001). The anchorage system consists expansive cementitious grout filled steel pipes. They investigated four groups of GFRP bars with different surface coating. The bar diameter of the GFRP bars in all groups were 12.5 mm (#4 bars) and they all had the same materials, shape and fiber-volume ratio. The anchorage length was 305 mm and they used a threaded end for the better bond to prevent the separation of coating in the anchorage. The total length of the specimens was  $40\phi+2L_g$  chosen according to ACI test specifications for FRP rods, which equals to 1110 mm for #4 GFRP bars.

D'Antino and Pisani (2023) investigated tensile and compressive characteristics of thermoset and thermoplastic GFRP bars. The authors used ISO 1046-1 for tensile testing procedures. They used epoxy bonded steel pipes for the anchorage. The length of the pipes was modified based on the anticipated peak applied load for each diameter, resulting in varying overall lengths of the specimens and the utilization of different testing machines. The authors emphasized that the selection of the testing machine took into consideration not only its maximum capacity but also factors such as the maximum distance between the heads and the head gripping system. Similar challenges and complexities arise when conducting other testing methods as specified in different test standards for performing tensile tests on FRP bars. A universally accepted and easy-to-use testing method is essential for accurately evaluating the tensile properties of FRP bars to facilitate widespread adoption of consistent characterization procedures.

The main aim of this study is to offer a solution to this problem with proposing a new test method suitable for readily available standard testing devices. This novel approach provides easy and effective solution to determining tensile properties of GFRP bars, enabling the wider application of these advance materials. This study introduces an innovative approach to GFRP

tensile testing, utilizing the devices and procedures commonly used for standard tensile testing of reinforced concrete steel. By employing the existing infrastructure, proposed method offers a cost-effective and practical solution for evaluating the mechanical properties of GFRP reinforcement without compromising the accuracy of results. This study aims to provide construction professionals and researchers with an efficient and accessible method for GFRP tensile testing, promoting the broader utilization of GFRP reinforcement in the construction industry.

## 2. Materials and Method

### 2.1. Materials

The GFRP bars used in this research were manufactured by pultrusion by using E-glass and vinyl-ester resin. Helically wrapped GFRP reinforcement bars with diameters of 12, 14, 16, and 18 mm were used in testing. Figure 1 shows the test specimens with different diameters. Each thick in the ruler represents one millimeter. At least 3 specimens were used for each test. The structural properties of the GFRP bars used in the experimental study are presented in Table 2.



Figure 1. GFRP rebars

Table 2. Properties of GFRP

Fiber type	Resin type	Fiber content by weight, %	Fiber content by volume, %	Density g/cm <sup>3</sup>
E-Glass	Vinyl Epoxy	> 75	>65	>1.80

### 2.1. Method

In this study, research and publication ethics were compiled with. Five different test procedures were tested as an alternative to the method specified in the ASTM D7205 standard. In the first method, the reinforcement was subjected to direct tensile testing without any treatment. In the second method, a rubber membrane was wrapped around on the both ends of the specimens and anchored to the grips through these. In the third method, the GFRP rebars were anchored using

epoxy bonded steel pipes, the difference from the test standard was the length of the anchorage, which was kept shorter to fit the specimen's length to the maximum allowed distance between the heads of the conventional testing machine readily available at Eskisehir Osmangazi University Materials testing laboratory. In the fourth method, a turned section with a length of  $10 \times d_0$  was created in the middle of the test specimens and a dog bone shape was provided. In the fifth method, similar to the fourth method, the middle part was tapered, and a special cylindrical apparatus made of steel material was used to hold only this apparatus in the jaws. Tensile tests were performed with a 'Kalite' brand universal tensile-compression device with a capacity of 250 kN at room temperature and a testing speed of 10 mm/min. Strain rate ( $\epsilon$ ) varied between  $1.2 \times 10^{-3} s^{-1}$ .

**3. Results and Discussion**

In the first method, the GFRP rebar was subjected to direct tensile testing without any treatment. However, as seen in Figure 2, first crushing and then slippage occurred in the gripping part of the heads during the test.

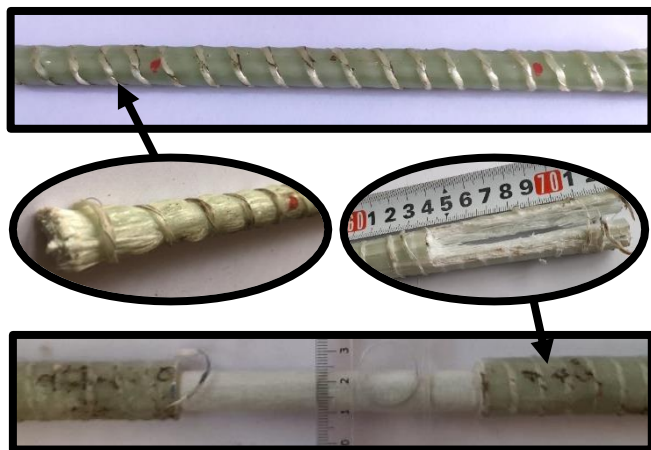


Figure 2. Samples with and without treatment

In the second method, as seen in Figure 3, a rubber membrane was wrapped around and adhered to the part where the jaws are located. During the tensile testing, slippage occurred at the beginning of the loading, and the specimen could not be tested to the maximum capacity due to the slippage of the rubber band. In the third method, as recommended by ASTM D7205, the GFRP reinforcement was placed inside a steel tube concentrically and adhered with epoxy.

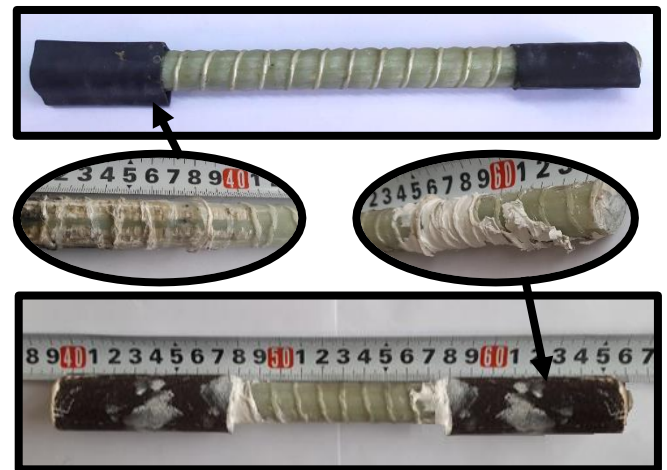


Figure 3. Rubber membrane and steel cap applications

According to the ASTM D7205, the length of the caps is longer to maintain the adherence bond and to prevent the caps from slipping off the ends of the samples during the tensile test. This requires longer GFRP bar samples and a longer stroke length (distance between the jaws) in the machine compared to standard steel reinforcement. However, this stroke distance cannot be provided in many universal testing machines. Therefore, a shorter sample was preferred considering the stroke length according to the recommended method. During the experiment, the steel cap held by the jaws was not long enough, inevitably slipping occurred.

As the fifth method, the middle of the sample was first turned to a length of  $10 \times d_0$ , and a 2 mm indentation was provided on the surface. Special half-cylinder-shaped apparatuses, with the diameter of the end of the sample thinned according to the sample diameter, the upper diameter being the unprocessed diameter of the sample, and the length being determined considering the grip length, were placed on the area where the jaws hold the sample to grasp the indentation part of the samples, as shown in Figure 4. The test results showed that the fracture did not occur at the jaws or at the narrowed section of the cross-section but in the form of fiber rupture in the middle of the sample, indicating the success of the method.

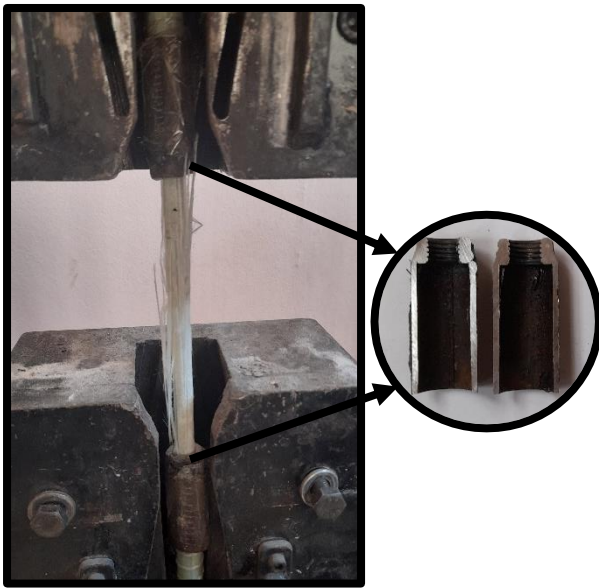


Figure 4. Suggested method for the tensile testing

The stress-strain diagram obtained from the tensile test performed on samples with different diameters is given in Figure 5. As seen from Figure 5, stress changes proportionally to strain. GFRP bars, which are an anisotropic material due to their brittle nature and glass fibers, did not exhibit a linear elastic behavior as expected. Since GFRP is a composite material, a homogeneous structure is not obtained in either the fibers or resin phase during the bonding of glass fibers with epoxy resin. Therefore, discontinuities occurring due to defects during tensile effects have partially affected the linear behavior negatively. During the tensile test, poorly wrapped with resin compared to others, the rupture of fibers reaching their ultimate tensile strength has caused sudden stress drops and small zigzags as the load is redistributed to other fibers. However, since the resin and fibers move together, no curvilinear behavior has been observed.

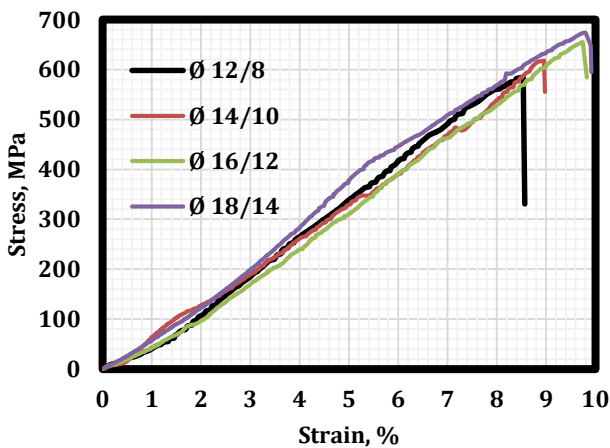


Figure 5. Stress-strain relationships of GFRP rebars

The tensile strengths of GFRP bar specimens with different diameters are shown in Figure 6. The tensile strengths increased by up to 15% as the specimen diameter increased. The increase in diameter and consequently, the increase in the number of fibers led to an increase in strength. It was expected that the force per unit area would remain constant as in the steel specimen. However, since the specimens are composite materials and fibers are effective in tension, the force per unit area has changed.

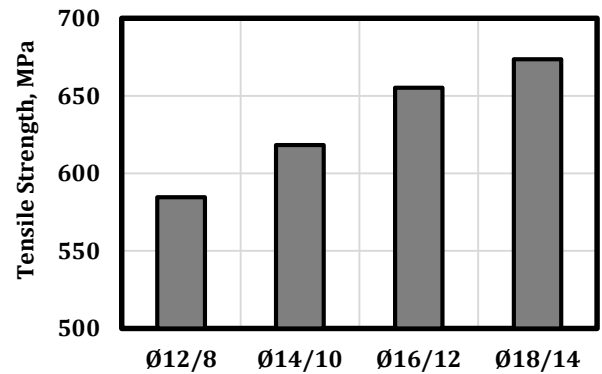


Figure 6. Tensile strength of tested GFRP rebars

The maximum elongation values at the fracture under tensile stress are given in Figure 7. It can be seen that the elongation values vary between 8.5% and 10%. The elongation increases become prominent especially when the diameter increases from 14/10 mm to 16/12 mm, reaching up to 10%. It can be said that the fibers, apart from the binding resin, are particularly effective in this elongation increase. Although glass is a brittle material with a limited non-linear deformation, the resin and other coatings used in the production of the glass fibers used in GFRP have an effect on this elongation.

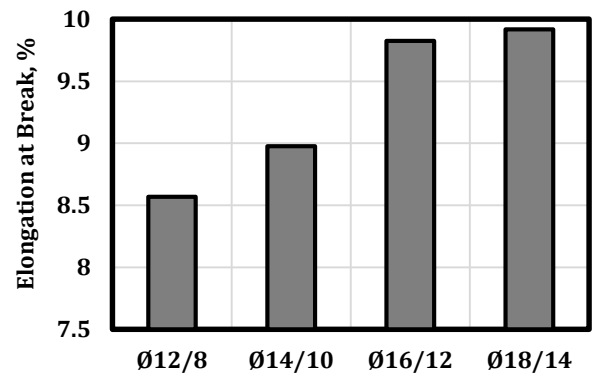


Figure 7. Total elongation changes with reinforcement diameter

The elastic modulus values calculated based on the strains of GFRP bars with different diameters under the tensile forces are given in Figure 8. The elastic modulus of GFRP rebars varied between 68-73 GPa. The change was below 8%, however it was irregular. The anisotropic and composite nature of GFRP, the combination of binding resin-glass fibers, and the defects arising from the material and production of glass fibers could be effective in this variation.

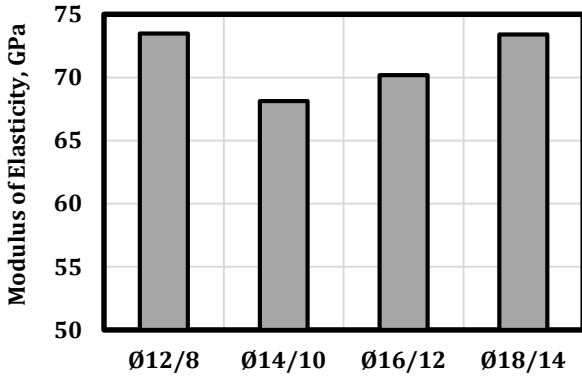


Figure 8. Elasticity modulus of GFRP bars under tension

The toughness values calculated using the stress-strain graphs drawn in Figure 9 are given. It is seen that the static toughness values of GFRP specimens with different diameters vary between 0.024-0.034 joule/mm<sup>3</sup>. As the reinforcement diameter increases, static toughness values have increased up to 40%. Although the stress increase and strain increase are not linear, and there is no increasing or decreasing curve, taking into account the areas below the stress strain curves, the increase in maximum stress value and the increase in maximum strain value are proportional, increasing the areas, thus increasing the static toughness values.

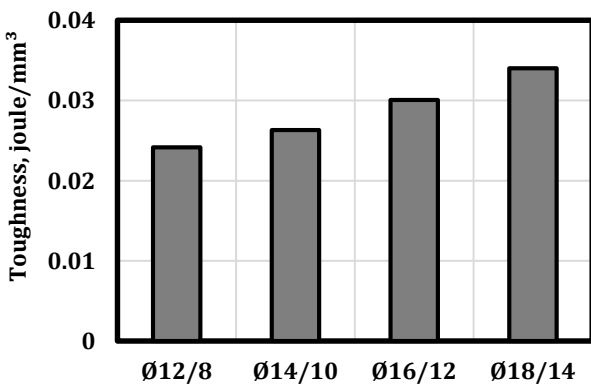


Figure 9. Toughness of GFRP bars

#### 4. Conclusions

The results are concluded as below:

- Stress-strain values obtained under the tensile effect of GFRP reinforcements increase approximately proportionally, but they also occur in discontinuities as well as deviations from linearity. Since the fracture of the relatively weak fibers bonded with resin as the load increases, the deformations and stresses are affected limitedly, it is reflected in the graph as small changes.
- It has been observed that the tensile strengths of GFRP bars reach values of up to 670 MPa. In structural design, the area calculated based on load-bearing capacity is considered, and the number of bars that provide this area is selected according to the reinforcement diameters. However, diameter changes in GFRP reinforcements should be taken into account as they can cause changes in strength.
- In structural design of reinforced concrete structures, the yield strength of reinforcement is considered. A total elongation value of more than 12% is desired for conventional steel reinforcement. However, while reinforced steel undergoes limited deformation until yielding, a significant portion of deformation occurs during strain hardening and necking. In the design conditions of the structure, deformation of the reinforcement is limited. However, it has been observed that these deformation values are quite high in GFRP reinforcements.
- It has been observed that the elastic modulus of GFRP reinforcements reaches 7.3 MPa. Since these values are significantly lower than the elastic moduli of concrete and steel that make up reinforced concrete, the behavior of GFRP reinforced concrete structures differs from conventional steel reinforced counterparts. And therefore, GFRP material tests are important and should be more easily done to specify the mechanical properties of the GFRP bars for each application.
- The static toughness values of the specimens have been observed increase with increasing diameter, reaching a value of 0.034 joules/mm<sup>3</sup>.

Average test results of GFRP bars are given in Table 3.

Table 3. Summary of test results

	Test results (average)
Tensile strength, MPa	633
Total elongation, %	9.3
Modulus of Elasticity, GPa	71
Toughness, Joule/mm <sup>3</sup>	0,028



This study aimed to determine the mechanical properties of GFRP reinforcements under tensile forces using different methods, without damaging the specimen during processing or testing with the apparatus. It has been demonstrated that the mechanical properties can be determined in all devices where standard steel tensile tests can be performed. Increasing research on determining the mechanical properties of GFRP bars and their use in design is important for reducing uncertainties in this field and increasing their practical applications. It is recommended to test this experimental method for different types of FRP reinforcements in future studies.

### Acknowledgement

This study was not funded by any organization.

The authors wish to thank Mr. TUTGUN for his contribution to the experimental work.

### Contribution of Researchers

K. Aybar contributed to the experimental study, methodology, writing - original draft, writing - reviewing and editing of the study.

M. Eryılmaz Yıldırım contributed to the literature review, methodology, experimental study, writing - reviewing and editing, writing - English translation of the study.

M. Canbaz contributed to the conceptualization, methodology, evaluation of the results, visualization, writing - reviewing and editing of the study.

### Conflict of Interest

No conflicts of interest have been declared by the authors.

### References

Al-Salloum, Y. A., El-Gamal, S., Almusallam, T. H., Alsayed, S. H., & Aqel, M. (2013). Effect of harsh environmental conditions on the tensile properties of GFRP bars. *Composites Part B: Engineering*, 45(1), 835-844. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.05.004>

ASTM D7205/D7205M-21. (2021). *Standard Test Method for Tensile Properties of Fiber Reinforced Polymer Matrix Composite Bars*.

Bakis, C. E., Bank, L. C., Brown, V. L., Cosenza, E., Davalos, J. F., Lesko, J. J., Machida, A., Rizkalla, S. H., & Triantafillou, T. C. (2002). Fiber-reinforced

polymer composites for construction - State-of-the-art review. *Journal of Composites for Construction*, 6(2), 73-87. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0268\(2002\)6:2\(73\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0268(2002)6:2(73))

Balendran, R. V., Rana, T. M., Maqsood, T., & Tang, W. C. (2002). Application of FRP bars as reinforcement in civil engineering structures. *Structural Survey*, 20(2), 62-72. <https://doi.org/10.1108/02630800210433837>

Benmokrane, B., Chaallal, O., & Masmoudi, R. (1995). Glass fibre reinforced plastic (GFRP) rebars for concrete structures. *Construction and Building Materials*, 9(6), 353-364. [https://doi.org/10.1016/0950-0618\(95\)00048-8](https://doi.org/10.1016/0950-0618(95)00048-8)

CNR-DT 203/2006. (2007). *Guide for the Design and Construction of Concrete Structures Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer Bars* (Issue June).

CSA S806-12. (2012). *Design and Construction of Building Structures with Fibre-Reinforced Polymers*. Canadian Standards Association.

D'Antino, T., & Pisani, M. A. (2023). Tensile and compressive behavior of thermoset and thermoplastic GFRP bars. *Construction and Building Materials*, 366(December 2022), 130104. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.130104>

Feng, G., Zhu, D., Guo, S., Rahman, M. Z., Jin, Z., & Shi, C. (2022). A review on mechanical properties and deterioration mechanisms of FRP bars under severe environmental and loading conditions. *Cement and Concrete Composites*, 134, 104758. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2022.104758>

Gudonis, E., Timinskas, E., Gribniak, V., Kaklauskas, G., Arnautov, A. K., & Tamulėnas, V. (2014). Frp Reinforcement for Concrete Structures: State-of-the-Art Review of Application and Design. *Engineering Structures and Technologies*, 5(4), 147-158. <https://doi.org/10.3846/2029882x.2014.889274>

JSCE-E 531. (1995). *Test Method for Tensile Properties of Continuous Fiber Reinforcing Materials*.

Kocaoz, S., Samaranayake, V. A., & Nanni, A. (2005). Tensile characterization of glass FRP bars. *Composites Part B: Engineering*, 36(2), 127-134. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2004.05.004>

- Kodur, V., Venkatachari, S., Matsagar, V. A., & Singh, S. B. (2022). Test Methods for Characterizing the Properties of Fiber-Reinforced Polymer Composites at Elevated Temperatures. *Polymers*, 14(9), 1734. <https://doi.org/10.3390/polym14091734>
- Kumar, M. H., Mohandoss, P., & Anjana, L. (2023). Investigation on tensile and creep behaviour of glass fiber reinforced polymer (GFRP) bars: A review. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.04.656>
- Liu, Y., Zhang, H.-T., Zhao, H.-H., Lu, L., Han, M.-Y., Wang, J.-C., & Guan, S. (2021). Experimental Study on Mechanical Properties of Novel FRP Bars with Hoop Winding Layer. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2021, 1–18. <https://doi.org/10.1155/2021/9554687>
- Lu, C., Yang, Y., & He, L. (2021). Mechanical and durability properties of GFRP bars exposed to aggressive solution environments. *Science and Engineering of Composite Materials*, 28(1), 11–23. <https://doi.org/10.1515/secm-2021-0002>
- Micelli, F., & Nanni, A. (2001). Mechanical properties and durability of FRP rods. In *CIES Report 00-22* (Issue March). Taylor & Francis. <http://www.crcnetbase.com/doi/10.1201/9780203883440.ch65>
- Nanni, A. (1993). Fiber-Reinforced-Plastic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures. In A. Nanni (Ed.), *Canadian Journal of Civil Engineering*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/C2009-0-09136-3>
- Spagnuolo, S., Meda, A., Rinaldi, Z., & Nanni, A. (2018). Residual behaviour of glass FRP bars subjected to high temperatures. *Composite Structures*, 203, 886–893. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.07.077>
- Spagnuolo, S., Rinaldi, Z., Donnini, J., & Nanni, A. (2021). Physical, mechanical and durability properties of GFRP bars with modified acrylic resin (modar) matrix. *Composite Structures*, 262, 113557. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.113557>
- Wiater, A., & Siwowski, T. (2020). Comparison of Tensile Properties of Glass Fibre Reinforced Polymer Rebars by Testing According to Various Standards. *Materials*, 13(18), 4110. <https://doi.org/10.3390/ma13184110>
- You, Y. J., Kim, J. H. J., Park, K. T., Seo, D. W., & Lee, T. H. (2017). Modification of rule of mixtures for tensile strength estimation of circular GFRP rebars. *Polymers*, 9(12). <https://doi.org/10.3390/polym9120682>

## FIRÇASIZ DA MOTORLARI İLE SÜRÜLEN VE HEM DİNAMİK HEM DE KİNEMATİK MODEL BELİRSİZLİKLERİ İÇEREN ROBOT KOLLARININ UYARLAMALI DENETİMİ

Şükrü ÜNVER<sup>1</sup>, Erman SELİM<sup>2\*</sup>, Enver TATLICIOĞLU<sup>3</sup>, Erkan ZERGEROĞLU<sup>4</sup>, Musa ALCI<sup>5</sup>

- <sup>1</sup> Ege Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik – Elektronik Mühendisliği Bölümü, İzmir, ORCID No: <http://orcid.org/0000-0002-0836-9799>
- <sup>2</sup> Ege Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik – Elektronik Mühendisliği Bölümü, İzmir, ORCID No: <https://orcid.org/0000-0003-4479-0406>
- <sup>3</sup> Ege Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik – Elektronik Mühendisliği Bölümü, İzmir, ORCID No: <https://orcid.org/0000-0001-5623-9975>
- <sup>4</sup> Gebze Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü, Kocaeli, ORCID No: <https://orcid.org/0000-0002-1211-0448>
- <sup>5</sup> Ege Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik – Elektronik Mühendisliği Bölümü, İzmir, ORCID No: <https://orcid.org/0000-0002-5382-3460>

Anahtar Kelimeler	Öz
Uyarlamalı denetim Robot kolları Görev uzayı Doğrusal olmayan kontrol Fırçasız DA motorları	<i>Çalışmamız kapsamında, eklemleri fırçasız doğru akım (DA) motorları kullanılarak sürülen ve hem dinamik hem de kinematik modelinde parametrik belirsizlikler içeren robot kolları için, eyleyici dinamikleri denetleyici tasarımına dahil edilerek uyarlamalı görev uzayı takip denetleyicisi tasarımı gerçekleştirilmiştir. Denetleyici tasarımının doğrudan görev uzayında gerçekleştirilmesi sayesinde pozisyon seviyesinde ters kinematiğin hesaplanmasına ihtiyaç duyulmamaktadır. Geliştirilen tam durum geri beslemeli ve ivme ölçümlerine ihtiyaç duymayan denetleyici yapısı için Lyapunov tabanlı kararlılık analizi gerçekleştirilmiştir. Kararlılık analizinin sonucuna göre robot kolunun hem dinamik hem de kinematik modelindeki parametrik belirsizliklere rağmen görev uzayı takip hatasının asimptotik kararlılığı ve denetleyici girişleri de dahil olmak üzere sistemde kullanılan tüm işaretlerin sınırlılığı garanti edilmiştir. Gerçekleştirilen çalışma ile robot kollarının görev uzayı denetiminde motor dinamikleri göz önünde bulundurulmuş ve bu konudaki öncü sonuçlardan birisi elde edilmiştir. Özellikle robot kolunun dinamik ve kinematik modellerindeki belirsizliklerle tasarlanan özgün uyarlama kuralları ile mücadele edilirken geliştirilen yenilikçi uyarlamalı denetleyicinin görev uzayı takip hatasının asimptotik kararlılığının matematiksel olarak ispatlanması çalışmanın en önemli katkısıdır.</i>

## ADAPTIVE CONTROL OF ROBOT MANIPULATORS DRIVEN BY BRUSHLESS DC MOTORS WITH PARAMETRIC UNCERTAINTIES IN BOTH KINEMATIC AND DYNAMIC MODEL

Keywords	Abstract
Adaptive control Robotic manipulators Task space Nonlinear control BLDC motors	<i>In this study, an adaptive task-space tracking controller design was proposed for robot arms driven by BLDC motors with parametric uncertainties in their dynamic and kinematic models. The proposed controller design incorporates actuator dynamics for the robot arm and does not require inverse kinematics calculations at the position level due to its direct implementation in task space. Lyapunov-based stability analysis was conducted for the developed full-state feedback controller structure, which does not require acceleration measurements. The stability analysis results demonstrate that, despite the parametric uncertainties in both the dynamic and kinematic models of the robot arm, the proposed controller guarantees the asymptotic stability of the task-space tracking error, as well as the boundedness of all signals used in the system, including the controller inputs. The conducted study considers the motor dynamics in the task space control of robot manipulators, leading to one of the pioneering findings in this area. The obtained result is particularly significant as it demonstrates the achievement of addressing the uncertainties present in the dynamic and kinematic models of the robot manipulator through novel adaptation laws. The most crucial contribution of this research lies in the mathematical proof of the asymptotic stability of the task space tracking error ensured by the developed novel adaptive controller.</i>



## Araştırma Makalesi

Başvuru Tarihi : 15.03.2023

Kabul Tarihi : 14.09.2023

## Research Article

Submission Date : 15.03.2023

Accepted Date : 14.09.2023

\* Sorumlu yazar: [erman.selim@ege.edu.tr](mailto:erman.selim@ege.edu.tr)  
<https://doi.org/10.31796/ogummf.1264457>

## 1. Giriş

Robot kollarının gerçekleştirilmesi beklenen görev yoğunlukla robot kolunun uç noktasının konumlandırılmasını gerektirmektedir (Yılmaz, Tatlıcıoğlu, Savran ve Alcı, 2022). Dolayısıyla robot kolunun takip etmesi istenilen yörüngesi, robot kolunun uç noktasına ait koordinat çerçevesinin, robot kolunun tabanına ait koordinat çerçevesine göre istenilen konumu ve yönü kullanılarak tanımlanır (Tatlıcıoğlu, McIntyre, Dawson ve Walker, 2005). Bilimsel yazında robot kollarının denetimi konusunda yapılan geliştirmeler yoğunlukla robot kolunun eklem uzayında denetleyici tasarımına yönelik geliştirmelerdir. Bu geliştirmelerden faydalanabilmek amacıyla istenilen görev uzayı yörüngesi eklem pozisyonları cinsinden ifade edilebilir ancak bu yöntemin en önemli zayıflığı pozisyon seviyesinde ters kinematiğin gerçek zamanlı olarak hesaplanmasını gerektirmesidir (Çetin, 2016). Çalışmamız kapsamında denetleyici tasarımı doğrudan görev uzayında gerçekleştirilerek pozisyon seviyesinde ters kinematik hesaplanmasına ihtiyaç duyulmaksızın denetim hedefine ulaşılmıştır. Görev uzayı konusunda detaylı bilgiye Nakanishi, Cory, Mistry, Peters ve Schaal (2008) ve Siciliano, Khatip ve Kröger (2008) kaynaklarından ulaşılabilir.

Robot kollarında kullanılan eyleyicilerin dinamikleri de eksiksiz bir robot dinamiğinin önemli bir parçasıdır. Eyleyici dinamiklerinin etkisi, çalışma hızı arttıkça ve yük değişimleri altında dramatik olarak artmaktadır (Tarn, Bejczy, Yun ve Li, 1991). Eyleyici dinamikleri robot kolunun dinamik karakteristiğini ve kararlılığını da etkileyebilmektedir (Wai ve Muthusamy, 2014). Yüksek hız ve doğruluk gereksinimlerine ihtiyaç duyulan robot kollarından yüksek bir performans elde edilmesi istendiğinde eyleyici dinamikleri, denetleyici tasarımında dikkate alınmalıdır (Good, Sweet ve Strobel, 1985). Robot kollarının denetimi konusunda bilimsel yazında son zamanlarda yapılan geliştirmelerde eyleyici dinamiklerinin de ele alındığı görülmektedir (Deng, Zhou, Zhou ve Yao, 2023; Keighobadi, Xu, Alfi, Arabkoohsa ve Nazmara, 2022; Saleki ve Fateh, 2020; Shojaei, Kazemy ve Chatraei, 2021; Chwa ve Kwon, 2022). Çalışmamız kapsamında eklemli fırçasız doğru akım (DA) motorları (Albostan ve Gökbulut, 1998) kullanılarak sürülen robot kolları için denetleyici tasarımı gerçekleştirilmiştir. Fırçasız DA motorlarının tercih edilmesinin temel motivasyonu, fırçalı DA motorlarına göre düşük bakım gereksinimi ve

yüksek tork üretimi avantajları nedeniyle endüstride sıklıkla tercih edilmesidir. Ancak fırçasız DA motorları faz akımları ve rotor hızları arasındaki çapraz terimler nedeniyle oldukça yüksek dereceden doğrusalsızlıklar içermektedir. Fırçasız DA motorlarının çok girişli yapısı nedeniyle koordinat dönüşümleri yapılsa dahi en az iki denetleyici tasarlanması gerekmektedir (Bridges ve Dawson, 1994).

Robot kollarının denetimi konusunda önemli araştırma konularından bir diğeri de robot kolunun dinamik ve kinematik modelinde belirsizliklerin varlığıdır (Dixon, 2007; Xiao, Yin ve Okyay, 2016; Yazıcı ve Karamancıoğlu, 2008). Model belirsizliklerinin varlığı denetleyici tasarımında belirsizlik içeren ifadelerin kullanılamaz hale gelmesine neden olmaktadır. Çalışmamız kapsamında robot kollarının hem dinamik hem de kinematik modelindeki parametrik belirsizliklerle mücadele eden denetleyici tasarımı gerçekleştirilmiştir. Fırçasız DA motorlarının çok girişli ve yüksek dereceden doğrusalsızlıklar içeren yapıları ele alınan kontrol problemini zorlaştırmaktadır buna ek olarak robot kolunun hem dinamik hem de kinematik modelindeki belirsizliklerin de ele alınması sonucunda ortaya oldukça zor bir kontrol problemi çıkmaktadır.

Bilimsel yazında robot kollarının görev uzayında denetimini hedeflerken eyleyici modelini de göz önünde bulunduran oldukça az sayıdaki çalışmalar arasında (Liu ve Cheah, 2005; Soltanpour, Khalilpour ve Soltani, 2012; Cheah 2003; Liu, Cheah ve Slotine, 2006) bulunmaktadır. Bu çalışmalarda robot kollarındaki çeşitli model belirsizlikleri de göz önünde bulundurularak kontrol problemlerine çözümler önerilmiştir. Ancak bu çalışmalarda elektriksel dinamikler ihmal edilerek oldukça basit bir eyleyici modeli tercih edilmiştir (Zhou, Yang, Wang, Chen ve Chen 2020; Chen, Yang ve Liu 2019). Görev uzayında ve elektriksel dinamikler ihmal edilmeksizin eyleyici dinamiklerinin dikkate alındığı çalışmalar arasında (Si, Zhao, Wei ve Guan, 2021) ve (Carrillo-Serrano, Hernandez ve Santibanez, 2011) bulunmaktadır. Si ve diğ. (2021) çalışmasında gürbüzleştirici terim olarak kayan kipli denetim yapısında kullanılan işaret işlevinin kullanıldığı görülmektedir. İşaret işlevinin denetleyici tasarımında kullanılması çatırdama problemi nedeniyle tasarlanan denetleyicilerin gerçek zamanlı uygulamalarda kullanımını kısıtlamaktadır. Carrillo-Serrano ve diğ. (2011) çalışmasında ise denetleyici tasarımında dinamik model bilgisine ihtiyaç



duyulmaktadır. Bilimsel yazında, eyleyicinin elektriksel dinamiklerini ihmal eden, dinamik ve kinematik model belirsizliklerinin ele alınmadığı ve kayan kipli denetim yapısını kullanan uygulanabilirliği görece düşük çalışmalar da dışarıda bırakıldığında eyleyici dinamiklerini göz önünde bulunduran, görev uzayında istenilen uç nokta konfigürasyonun takibini amaçlayan denetleyici tasarımı konusunda tam durum geri beslemeli denetleyici tasarımı çalışması yazarların en iyi bilgisi dahilinde tespit edilememiştir.

Bu çalışma kapsamında eklemli fırcasız DA motorları ile sürülen robot kolunun hem dinamik modelindeki hem de kinematik modelindeki belirsizlikler ile mücadele eden ve eklem ivmelerinin ölçüm bilgisine ihtiyaç duymayan, tam durum geri beslemeli uyarlamalı denetleyici tasarımı gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan denetleyicinin robot dinamik ve kinematik modelindeki parametrik belirsizliklere rağmen asimptotik kararlılığı Lyapunov tarzı sentez ve kararlılık analizi yöntemi kullanılarak garanti edilmiştir. Bölüm 2’de makale genelinde kullanılan bazı simge ve kısaltmalar anlamları ile sunulmuştur. Bölüm 3’te kinematik model, Bölüm 4’te kullanılan fırcasız DA motorlarının elektriksel modeli ile birlikte robot kolunun dinamik modeli, Bölüm 5’te hata sistemi geliştirilmesi ve denetleyici tasarımı, Bölüm 6’da Lyapunov tabanlı kararlılık analizi ve sonucu, Bölüm 7’de iki serbestlik dereceli, eklemli fırcasız DA motorları ile sürülen robot kolunun geliştirilen denetleyici kullanılarak elde edilen benzetim çalışmasına ait sonuçlar sunulmuştur ve son olarak Bölüm 8’de elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir.

## 2. Simgeler ve Kısaltmalar

Bu kısımda çalışmanın okunabilirliğini geliştirmek amacıyla, kullanılan bazı matematiksel simgeler ve kısaltmalar Tablo 1’de sunulmuştur.

Bu çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

Tablo 1. Simgeler ve Kısaltmalar

$q(t), \dot{q}(t), \ddot{q}(t) \in \mathbb{R}^n$	Eklem pozisyon, hız ve ivme vektörleri
$f(q): \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$	İleri kinematik işlevi
$x(t), \dot{x}(t) \in \mathbb{R}^n$	Görev uzayı pozisyon ve hız vektörleri
$J(q) \in \mathbb{R}^{n \times n}$	Jakobiyen matrisi
$I_n \in \mathbb{R}^{n \times n}$	Birim matris
$M(q) \in \mathbb{R}^{n \times n}$	Eylemsizlik/atalet matrisi
$V_m(q, \dot{q}) \in \mathbb{R}^{n \times n}$	Merkezcil ve Koriyolis etkilerini içeren matris
$G(q) \in \mathbb{R}^n$	Yerçekimine bağlı etkileri içeren vektör
$F_d \in \mathbb{R}^{n \times n}$	Sabit, köşegensel ve artı tanımlı viskoz sürtünme matrisi

$I_a(t) = [I_{a1} \ \dots \ I_{an}]^T,$ $I_b(t) = [I_{b1} \ \dots \ I_{bn}]^T \in \mathbb{R}^n$	Faz akım vektörleri
$L_a, L_b \in \mathbb{R}^{n \times n}$	Köşegensel, endüktans matrisleri
$R \in \mathbb{R}^{n \times n}$	Köşegensel, sargı direnç matrisi
$N_p \in \mathbb{R}^{n \times n}$	Köşegensel, kutup sayılarını içeren matrisi
$K_B \in \mathbb{R}^{n \times n}$	Köşegensel, elektromotor kuvvet katsayılarını içeren matrisi
$V_a(t) = [V_{a1} \ \dots \ V_{an}]^T,$ $V_b(t) = [V_{b1} \ \dots \ V_{bn}]^T \in \mathbb{R}^n$	Denetleyici girişi olan faz gerilimleri
$\ \cdot\ , \ \cdot\ _{\infty}$	İlgili vektörün Öklid normu ve ilgili matrisin indirgenmiş sonsuz normu
$\text{proj}\{\cdot\}$	İlgili işlev için projeksiyon/izdüşüm operatörü
$\text{diag}\{\cdot\}$	İlgili vektör elemanlarından köşegensel, kare matris oluşturan operatör
$\det(\cdot), \text{adj}(\cdot)$	İlgili matrisin determinantı ve eki/adjointi
$\lambda_{\max}(\cdot), \lambda_{\min}(\cdot)$	İlgili matrisin en büyük ve en küçük özdeğeri
$K_e, K_r \in \mathbb{R}^{n \times n}$	Artı tanımlı, köşegensel ve sabit denetleyici kazanç matrisleri
$k_{a1}, k_{a2}, \kappa \in \mathbb{R}$	Artı denetleyici kazançları
$\mathcal{L}_{\infty}$	Sınırlı fonksiyonlardan oluşan vektör uzayı
$\mathcal{L}_2$	Karesi integrallenebilir fonksiyonlardan oluşan vektör uzayı

## 3. Kinematik Model

$n$  boyutlu uzayda çalışan ve  $n$  serbestlik dereceli robot kolunun kinematik modeli (Dawson, Bridges ve Qu, 1995)

$$\dot{x} = f(q) \quad (1)$$

şeklinde ifade edilebilir. Eşitlik (1) ifadesinin zamana göre türevi alındığında hız seviyesinde kinematik modeli

$$\dot{x} = J(q)\dot{q} \quad (2)$$

yapısında elde edilmiştir. Jakobiyen matrisi

$$J(q) \triangleq \frac{\partial f(q)}{\partial q} \quad (3)$$

şeklinde tanımlanmıştır.

#### 4. Dinamik ve Elektriksel Sistem Modeli

Eklemleri fırçasız DA motorları kullanılarak tahrik edilen, rijit eklemler ve  $n$  serbestlik dereceli robot kolunun dinamik modeli (Bridges ve diğ. 1994)

$$M(q)\ddot{q} + V_m(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) + F_d\dot{q} = (K_{T1}I_B + K_{T2})I_a \quad (4)$$

$$L_a \frac{dI_a}{dt} + RI_a + N_p L_b I_B \dot{q} + K_{T2}\dot{q} = V_a \quad (5)$$

$$L_b \frac{dI_b}{dt} + RI_b - N_p L_a I_a \dot{q} = V_b \quad (6)$$

yapısındadır.

**Özellik 1:** Eşitlik (4) ifadesinin sol tarafındaki dinamik terimler doğrusal olarak parametrelerine ayrıştırılabilir yapıda olup (Patil, Sun, Bhasin ve Dixon, 2022)

$$Y\theta = M(q)\ddot{q} + V_m(q, \dot{q})\dot{q} + G(q) + F_d\dot{q} \quad (7)$$

şeklinde yeniden yazılabilir. Üstte  $Y(q, \dot{q}, \ddot{q}) \in \mathbb{R}^{n \times p_d}$  regresör matrisini ve  $\theta \in \mathbb{R}^{p_d}$  ise robotun fiziksel özelliklerine bağlı sabit parametre vektörünü göstermektedir.

Tork sabitleri olan  $K_{T1}$  ve  $K_{T2}$  alttaki yapıda tanımlanmaktadır

$$K_{T1} = N_p(L_b - L_a) \quad (8)$$

$$K_{T2} = \sqrt{\frac{3}{2}} N_p K_B \quad (9)$$

Faz akım vektörlerinin köşegenel matris gösterimleri olan  $I_A(t)$  ve  $I_B(t)$  alttaki yapıda tanımlanmıştır

$$I_A = \text{diag}\{I_a\} \quad (10)$$

$$I_B = \text{diag}\{I_b\} \quad (11)$$

#### 5. Denetleyici Tasarımı

Çalışmamız kapsamında robot kolunun hem dinamik modelindeki hem de kinematik modelindeki parametrik belirsizliklere rağmen uç noktasının istenilen görev uzayı yörüngesini takip etmesini sağlayacak denetleyici tasarımı gerçekleştirilecektir. Denetleyici, elektriksel motor dinamiklerinde Eşitlikler (5), (6)'da  $V_a(t)$  ve  $V_b(t)$  ile gösterilen faz gerilimleri olup izleyen adımlarda tasarlanacaklardır. Robot kolunun eklemlerinin sürülmesi amacıyla kullanılan fırçasız DA motorlarına ait elektriksel model parametrelerinin bilindiği varsayılmaktadır. Eklem pozisyonları, eklem hızları, uç nokta pozisyonu ve uç nokta hızı ile faz akımlarının ölçülebildiği kabul edilmektedir (Parlaktuna ve Eroğlu, 2007).

Görev uzayı takip hatası  $e(t) \in \mathbb{R}^n$  aşağıdaki gibi tanımlanmış olup

$$e \triangleq x_d - x \quad (12)$$

burada  $x_d(t) \in \mathbb{R}^n$  istenilen görev uzayı pozisyon vektörünü ifade etmektedir.  $x_d(t)$  üçüncü dereceye kadar türevlenebilir ve kendisi dahil üçüncü dereceye kadar türevleri sınırlıdır.

**Özellik 2:** Eşitlik (2) ifadesinde sunulan hız seviyesinde kinematik model

$$J(q)a = Y_j(q, a)\theta_k, \forall a \in \mathbb{R}^n \quad (13)$$

şeklinde doğrusal parametrelerine ayrıştırılabilir (Braganza, Dixon, Dawson ve Xian, 2005) olup burada  $Y_j(q, a) \in \mathbb{R}^{n \times n}$  bilinen regresör matrisini,  $\theta_k \in \mathbb{R}^n$  bilinmeyen parametre vektörünü göstermektedir.

$J(q)$  ve  $f(q)$  belirsiz olduğu için denetleyici tasarımında kullanılamamaktadır. Bu doğrultuda Özellik 2 ifadesinden de faydalanılarak tanımlanan  $\hat{f}(q, \hat{\theta}_k) \in \mathbb{R}^{n \times n}$  Jakobiyen matrisinin kestirimini göstermekte olup belirsiz olan  $\theta_k$  parametre vektörünün yerine  $\hat{\theta}_k \in \mathbb{R}^n$  ile ifade edilen parametre kestirim vektörünün yazılması sonucu elde edilmiştir.

**Özellik 3:** Robot kolunun tüm kinematik tekilliklerinden önsel olarak kaçınıldığı kabul edilmekte olup olası her eklem pozisyonu  $q(t)$  için Jakobiyen matrisinin tersinin var olduğu kabul edilmektedir (Dawson ve diğ. 1995). Bu varsayıma uymayan durumlarda tekil değer ayrıştırması (Karamancioğlu ve Özdemir, 1996) gibi yöntemler kullanılabilir.

Jakobiyen matrisinin kestiriminin tersinin zamana göre türevi  $\hat{W}_j(q, \dot{q}, \hat{\theta}_k, \dot{\hat{\theta}}_k) \in \mathbb{R}^{n \times n}$  matrisi ile gösterilmekte olup

$$\hat{W}_j(q, \dot{q}, \hat{\theta}_k, \dot{\hat{\theta}}_k) \triangleq \frac{d}{dt}(\hat{f}^{-1}(q, \hat{\theta}_k)) \quad (14)$$

yapısında tanımlanmıştır.

Süzgeçlenmiş hata işareti  $r(t) \in \mathbb{R}^n$  aşağıdaki gibi tanımlanmıştır

$$r \triangleq \hat{f}^{-1}(q, \hat{\theta}_k)(\dot{x}_d + K_e e) - \dot{q} \quad (15)$$

Eşitlik (15) ifadesi  $J(q)$  ile çarpılıp Eşitlik (12) ifadesinin türevi kullanılarak düzenlendiğinde,

$$\dot{e} = -K_e e - \hat{J}(q, \hat{\theta}_k)\dot{q} + \hat{f}(q, \hat{\theta}_k)r \quad (16)$$

ifadesi elde edilmiştir. Burada  $\hat{J}(q, \hat{\theta}_k) \in \mathbb{R}^{n \times n}$  Jakobiyen matrisinin kestirim hatasını,  $\hat{\theta}_k(t) \in \mathbb{R}^n$  parametre kestirim hata vektörünü göstermekte olup

$$\hat{J}(q, \hat{\theta}_k) \triangleq J(q, \theta_k) - \hat{f}(q, \hat{\theta}_k) \quad (17)$$

$$\tilde{\theta}_k \triangleq \theta_k - \hat{\theta}_k \quad (18)$$

şeklinde tanımlanmışlardır. Eşitlik (15) ifadesinin türevi alınıp elde edilen ifade  $M(q)$  ile çarpılıp ardından Eşitlik (4) kullanıldığında alttaki ifadeye ulaşılabilir

$$\begin{aligned} M\dot{r} &= M(q)\widehat{W}_j(q, \dot{q}, \hat{\theta}_k, \hat{\theta}_k)(\dot{x}_d + K_e e) + \\ &M(q)\hat{f}^{-1}(q, \hat{\theta}_k)(\dot{x}_d + K_e \dot{e}) - V_m(q, \dot{q})r + \\ &V_m(q, \dot{q})\hat{f}^{-1}(q, \hat{\theta}_k)(\dot{x}_d + K_e e) + G(q) + F_d \dot{q} - K_{T1}I_A I_b - \\ &K_{T2}I_a. \end{aligned} \quad (19)$$

Üstteki ifadenin elde edilmesi esnasında Eşitlik (14) ifadesi ve  $I_B I_a = I_A I_b$  kullanılmıştır.

**Özellik 4:**  $V_m(q, \dot{q})$  matrisi altta sunulan yer değiştirme özelliğini sağlar (Lewis ve diğ. 2003)

$$V_m(q, a)b = V_m(q, b)a, \forall a, b \in \mathbb{R}^n. \quad (20)$$

**Özellik 5:** Eşitlik (14) ile tanımlanan  $\widehat{W}_j$  matrisi alttaki yer değiştirme ifadesini sağlar (Dawson ve diğ. 1995)

$$\widehat{W}_j(q, a)b = \widehat{W}_j(q, b)a, \forall a, b \in \mathbb{R}^n. \quad (21)$$

Eşitlik (15) ifadesinden elde edilen  $\dot{q}$  ifadesi Eşitlik (19) ifadesinde yerine yazılıp Özellik 1, Özellik 4, Özellik 5 ve Eşitlik (2) kullanılarak Eşitlik (19) ile verilen ifadede sırasıyla yalnızca dinamik model parametrelerine ve hem dinamik hem kinematik model parametrelerine bağlı terimler birlikte yazılmak amacıyla yeniden gruplandırıldığında alttaki terimlere ulaşılır

$$\begin{aligned} Y_d \theta_d &= M(q)\widehat{W}_j(q, \hat{f}^{-1}(q, \hat{\theta}_k)\dot{x}_d, \hat{\theta}_k)\dot{x}_d + \\ &M(q)\hat{f}^{-1}(q, \hat{\theta}_k)\dot{x}_d + M(q)\hat{f}^{-1}(q, \hat{\theta}_k)K_e \dot{x}_d + \\ &V_m(q, \hat{f}^{-1}(q, \hat{\theta}_k)\dot{x}_d)\hat{f}^{-1}(q, \hat{\theta}_k)\dot{x}_d + G(q) + \\ &F_d \hat{f}^{-1}(q, \hat{\theta}_k)\dot{x}_d \end{aligned} \quad (22)$$

$$Y_{dk} \theta_{dk} = -M(q, \hat{\theta}_k)\hat{f}^{-1}(q, \hat{\theta}_k)K_e J(q, \theta_k)\hat{f}^{-1}(q, \hat{\theta}_k)\dot{x}_d \quad (23)$$

burada  $Y_d(q, \dot{x}_d, \ddot{x}_d, \hat{\theta}_k, \hat{\theta}_k) \in \mathbb{R}^{n \times p_d}$  ve  $Y_{dk}(q, \dot{x}_d, \hat{\theta}_k) \in \mathbb{R}^{n \times p_{dk}}$  bilinen regresör matrislerini,  $\theta_d \in \mathbb{R}^{p_d}$  ve  $\theta_{dk} \in \mathbb{R}^{p_{dk}}$  ise bilinmeyen parametre vektörlerini göstermektedir.

Eşitlik (22) ve Eşitlik (23) ile sunulan tanımlar Eşitlik (19) ile elde edilen hata dinamiklerinde yerine yazıldığında

$$M\dot{r} = -V_m r + Y_d \theta_d + Y_{dk} \theta_{dk} + \tilde{Y} - K_{T1}I_A I_b - K_{T2}I_a \quad (24)$$

açık çevrim hata sistemi elde edilmiştir. Burada  $\tilde{Y}$  ifadesi Eşitlik (19) ifadesinde  $\|e\|$  ve  $\|r\|$  ifadeleri ile sınırlandırılabilen terimler gruplandırılarak

$$\begin{aligned} \tilde{Y} &\triangleq M(q)\widehat{W}_j(q, \hat{f}^{-1}(q)\dot{x}_d)K_e e + \\ &M(q)\widehat{W}_j(q, \hat{f}^{-1}(q)K_e e)\dot{x}_d + \\ &M(q)\widehat{W}_j(q, \hat{f}^{-1}(q)K_e e)K_e e - M(q)\widehat{W}_j(q, r)\dot{x}_d - \\ &M(q)\widehat{W}_j(q, r)K_e e - M(q)\hat{f}^{-1}(q)K_e J(q)\hat{f}^{-1}(q)K_e e + \\ &M(q)\hat{f}^{-1}(q)K_e J(q)r + V_m(q, \hat{f}^{-1}(q)\dot{x}_d)\hat{f}^{-1}(q)K_e e + \\ &V_m(q, \hat{f}^{-1}(q)K_e e)\hat{f}^{-1}(q)\dot{x}_d + \\ &V_m(q, \hat{f}^{-1}(q)K_e e)\hat{f}^{-1}(q)K_e e - V_m(q, r)\hat{f}^{-1}(q)\dot{x}_d - \\ &V_m(q, r)\hat{f}^{-1}(q)K_e e + F_d \hat{f}^{-1}(q)K_e e - F_d r. \end{aligned} \quad (25)$$

şeklinde tanımlanmıştır.  $\tilde{Y}$  ifadesi için takip eden kararlılık analizinde kullanmak amacıyla aşağıda sunulan üst sınır Doğan (2016) çalışmasındakine benzer adımlar takip edilecek

$$\|\tilde{Y}\| \leq (c_1 + c_2 \|e\|)\|e\| + (c_3 + c_4 \|e\|)\|r\| \quad (26)$$

şeklinde elde edilebilir. Burada,  $c_1, c_2, c_3, c_4 \in \mathbb{R}$  robot kolunun fiziksel parametrelerine ve takip edilmesi istenen yörüngeye bağlı bilinen sabitleri göstermektedir.

Fırçasız DA motorların çok girişli yapısından dolayı denetleyici girişleri olan faz gerilimleri  $V_a(t)$  ve  $V_b(t)$  tasarlanarak faz akımları  $I_a(t)$  ve  $I_b(t)$  kontrol edilerek istenilen tork  $\tau$  değerlerinin robot eklemlerine uygulanması gerekmektedir. Bu hedef doğrultusunda  $\eta_a(t) \in \mathbb{R}^n$  ile gösterilen hata işareti

$$\eta_a \triangleq I_{ac} - I_a \quad (27)$$

şeklinde tanımlanmıştır. Burada  $I_{ac}(t) \in \mathbb{R}^n$  ara denetleyiciyi ifade etmekte olup

$$I_{ac} = K_{T2}^{-1}(K_r r + \hat{f}^T e + (k_{a1} + k_{a2})\|e\|^2 r + Y_d \hat{\theta}_d + Y_{dk} \hat{\theta}_{dk}) \quad (28)$$

yapısında tasarlanmıştır. Burada,  $\hat{\theta}_d(t) \in \mathbb{R}^{p_d}$  ve  $\hat{\theta}_{dk}(t) \in \mathbb{R}^{p_{dk}}$  parametre kestirim vektörlerini ifade etmekte olup güncelleme kuralları alttaki yapıda tasarlanmıştır

$$\dot{\hat{\theta}}_d = Y_d^T r \quad (29)$$

$$\dot{\hat{\theta}}_{dk} = Y_{dk}^T r. \quad (30)$$

$\hat{\theta}_k$  parametre kestirim vektörü için ise güncelleme kuralı

$$\dot{\hat{\theta}}_k = \text{proj}\{-Y_j^T(q, \dot{q})e\} \quad (31)$$

yapısında tasarlanmış olup burada sunulan tasarımda  $\mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$  projeksiyon/izdüşüm operatörü  $\hat{\theta}_k$  vektörünün elemanlarının değerlerini  $\hat{f}(q, \hat{\theta}_k)$  matrisinin tersinin alınabilir olduğu bir aralıkta

sınırlandırmak amacıyla kullanılmaktadır (Braganza ve diğ. 2005; Bridges, Dawson ve Gao, 1993).

Eşitlik (27) ile tanımlanan hatanın ve Eşitlik (28) ile tasarlanan denetleyicinin Eşitlik (24) ile elde edilen açık çevrim hata sisteminde yerine yazılması sonucunda

$$M\dot{r} = -V_m r + \tilde{Y} + Y_d \tilde{\theta}_d + Y_{dk} \tilde{\theta}_{dk} - K_{T1} I_A I_b - K_r r - \tilde{f}^T e - (k_{a1} + k_{a2}) \|e\|^2 r + K_{T2} \eta_a \quad (10)$$

üstteki kapalı çevrim hata sistemine ulaşılmıştır. Burada  $\tilde{\theta}_d(t) \in \mathbb{R}^{p_d}$  ve  $\tilde{\theta}_{dk}(t) \in \mathbb{R}^{p_{dk}}$  parametre kestirim hata vektörlerini göstermekte olup

$$\tilde{\theta}_d \triangleq \theta_d - \hat{\theta}_d \quad (11)$$

$$\tilde{\theta}_{dk} \triangleq \theta_{dk} - \hat{\theta}_{dk} \quad (12)$$

şeklinde tanımlanmışlardır.

Eşitlik (27) ile tanımlanan hatanın önce türevinin alınıp ardından  $L_a$  ile çarpılıp sonrasında Eşitlik (5) ifadesindeki dinamiklerin yerine yazılması sonucu

$$L_a \dot{\eta}_a = L_a \frac{dI_{ac}}{dt} + R I_a + N_p L_b I_B \dot{q} + K_{T2} \dot{q} - V_a \quad (13)$$

ifadesine ulaşılmıştır. Eşitlik (13) ifadesinde açıkça görüldüğü üzere Eşitlik (28) ile sunulan  $I_{ac}(t)$  tasarımının zamana göre türevinin kullanılması gerekmekte olup bu ifade ise  $\dot{r}(t)$  terimine bağlıdır. Eşitlik (15) ile sunulan tanımın zamana göre türevi alınıp ulaşılan ifadede Eşitlik (4) ile verilen dinamik modelin  $M^{-1}(q)$  ile çarpılmasının ardından yalnız bırakılan eklem ivme vektörü  $\dot{q}(t)$  yerine yazılınca

$$\dot{r} = \frac{d}{dt} [\tilde{f}^{-1}(q, \hat{\theta}_k)(\dot{x}_d + K_e e)] - \frac{\text{adj}(M(q))}{\det(M(q))} [(K_{T1} I_B + K_{T2}) I_a - V_m(q, \dot{q}) \dot{q} - G(q) - F_d \dot{q}] \quad (14)$$

şeklinde yeniden yazılabilir. Buradan görülebileceği üzere Eşitlik (14) ifadesi paydadaki  $\det(M(q))$  teriminin bilinmeyen dinamik model parametrelerine dayanmasından dolayı doğrusal olarak parametrelerine ayrıştırılabilir yapıda değildir. Eylemsizlik matrisinin determinanı doğrusal olarak parametrelerine ayrıştırılabilir bir işlev olup sunum kolaylığı açısından  $h(q) \in \mathbb{R}$  olarak yeniden tanımlandığında

$$h(q) \triangleq \det(M(q)) = m^T \theta_m \quad (15)$$

yapısında yazılabilir. Üstte  $m(q) \in \mathbb{R}^{p_m}$  bilinen regresör vektörünü,  $\theta_m \in \mathbb{R}^{p_m}$  ise bilinmeyen parametre vektörünü göstermektedir. Eşitlik (13) ile sunulan ifadenin  $h(q)$  ile çarpıldıktan sonra elde edilen

ifadeye  $\frac{1}{2} \dot{h} L_a \eta_a$  teriminin eklenip çıkartılması sonucunda

$$h L_a \dot{\eta}_a = h L_a \frac{dI_{ac}}{dt} + h(R I_a + N_p L_b I_B \dot{q} + K_{T2} \dot{q}) + \frac{1}{2} \dot{h} L_a \eta_a - \frac{1}{2} \dot{h} L_a \eta_a - h V_a \quad (16)$$

ifadesine ulaşılmıştır. Burada  $\frac{dI_{ac}}{dt}$  ifadesi  $h(q)$  ya da diğer bir deyişle  $\det(M(q))$  ile çarpıldığından dolayı  $h L_a \dot{\eta}_a$  ifadesi doğrusal parametrelerine ayrıştırılabilir bir işlev olup diğer doğrusal parametrelerine ayrılabilen terimlerle birlikte yazılıp yeniden gruplandırılmıştır.

$$Y_a \theta_a = h L_a \frac{dI_{ac}}{dt} + h(R I_a + N_p L_b I_B \dot{q} + K_{T2} \dot{q}) + \frac{1}{2} \dot{h} L_a \eta_a \quad (17)$$

ifadesine ulaşılabilir. Üstte  $Y_a(I_a, I_b, q, \dot{q}, \eta_a, x, \dot{x}, x_d, \dot{x}_d, \ddot{x}_d) \in \mathbb{R}^{n \times p_a}$  bilinen regresör matrisini,  $\theta_a \in \mathbb{R}^{p_a}$  ise bilinmeyen parametre vektörünü göstermektedir. Eşitlik (17) tanımının Eşitlik (16) ifadesinde yerine yazılması sonucu

$$h L_a \dot{\eta}_a = Y_a \theta_a - \frac{1}{2} \dot{h} L_a \eta_a - h V_a \quad (18)$$

açık çevrim hata sistemine ulaşılmıştır. Denetleyici girişi olan faz gerilimi  $V_a(t)$

$$V_a = (m^T \hat{\theta}_m)^{-1} (Y_a \hat{\theta}_a + K_{T2} r) \quad (19)$$

yapısında tasarlanmış olup  $\hat{\theta}_m(t) \in \mathbb{R}^{p_m}$  ve  $\hat{\theta}_a(t) \in \mathbb{R}^{p_a}$  parametre kestirim vektörleri olup güncelleme kuralları alttaki yapıda tasarlanmıştır

$$\dot{\hat{\theta}}_m = \text{proj}\{-m V_a^T \eta_a\} \quad (20)$$

$$\dot{\hat{\theta}}_a = Y_a^T \eta_a \quad (21)$$

Eşitlik (20) ile sunulan tasarımda  $\mathbb{R}^{p_m} \rightarrow \mathbb{R}^{p_m}$  projeksiyon/izdüşüm operatörü  $\hat{\theta}_m$  vektörünün elemanlarının değerlerini paydadaki  $m^T \hat{\theta}_m$  ifadesinin sıfıra eşit olmayacağı bir aralıkta sınırlandırmak amacıyla kullanılmaktadır (Bridges ve diğ. (1993); Braganza, Dixon, Dawson ve Xian, 2008). Eşitlik (19) ile tasarlanmış olan denetleyici kuralının Eşitlik (18) ifadesinde yerine yazılması sonucunda

$$h L_a \dot{\eta}_a = Y_a \theta_a - \frac{1}{2} \dot{h} L_a \eta_a - h (m^T \hat{\theta}_m)^{-1} (Y_a \hat{\theta}_a + K_{T2} r) \quad (22)$$

kapalı çevrim hata sistemine ulaşılmıştır.

Denetleyici girişi olan faz gerilimi  $V_b(t)$

$$V_b = R I_b - N_p L_a I_A \dot{q} + K_{T1} I_A r \quad (23)$$





şeklinde tanımlanmışlardır. Eşitlik (27) ile sunulan Lyapunov işlevi içerisindeki terimlere karesel olarak bağlı olup artı tanımlıdır.

$V(t)$  ifadesinin zamana göre türevi alındığında

$$\dot{V} = \frac{1}{2}r^T \dot{M}r + r^T M \dot{r} + e^T \dot{e} + \frac{1}{2}h\eta_a^T L_a \eta_a + h\eta_a^T L_a \dot{\eta}_a + I_b^T L_b \frac{dI_b}{dt} + \tilde{\theta}_a^T \dot{\tilde{\theta}}_a + \tilde{\theta}_m^T \dot{\tilde{\theta}}_m + \tilde{\theta}_{ak}^T \dot{\tilde{\theta}}_{ak} + \tilde{\theta}_k^T \dot{\tilde{\theta}}_k \quad (52)$$

elde edilmiştir.

**Özellik 6:** Eylemsizlik matrisinin zamana göre türevi olan  $\dot{M}(q)$  ile merkezci ve koryolis terimlerini modelleyen matris  $V_m(q, \dot{q})$  birlikte aşağıdaki ters simetri özelliğini sağlarlar (Lewis, Dawson ve Abdallah, 2003)

$$a^T(\dot{M} - 2V_m)a = 0, \forall a \in \mathbb{R}^n. \quad (53)$$

Eşitlik (16), Eşitlik (10), Eşitlik (22), Eşitlik (24) ifadelerindeki hata dinamikleri ve Eşitlik (18), Eşitlik (33), Eşitlik (34), Eşitlik (50), Eşitlik (51) ile tanımlanan parametre kestirim hata vektörlerinin zamana göre türevlerinde  $\theta_a$ ,  $\theta_m$ ,  $\theta_{ak}$  ve  $\theta_k$  vektörlerinin sabit olmaları Eşitlik (29), Eşitlik (30), Eşitlik (31), Eşitlik (42) ve Eşitlik (43) ile tasarlanan güncelleme kuralları ile birlikte Eşitlik (52) ifadesinde yerine yazılıp Özellik 6 ifadesi de kullanılarak sadeleştirmeler yapıldığında

$$\dot{V} \leq r^T \dot{Y} - r^T K_r r - k_{a1} \|e\|^2 \|r\|^2 - k_{a2} \|e\|^2 \|r\|^2 + r^T K_{T2} \eta_a - e^T K_e e + \eta_a^T Y_a \theta_a + \eta_a^T h(m^T \hat{\theta}_m)^{-1} (Y_a \hat{\theta}_a + K_{T2} r) - \tilde{\theta}_m^T \text{Proj}\{-mV_a^T \eta_a\} - \tilde{\theta}_a^T Y_a^T \eta_a \quad (54)$$

elde edilmiştir.

Projeksiyon operatörünün sağladığı  $-\tilde{\theta}_m^T \text{Proj}\{-mV_a^T \eta_a\} \leq \tilde{\theta}_m^T mV_a^T \eta_a$  eşitsizliği (Bridges ve diğ. 1993; Braganza ve diğ. 2008) ve Eşitlik (26) ifadesinde sunulan üst sınır kullanılarak Eşitlik (54) ifadesinin sağ tarafı için aşağıda sunulan üst sınır

$$\dot{V} \leq c_1 \|e\| \|r\| + c_2 \|e\|^2 \|r\| + c_3 \|r\|^2 + c_4 \|e\| \|r\|^2 - \lambda_{\min}(K_r) \|r\|^2 - k_{a1} \|e\|^2 \|r\|^2 - k_{a2} \|e\|^2 \|r\|^2 - \lambda_{\min}(K_e) \|e\|^2 \quad (55)$$

elde edilmiştir. Analizin devamında Eşitlik (55) ifadesinde sunulan eşitsizliğin sağ tarafındaki bazı terimler için üst sınırlar elde edilecek ve ardından Eşitlik (55) içerisinde yerine yazılacaktır. Young eşitsizliğinden faydalanılarak (Marquez, 2003)

$$c_1 \|e\| \|r\| \leq \frac{1}{4\delta} \|e\|^2 + c_1^2 \|r\|^2 \quad (56)$$

üst sınırı elde edilmiş olup burada  $\delta \in \mathbb{R}$  artı sabiti göstermektedir. Öte yandan  $\frac{c_2^2}{4k_{a1}} \|e\|^2$  teriminin eklenip çıkartılması sonucu alttaki üst sınır (Kokotovic, 1992; Şahan, 2021)

$$c_2 \|e\|^2 \|r\| - k_{a1} \|e\|^2 \|r\|^2 = -\|e\|^2 \left( \sqrt{k_{a1}} \|r\| - \frac{c_2}{2k_{a1}} \right)^2 + \frac{c_2^2}{4k_{a1}} \|e\|^2 \leq \frac{c_2^2}{4k_{a1}} \|e\|^2 \quad (57)$$

elde edilmiş ve benzer adımlar takip edilerek

$$c_2 \|e\|^2 \|r\| - k_{a2} \|e\|^2 \|r\|^2 \leq \frac{c_2^2}{4k_{a2}} \|e\|^2 \quad (58)$$

sonucuna ulaşılmıştır. Eşitlik (56), Eşitlik (57) ve Eşitlik (58) ile elde edilen üst sınırların Eşitlik (55) ifadesinde yerine yazılması ve elde edilen terimlerin yeniden gruplanması sonucunda

$$\dot{V} \leq -\left( \lambda_{\min}(K_e) - \frac{1}{4\delta} - \frac{c_2^2}{4k_{a1}} \right) \|e\|^2 - \left( \lambda_{\min}(K_r) - c_3 - c_1^2 - \frac{c_4^2}{4k_{a2}} \right) \|r\|^2 \quad (59)$$

ifadesine ulaşılmıştır. Denetleyici kazançları için Eşitlik (25) ve Eşitlik (26) ile sunulan tasarımların kullanılmasıyla

$$\dot{V} \leq -\kappa \|z\|^2 \quad (60)$$

sonucuna ulaşılmış olup üstte  $z(t) \in \mathbb{R}^{2n}$  birleştirilmiş hata vektörü olup  $z \triangleq [e^T \ r^T]^T$  olarak tanımlanmıştır.

**Özellik 7:** Eylemsizlik matrisi  $M(q)$  artı tanımlı ve simetrik olup alttaki eşitsizlikleri sağlar (Lewis ve diğ. 2003)

$$m_1 I_n \leq M(q) \leq m_2 I_n. \quad (61)$$

**Özellik 8:**  $J(q)$  matrisinin elemanları eklem pozisyonlarına yalnızca trigonometrik işlevler ile bağlıdır ve dolayısıyla da tüm olası eklem pozisyonları için sınırlıdır.

Eşitlik (27) ve Eşitlik (60) göz önünde bulundurulduğunda  $V(t) \in \mathcal{L}_\infty$  olduğu sonucuna ulaşılmıştır. Buna göre  $e(t)$ ,  $r(t)$ ,  $\eta_a(t)$ ,  $I_b(t)$ ,  $\tilde{\theta}_a(t)$ ,  $\tilde{\theta}_m(t)$ ,  $\tilde{\theta}_{ak}(t)$ ,  $\tilde{\theta}_k(t) \in \mathcal{L}_\infty$  olduğu açıkça görülmektedir.  $\tilde{\theta}_a(t)$ ,  $\tilde{\theta}_m(t)$ ,  $\tilde{\theta}_{ak}(t)$  ve  $\tilde{\theta}_k(t)$  işaretlerinin sınırlılığı ve  $\theta_a$ ,  $\theta_m$ ,  $\theta_{ak}$ ,  $\theta_k$  vektörlerinin sabit olmaları sırasıyla Eşitlik (18), Eşitlik (33), Eşitlik (34), Eşitlik (50) ve Eşitlik (51) ile birlikte kullanılarak  $\hat{\theta}_a(t)$ ,  $\hat{\theta}_m(t)$ ,  $\hat{\theta}_{ak}(t)$ ,  $\hat{\theta}_k(t) \in \mathcal{L}_\infty$  gösterilebilir. Hata işaretleri  $e(t)$  ve  $r(t)$  sınırlı oldukları için Özellik 8 ve Eşitlik (16) parametre kestirim vektörlerinin sınırlılığı ile beraber kullanılarak  $\dot{e}(t) \in \mathcal{L}_\infty$  olduğu gösterilebilir. Eşitlik (12) ve zamana

göre türevi  $e(t)$ ,  $\dot{e}(t)$ ,  $x_d(t)$ ,  $\dot{x}_d(t)$  işaretlerinin sınırlılıkları ile birlikte göz önünde bulundurulduğunda  $x(t)$ ,  $\dot{x}(t) \in \mathcal{L}_\infty$  ispatlanır.  $\dot{x}(t)$  işaretinin sınırlılığı, Eşitlik (2) ile kullanıldığında  $\dot{q}(t) \in \mathcal{L}_\infty$  gösterilir.  $q(t)$  ve  $\dot{q}(t)$  sınırlı oldukları için  $M(q)$ ,  $V_m(q, \dot{q})$ ,  $G(q) \in \mathcal{L}_\infty$  olduğu ispatlanır. Üstteki sınırlılık sonuçları kullanılarak Eşitlik (22) ile elde edilen  $Y_d(t)$  ve Eşitlik (23) ile elde edilen  $Y_{dk}(t)$  matrislerinin sınırlılıkları ispatlanabilir. Üstteki sınırlılık çıkarımları Eşitlik (28) ile birlikte kullanılarak  $I_{ac}(t) \in \mathcal{L}_\infty$  ve bu sonuç  $\eta_a(t) \in \mathcal{L}_\infty$  ile beraber  $I_a(t)$  ve  $Y_a(t)$  ifadelerinin sınırlılığını ispatlamak için kullanılabilir. Bu sınırlılık çıkarımları Eşitlik (19) ve Eşitlik (23) ile sunulan tasarımlar kullanılarak denetleyici girişleri olan  $V_a(t)$ ,  $V_b(t) \in \mathcal{L}_\infty$  gösterilebilir. Üstteki sınırlılık sonuçları ve Özellik 7, Eşitlik (24) ile birlikte kullanıldığında  $\dot{r}(t) \in \mathcal{L}_\infty$  ispatlanır. Yukarıdakine benzer adımların takip edilmesiyle tüm işaretlerin kapalı çevrim altında sınırlılığı gösterilebilir.

Eşitlik (60) ile elde edilen ifadenin her iki tarafının  $t = 0$  anından  $t \rightarrow +\infty$  için integrali alındığında

$$\int_0^{+\infty} \|z(\sigma)\|^2 d\sigma \leq \frac{1}{\kappa} (V(0) - V(+\infty)) \leq \frac{V(0)}{\kappa} \quad (62)$$

sonucuna ulaşılabilir ki bu ifadeden  $z(t) \in \mathcal{L}_2$  olduğu görülmektedir. Üstteki sınırlılık takip analizinden  $e(t)$ ,  $r(t)$ ,  $\dot{e}(t)$ ,  $\dot{r}(t) \in \mathcal{L}_\infty$  ve dolayısıyla da  $z(t)$ ,  $\dot{z}(t) \in \mathcal{L}_\infty$  ispatlanmıştır. Bu çıkarımların ışığında Barbalat'ın önermesi (Khalil, 1996) kullanılarak  $t \rightarrow +\infty$  için  $z(t)$  vektörünün yakınsaklığı ve  $e(t)$  ile  $r(t)$  vektörlerinin yakınsaklığı, dolayısıyla da Teori 1 kapsamında sunulan önerme ispatlanmış olur.

## 7. Benzetim Çalışması ve Sonuçları

Tasarlanan uyarlamalı denetleyicinin performansını göstermek amacıyla düzlemde çalışan, iki serbestlik dereceli, dönel eklemli robot kolu modeli kullanılarak sayısal benzetim çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Eşitlik (1)'de sunulan ileri kinematik

$$x = \begin{bmatrix} l_1 c_1 + l_2 c_{12} \\ l_1 s_1 + l_2 s_{12} \end{bmatrix} \quad (63)$$

yapısında olup Jakobiyen matrisi

$$J = \begin{bmatrix} -l_1 s_1 - l_2 s_{12} & -l_2 s_{12} \\ l_1 c_1 + l_2 c_{12} & l_2 c_{12} \end{bmatrix} \quad (64)$$

şeklinde elde edilmiştir. Burada  $s_1 = \sin(q_1)$ ,  $s_2 = \sin(q_2)$ ,  $c_1 = \cos(q_1)$ ,  $c_2 = \cos(q_2)$ ,  $s_{12} = \sin(q_1 + q_2)$ ,  $c_{12} = \cos(q_1 + q_2)$  şeklinde tanımlanmıştır. Eklem uzunlukları  $l_1 = l_2 = 0.127\text{m}$  olarak alınmıştır. Sayısal benzetim çalışmaları gerçekleştirilirken  $l_1$  ve  $l_2$  parametreleri sadece robot kolunun hareketlerinin benzetimi amacıyla kullanılmış olup denetleyici tasarımlarının bir parçası değildir. Eşitlik (4)'te

sunulan robot kolunun dinamik modeli aşağıdaki terimler ile kullanılmış olup

$$M = \begin{bmatrix} p_1 + 2p_3 c_2 & p_2 + p_3 c_2 \\ p_2 + p_3 c_2 & p_2 \end{bmatrix} \quad (65)$$

$$V_m = \begin{bmatrix} -p_3 s_2 \dot{q}_2 & -p_3 s_2 (\dot{q}_1 + \dot{q}_2) \\ -p_3 s_2 \dot{q}_1 & 0 \end{bmatrix} \quad (66)$$

$$F_d = \begin{bmatrix} p_4 & 0 \\ 0 & p_5 \end{bmatrix} \quad (67)$$

burada  $p_1 = 3.473$ ,  $p_2 = 0.193$ ,  $p_3 = 0.242$ ,  $p_4 = 5.3$ ,  $p_5 = 1.1$  olarak ele alınmıştır. Sayısal benzetim çalışmaları gerçekleştirilirken  $p_1$ ,  $p_2$ ,  $p_3$ ,  $p_4$ ,  $p_5$  parametreleri sadece robot kolunun hareketlerinin benzetimi amacıyla kullanılmış olup denetleyici tasarımlarının bir parçası değildir. Eşitlik (5) ve Eşitlik (6)'da sunulan ve robot kolunun eklemelerini sürmekte kullanılan fırçasız DA motorlarının dinamik modeli aşağıdaki terimler ile kullanılmış olup

$$L_a = \begin{bmatrix} L_{a1} & 0 \\ 0 & L_{a2} \end{bmatrix} \quad (68)$$

$$L_b = \begin{bmatrix} L_{b1} & 0 \\ 0 & L_{b2} \end{bmatrix} \quad (69)$$

$$R = \begin{bmatrix} R_1 & 0 \\ 0 & R_2 \end{bmatrix} \quad (70)$$

$$N_p = \begin{bmatrix} N_{p1} & 0 \\ 0 & N_{p2} \end{bmatrix} \quad (71)$$

bu ifadelerdeki elektriksel model parametreleri birinci eklem için;  $L_{a1} = L_{a2} = 3.6\text{mH}$ ,  $L_{b1} = L_{b2} = 27.9\text{mH}$ ,  $R_1 = R_2 = 1.5587\Omega$  ve  $N_{p1} = N_{p2} = 2$  olarak, ikinci eklem için ise  $L_{a1} = L_{a2} = 0.36\text{mH}$ ,  $L_{b1} = L_{b2} = 2.79\text{mH}$ ,  $R_1 = R_2 = 0.5587\Omega$  ve  $N_{p1} = N_{p2} = 2$  olarak alınmıştır.

Takip edilmesi istenilen görev uzayı yörüngesi

$$x_d = \begin{bmatrix} 0.13 + (1 - \exp\{-0.01t^3\})0.02 \sin(0.05t) \\ 0.13 - (1 - \exp\{-0.01t^3\})0.02 \cos(0.05t) \end{bmatrix} \text{m} \quad (72)$$

yapısında tasarlanmış olup bu ifadedeki üstel terim sisteme yumuşak bir başlangıç vermek amacıyla kullanılmıştır.

Robot kolunun başlangıçta hareketsiz durumdaki eklem pozisyonları  $q(t=0) = [0 \quad \frac{\pi}{2}]^T$ , eklem hızları  $\dot{q}(t=0) = [0 \quad 0]^T$  olarak alınmıştır. Parametre kestirim vektörlerinin başlangıç değerleri  $\hat{\theta}_k(t)$  için gerçek değerinin 0,9 katı olarak,  $\hat{\theta}_m(t=0) =$

$[0.5 \ 0.5]^T$  şeklinde ve diğer tüm parametreler için sıfır olacak şekilde seçilmiştir.

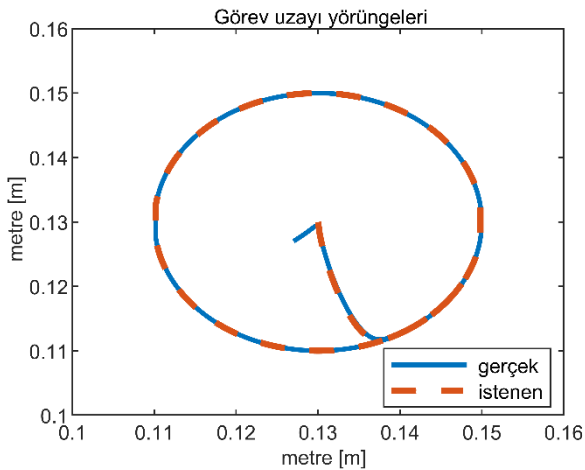
Denetleyici kazançları görece büyük bir değerden başlayıp iyi bir denetim performansı elde edilene kadar azaltılmak suretiyle deneme yanılma yoluyla ayarlanmış olup altta sunulan kazanç değerleri için elde edilen sonuçlar paylaşılmıştır

$$K_r = \begin{bmatrix} 5 & 0 \\ 0 & 4 \end{bmatrix} \quad (73)$$

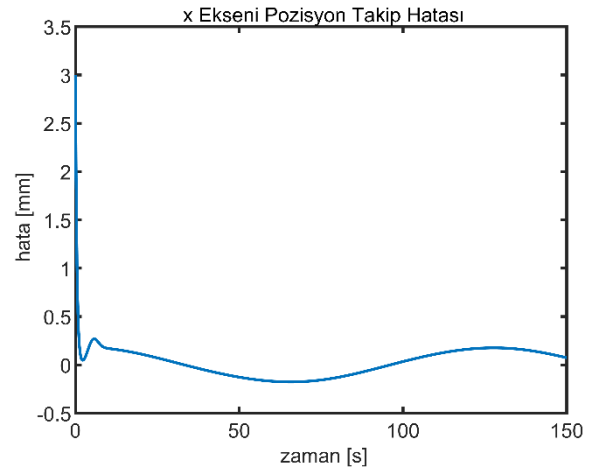
$$K_e = \begin{bmatrix} 4 & 0 \\ 0 & 3 \end{bmatrix} \quad (74)$$

$$k_{a1} + k_{a2} = 1. \quad (75)$$

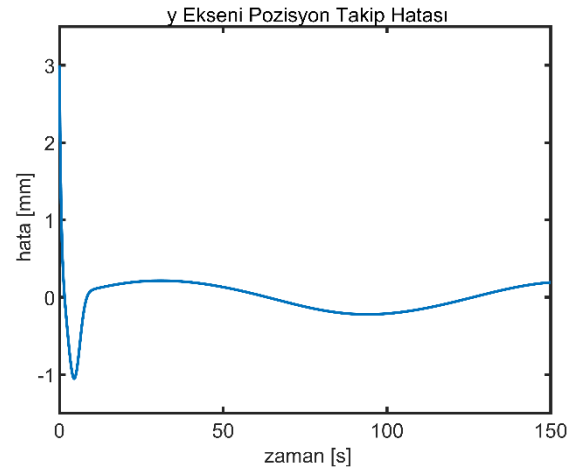
Görev uzayı takip yörüngeleri Şekil 2'de,  $x$  eksen pozisyon takip hatası Şekil 3'te,  $y$  eksen pozisyon takip hatası Şekil 4'te, birinci eklem için faz gerilimleri olan denetleyici girişleri  $V_a$  ve  $V_b$  Şekil 5'te ve ikinci eklem için faz gerilimleri olan denetleyici girişleri  $V_a$  ve  $V_b$  Şekil 6'da sunulmuştur. Gerek Şekil 2 gerekse de Şekil 3 ve Şekil 4'ten uç nokta takip hedefine ulaşıldığı gözlemlenmektedir.



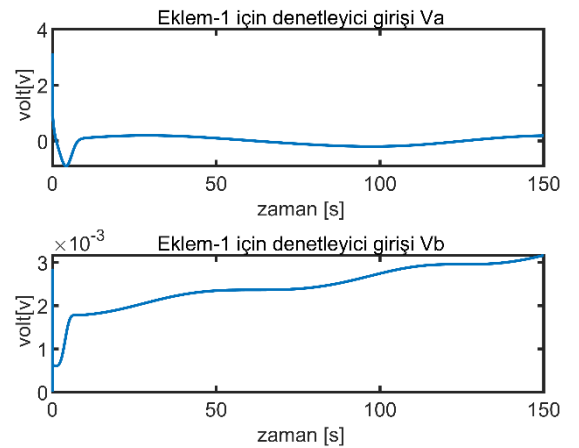
Şekil 2. İstenen  $x_d(t)$  ve gerçek  $x(t)$  görev uzayı yörüngeleri



Şekil 3.  $x$  eksen pozisyon takip hatası

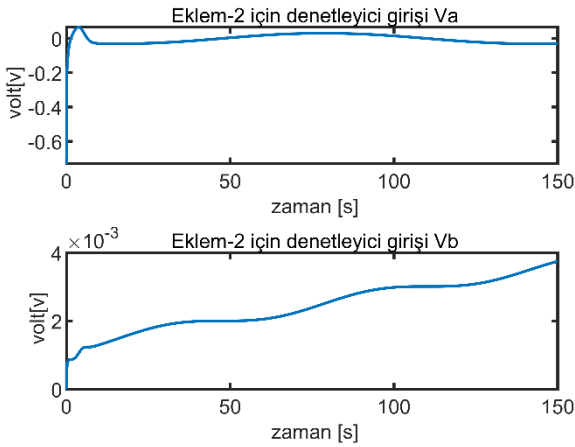


Şekil 4.  $y$  eksen pozisyon takip hatası



Şekil 5. Birinci eklem için  $V_a(t)$  ve  $V_b(t)$





Şekil 6. İkinci eklem için  $V_a(t)$  ve  $V_b(t)$

## 8. Sonuçlar

Çalışmamız kapsamında tasarlanan yenilikçi denetleyici yapısı ile robot kolunun hem dinamik hem de kinematik modelindeki belirsizliklere rağmen görev uzayı takip hatasının küresel asimptotik kararlılığı Lyapunov tabanlı olarak garanti edilmiştir. Tüm güncelleme kurallarının ve kapalı çevrim sistem içerisindeki tüm sinyallerin sınırlı kalacağı dolayısıyla tasarlanan denetleyici girişleri olan ve fırçasız DA motorlarına uygulanan faz gerilimlerinin de sınırlı kalacağı garanti edilmektedir. Benzetim sonuçları yeterince iyi bir takip performansının elde edildiğini ve denetleyici girişi olan faz gerilimlerinin uygulanabilir sınırlar içerisinde kaldığını göstermektedir. Tasarlanan tam durum geri beslemeli denetleyici yapısı eklem ve uç nokta pozisyonlarının, hızlarının ve motor akımlarının ölçümüne ihtiyaç duymaktadır. Görev uzayında ve fırçalı DA motor eyleyici dinamiklerinin ele alındığı (Peng, Ding ve Dubai, 2020; Jhan ve Lee 2017) çalışmalarına kıyasla çalışmamız kapsamında kinematik model belirsizlikleri de ele alınmıştır. Ek olarak bu çalışmalarda, takip hatasının ancak küçük bir bandın içerisinde kalacağı garanti edilebilirken çalışmamız kapsamında asimptotik sonucu kararlılık elde edilmiştir. (Si ve diğ. 2021) çalışmasına kıyasla denetleyici tasarımında çatırdama problemine neden olan işaret işlevi kullanılmamıştır. (Xu, Hu ve Zhang, 2017) çalışmasına kıyasla ise geliştirilen denetleyici yapısı eklem ivmelerinin ölçüm bilgisine ihtiyaç duymamaktadır. (Izadbakhsh ve Khorashadizadeh, 2017) çalışmasında ise eyleyicilerin endüktans etkileri ihmal edilerek ( $L=0$ ) eyleyici modeli doğrusallaştırılmıştır ve uç nokta ivmelerinin ölçüm bilgisine de ihtiyaç duyulmaktadır.

Gelecek çalışmalarda filtre veya gözetleyici tasarımına yönelik çalışmalar yapılarak bu gereksinimler azaltılabilir ve görüntü tabanlı algılayıcıların etkileri ele alınabilir (Yayan ve Erdoğan, 2022). Kendinden uyarlamalı gürbüz denetleyici tasarımları yapılabilir (Yılmaz ve diğ. 2022; Bayrak, 2017). Tasarlanan

denetleyici yapılarının gerçek zamanlı uygulamalarının da yapılması planlanmaktadır. Ek olarak sistem kısıtlarıyla ve doğrusalsızlıklarla mücadele etmek amacıyla doğrusal olmayan programlama (Yazıcı ve Karamancıoğlu, 2008) yöntemleri kullanılabilir.

## Teşekkür

Bu çalışmada sunulan araştırmaya verdiği destekten ötürü Türkiye Bilimsel ve Teknolojik Araştırma Kurumu'na (TÜBİTAK) teşekkür ederiz (proje numarası: 121E383). Ayrıca Şükrü Ünver, 2211-C programı (1649B032207716) kapsamında desteklendiği için TÜBİTAK'a ve YÖK 100/2000 projesi kapsamında desteklendiği için Yükseköğretim Kurulu'na teşekkür eder.

## Araştırmacıların Katkısı

Gerçekleştirilen çalışmada Yazar 1 yazılım, bilimsel yazın taraması, metodoloji, orijinal taslağın yazımı ve düzeltmeleri başlıklarında; Yazar 2 sonuçların ve metodolojinin değerlendirilmesi, konseptin detaylandırılması, biçimsel analiz ve inceleme başlıklarında; Yazar 3 fikrin oluşturulması, konseptin detaylandırılması, metodoloji, yazım denetimi ve makale içeriğinin incelemesi ve düzenlemesi başlıklarında; Yazar 4 konseptin detaylandırılması, metodoloji, biçimsel analiz ve inceleme başlıklarında; Yazar 5 metodoloji, biçimsel analiz, inceleme değerlendirme ve danışmanlık başlıklarında katkı sunmuşlardır.

## Çıkar Çatışması

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir.

## Kaynaklar

- Albostan, A ve Gökbulut, M. (1998). Fırçasız Doğru Akım Motorlarının Yapay Sinir Ağları ile Öz-Uyarlamalı Denetimi. *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 11(1). Erişim adresi: <https://dergipark.org.tr/en/pub/ogummf/issue/30463/329417>
- Bayrak, A. (2017). Sliding Mode Based Self-Tuning PID Controller for Second Order Systems. *Süleyman Demirel University Journal of Natural and Applied Sciences*, 21(3), 876-872. doi: <https://doi.org/10.19113/sdufbed.07565>
- Braganza, D., Dixon, W, E., Dawson, D.M. ve Xian, B. (2008). Tracking Control for Robot Manipulators with Kinematic and Dynamic Uncertainty. *International Journal of Robotics and Automation*, 23(2). doi: [10.2316/Journal.206.2008.2.206-3102](https://doi.org/10.2316/Journal.206.2008.2.206-3102)

- Braganza, D., Dixon, W. E., Dawson, D.M. ve Xian, B. (2005). Tracking Control for Robot Manipulators with Kinematic and Dynamic Uncertainty. *IEEE Conference on Decision and Control*, 5293-5297. doi: [10.1109/CDC.2005.1583003](https://doi.org/10.1109/CDC.2005.1583003)
- Bridges, M.M., Dawson, D.M. ve Gao, X. (1993). Adaptive control of rigid-link electrically-driven robots. *IEEE Conference on Decision and Control*, 159-165. doi: [10.1109/CDC.1993.325171](https://doi.org/10.1109/CDC.1993.325171)
- Bridges, M.M. ve Dawson, D.M. (1994). Adaptive control of rigid-link electrically-driven robots actuated with brushless DC motors. *IEEE Conference on Decision and Control*, 1284-1289. doi: [10.1109/CDC.1994.411145](https://doi.org/10.1109/CDC.1994.411145)
- Carrillo-Serrano, R.V., Hernández-Guzmán, V.M. ve Santibáñez, V. (2011). PD control with feedforward compensation for rigid robots actuated by brushless DC motors. *Robotica*, 29(4), 507-514. doi: <https://doi.org/10.1017/S0263574710000329>
- Cheah, C.C. (2003). Task-space regulation of robots with approximate actuator model. *Robotica*, 21(1), 95-104. doi: <https://doi.org/10.1017/S026357470200440X>
- Chen, Z., Yang, X. ve Liu, X. (2019). RBFNN-based nonsingular fast terminal sliding mode control for robotic manipulator including actuator dynamics. *Neurocomputing*, 362, 72-82. doi: <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2019.06.083>
- Chwa, D. ve Kwon, H. (2022). Nonlinear Robust Control of Unknown Robot Manipulator Systems with Actuators and Disturbances Using System Identification and Integral Sliding Mode Disturbance Observer. *IEEE Access*, 10, 35410-35421. doi: [10.1109/ACCESS.2022.3163306](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3163306)
- Çetin, K. (2016). *Artık eklemlili robot kollarının kontrolü ve telerobotik uygulamaları*. (Doktora tezi), İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, İzmir, Türkiye.
- Dawson, D.M., Bridges, M.M. ve Qu, Z. (1995). *Nonlinear control of robotic systems for environmental waste and restoration*. Prentice-Hall Inc.
- Deng, W., Zhou, H., Zhou, J ve Yao, J. (2023). Neural network-based adaptive asymptotic prescribed performance tracking control of hydraulic manipulators. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 53(1), 285-295. doi: [10.1109/TSMC.2022.3178626](https://doi.org/10.1109/TSMC.2022.3178626)
- Dixon, W. E. (2007). Adaptive Regulation of Amplitude Limited Robot Manipulators with Uncertain Kinematics and Dynamics. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 52(3), 488-493. doi: [10.1109/TAC.2006.890321](https://doi.org/10.1109/TAC.2006.890321)
- Doğan, K.M. (2016). *Telerobotik uygulamalarda robot kollarının öğrenmeli denetimi*. (Yüksek lisans tezi), İzmir Yüksek Teknoloji Enstitüsü, İzmir, Türkiye.
- Good, M.C., Sweet, L.M. ve Strobel, K.L. (1985). Dynamic Models for Control System Design of Integrated Robot and Drive Systems. *Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 107(1), 53-59. doi: <https://doi.org/10.1115/1.3140707>
- Izadbakhsh, A. ve Khorashadizadeh, S. (2017). Robust Task-Space Control of Robot Manipulator Using Differential Equations for Uncertainty Estimation. *Robotica*, 35(1), 1923-1938. doi: <https://doi.org/10.1017/S0263574716000588>
- Jhan, Z.Y. ve Lee, C.H. (2017). Adaptive Impedance Force Controller Design for Robot Manipulator including Actuator Dynamics. *International Journal of Fuzzy Systems*, 19(1), 1739-1749. doi: <https://doi.org/10.1007/s40815-017-0358-2>
- Karamancıoğlu, A. ve Özdemir, C. (1996). A Tutorial On The Singular Value Decomposition. *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 9(1). Erişim adresi: <https://dergipark.org.tr/tr/pub/ogummf/issue/30406/328445>
- Keighobadi, J., Xu, B., Alfi A., Arabkoohsar A. ve Nazmara, G. (2022). Compound FAT-based prespecified performance learning control of robotic manipulators with actuator dynamics. *ISA Transactions*. doi: <https://doi.org/10.1016/j.isatra.2022.04.027> Get rights and content
- Khalil, H.K. (1996). *Nonlinear Systems*. Prentice-Hall Inc.
- Kokotovic, P.V. (1992). The joy of feedback: nonlinear and adaptive. *IEEE Control Systems Magazine*, 12(3), 7-17. doi: [10.1109/37.165507](https://doi.org/10.1109/37.165507)
- Lewis, F.L., Dawson, D.M. ve Abdallah, C.T. (2003). *Robot manipulator control: theory and practice*. CRC Press.
- Liu, C. ve Cheah, C.C. (2005). Task-space adaptive setpoint control for robots with uncertain kinematics and actuator model. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 50(11), 1854-1860. doi: [10.1109/TAC.2005.858664](https://doi.org/10.1109/TAC.2005.858664)
- Liu, C., Cheah, C.C. ve Slotine, J.J. (2006). Adaptive Jacobian PID Regulation for Robots with Uncertain Kinematics and Actuator Model. *IEEE/RSJ*

- International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 3044-3049. doi: [10.1109/IROS.2006.282242](https://doi.org/10.1109/IROS.2006.282242)
- Marquez, H.J. (2003). *Nonlinear control systems: analysis and design*. John Wiley & Sons Inc.
- Nakanishi, J., Cory, R., Mistry, M., Peters, J. ve Schaal, S. (2008). Operational space control: A theoretical and empirical comparison. *The International Journal of Robotics Research*, 27(6), 737-757. doi: <https://doi.org/10.1177/0278364908091>
- Parlaktuna, O. ve Eroğlu, E. (2007). Gezin Robotlarda Ultrasonik Mesafe Algılayıcılarla Robot Davranışlarının Kontrolü ve Çevre Haritalama. *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 20(2). Erişim adresi: <https://dergipark.org.tr/tr/pub/ogummf/issue/30184/325706>
- Patil, O.S., Sun, R., Bhasin, S. ve Dixon, W.E. (2022). Adaptive Control of Time-Varying Parameter Systems with Asymptotic Tracking. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 67(9), 4809-4815. doi: <https://doi.org/10.1109/TAC.2022.3161388>
- Peng, J., Ding, S ve Dubai, R. (2020). Adaptive Impedance Control Based on Neural Network for Electrically-Driven Robotic Systems. *IEEE International Systems Conference*, 1-6, doi: <https://doi.org/10.1109/SysCon47679.2020.9275847>
- Saleki, A. ve Fateh, M.M. (2020). Model-free control of electrically driven robot manipulators using an extended state observer. *Computers and Electrical Engineering*, 87. Erişim adresi: <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2020.106768> [Get rights and content](#)
- Shojaei, K., Kazemy, A. ve Chatraei, A. (2021). An Observer-Based Neural Adaptive  $PID^2$  Controller for Robot Manipulators Including Motor Dynamics with a Prescribed Performance. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 26(3), 1689-1699. doi: [10.1109/TMECH.2020.3028968](https://doi.org/10.1109/TMECH.2020.3028968)
- Si, W., Zhao, L., Wei, J. ve Guan, Z. (2021). Task-space regulation of rigid-link electrically-driven robots with uncertain kinematics using neural networks. *Measurement and Control*, 54(1-2), 102-115. doi: <https://doi.org/10.1177/0020294020983383>
- Siciliano, B., Khatib, O. ve Kröger, T. (2008). *Springer handbook of robotics*, Springer.
- Soltanpour, M.R., Khalilpour, J. ve Soltani, M. (2012). Robust nonlinear control of robot manipulator with uncertainties in kinematics, dynamics and actuator models. *International Journal of Innovative Computing, Information and Control*, 8(8), 5487-5498. Erişim adresi: <http://www.ijicic.org/ijicic-11-04101.pdf>
- Şahan, G. (2021). Relaxations of Conditions of Lyapunov Functions. *Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 25(2), 238 - 244. doi: <https://doi.org/10.19113/sdufenbed.808371>
- Tarn, T.J., Bejczy, A.K., Yun, X. ve Li, Z. (1991). Effect of motor dynamics on nonlinear feedback robot arm control. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 7(1), 114-122. doi: [10.1109/70.68075](https://doi.org/10.1109/70.68075)
- Tatlıcıoğlu, E., McIntyre, M., Dawson, D.M. ve Walker, I. (2005). Adaptive Nonlinear Tracking Control of Kinematically Redundant Robot Manipulators with Sub-Task Extensions. *IEEE Conference on Decision and Control*, 4373-4378. doi: [10.1109/CDC.2005.1582850](https://doi.org/10.1109/CDC.2005.1582850)
- Wai, R.J. ve Muthusamy, R. (2014). Design of Fuzzy-Neural-Network-Inherited Backstepping Control for Robot Manipulator Including Actuator Dynamics. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 22(4), 709-722. doi: [10.1109/TFUZZ.2013.2270010](https://doi.org/10.1109/TFUZZ.2013.2270010)
- Xiao, B., Yin, S. ve Kaynak, O. (2016). Tracking Control of Robotic Manipulators with Uncertain Kinematics and Dynamics. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 63(10), 6439-6449. doi: [10.1109/TIE.2016.2569068](https://doi.org/10.1109/TIE.2016.2569068)
- Yayan, U. ve Erdoğan, A.K. (2022). Development of a fault injection tool & dataset for verification of camera based perception in robotic systems. *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 30(3), 328-339. Erişim adresi: <https://dergipark.org.tr/tr/pub/ogummf/issue/74024/1054761>
- Yazıcı, A. Ve Karamancıoğlu, A. (2008). A Nonlinear Programming Approach For The Swing-Up Control Problem. *Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 21(2), 109 - 124. Erişim adresi: <https://dergipark.org.tr/en/pub/ogummf/issue/30163/325536>
- Yılmaz, B.M., Tatlıcıoğlu, E., Savran, A. ve Alcı, M. (2022). Self-Adjusting Fuzzy Logic Based Control of Robot Manipulators in Task Space. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 69(2), 1620-1629. doi: [10.1109/TIE.2021.3063970](https://doi.org/10.1109/TIE.2021.3063970)

- Zergeroğlu, E., Kandemir, I., Seker, M. Ve Eroğlu, E. (2006). Dealing with uncertainty in dynamical systems: Lyapunov-based approaches. *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, 21(3), 587-602. Erişim adresi: <https://dergipark.org.tr/en/pub/gazimmfd/issue/6669/88847>
- Zhou, B., Yang, L., Wang, C., Chen, Y. ve Chen, K. (2020). Inverse Jacobian adaptive tracking control of robot manipulators with kinematik, dynamic and actuator uncertainties. *Complexity*. doi: <https://doi.org/10.1155/2020/5070354>
- Xu, L., Hu, Q. ve Zhang, Y. (2017).  $\mathcal{L}_2$  performance control of robot manipulators with kinematics, dynamics and actuator uncertainties. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 27(2), 875–893. doi: <https://doi.org/10.1002/rnc.3604>



## BİR METAL SANAYİ İŞLETMESİNDE ERGONOMİK RİSK DEĞERLENDİRME YÖNTEMLERİYLE BÜTÜNLEŞİK İŞ YÜKLERİNİN ANALİZİ

Emin KAHYA<sup>1\*</sup>, Kadriye ALPASLAN<sup>2</sup>, Gizem ŞENYÜZ<sup>3</sup>

- <sup>1</sup> Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Müh. Mim. Fak. Meşelik Yerleşkesi Endüstri Mühendisliği Bölümü, 26480, Eskişehir, ORCID No : <https://orcid.org/0000-0001-9763-2714>
- <sup>2</sup> Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Müh. Mim. Fak. Meşelik Yerleşkesi Endüstri Mühendisliği Bölümü, 26480, Eskişehir, ORCID No : <https://orcid.org/0009-0003-6588-4580>
- <sup>3</sup> Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Müh. Mim. Fak. Meşelik Yerleşkesi Endüstri Mühendisliği Bölümü, 26480, Eskişehir, ORCID No : <https://orcid.org/0009-0003-0588-3252>

Anahtar Kelimeler	Öz
Çalışma duruşları Ergonomik risk değerlendirme yöntemleri REBA MURI AHP	<i>Uygunsuz çalışma duruşları sırt, kol, boyun, bilek gibi vücut bölgelerinde kas iskelet sistemi rahatsızlıklarına neden olmaktadır. Bu rahatsızlıklar, yapılan işin özelliklerinin farklı olması nedeniyle aynı bölümde atölyeler arasında farklılıklar göstermektedir. Rahatsızlıkların önlenmesi amacıyla, ergonomik risk değerlendirmelerin yapılarak risk düzeylerinin tespit edilmesi gerekmektedir. Bu çalışmada, ana sanayiye metal parçaların üretimini gerçekleştiren bir işletmenin üretim bölümünde işçilerin yaptıkları işlem ve montaj faaliyetlerin risk düzeylerinin 5 farklı ergonomik risk değerlendirme yöntemi; REBA, NERPA, QEC, OWAS ve MURI, ile tespiti amaçlanmıştır. İşletmede, işçilerin yapmış oldukları 20 işlem belirlenmiş, bunlar gözlemlenerek her işlem için vücut bölgeleri (boyun, gövde, bacak, kol, bilek) ve diğer bileşenlerin (ağırlık kaldırma, kavrama, aktivite, stres, yürüme vb.) risk skorları 5 yöntem için tespit edilmiştir. Yöntemlerin kapsadığı vücut bölgeleri ile diğer faktörler ayrı özelliklere ve hatta risk skoru birimlerine sahip olduklarından, her yöntemin maksimum risk skoruna göre işlemlerin risk skorları % birimine dönüştürülerek normalizasyon işlemi yapılmıştır. İşlemlerin bütünlük risk skoru için, 5 uzmana AHP yöntemi uygulanarak yöntemlerin ağırlıkları belirlenmiş ve her işlem için bütünlük risk skoru hesaplanmıştır. En yüksek bütünlük risk skoruna sahip ilk 5 işlem için iyileştirici geliştirmeler önerilmiştir.</i>

### ANALYSIS OF INTEGRATED WORKLOADS BY USING ERGONOMIC RISK ASSESSMENT METHODS IN A METAL INDUSTRIAL ENTERPRISE

Keywords	Abstract
Working posture Ergonomic risk assessment methods REBA MURI AHP	<i>Inappropriate working postures can cause musculoskeletal disorders on the body parts such as back, arms, neck, wrists. These disorders show differences between workshops in the department due to the different compelling characteristics of the work done. In order to prevent disorders, ergonomic risk levels should be determined by using ergonomic risk assessments. In this study, it is aimed to determine the risk levels of the operations and assembly activities performed by the workers in the production department of an enterprise that produces metal parts for the main industry with 5 different ergonomic risk assessment methods, REBA, NERPA, QEC, OWAS ve MURI. In the enterprise, 20 operations performed by the workers were determined, and by observing these, risk scores of the body parts (neck, trunk, leg, arm, wrist) and other components (weight lifting, grip, activity, stress, walking, etc.) for each operation for 5 methods were determined. Since the body regions covered by the methods and other factors have different characteristics and even risk score units, the risk scores of the operations were converted into % units according to the maximum risk score of each method, and then normalization was performed. For the integrated risk score of the operations, the weights of the methods were determined by applying the AHP method to 5 experts and the integrated risk score was calculated for each operation. Remedial enhancements are proposed for the top 5 operations with the highest integrated risk score.</i>

Araştırma Makalesi

Research Article

Başvuru Tarihi : 18.06.2023

Submission Date : 18.06.2023

Kabul Tarihi : 14.09.2023

Accepted Date : 14.09.2023

\* Sorumlu yazar: [ekahya@ogu.edu.tr](mailto:ekahya@ogu.edu.tr)  
<https://doi.org/10.31796/ogummf.1316286>



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

Teknolojik gelişmeler sayesinde işler kolay hale gelse de fiziksel insan gücüne duyulan ihtiyaç hala birçok alanda devam etmektedir. İnsan gücünün yoğun olarak kullanıldığı işlerde eğer uygun olmayan çalışma duruşları mevcut ise kas iskelet sistemi rahatsızlıkları (KİSR) kaçınılmaz bir sorundur.

Araştırmalara göre endüstriyel işlerin ortalama üçte birinin; kaldırma, indirme, tutma, taşıma, itme veya çekme gibi elle taşıma faaliyetlerinden biri ile bağlantılı olduğu yönünde güçlü kanıtlar bulunmaktadır (Akay ve Toksari, 2009). El ile taşıma işlerinde özellikle bel rahatsızlıkları ile sıkça karşılaşmaktadır.

KİSR; kaslarda, sinirlerde, tendonlarda, kıkırdakta, bağlarda, birleşme noktalarında ve disklerde (omurga) meydana gelen rahatsızlıklardır. İskelet ve kas sistemi sendromları eğilme, doğrulma, tutma, kavrama, bükme ve uzanma gibi sıradan vücut hareketlerinden meydana gelir (Akay, Dağdeviren ve Kurt, 2003). Bu hareketler günlük yaşam içerisinde yapıldıklarında zararlı olmamakla birlikte, iş yaşamında sürekli tekrar edildiklerinde ve hızlı yapıldıklarında zararlı hale gelmektedirler (Özel ve Çetik, 2010).

KİSR, dünyada yaygın bir sağlık sorunu olup; sinirleri, tendonları, kasları ve vücudun destekleyici yapılarını kapsamaktadır (Esen ve Fığlalı, 2013). Tekrarlı hareketler, kesintisiz uzun süre çalışma, hız çalışma, uygunsuz çalışma koşulları (sıcaklık, titreşim vb.), yüksek iş talebi, gibi faktörler KİSRna sebep olmaktadır. Ayrıca, iskelet ve kas sistemi sendromlarına: sabit duruşlar, sürekli ve tekrarlı hareketler, işin süresi ve sıklığı, vücudun belli bölgelerindeki uygun olmayan duruşlardan dolayı meydana gelen zorlanmalar, uygun harekete izin vermeyen işler ve titreşim neden olmaktadır (Akay ve diğ., 2003). Bu sebeple uygunsuz çalışma duruşlarının olabildiğince iyileştirilmesi ve çalışanın rahatsızlıklarının en aza indirilmesi, hem çalışan sağlığı hem de işgücü verimliliği açısından oldukça önemlidir.

KİSR ortaya çıkmasını önleyebilmenin en önemli yolu ise ergonomik tehlikelerin belirlenmesi için ergonomik risk değerlendirmesi yapılmasıdır. Ergonomik düzenlemelerin nasıl ve hangi yerlerde yapılacağı, ergonomik risk değerlendirmeleri sonucu belirlenmelidir (Coşkun, Sağıroğlu ve Erginel, 2015). Ergonomik risk değerlendirme sonucunda hangi alanda hangi sırada iyileştirmeler yapılacağı ortaya çıkmaktadır.

Literatürde ergonomik riskleri değerlendirmek için birbirinden farklı özellikte pek çok yöntem bulunmaktadır. Bu yöntemler, çalışırken işçinin duruşunu değerlendirmek ya da yaptığı işin unsurlarını ele almak üzere tasarlanmışlardır (Karabacak, 2016; Kılıç Delice, Ayık, Abidinoğlu, Çiftçi ve Sezer, 2018). Bu çalışmada, ergonomik risk değerlendirme

yöntemlerinden REBA (Rapid Entire Body Assessment - Hızlı Tüm Vücut Değerlendirmesi), NERPA (Novel Ergonomic Postural Assessment - Yeni Ergonomik Duruş Değerlendirmesi) OWAS (Ovako Working Posture Analysing System - Hızlı Tüm Vücut Değerlendirmesi), QEC (Quick Exposure Check - Hızlı Maruziyet Değerlendirme) ve MURİ yöntemleri bir metal sanayi işletmesindeki 20 işlem için kullanılarak her bir yöntem için risk skorları elde edilmiştir. Bir ÇKKV (Çok Kriterli Karar Verme) yöntemi olan AHP (Analitik Hiyerarşi Prosesi) 5 karar vericiye uygulanarak ergonomik risk değerlendirme yöntemlerinin ağırlıkları tespit edilmiştir. Her bir yöntemin maksimum risk skorunun farklı ve hatta birimlerinin değişik yapıda olması nedeniyle, maksimum risk skorlarından hareketle, işlemlerin risk skorları % birime dönüştürülerek normalizasyon işlemi yapılmıştır. Normalize risk skorları yöntem ağırlıkları ile bütünleşik risk skorları elde edilmiş, en yüksek bütünleşik risk skoruna sahip 5 işlem için iyileştirici öneriler geliştirilmiştir.

Çok çeşitli risk değerlendirme yöntemlerini içinde bulundurması nedeniyle bu çalışma daha kapsamlıdır. Ayrıca risk değerlendirme yöntemlerinin bir ÇKKV yöntemi ile birlikte kullanılması ile alandaki çalışmalara katkı sağlayacağı düşünülmektedir.

## 2. Bilimsel Yazın Taraması

Literatürde, ergonomik risk değerlendirme yöntemlerinden biri veya birkaçı kullanılarak; metal, otomotiv, tekstil, mobilya, gıda, tarım, ormancılık, inşaat ve enerji gibi sektörlerde mavi yakalı çalışanların yaptıkları işlerde risk skorunu tespit etmek ve yüksek riskli işlemler için iyileştirici öneriler geliştirilmiş çok sayıda çalışma sunulmuştur.

Son yıllarda, bu çalışmada kullanılmış yöntemlerden birkaçı kullanılarak yapılmış en önemli çalışmalar tanıtılacaktır. Çalışmaların büyük bölümünde en yüksek risk skoru tespit edilen işlemler için iyileştirme önerilerinin geliştirilmesi ele alınmıştır.

Gajbhiye, Banerjee ve Nandi (2020), inşaat işlerinde çalışanların, aşırı fiziksel efor, aşırı kuvvet, ağır yük kaldırma ve gün boyunca uygunsuz duruşta çalışmaları nedeniyle KİSR maruz kaldıklarını belirterek, hafriyat işçilerinin ağrı/rahatsızlık düzeylerini değerlendirmek amacıyla bir çalışma yapmışlardır. Çalışanların ergonomik riskleri NERPA, WERA ve REBA yöntemleriyle gerçekleştirilmiştir. İnşaat işçilerinin duruşlarının değerlendirilmesi için NERPA yönteminin uygulanabileceği görülmüştür. Zengin ve Ömer (2020), bina inşaatlarında çalışan duruşlarının 3 farklı ergonomik risk değerlendirme yöntemi (REBA, OWAS ve QEC) ile analiz ederek, 4 farklı görevdeki toplam 39 çalışma duruşunu analiz etmişlerdir. Sonuçta QEC yöntemi sonuçlarının diğer yöntemlerden ayrıldığı belirlenmiştir. Sadeghi Yarandi ve diğ. (2019), KİSR

etkileyen risk faktörlerini belirlemek için NERPA, RULA, REBA yöntemlerini, Alborz ilinde bir enerji santrali ekipman endüstrisinde onarım ve bakım bölümünde çalışan 259 çalışana uygulamışlardır. Nordic anketi KİSR düzeylerini belirlemek için kullanılmıştır. Sonuçlar, farklı görevlerde KİSR sonuçlarını tahmin etmede en iyi yöntemin RULA yöntemi olduğunu göstermiştir.

Baş ve Yapıcı (2020), Karadeniz bölgesinde emek yoğun çalışmanın yapıldığı bir gıda işletmesinin hammadde, imalat ve paketleme bölümlerinde, işçilerin çalışma esnasındaki riskli çalışma pozisyonları REBA ve RULA yöntemleri ile risk analizi yapmışlardır. Akalp, Saklangıç ve Çırakoğlu (2021) tarım işçilerinin zeytin hasadı esnasında çalışma duruşlarını REBA yöntemi ile analiz etmiş ve riskli işler için çözüm önerileri sunmuşlardır. Aydın (2021), perakende sektöründe et ve tavuk ürünleri satışı yapan bir firmada çalışma duruşlarını gözlemiş, çalışanların elle kaldırma işlemi için NIOSH kaldırma denklemi, reyon kısmındaki çalışma duruşları için ise REBA yöntemini kullanmıştır. Hawari, Sulaiman, Kamarudin ve Me (2022), Malezya'nın Selangor kentindeki 3 ahşap işleme atölyesinde kesme, kaldırma ve montaj işlemleri için QEC ve REBA yöntemleri ile ergonomik risk analizi yürütmüşlerdir. Sauk, Beyhan ve Kalın Uğurlutepe (2023), fındık toplama makinası ile fındığın yerden toplanması esnasında çalışan duruşlarını REBA ve OWAS yöntemleri ile inceleyerek risk skorlarını belirlemişlerdir.

Polat ve diğ. (2017), Denizli'de faaliyet gösteren bir mobilya işletmesinde çalışan işçilerin çalışma duruşlarını REBA yöntemi ile analiz etmişlerdir. Otuz iki işçi için REBA yöntemi ile gözlemler yapılmış, KİSR açısından riskli işler belirlenmiştir. Özellikle üretim ve montaj hatlarında çalışan işçilerin yaklaşık %60'ının KİSR açısından oldukça riskli olduğunu tespit edilmiştir. Çiçek, Kazanç ve Kahya (2018), REBA, OWAS ve QEC yöntemleri ile mobilya sektöründe bir işletmenin montaj hattındaki süngerleme, kumaşı iskelete giydirme, kolları iskelete zımbalama ve gövdeyi iskelete zımbalama olmak üzere dört işlemin risk skorlarını tespit etmişlerdir. Demirkol Akyol (2022), bir tekstil işletmesindeki işlemlerin ergonomik risk faktörlerini belirlemek amacıyla REBA, NIOSH ve OCRA yöntemlerini kullanmıştır.

Yazdanirad ve diğ. (2018), İsfahan'da ilaç, otomotiv ve montaj olmak üzere üç farklı sektörden 210 işçi üzerinde çalışma yürütmüşlerdir. KİSR düzeylerini belirlemek için bir Nordic anketi kullanılmıştır. Seçilen işlemler RULA, LUBA ve NERPA yöntemleri ile değerlendirilmiştir. Sonuçlar, KİSR değerlendirmek için üç yöntem arasında en uygun yöntemin RULA olduğunu göstermiştir. Kahya ve Söylemez (2019), bir jant fabrikasının üretim atölyesinde zorlanmaların en fazla olduğu yıkama, kıvrırma, torna ve pres tezgahlarında, işçilerin maruz kaldıkları fiziksel zorlanmaların tespiti amacıyla REBA ve QEC yöntemleri ile ergonomik risk

değerlendirmesi yapılmışlardır. Özcan ve Yeğin (2020), otomotiv sektörüne lastik üreten bir işletmede yükleme ve boşaltma yapan işçilerin fiziksel ve zihinsel iş yüklerinin iyileştirilmesi amacıyla OWAS ve NASA-TLX yöntemleri ile analizler yapmışlardır. Mert, İde ve Gündüz (2022), otomotiv sektöründe yedek parça imalatı yapılan progresif kalıp hattında çalışanların KİSR risklerini QEC ve BAUA yöntemleri ile incelemişlerdir. Demirtaş ve diğ. (2023), ısı rezistans üretimi yapan bir fabrikada REBA, NIOSH, OWAS ve OCRA yöntemlerini kullanılarak riskli çalışma duruşlarının olduğu işlerde çalışacak personelin atanması problemini ele almışlardır.

Bu çalışmalara ilaveten, Kılıç Delice ve diğ. (2018), Adar ve Kılıç Delice (2020) ve Aksüt, Eren ve Tüfekçi (2021) ergonomik risk değerlendirme yöntemleri ile ÇKKV yöntemlerinin birlikte kullanıldığı çalışmalar sunmuşlardır. Kılıç Delice ve diğ. (2018), bir tüp üretim fabrikasında REBA, OWAS, QEC ve MANTRA yöntemlerini kullanarak riskli çalışma duruşlarını çıkarmayı amaçlamışlardır. Diğer çalışmalardan farklı olarak, çalışmada; üretim aşamalarının ve vücut bölümlerinin risk değerlendirmeleri ayrı ayrı yapılmıştır. Bütünleşik bir değerlendirme için bu dört yöntem AHP yöntemi ile ağırlıklandırılmıştır. Adar ve Kılıç Delice (2020), şoförlerin toplam iş yükünü ÇÖKV yöntemlerinden AHP ve COPRAS yöntemlerini kullanarak belirlemişlerdir. İlk olarak; zihinsel iş yükünü NASA-TLX, fiziksel iş yükünü ise REBA yöntemi ile tespit etmişlerdir. Ardından, AHP yöntemi ile ölçütlerin önem ağırlıkları belirlenmiş ve bu ağırlıklar kullanılarak COPRAS yöntemi ile 60 şoförü karşılaştırmışlardır. Aksüt, Eren ve Tüfekçi (2021), bir tekstil fabrikasının bölümlerinin ergonomik risk açısından sıralanması problemini ele almışlardır. Problemin çözümünde ANP ve PROMETHEE yöntemleri kullanılmıştır. Kadınların yoğun olarak çalıştığı Dikimhane bölümü ergonomik risk açısından ilk sırada yer almıştır.

Bu çalışmada, farklı olarak, birbirinden farklı özelliklere sahip 5 ergonomik risk değerlendirme yöntemi kullanılmış, kapsam daha da genişletilmiştir. Yöntemlerin ağırlıkları AHP yöntemi ile tespit edilerek bütünleşik bir risk skorunun belirlenmesi açısından diğer çalışmalardan fark oluşturmaktadır. Bu şekilde ergonomik risk değerlendirme yöntemlerinin sonuçları ayrı ayrı değil, bir bütün olarak değerlendirilip daha etkin sonuçların elde edilmesi sağlanmıştır.

### 3. Kullanılan Yöntemler

Bu çalışmada, 5 ergonomik risk değerlendirme yöntemi ile bir ÇKKV yöntemi olan AHP yöntemi kullanılmıştır.

#### 3.1. Ergonomik Risk Değerlendirme Yöntemleri

İşlemlerin ergonomik riskleri REBA, NERPA, QEC, OWAS ve MURI yöntemleri belirlenmiştir.

### REBA Yöntemi

Hignett ve McAtamney (2000) tarafından duruşları analiz etmek üzere geliştirilen REBA yöntemi; elle yapılan taşıma, kaldırma işlemlerindeki riskleri hesaplamak için kullanışlıdır. REBA yönteminde, vücut bölgeleri olarak; gövde, boyun, bacak, üst kol, alt kol ve bileklerin duruşu analiz edilir, duruş sırasında uygulanan kuvvet (veya taşınan yük), kavrama ve aktivite skoru eklenerek REBA skoru elde edilmektedir.

### NERPA Yöntemi

Yöntem, postüral değerlendirmenin en yeni yöntemlerinden biridir. NERPA, fiziksel durumu daha iyi değerlendiren son yöntemlerden biri olarak ilk kez 2013 yılında Sanchez-Lite, Garcia, Domingo ve Angel Sebastian (2013) tarafından sunulmuştur. NERPA, RULA'nın değiştirilmiş bir uyarlamasıdır, aynı yapıya sahiptir. Yöntem, nihai puanı elde etmek için fiziksel koşullara dayalı bir puanlama sistemini kullanan birçok gözlemsel değerlendirme yöntemine benzerdir (Sadeghi Yarandi ve diğ., 2019).

### QEC Yöntemi

QEC yönteminin ilk yapı ve değerlendirilmesi 1. aşamada (1996-1998) Lee ve Buckle (1998) tarafından oluşturulmuştur. Yöntem uygulayıcılar tarafından belirli bir süre kullanıldıktan sonra, içeriği değerlendirilmiş, sunum formatı 2. aşamada (2000-2003) gözden geçirilmiştir. Her iki aşamada 206 uygulayıcıdan alınan geri bildirimlere göre yöntem son şekli verilmiştir (David, Woods, Li ve Buckle, 2008).

İki bölümden oluşan formun, "Gözlemcinin Değerlendirmesi" bölümünde; değerlendirici, çalışma esnasında 4 vücut bölgesinde (sırt, omuz/kol, bilek/el ve boyun) duruş ve hareketler için 18 soru yer almaktadır. "Çalışanın Değerlendirmesi" bölümünde ise, çalışan; kaldırılan veya taşınan en fazla ağırlık, iş süresi, bir elle uygulanan en yüksek kuvvet, işin gerektirdiği görsel dikkat, taşıt kullanma, titreşim, zorlanma ve iş stresi olmak üzere 8 başlıkta değerlendirme yapmaktadır. Nihai olarak; 8 farklı bileşen; sırt (statik ve dinamik), omuz/kol, bilek/el, boyun, taşıt kullanma, titreşim, iş temposu, stres skorlamaya esas teşkil etmektedir.

### OWAS Yöntemi

Ovako Çelik Şirketi tarafından 1970 yılında Finlandiya'da geliştirilmiştir (Karhu, Kansu ve Kuorinka, 1977). Çalışma sırasında sırt, kol ve bacak vücut bölgelerinin duruşları ile eğilme, rotasyon ve elevasyon pozisyonlarını değerlendirilir. Her bir duruş özelinde o duruşa maruz kalma süresi ve sıklığı da dikkate alınır. Değerlendirmede duruşların kaydedilmesi aşamasında kamera kullanılabilir, görüntüler için özelliğine göre farklı zaman aralıkları ile incelenir. Uzun süreli

işlemlerde 15 saniye, daha küçük sürelerde ise 5 saniye ara ile çalışma duruşunun kaydedilip değerlendirilmesi önerilmektedir (Akay ve diğ., 2003). Sadece 4 vücut bölgesinin etkili olduğu işlem türleri için kullanılabilir. Her 5-15 saniyede bir analiz yapılması işlem yükünü arttırır.

### MURI Yöntemi

Yalın üretimde, gereksiz faaliyetler yani israflar MUDA, MURİ ve MURA olarak tanımlanır. MURİ; aşırı yükü yani çalışma alanında bulunan ekipman ve insanların normal kapasitelerinin üzerinde çalıştırılarak zorlanmalarını ifade eder (Ayan, 2015; Oral, Gönen, Karaoğlan, Tuncer ve Kundakçı, 2018).

MURİ yönteminde, belden eğilme, belin dönmesi, kolların çalışması gibi 9 vücut bölgesi hareketi için çalışma esnasında puanlama yapılmaktadır. Her hareket için 3 farklı seviye bulunmaktadır. Değerlendirme sonucuna göre elde edilen risk seviyesi yüksek ise iyileştirme yapılarak riskli hareketin azaltılması hatta ortadan kaldırılması amaçlanmaktadır.

Yöntemlerin risk skorlarına bağlı olarak risk düzeyleri Tablo 1'de verilmiştir.

### 3.2. AHP Yöntemi

AHP yöntemi Thomas L. Saaty (1980) tarafından karmaşık karar verme problemlerinin çözümü için geliştirilen ve en yaygın olarak kullanılan ÇKKV yöntemidir. AHP yöntemi çok sayıda ölçüt ile uygulanabilen, nitel ve nicel faktörleri değerlendirebilen, diğer yöntemlere göre uygulaması kolay olan ve sistematik yapısı sayesinde çok karmaşık problemleri basitleştiren bir yöntemdir (Adar ve Kılıç Delice, 2020).

AHP yöntemi 4 adımdan oluşmaktadır (Saaty, 1980; Adar ve Kılıç Delice, 2020):

- 1- Karar matrislerinin oluşturulması
- 2- Normalize matrisin oluşturulması
- 3- Öncelik vektörünün hesaplanması
- 4- Tutarlılık oranının (TO) hesaplanması

#### Adım 1: Karar matrislerinin oluşturulması

Ölçütler arasında ikili karşılaştırma matrisleri kurularak karar verici görüşleri alınır. Karar verici tarafından ölçüt i ile ölçüt j karşılaştırıldığı zaman, ölçüt i'nin ölçüt j'ye göre ne oranda tercih edildiğini belirlemek için Saaty (1980) tarafından önerilen ve Tablo 2'de gösterilen 1-9 skalası kullanılır.

Tablo 1. Risk Düzeyleri

Derece	Risk Skoru	Risk Seviyesi	Önlem
0	1	İhmal Edilebilir	Gerekli değil
1	2-3	Düşük	Gerekli olabilir
2	4-7	Orta	Gerekli
3	8-10	Yüksek	Kısa zaman içerisinde gerekli
4	11-15	Çok Yüksek	Hemen gerekli

b) NERPA Yöntemi (Sadeghi Yarandi ve diğ., 2019)

Derece	Risk Skoru	Risk Seviyesi
1	1-2	Düşük
2	3-4	Orta
3	5-6	Yüksek
4	7	Çok Yüksek

c) QEC Yöntemi (Li ve Buckle, 1998)

Derece	Risk Skoru	Eylem
1	≤40%	Kabul edilebilir
2	41-50%	Daha fazla araştırılmalı
3	51-70%	Daha fazla araştırılmalı ve yakın zamanda değişiklik yapılmalı
4	>70%	Araştırılmalı ve hemen değişiklik yapılmalı

d) OWAS Yöntemi (Ülker ve Burdurlu, 2012)

Kod	Kategori	Eylem Sınıfı	Açıklama
1	C1	Normal duruş	Ergonomik düzenleme yapılması gerekmemektedir.
2	C2	Zorlanma fazla değil	Ergonomik düzenleme yapılması gerekir fakat acil bir düzenlemeye gidilmez.
3	C3	Yüklenme ve zorlanma fazla	Ergonomik düzenleme en kısa zamanda yapılmalıdır.
4	C4	Yüklenme ve zorlanma çok fazla	Ergonomik düzenleme derhal yapılmalıdır.

e) MURI Yöntemi (Oral ve diğ., 2018)

Derece	Risk Skoru	Risk Seviyesi
1	0-10	Yeşil
2	11-15	Sarı
3	16-	Kırmızı

Tablo 2. Karşılaştırma Ölçeği (Saaty, 1980)

Önemi	Tanım	Açıklama
1	Eşit öneme sahip	Her iki seçenekte eşit önem düzeyine sahip
3	Biraz önemli	Bir ölçüt diğerine göre biraz daha önemlidir
5	Fazla önemli	Bir ölçüt diğerine göre çok daha önemlidir
7	Çok fazla önemli	Bir ölçüt diğerine göre çok daha fazla önemlidir
9	Son derece önemli	Bir ölçütün diğerine göre son derece önemli
2,4,6,8	Ara değerler	Uzlaşma gerektiğinde kullanılan önem düzeyleri

İkili karşılaştırmalar, köşegen elemanları 1 olan matrisin üst üçgen matris kısmı için yapılır.  $x_{ij}$ , i. ve j. ölçütün ikili karşılaştırma değeri ise,  $x_{ji}$  değeri  $1/x_{ij}$  eşitliğinden elde edilir. İkili karşılaştırma matrisleri Denklem (1)'de verildiği gibi oluşturulur.

$$X = \begin{bmatrix} 1 & x_{1,2} & \dots & x_{1,n} \\ x_{2,1} & 1 & \dots & x_{2,n} \\ \cdot & \cdot & \dots & \cdot \\ x_{n,1} & x_{n,2} & \dots & x_{n,n} \end{bmatrix} \quad (1)$$

n ölçütün yer aldığı durumda oluşturulacak ikili karşılaştırma matrisi X,  $n \times n$  boyutundadır. Ana ölçütler ve alt ölçütler arasında ikili karşılaştırma matrisleri oluşturulduktan sonra Adım 2'ye geçilir.

### Adım 2: Normalize matrisin oluşturulması

İkili karşılaştırma matrisindeki (X) her eleman Denklem (2)'ye göre kendi sütun toplamına bölünerek normalize edilir.

$$x'_{i,j} = \frac{x_{i,j}}{\sum_{i=1}^n x_{i,j}} \quad (2)$$

### Adım 3: Öncelik vektörünün hesaplanması

Normalize edilmiş matrisin her bir sütun toplamı 1'e eşittir. Denklem (3) kullanılarak, normalize edilmiş matrisin her bir satır toplamı, matrisin boyutuna bölünerek ortalaması elde edilir. Elde edilen bu değer her bir ölçüt için hesaplanan önem ağırlığıdır. Bu ağırlıklar öncelik vektörü olarak adlandırılır.

$$w_i = \left( \frac{1}{n} \right) \sum_{j=1}^n x'_{i,j}, \quad i, j = 1, 2, 3, \dots, n \quad (3)$$



#### Adım 4: Tutarlılık oranının (TO) hesaplanması

Ölçütler arasında yapılan ikili karşılaştırmalar sonucu elde edilen yargıların tutarlı olup olmadığı kontrol edilir. Karar vericinin yargıları ile oluşturulan bir A matrisinin tutarlı olup olmadığı Denklem (4)'te verilen "Tutarlılık İndeksi (TI)" katsayısının hesaplanması ile elde edilir.

$$TI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (4)$$

Tutarlılık indeksi hesabı yapabilmek için önce Özdeğer olarak adlandırılan  $\lambda_{max}$ , Denklem (5) kullanılarak hesaplanmalıdır.

$$\lambda_{max} = \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{\sum_{j=1}^n X_{i,j} * w_j}{w_i} \right) \quad (5)$$

Tutarlılığı kontrol edebilmek için "Rassal İndeks (RI)" değerinin de bilinmesi gerekir. Her bir matris boyutu n'e karşılık gelen RI değerleri Tablo 3'te verilmiştir. RI değeri, boyutu en çok 15 olan matrisler için hesaplanabilmektedir.

Tablo 3. Matris Boyutuna Göre RI Değerleri

n	1	2	3	4	5	..	10
RI	0,00	0,00	0,58	0,90	1,12	..	1,49

TI ve RI oranları belirlendikten sonra TO değeri Denklem (6) kullanılarak hesaplanır.

$$TO = \frac{TI}{RI} \quad (6)$$

Matrisin tutarlı olması için TO değerinin 0,1'den küçük çıkması gerekmektedir. Eğer TO değeri 0,1'den büyük çıkarsa matrisin tutarsız olduğu kanaatine varılır ve ikili karşılaştırma matrisi tekrar gözden geçirilir.

#### 4. Uygulama

Çalışmanın gerçekleştirildiği işletme, Organize Sanayi Bölgesinde, metal ve plastik parçalar üretmekte olup 1984 yılında kurulmuştur. İşletmede, 35 adeti beyaz ve 249 adeti mavi yakalı olmak üzere 284 personel görev yapmaktadır. Bu çalışmanın gerçekleştirildiği metal üretim bölümünde ise 2 vardiyada 63 mavi yakalı çalışmaktadır.

Metal üretim bölümünde, saç plakadan kesilen saç parçalar, preslerde şekillendirme, puntolama, delik

delme, dış çekme gibi işlemlerden geçtikten sonra gruplama atölyesinde birleştirilmektedir.

Çalışma öncesinde işletme yöneticisi ile temas kurularak çalışmanın amacı, yürütüm şekli hakkında detaylı bilgi verilmiş, çalışma ve makale için 12 Nisan 2023 tarihli izin alınmıştır. Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri İnsan Araştırmaları Etik Kurulu Başkanlığı'nın 18 Mayıs 2023 tarih ve 2923-13 nolu kararı ile araştırmanın etik ve bilimsel açıdan uygunluğu onaylanmıştır.

Bu çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

#### 4.1. İşlemlerin Risk Skorlarının Belirlenmesi

İşletmenin Metal Üretim Bölümündeki 4 farklı atölyede mevcut olan tezgâhlardaki işlemler üzerine yürütülmüştür. 3 üretim atölyesinde 28 tezgâh ve Gruplama atölyesinde 13 montaj iş istasyonunda işlemler yapılmakta olup bizzat işçilerin yaptığı 20 farklı özelliklere sahip işlem için gözlem yapılabileceği tespit edilmiştir.

Tezgâh ve montaj masalarında çalışan işçilerin yaptıkları işlemler gözlemlenerek, ergonomik risk değerlendirme yöntemlerinden; REBA, NERPA, QEC, OWAS ve MURI yöntemleri ile risk skorları belirlenmiştir.

Her bir işlem için, bir süre işlemin nasıl yapıldığı, işçinin işlemlerini yapılış esnasında zorlandığı vücut bölgelerine odaklanılmıştır. Önce, REBA formunda belirtilen her vücut bölgesi için işçinin zorlanma düzeyini gösteren düzey forma işaretlenmiştir. İşaretlenen düzeylerine göre formdaki puanlar toplanarak REBA risk skoru hesaplanmıştır. Benzer işlemleri NERPA, QEC, OWAS ve MURI yöntemleri için de yapılmış ve her işlem için 5 farklı yöntemin risk skorları elde edilmiştir (Tablo 4).

Tablo 4'ten görüleceği üzere, işlemlerin REBA skorları 3-10, NERPA skorları 3-6, QEC skorları 65,43%-76,54%, OWAS skorları 1-3 ve MURI skorları 10-17 arasında değişmektedir.

Her yöntemde farklı vücut bölgeleri zorlanmaları ile ek faktörler (ağırlık kaldırma gibi) yer almaktadır. Başka bir ifade ile tüm vücut boyutları ve faktörleri kapsayan mükemmel bir yöntem yoktur. Dolayısıyla en yüksek skorlu işlemler yöntemden yöntemeye değişebilmektedir.

En yüksek skorlu işlemler (Şekil-1);

- REBA yöntemine göre Çoklu Dış Çekme (skor = 10)
- NERPA yöntemine göre Çoklu Dış Çekme dahil 8 işlem (skor = 6)
- QEC yöntemine göre Çoklu Dış Çekme ve Teker sıkma ve kapak takma B (skor = 76,54%)
- OWAS yöntemine göre Çoklu Dış Çekme (skor = 3)
- MURI yöntemine göre Çoklu Dış Çekme (skor = 17) olarak elde edilmiştir.

Tablo 4. İşlemlerin Risk Skorları

Atölye	Analizlerde İşlem Adı	REBA	NERPA	QEC	OWAS	MURİ
Manuel Saç Şekillendirme	Saç kesim (M3)	7	5	62,96%	2	12
	Manuel Pres Baskı (H2501)	5	6	72,84%	2	15
Manuel Preshane	Manuel Pres Baskı (631)	5	4	69,14%	2	12
	Manuel Pres Baskı (632)	5	4	69,14%	2	13
	Manuel Pres Baskı (1005)	5	3	69,14%	1	12
	Manuel Pres Baskı (1007)	5	4	69,14%	2	15
Otomatik Preshane	Otomatik Pres Baskı	7	6	72,22%	2	14
Gruplama	Çapak alma	7	6	67,90%	1	12
	Argon Kaynak	5	6	62,96%	1	9
	Punta Kaynak	5	5	67,90%	1	12
	Kılavuz Çekme	3	3	65,43%	1	12
	Diş Çekme	7	3	74,07%	1	13
	Çoklu Diş Çekme	<b>10</b>	6	<b>76,54%</b>	<b>3</b>	<b>17</b>
	Perçinleme	3	4	72,84%	1	11
	Teker Sıkma	9	6	71,60%	2	10
	Teker sıkma ve kapak takma A	7	6	74,07%	2	12
	Teker sıkma ve kapak takma B	7	6	<b>76,54%</b>	2	13
	Tox Baskı	7	5	75,31%	1	14
	Vida Sıkma	5	5	70,99%	1	11
	Yapıştırma	6	5	68,52%	2	13

#### 4.2. Risk Skorlarının Normalizasyonu

Her yöntemin risk skorunun maksimum değeri ile yapısı birbirinden farklıdır. Maksimum REBA skoru 15 iken QEC skoru % cinsindedir. Bir işlemin 5 yöntem için risk skorlarını içeren bütünleşik skoru, bunların ortalaması ile belirlenemez. Dolayısıyla, yöntemlerin skorlarının aynı birime dönüştürülmesi yani normalizasyon yapılması gerekir.

Normalizasyon işlemi, 1 risk skoru başına % belirlenmesi ile mümkündür. Örneğin, REBA skoru için, maksimum risk skoru 15 olduğundan 1 risk skoru başına %6,67 olarak elde edilir (Tablo 5).

Tablo 5. Karşılaştırma Ölçeği

Yöntem	Maksimum Risk Skoru	Skor Başına %
REBA	15	%6,67
NERPA	7	%14,29
QEC	%100	%1
OWAS	4	%25
MURİ	27	%3,7

Böylece, örneğin Saç kesim (M3) işlemi için risk skorları (%);

- REBA : %46,67
- NERPA : %71,43
- QEC : %62,96
- OWAS : %50
- MURİ : %44,44

olarak elde edilir. Eğer, her bir yöntemin bütünleşik risk skorundaki payı eşit kabul edilir (eşit ağırlık, %20) ise, işlemin;

$$\text{Risk Skoru} = \%20(\%46,67 + \%71,43 + \%62,96 + \%50 + \%44,44) = \%55,10$$

şeklinde hesaplanır.

#### 4.3. AHP Yöntemi ile Yöntemlerin Ağırlıklarının Tespit Edilmesi

AHP yöntemi her yöntemin ağırlığını belirlemede kullanılabilir en uygun yöntemlerden biridir. AHP yöntemi uygulaması için Ergonomi alanından 3 öğretim üyesi ile işletmeden 2 yönetici karar verici olarak belirlenecektir. Yöneticilere, 5 Ergonomik Risk Değerlendirme Yönteminin her birinin temel özellikleri, değerlemede dikkate alınan vücut bölgeleri ve puanları açıklanmış, sonra da AHP yönteminin nasıl uygulanacağı tanıtılmıştır. Başlık 3.2'de belirtilen 4 adım izlenerek yöntemlerin ağırlıkları tespit edilmiştir.

Her bir yönetici ikili karşılaştırma yaparak, bir yöntemin diğerine göre üstünlük (önem) düzeyine karar verecektir. Tablo 2'de verilen karşılaştırma ölçeği kullanılarak, 5 karar vericinin gözlem sonuçları ile ölçütler arasında ikili karşılaştırma matrisleri oluşturulmuştur. Beş karar verici tarafından oluşturulan matrisler geometrik ortalama ile birleştirilmiş ve Tablo 6'da sunulmuştur.

Denklem (4) ve Denklem (5) ile her karar vericinin ve birleştirilmiş matrislerin tutarlılık oranları hesaplanmıştır.

Birleştirilmiş matris için;

$$\lambda_{max} = 5,0438483$$

$$TI = (\lambda_{max} - n)/(n-1) = 0,01096207 \quad (n=5)$$

$$RI = 1,12 \quad (n=5)$$

$$TO = 0,09135062 < 0,1$$

olduğundan matris tutarlıdır, Tablo 7'de verilen ağırlıklar uygundur.

Gözlem yapılan her işlem için, 5 yöntemin sonuçları ağırlıkları ile çarpılarak, bütünlük risk skoru tespit edilmiş ve Tablo 8'de sunulmuştur.

Denklem (2) kullanılarak Tablo 6'daki değerler normalize edilmiş, Denklem (3) kullanılarak her bir satır toplamı, matrisin boyutuna bölünerek yöntemlerin önem ağırlıkları yani öncelik değerleri hesaplanmıştır. Tablo 7'de yöntemlerin ağırlıkları sunulmuştur.

Tablo 6. Birleştirilmiş Karar Matrisleri

Yöntem	REBA	NERPA	QEC	OWAS	MURI
REBA	1,0000	1,0845	0,7579	3,1165	1,5157
NERPA	0,9221	1,0000	0,6310	2,5365	1,0845
QEC	1,3192	1,5849	1,0000	5,1435	3,4375
OWAS	0,3209	0,3942	0,1944	1,0000	0,5422
MURI	0,6598	0,9221	0,2909	1,8442	1,0000

Tablo 7. Birleşik Öncelik Değerler (Ağırlıklar) (%)

Yöntemler	Öncelik Değerleri
REBA	22,93%
NERPA	19,35%
QEC	36,18%
OWAS	7,35%
MURI	14,19%

## 5. Tartışma

Bu çalışmada, literatürde en yaygın kullanılan, olabildiği ölçüde fazla vücut boyutlarını dikkate alan 5 ergonomik risk değerlendirme yöntemi; REBA, NERPA, QEC, OWAS ve MURI ile risk skorları belirlenmiştir.

Risk skoruna bağlı olarak, Tablo 1'de verilen risk düzeyleri dikkate alındığında, orta düzey riskler için iyileştirme yapılması gerekli, yüksek riskler için ise kısa zamanda iyileştirme yapılması önerilir. REBA yöntemine göre, Tablo 4'ten açıkça görülmektedir ki, işlemlerin %80'i orta risk düzeyindedir. Başka bir deyişle sadece 2 işlem düşük ve 2 işlem de yüksek risklidir. Yüksek riskli işlemler Çoklu Dış Çekme ve Teker Sıkma işlemleridir. Bu işlemler, bütünlük risk skoru açısından, en yüksek risk skorlu ilk 5 işlem arasında yer almaktadır.

Ergonomik risk değerlendirme yöntemlerinin dikkate aldıkları vücut bölgeleri ve diğer faktörler ile risk puanlamaları arasında bazı farklılıklar olduğundan, belirledikleri yüksek riskli işlemler arasında bazı farklılıklar çıkabilir.

Beş ergonomik risk değerlendirme yöntemi için risk düzeylerindeki işlem sayıları Tablo 9'da verilmiştir.

En yüksek bütünlük risk skoruna sahip işlemler,

- 1) Çoklu Dış Çekme
- 2) Teker Sıkma
- 3) Teker Sıkma ve Kapak Takma B
- 4) Teker Sıkma ve Kapak Takma A
- 5) Otomatik Pres Baskı

olarak elde edilmiştir.

Sonuçlar göstermektedir ki REBA, OWAS ve MURI yöntemleri yüksek riskli işlem sayıları 1-2 olmasına rağmen, NERPA ve QEC yöntemlerinde yüksek ve çok yüksek risk düzeyleri başlangıç skorunun daha düşük skorla belirlendiği görülmektedir. NERPA yönteminde risk düzeyinin 2 skor sabit farklarla oluşturulması bu sapmanın nedeni olabilir. QEC yönteminde risk düzeyleri, öncekine göre %10 sabit artışlarla belirlenmiştir. İlk bakışta makul görülmeyle birlikte, hafif metal sanayi işlemleri için uygun olmadığı görülmektedir.

Tablo 8. İşlemlerin Risk Skorları

Atölye	Analizlerde İşlem Adı	REBA	NERPA	QEC	OWAS	MURİ	Birleşik Skor (%)
		22,93%	19,35%	36,18%	7,35%	14,19%	
Manuel Saç Şekillendirme	Saç kesim (M3)	46,67	71,43	62,96	50,00	44,44	59,07
	Manuel Pres Baskı (H2501)	33,33	85,71	72,84	50,00	55,56	60,30
Manuel Preshane	Manuel Pres Baskı (631)	33,33	57,14	69,14	50,00	44,44	53,70
	Manuel Pres Baskı (632)	33,33	57,14	69,14	50,00	48,15	54,22
	Manuel Pres Baskı (1005)	33,33	42,86	69,14	25,00	44,44	49,09
	Manuel Pres Baskı (1007)	33,33	57,14	69,14	50,00	55,56	55,27
Otomatik Preshane	Otomatik Pres Baskı	46,67	85,71	72,22	50,00	51,85	64,45
Gruplama	Çapak alma	46,67	85,71	67,90	25,00	44,44	60,00
	Argon Kaynak	33,33	85,71	62,96	25,00	33,33	58,99
	Punta Kaynak	33,33	71,43	67,90	25,00	44,44	54,18
	Kılavuz Çekme	20,00	42,86	65,43	25,00	44,44	44,70
	Diş Çekme	46,67	42,86	74,07	25,00	48,15	54,46
	Çoklu Diş Çekme	66,67	85,71	76,54	75,00	62,96	74,01
	Perçinleme	20,00	57,14	72,84	25,00	40,74	49,62
	Teker Sıkma	60,00	85,71	71,60	50,00	37,04	65,18
	Teker sıkma ve kapak takma A	46,67	85,71	74,07	50,00	44,44	64,07
	Teker sıkma ve kapak takma B	46,67	85,71	76,54	50,00	48,15	65,49
	Tox Baskı	46,67	71,43	75,31	25,00	51,85	60,96
	Vida Sıkma	33,33	71,43	70,99	25,00	40,74	54,77
	Yapıştırma	40,00	71,43	68,52	50,00	48,15	58,29

Tablo 9. Yöntemler Göre Risk Düzeylerindeki İşlem Sayıları

Risk Düzeyi	REBA	NERPA	QEC	OWAS	MURİ
Düşük	2	0	0	9	2
Orta	16	7	0	10	13
Yüksek	2	13	10	1	1
Çok Yüksek	0	0	10	0	0

En yüksek bütünlük risk skoruna sahip 5 işlem için risk skorunu düşürücü iyileştirme önerileri aşağıda açıklanmıştır. İşlemlerin risk skorunu yükseltici hareketleri Şekil 1'de verilmiştir. Analizler REBA yöntemine göre yapılacaktır.

**Çoklu Diş Çekme:** Çalışan diş çekilecek parçaları kasadan alarak banttaki yuvalara yerleştirmekte, bant kılavuz tezgahın önüne geldiğinde diş çekme otomatik gerçekleşmektedir.

Ergonomik açıdan 3 önemli problem tespit edilmiştir.

a) İşlemin özelliği gereği, çalışan her 10-15 parçada bir matkap ucuna yağ sürmektedir. Bu faaliyet esnasında 3 vücut bölgesi zorlanmaktadır (Şekil-1.a).

- 1) 20° üstünde boyun eğmesi ve yana dönme
- 2) 60° üstünde sırtın öne ve yana doğru sırt eğilmesi
- 3) 45-90° arası kolların öne ve rotasyon

Bu zorlanmayı azaltmak için, kılavuz tezgahın üzerine uygun büyüklükte bir yağ tankı ve bundan bir hortum ile tezgaha yağ akışının ayarlı olmasını sağlayan bir mekanizma (tıpkı hastaya serum verme gibi) kurulması önerilir.

b) Çalışan yüksek ve yüksekliği sabit bir sandalyede oturmaktadır. Bu oturuş esnasında ayaklar masa altına girmediğinden, yan oturuş yapmakta veya vücudunu geriye çekmekte, bu da parçaları banda koyma esnasında 20° üstünde sırtın öne doğru eğilmesini gerektirmektedir.

Temel prensip, çalışma yeri yüksekliğinin operatörün dirsek yüksekliğinde olmasıdır. Bu boyuta 10-15 cm tolerans eklenebilir. Ancak operatörün omuz yüksekliğine kadar kollarını kaldırması, omuz ve üst kol ağrılarına neden olduğundan, kabul edilemez.

Çalışma yeri yüksekliği (parçaların konduğu konveyör yükseklik: 95 cm

Oturarak çalışma durumunda;

Türkiye’de son yıllarda kapsamlı (4205 denek) antropometrik ölçülerin alındığı bir çalışma olan İşeri ve Arslan (2009)’da verilmiş ölçülere göre;

172,3 cm boya sahip uzun boy (%95.) kadın bir operatör için;

Oturma yüksekliği = 44,6 cm

Dirsek yüksekliği = 28,7 cm

Ayakkabı ve elbise payı = 5 cm

Toplam = 78,3 cm

Parçaların konduğu yükseklik 95 cm olduğundan operatörün oturarak çalışması tercih edilmez. Zira 16,7 cm’ye kadar kollarını kaldırması gerekir ki bu üst kol ve omuz ağrılarına sebep olur. Oturarak çalışmak uzun boylu kadın için dahi uygun değildir.

Ayakta çalışma durumunda;

Kısa (%5.) boya (147,3 cm) sahip kadın bir operatör için;

Ayakta dirsek yükseklik = 91,3 cm

Ayakkabı ve elbise payı = 5 cm

Toplam = 96,3 cm

Operatörün ayakta çalışması uygundur.

c) Kasaların konduğu sehpanın yüksekliği sabittir.

Yük kaldırma ilkeleri gereği, kasaların zeminden en az 40 cm yükseğe konulması önerilmektedir. Bu yükseklik dolu kasayı yerden almak için uygundur.

i) Kutulardan malzemeleri alma dirsek yüksekliğinde alınmalıdır. Kutu yüksekliğinin 15-20 cm olabileceği dikkate alındığından, kasa altı sehpa yüksekliğinin yaklaşık çalışanın bel yüksekliğinde olması önerilebilir.

Ayakta yapılan işler için;

İşeri ve Arslan’ın (2009) verdiği antropometrik ölçülere göre;

%5. (kısa) boya (147,3 cm) sahip kadın bir operatör için;

Ayakta dirsek yükseklik = 91,3 cm

Ayakkabı ve elbise payı = 5 cm

Toplam = 96,3 cm

184,2 cm boya sahip (%95) erkek bir operatör için;

Ayakta dirsek yükseklik = 117,5 cm

Ayakkabı ve elbise payı = 5 cm

Toplam = 122,5 cm

olup, çalışanların farklı boy ölçülerinde olabileceği dikkate alındığında, standart 109,4 cm, ayarlama mesafesi 26,2 cm (109,4 ± 13,1 cm ) olan ayarlanabilir sehpa kullanılmalıdır.

ii) Hem ayakta hem de oturarak yapılan işler için, en uygunu, sabit veya hareketli (tekerlekli), hidrolik makaslı, manuel veya elektrikli kaldırma tablaları kullanmaktır.

Bu iyileştirmelerin uygulanması halinde REBA risk skorunun 10’dan 4’e düşmesi beklenmektedir.

**Teker Sıkma:** İşçi kutulardan aldığı parçaları sıkma mekanizmasına koyup anahtar ile sıkılmaktadır.

Bu işlemdeki en önemli risk faktörü çalışan boyun (193 cm) tezgah yüksekliğine göre uzun olmasıdır (Şekil-1.b).

Tezgah yüksekliğinin 90 cm olması nedeniyle,

- 1) 20° üstünde boyun eğmesi ve yana dönme
- 2) 20-60° sırtın öne ve yana doğru sırt eğilmesi

olmaktadır. Ayakta çalışılan iş yerlerinde tezgah yüksekliği;

- a) İşçinin dirsek yüksekliği,
- b) Çalışılan parçanın yüksekliği,
- c) Kuvvet kullanımı ve
- d) Montajın inceliğine (hassasiyet)

bağlıdır. Kısa veya uzun boylu kadın ve erkeklerin birlikte çalıştığı istasyonlarında aynı tezgah yüksekliği önerilemez. Öncelikle önemli olan, çalışanların ayakta dirsek yüksekliği, yaklaşık olarak, tezgah yüksekliği ile aynı olmasıdır.

İşeri ve Arslan’ın (2009) verdiği antropometrik ölçülere göre;

157,4 cm kısa boya (%5.) sahip erkek bir operatör için;

Ayakta dirsek yüksekliği = 97,7 cm

Ayakkabı ve giysi payı = 5 cm

Toplam = 102,7 cm

Tezgah yüksekliği ~13 cm küçüktür, %5. erkek operatörün bile eğilmesi kaçınılmazdır. Böyle bir tezgahta ancak kısa boylu (%5.) kadınlar (147 cm) çalışabilir.

Kutular, operatörün en fazla 20° eğilecek kadar yakın mesafeye alınmalıdır. Bu önerinin uygulanması halinde REBA risk skorunun 9’dan 4’e düşmesi beklenmektedir.

**Teker Sıkma ve Kapak Takma A/B:** Bu işlemlerdeki en önemli risk faktörü malzemelerin olduğu kutulardan parçaların alınması ve kapak takılmış parçaların diğer



bir kutuya bırakılması esnasında özellikle boyun, sırt ve üst kol hareketlerindeki uygunsuzluklardır (Şekil-1.c).

Böyle uygunsuzluklar;

- i) Masa altı bacak boşluğu olmaması ve
- ii) Çalışanın kısa boylu olması nedeniyle kutuların işçiden uzak kalması sonucu oluşur.

İstasyonlarında, işçinin oturarak veya ayakta çalışması halinde, masa üzerinde iki kolun uzanma mesafesinde, öne doğru eğimli malzeme kutularının yerleştirilmesi, bitmiş ürün kutusunun ise yanda, kasa üst seviyesi işçinin dirsek hizasında olacak şekilde, sehpa üzerinde tasarlanması (ergonomik iş istasyon) önerilir. Bu iyileştirme sadece KİSR düşürmekle kalmaz aynı zamanda işgücü verimliliğinin yükselmesini de sağlar. Öneri ile REBA risk skorunun 7'den 4'e düşmesi beklenmektedir.



a) Çoklu Diş Çekme



b) Teker Sıkma



c) Teker Sıkma ve Kapak Takma A/B



d) Otomatik Pres Baskı

**Otomatik Pres Baskı:** İşlem esnasında en büyük risk, kasa 80\*150\*80 cm ebadında olduğunda, parçanın kasaya yerleştirilmesi esnasında işçinin 60°'ye kadar sırtını eğmesidir (Şekil-1.d).

i) Kasanın altında 40 cm yüksekliğinde platform bulunmalı, kasada yarıdan az malzeme kaldığında, daha az eğilerek malzeme alabilmek için kasanın bir tarafının yarıya kadar açılmasını sağlayacak şekilde menteşeli kapak yapılması önerilmektedir.

ii) Üzerinde daha küçük ebatlı (70\*50 cm gibi) kasa konabilen, sabit veya hareketli (tekerlekli), hidrolik makaslı, manuel veya elektrikli kaldırma tablaları kullanılabilir.

Önerinin uygulanması halinde REBA risk skorunun 8'dan 4'e düşmesi beklenmektedir.

Şekil 1. En Yüksek Risk Skorlu İşlemler

## 6. Sonuçlar

Herhangi bir ürünün işlenmesi, paketlenmesi vb. aşamalarında mutlaka bir kütleyi tutma, kaldırma, taşıma, elde tutma, indirme, bırakma vb. faaliyetler ile karşılaşılır. Bir kütleyi kaldırma vb. tamamen veya büyük ölçüde statik bir iş olup, çok fazla güç gerektirir. Asıl sorun, güç gereksinimi ve zorlanma değil, uygunsuz çalışma duruşları sonucu, özellikle boyun, sırt, kol, bilek, ayak gibi vücut bölgelerinde KİSR neden olmasıdır. Bu rahatsızlıklar sadece yük kaldırma, taşıma faaliyetlerini yapanlarda değil, aynı zamanda sık frekanslarda parça alma-bırakma, montaj gibi çalışanlarda da sıklıkla görülmektedir. Çalışanlarda meydana çıkan rahatsızlıklar, aynı zamanda üretimdeki verimliliğin düşmesine, iş kazalarının artmasına da yol açmaktadır.

KİSR azaltmak için, ergonomik risk değerlendirme yöntemleri ile risk skorunun belirlenmesi, bu skoru yükselten boyun ve sırt eğmesi, omuz veya baş üstü kol uzanma, bilek dönmeleri, diz çökme gibi uygunsuzlukları azaltacak çözüm önerilerinin geliştirilmesi gerekir.

İşyerinin çalışma koşullarının ve çevresinin ergonomik açıdan uygun olmayışı hem işçilerin işe bağlı sağlık sorunları yaşamalarına hem de işverenin tazminat ve tedavi masraflarını ödemelerine neden olabilir. Bu nedenle ergonomik düzenlemelerin yapılması hem çalışan hem de işveren bakımından oldukça yararlı sonuçlar ortaya çıkarmaktadır. Bununla birlikte, ergonomik düzenleme çalışmaları içerisinde çalışma duruşlarının ergonomik risk değerlendirmeleri sıklıkla yapılmakta olan önemli değerlendirmelerdir (Kılıç Delice ve diğ., 2018). Bu çalışmada 5 ergonomik risk değerlendirme yöntemi; REBA, NERPA, QEC, OWAS ve MURI kullanılarak elde edilen ergonomik risk değerleri bir ÇKKV yöntemi olan AHP yöntemi kullanılarak bütünleşik bir risk değerlendirmesine dönüştürülmüştür. Hangi görevde hangi vücut bölümü için öncelikli olarak ergonomik açıdan tedbirler alınması gerektiği ayrıntılı bir şekilde ortaya çıkarılmıştır. Böylece, risk önceliklerine göre belirlenmiş işlemler ve vücut bölgeleri için önerilen iyileştirme çalışmaları başlatılmalıdır.

### Araştırmacıların Katkıları

Bu araştırmada; Emin KAHYA, çalışmanın tasarımı, bilimsel yayın taraması, formların tasarımı, istatistiki analizi, iyileştirme önerileri, makalenin hazırlanması, iyileştirme önerilerinin geliştirilmesi; Kadriye ALPASLAN ve Gizem ŞENYÜZ ergonomik risk değerlendirmelerin yapılması konularında katkılarda bulunmuştur.

## Teşekkür

Bu çalışmanın gerçekleştirilmesine izin veren işletme yöneticilerine, çalışmalar esnasında yardımcı olan Makine Müh. Serkan Bıyıkoglu ve İSG uzmanı Zeynep Soykan Birtürk'e teşekkür ederiz.

## Çıkar Çatışması

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir.

## Kaynaklar

- Adar, T. ve Kılıç Delice, E. (2020). Şehir içi toplu taşıma şoförlerinin toplam iş yüklerinin fiziksel ve zihinsel iş yükü ölçütlerine göre yeni bir yaklaşımla karşılaştırılması. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 26(1), 254-267. Erişim adresi: <https://dergipark.org.tr/en/pub/pajes/issue/52564/690955?publisher=pamukkale>
- Akalp, H. G., Saklangıç, U. ve Çırakoğlu, S. (2021). Zeytin tarımında çalışan işçilerin çalışma duruşlarının REBA yöntemi ile analizi. *Ergonomi*, 4(2), 88-96. doi: <https://doi.org/10.33439/ergonomi.961369>
- Akay, D., Dağdeviren, M. ve Kurt, M. (2003). Çalışma duruşlarının ergonomik analizi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 18(3), 73-84. Erişim adresi: <https://dergipark.org.tr/tr/pub/gazimmfd/issue/6657/88995>
- Akay, D. & Toksari, M. D. (2009). Ant colony optimization approach for classification of occupational low back disorder risks. *Human Factors and Ergonomics in Manufacturing*, 19(1), 1-14. doi: <https://doi.org/10.1002/hfm.20134>
- Aksüt, G., Eren, T. ve Tüfekçi, M. (2021). Tekstil sektöründe kadın çalışanların maruz kaldığı ergonomik risklerin çok kriterli karar verme yöntemleri ile belirlenmesi. *Endüstri Mühendisliği*, 32(1), 12-33. doi: <https://doi.org/10.46465/endustrimuhendisligi.789642>
- Ayan, B. (2015). *Montaj hattında ergonomik risk unsurlarının incelenmesi: Otomotiv sektörüne yönelik bir uygulama* (Uzmanlık Tezi). Çalışma ve Sosyal Güvenlik Bakanlığı Çalışma ve Sosyal Güvenlik Eğitim ve Araştırma Merkezi, Ankara.
- Aydın, S. (2021). NIOSH ve REBA yöntemleri kullanılarak ergonomik risk analizi vaka çalışması. *Balıkesir Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 23(2), 414-433. doi: <https://doi.org/10.25092/baunfbed.887802>

- Baş, H. ve Yapıcı, F. (2020). İş istasyonlarında çalışanlarda zorlanmaya neden olan duruşların ergonomik açıdan irdelenmesi: Örnek uygulama. *Ergonomi*, 3(3), 128-137. doi: <https://doi.org/10.33439/ergonomi.789307>
- Coşkun, M. B., Sağiroğlu, H. ve Erginel, N. (2015). İş istasyonlarının ergonomik riskinin NIOSH yöntemi ile belirlenmesi. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 3(3), 365-370. Erişim adresi: <https://dergipark.org.tr/en/pub/jesd/issue/20874/224048>
- Çiçek, E., Kazanç, N. ve Kahya, E. (2018). Bir mobilya işletmesinin montaj hattında ergonomik risk analizi. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 6(Özel sayı: Ergonomi 2017), 67-82. doi: <https://doi.org/10.21923/jesd.359455>
- David, G., Woods, V., Li, G., & Buckle, P. (2008). The development of the Quick Exposure Check (QEC) for assessing exposure to risk factors for work-related musculoskeletal disorders. *Applied Ergonomics*, 39(1), 57-69. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2007.03.002>
- Demirkol Akyol, Ş. (2022). Bir tekstil işletmesinde ergonomik risk değerlendirme uygulaması. *Ergonomi*, 5(2), 72-83. doi: <https://doi.org/10.33439/ergonomi.1086636>
- Demirtaş, D. N., Yazıcı, E., Olcar, H., Kuşçu, F. N., Başer, C. ve Alakaş, H. M. (2023). Isı rezistans fabrikasında ergonomik risk değerlendirme ve hedef programlama ile personel planlama. *Verimlilik Dergisi*, 57(1), 159-180. doi: <https://doi.org/10.51551/verimlilik.1050109>
- Esen, H. ve Fırlı, N. (2013). Çalışma duruşu analiz yöntemleri ve çalışma duruşunun kas-iskelet sistemi rahatsızlıklarına etkileri. *Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi*, 17(1), 41-51. Erişim adresi: <https://dergipark.org.tr/en/download/article-file/192676>
- Gajbhiye, M. T., Banerjee, D., & Nandi, S. (2020). Postural evaluation of construction labourers engaged in excavation work using newly developed NERPA method and its validation through REBA and WERA methods. In: *Advances in Mechanical Engineering: Select Proceedings of ICAME 2020* (pp. 253-261). Singapore: Springer Singapore. Erişim adresi: [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-15-3639-7\\_30](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-15-3639-7_30)
- Hawari, N. M., Sulaiman, R., Kamarudin, K. M., & Me, R. C. (2022). Musculoskeletal discomfort evaluation using Rapid Entire Body Assessment (REBA) and Quick Exposure Check (QEC) among woodworking workers in Selangor, Malaysia. *Asian Journal of Applied Sciences*, 10(5), 407-416. doi: <https://doi.org/10.24203/ajas.v10i5.7047>
- Hignett, S. & McAtamney, L. (2000). Rapid entire body assessment (REBA). *Applied Ergonomics*, 31(2), 201-205. doi: [https://doi.org/10.1016/S0003-6870\(99\)00039-3](https://doi.org/10.1016/S0003-6870(99)00039-3)
- İşeri, A. ve Arslan, N. (2009). Estimated anthropometric measurements of Turkish adults and effects of age and geographical regions. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 39(5), 860-865. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ergon.2009.02.007>
- Kahya, E. ve Söylemez, S. (2019). Jant sektöründe QEC ve REBA yöntemleriyle ergonomik risk değerlendirmesi. *Karaelmas İş Sağlığı ve Güvenliği Dergisi*, 3(2), 83-96. doi: <https://doi.org/10.33720/kisgd.644584>
- Karabacak, N. (2016). *Diş hekimlerinin çalışma duruşlarının ergonomik analizi*. (Yüksek Lisans Tezi). Selçuk Üniversitesi, Konya.
- Karhu, O., Kansi, P., & Kuorinka, I. (1977). Correcting working postures in industry: A practical method for analysis. *Applied Ergonomics*, 8(4), 199-201. doi: [https://doi.org/10.1016/0003-6870\(77\)90164-8](https://doi.org/10.1016/0003-6870(77)90164-8)
- Kılıç Delice, E., Ayık, İ., Abidinoğlu, Ö. N., Çiftçi, N. N. ve Sezer, Y. (2018). Ergonomik risk değerlendirme yöntemleri ve AHP yöntemi ile çalışma duruşlarının analizi: Ağır ve tehlikeli işler için bir uygulama. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 6(Özel sayı: Ergonomi 2017), 112-124. doi: <https://doi.org/10.21923/jesd.364394>
- Li, G. & Buckle, P. (1998). User participation in the development of exposure assessment method—a think aloud approach (abstract). In: *PREMUS-ISEOH '98: Proceedings of the Third International Scientific Conference on Prevention of Work-Related Musculoskeletal Disorders*, 21-25 September 1998, Helsinki, Finland. Finnish Institute of Occupational Health, Helsinki, 97p.
- Mert, U., İde, D. ve Gündüz, T. (2022). Otomotiv sektörü progresif kalıp hattında ergonomik üretim tasarımı ile verimliliğin artırılması. *Endüstri Mühendisliği*, 33(2), 289-308. Erişim adresi: <https://dergipark.org.tr/en/pub/endustrimuhendisligi/issue/46716/585764>
- Oral, A., Gönen, D., Karaoğlu, A. D., Tuncer, C. ve Kundakçı, S. S. (2018). Makina montajında zaman israfının kaldırılması için REBA ve MURİ çalışması. *Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 6(Özel Sayı: Ergonomi 2017), 102-111. doi: <https://doi.org/10.21923/jesd.359911>
- Özcan, B. ve Yeğin, E. (2020). Lastik sektöründe OWAS ve NASA-TLX yöntemleri kullanılarak fiziksel ve zihinsel iş yükü ölçümü. *Ergonomi*, 3(1), 1-9. doi: <https://doi.org/10.33439/ergonomi.643602>

- Özel, E. ve Çetlik, O. (2010). Mesleki görevlerin ergonomik analizinde kullanılan araçlar ve bir uygulama örneği. *Dumlupınar üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 22, 41-56. Erişim adresi: <https://dergipark.org.tr/en/pub/dpufbed/issue/36008/405251>
- Polat, O., Mutlu, Ö., Çakanel, H., Doğan, O., Özçetin, E. ve Şen, E. (2017). Bir mobilya fabrikasında çalışan işçilerin çalışma duruşlarının REBA yöntemi ile analizi. *Süleyman Demirel Üniversitesi Mühendislik Bilimleri ve Tasarım Dergisi*, 5(Özel sayı: Ergonomi 2016), 263-268. doi: <https://doi.org/10.21923/jesd.41742>
- Saaty, T. L. (1980). *The Analytic Hierarchy Process*. New York: McGraw-Hill.
- Sadeghi Yarandi, M., Soltanzadeh, A., Koohepaei, A., Sajedian, A. A., Ahmadi, V., Sakari, S., & Yazdanirad, S. (2019). Effectiveness of three ergonomic risk assessment tools, namely NERPA, RULA, and REBA, for screening musculoskeletal disorders. *Archives of Hygiene Sciences*, 8(3), 188-201. Erişim adresi: <https://pdfs.semanticscholar.org/007d/2bb75838ce2d59a6a9dc331c09da585ffa33.pdf>
- Sanchez-Lite, A., Garcia, M., Domingo, R., & Angel Sebastian, M. (2013). Novel ergonomic postural assessment method (NERPA) using product-process computer aided engineering for ergonomic workplace design. *PLoS One*, 8(8), e72703. doi: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0072703>
- Sauk, H., Beyhan, M. ve Kalın Uğurlutepe, K. M. (2023). Fındığın mekanik hasadında çalışanların çalışma duruşlarının ergonomik analizi. *Tarım Makinaları Bilimi Dergisi*, 18(3), 126-138. Erişim adresi: <https://dergipark.org.tr/en/pub/tarmak/issue/74320/1137193>
- Ülker, O. ve Burdurlu, E. (2012). Panel mobilya imalatında kullanılan bazı makinelerde OWAS yöntemi ile eylemsel duruş analizi. *Kastamonu University Journal of Forestry Faculty*, 12(2), 291-300. Erişim adresi: <https://dergipark.org.tr/en/pub/kastorman/issue/17233/180030>
- Yazdanirad, S., Khoshakhlagh, A. H., Habibi, E., Zare, A., Zeinodini, M., & Dehghani, F. (2018). Comparing the effectiveness of three ergonomic risk assessment methods—RULA, LUBA, and NERPA—to predict the upper extremity musculoskeletal disorders. *Indian Journal of Occupational and Environmental Medicine*, 22(1), 17. Erişim adresi: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5932905/>
- Zengin, M. A., ve Ömer, A. S. A. L. (2020). Bina inşaatındaki çalışan duruşlarının farklı ergonomik risk değerlendirme yöntemi ile değerlendirilmesi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi*, 35(3), 1615-1630. doi: <https://doi.org/10.17341/gazimmfd.548028>



# KUPLAJ BARASI ÜZERİNDEN PARALEL BAĞLANAN YÜKSEK GERİLİM YERALTI KABLOLARINDA İŞLETME PARAMETRELERİNİN AKIM DAĞILIMINA ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Mehmet Aytaç ÇINAR<sup>1</sup>, Yunus Berat DEMİROL<sup>2</sup>, Bora ALBOYACI<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Kocaeli Üniversitesi, İzmit Meslek Yüksekokulu, Kocaeli, ORCID No : [0000-0002-1655-4281](https://orcid.org/0000-0002-1655-4281)

<sup>2</sup>GENETEK Güç&Enerji Ltd. Şti., Kocaeli Üniversitesi Teknopark, Kocaeli, ORCID No : [0000-0001-7168-2764](https://orcid.org/0000-0001-7168-2764)

<sup>3</sup>Kocaeli Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Elektrik Mühendisliği Bölümü, Kocaeli, ORCID No : [0000-0002-1117-0326](https://orcid.org/0000-0002-1117-0326)

Anahtar Kelimeler	Öz
Güç kablosu Paralel devre Dengesiz yüklenme Kablo akımı Kuplaj akımı	Güç taşınmasında gerek arıza olasılıklarının azaltılması gerekse güvenlik gerekçeleri ile orta gerilim kabloları tercih edilmektedir. Bununla birlikte, enerji talebinin arttığı bölgelerde çok sayıda kablo sisteminin aynı kanal veya galeri içerisinde paralel şekilde tesis edilmesi zorunluluğu ortaya çıkmaktadır. Bu çalışmada bir transformatör merkezinin ana indirici çıkışından dağıtım merkezine kadar tesis edilmiş olan güç kablolarının kuplaj barası üzerinden bağlandığı bir uygulama incelenmiştir. Öncelikle kablo sistemi modellenerek analizi gerçekleştirilmiş ve saha ölçüm verileri ile model doğrulanmıştır. Ardından, çeşitli parametrelere bağlı olarak kuplaj barasından geçen akımlar ile kablolar üzerinde oluşan akım dağılımlarının değişimleri incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar, tüm bu parametrelerin kablolarda taşınan akımlar ile kuplaj akımları üzerinde önemli oranda etkisi olduğunu göstermektedir. Bu durum, paralel devrelere sahip kablo sistemlerinde gerek enerji temininin sürekliliği gerekse sistem güvenilirliğini sağlayabilmek için kablo sistemlerinin tesis edilmesi esnasında işletme süresince karşı karşıya kalınabilecek işletme koşullarındaki değişimlerin göz önünde tutulması gerekliliğini ispatlamaktadır.

## EFFECT OF OPERATING PARAMETERS ON CORE CURRENTS IN HIGH VOLTAGE UNDERGROUND CABLES CONNECTED IN PARALLEL OVER COUPLING BUS

Keywords	Abstract
Power cable Parallel circuit Unbalanced loading Cable current Coupling current	In power distribution, medium voltage cables are preferred for both reducing the probability of failure and for safety reasons. However, it becomes necessary to install many cable systems in parallel in the same gallery, especially in regions which the energy demand increase. In this study, a case study in which the power cables installed from the main step-down output of a transformer substation to the distribution center are connected via the coupling bus is examined. In this context, first of all, the cable system was modeled and analyzed, and the model was verified with the field measurement data. Then, depending on the various parameters, the currents passing through the coupling busbar and the variation of the current distributions on the cables were examined. The results show that all these parameters have significant effects on the currents in the cables and the coupling. This proves the necessity of considering the changes in the operating conditions that may be encountered during the installation of the cable systems in order to ensure the continuity of the energy supply and the system reliability in the cable systems with parallel circuits.

Araştırma Makalesi

Başvuru Tarihi

Kabul Tarihi

: 12.08.2022

: 10.10.2023

Research Article

Submission Date

Accepted Date

: 12.08.2022

: 10.10.2023

\* Sorumlu yazar: [aytac@kocaeli.edu.tr](mailto:aytac@kocaeli.edu.tr)

<https://doi.org/10.31796/ogummf.1161302>

### 1. Giriş

Elektrik enerjisinin üretimi, iletimi ve dağıtım aşamalarında havai hatlar ile yüksek gerilim yeraltı kabloları kullanılabilir. Günümüzde özellikle şehir merkezlerinde havai hatların yerini oluşturdukları

risk ortamından, çevreye verdiği görüntü kirliliğinden ve kullandığı büyük ölçekli alandan dolayı yüksek gerilim yeraltı kabloları almaktadır (Alboyacı, Çınar, Demirel ve İnce, 2022). Enerji dağıtımında kullanılan yüksek gerilim kablolarının paralel devreler halinde tesis edilerek işletilmesi durumunda teknik açıdan



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/>).



çeşitli olumsuzluklar ile karşı karşıya kalılabilmektedir. Bu olumsuzlukların başlıcası olarak paralel kablo iletkenleri arasında meydana gelen akım dağılımının dengeli olmaması ve buna bağlı olarak aynı baradaki kablolar arasında kuplaj bağlantısı mevcut ise kuplaj kapatıldığında bu bağlantıdan akım akması sayılabilir. Dengesizlik sebebiyle meydana gelen bu akımlar kesici elemanlarda hatalı açma eylemlerinin ortaya çıkmasına sebebiyet verebilmektedir.

Paralel güç kablolarının dengesiz yüklenme sebeplerinden biri kablolar arasında oluşan karşıt endüktanstır. Karşıt endüktans değeri kabloların tesis edilme aşamasında gerçekleştirilen çeşitli uygulama biçimlerine göre değişiklik göstermektedir. Kablolar arasında oluşan karşıt endüktans değeri eşit olmadığından dolayı kablo sistemi için oluşturulan empedans matrisinde köşegen haricindeki elemanların değerleri birbirinden farklı olmaktadır. Bu sebepten dolayı kablolar arasında meydana gelen akım dağılımları da dengesiz hale gelmektedir.

Dengesiz yüklenmenin şiddeti kabloların yerleşim düzenleri (trefoil, flat vb), faz iletkenlerinin birbirlerine göre konumu, paralel iletken grupları arasındaki uzaklık, kabloların ekran ve zırhının mevcut olup olmaması, ekran ve zırhın mevcut olması durumunda bunların topraklama düzeni, ekran ve zırhın topraklama barasına bağlantı noktasındaki kontak direnci, kablonun harmonikli akımlar ile yüklenme derecesi ve yük dengesizliği gibi birçok parametreye bağlı olarak da değişmektedir.

Literatürde, çok sayıda paralel kablo içeren sistemlerde iletkenler üzerindeki akım dağılımlarının hesaplandığı (Wu, 1984; Fassarella vd., 2018), dengesizliği azaltmaya yönelik faz dizilimlerinin incelendiği (Zhang, Zhang, Li, Li ve Li, 2022) ve kablo ekranlarında oluşan gerilimlerin hesaplandığı (Kong, Wang, Zhang, Yin ve Deng, 2010) çeşitli çalışmalar mevcuttur. Bunun yanında paralel kablo sistemlerinde mevcut çalışma durumlarına göre kabloların ısınma düzeylerini, harmonikli akım içeren yüklenme durumlarında kablolarında oluşan akım dağılımlarını (Gouramanis, Demoulias, Labridis ve Dokopoulos, 2009), kabloların ekranlama tiplerine göre oluşan kayıpları ve akımları (Gouda vd., 2011; Dong vd., 2017; Khamlichi vd., 2017; Akbal, 2017) ekran akımlarının yapay sinir ağı tabanlı yöntemlerle hesaplanmasını (Koroğlu, Umurkan ve Kesler, 2015), ekranlama tipine göre kablonun elektriksel performansını (Mahdipour, Akbari, Khalilzadeh ve Werle, 2017) inceleyen, yüksek gerilim yeraltı kablolarının arasında bulunan mesafelerin parametrik olarak değişiminin incelendiği ve harmonikli yüklenme durumunda ekran akımlarının, gerilimlerinin ve kayıpların karşılaştırıldığı (Demirool ve Kalenderli, 2023) çalışmalara rastlanmaktadır.

Bu ve benzeri çalışmalarda özellikle iletkenler üzerindeki akım dağılımlarının hesaplanmasında sonlu

elemanlar yönteminin kullanılmasının kolaylıklar sağladığı görülmektedir (Demirool vd., 2021; Li vd., 2016). Buna karşın kablolar arasındaki dengesiz yüklenme ile meydana gelen sirkülasyon akımının fazlar arası uzaklığa, topraklama barası kontak geçiş direncine ve kablo sisteminin etrafında bulunan diğer kablolardan geçen akıma göre karşılaştırıldığı çalışmaların sınırlı kaldığı görülmektedir.

Bu çalışmada çok sayıda paralel kablo içeren ve baralar arasında kuplaj bağlantısı bulunan bir sistemde kablo ekranları ile toprak barası arasındaki kontak direnci, tesis edilen kablolar arasındaki mesafe ve kablo gruplarının yüklenme durumunun değişimi gibi tasarım ve işletmeye bağlı parametrelere göre kablolar üzerinden ve kuplaj barasından geçen akımlarda meydana gelecek değişimlerin belirlenmesi hedeflenmektedir. Bu kapsamda ülkemizde faaliyet gösteren bir elektrik dağıtım şirketi tarafından sağlanan verilerden faydalanılarak detaylı modelleme ve analiz çalışmaları gerçekleştirilmiş ve elde edilen sonuçlar değerlendirilmiştir.

## 2. Materyal ve Metot

Günümüzde hızlı nüfus artışı ve endüstrileşmeye bağlı olarak yük yoğunluğunun artması, özellikle büyük şehirlerde iki veya daha fazla sayıda güç transformatorünün aynı merkezde bulunması, kablo hatları için öngörülen güzergahların sınırlı kalması gibi sebeplerle ana transformator merkezlerinden (TM) çıkan kablolar Şekil 1'de gösterildiği üzere çok sayıda paralel kablo demetleri halinde ve tüm kablolar aynı galeri içerisinde olacak şekilde tesis edilmektedir. Bu durumda çeşitli faktörlere bağlı olarak iletkenler üzerinde oluşan akım dağılımlarında önemli düzeyde dengesizlikler ile karşı karşıya kalılabilmektedir.

Orta gerilim yeraltı kabloları güç sisteminin temel ekipmanlarından biridir. Sistem boyutlandırması yapılırken kullanılacak olan kabloların nominal akımı taşıyabilecek, uygun gerilim düşümü değerini sağlayacak ve meydana gelebilecek kısa devre akımına dayanacak bir şekilde boyutlandırılması gerekmektedir. Bunun yanında kablolar üzerinden geçen akımlar faz sıralaması, kablolar arasındaki mesafe, toprak geçiş direnci gibi parametrelere bağlı olarak değişmektedir.

### 2.1. Teorik Metot

Paralel kablolar kullanılarak tesis edilen sistemlerde akım dağılımının hesaplanabilmesi için empedans matrisinin elde edilmesi gerekmektedir.

Kablo sisteminin empedans matrisi kabloların rezistif dirençleri ile öz ve karşıt endüktanslarından oluşmaktadır. Bu parametreler de kabloların arasında bulunan mesafeye, kablonun ekranlamasının mevcut olup olmamasına, mevcut ise ekranlamanın topraklanma durumuna, toprak geçiş direncine, faz

sıralamasına, deri ve yakınlık etkilerine bağlı olarak değişmektedir.



Şekil 1. Aynı galeri içerisinde bulunan çok sayıda orta gerilim yeraltı kablosu

Kabloların ekransız olduğu ve paralel kabloların tamamının aynı faza ait olduğu varsayıldığında empedans matrisini oluşturan elemanların değerleri Denklem (1)-(2) kullanılarak hesaplanmaktadır (Fassarella, Fortes ve Sotelo, 2018).

$$Z_{jj} = \left( R + j\omega \left( L + \frac{\mu_0}{2\pi} \left( \ln \frac{2s}{r} - 1 \right) \right) \right) \quad (1)$$

$$Z_{jk} = j\omega \left( \frac{\mu_0}{2\pi} \left( \ln \frac{2s}{D_{jk}} - 1 \right) \right) \quad (2)$$

Burada;  $R$  iletkenin alternatif akım direnci ( $\Omega$ ),  $L$  iletkenin öz endüktansı,  $\mu_0$  manyetik geçirgenliği,  $r$  iletken yarıçapı (m),  $s$  kablo uzunluğu (m),  $D_{jk}$  ise  $j$  ile  $k$  kabloları arasında bulunan mesafe (m) olarak tanımlanmaktadır. Bu kabloların alternatif akım dirençleri ise doğru akım dirençleri ile deri ve yakınlık etkisine bağlı olarak Denklem (3)'e göre hesaplanmaktadır.

$$R_{ac} = R_{dc}(1 + y_s + y_p) \quad (3)$$

Burada;  $R_{ac}$ ,  $R_{dc}$ ,  $y_s$  ve  $y_p$  sırası ile alternatif akım direncini ( $\Omega$ ), doğru akım direncini ( $\Omega$ ), deri etkisi katsayısını ve yakınlık etkisi katsayısını ifade etmektedir.

İletkenin doğru akım direnci Denklem (4)'e göre;

$$R_{dc} = \frac{\rho l}{S} \quad (4)$$

olup, burada  $\rho$ ,  $l$  ve  $S$  sırası ile iletkenin öz direncini ( $\Omega.m$ ), uzunluğunu (m) ve kesit alanını ( $mm^2$ ) ifade etmektedir. Deri etkisi ve yakınlık etkisi katsayıları sırasıyla Denklem (5)-(6) kullanılarak elde edilmektedir.

$$y_s = \frac{X_s^4}{192 + 0.8X_s^4} \quad (5)$$

$$y_p = \frac{X_p^4}{192 + 0.8X_p^4} \left( \frac{D_i}{a} \right)^{2.9} \quad (6)$$

Burada,

$$X_s = \sqrt{\frac{8\pi f}{R_{dc}} 10^{-7} k_s} \quad (7)$$

$$X_p = \sqrt{\frac{8\pi f}{R_{dc}} 10^{-7} k_p} \quad (8)$$

olarak hesaplanmaktadır. Bu denklemlerde,  $f$  kablodan akan akımın frekansı (Hz),  $D_i$  iletken çapı (m),  $a$  iletken eksenleri arasındaki mesafe (m) olarak tanımlanmaktadır.  $k_s$  ve  $k_p$  katsayı değerleri ise uluslararası standartlarda açıklandığı şekilde elde edilebilmektedir (IEC 60287-1-1, 2006).

Empedans matrisinin elde edilmesinin ardından Denklem (9)'dan yola çıkarak paralel iletkenler arasındaki akım dağılımları bulunabilmektedir.

$$[\bar{I}] = [\bar{Z}]^{-1}[K]([K]^T[\bar{Z}]^{-1}[K])^{-1}[\bar{I}_{abc}] \quad (9)$$

Burada  $Z$  empedans matrisini,  $K$  kabloların konumlarına göre oluşturulan katsayılar matrisini ifade etmektedir.  $[K]$  matrisi (Fassarella, Fortes ve Sotelo, 2018)'den elde edilmektedir.

## 2.1. Sonlu elemanlar yöntemi

Nümerik yöntemlerden biri olan sonlu elemanlar yöntemi (FEM), güç sistemi ekipmanlarının elektriksel parametrelerin hesaplanmasında kullanılabilir. Özel tip transformatörler (Çürükova vd., 2022), yüksek gerilim izolatörleri (Alboyacı, Çınar, Demirel ve Uzar, 2022), korona halkaları (Uzar, Demirel, Çınar ve Alboyacı, 2023) ve baralı kanal birimi sistemleri (Alboyacı, Çınar ve Demirel, 2023) FEM ile modellenilebilmekte, analiz ve optimizasyon çalışmaları yüksek doğruluk ile gerçekleştirilebilmektedir. FEM ile analitik yöntemlerin yetersiz kaldığı karmaşık geometrik yapılarda dahi çözüm yapılabilmektedir.

Gerçekleştirilen analiz çalışmalarında iletkenler üzerindeki akım dağılımının hesaplanması için kısa zamanda ve yüksek doğrulukta işlem gerçekleştiren sonlu elemanlar yöntemi kullanılmıştır. Sonlu elemanlar yöntemi ile model üzerinde sonlu sayıda üçgen eleman

oluşturulmakta ve bir ağ yapısı oluşturan bu elemanlara Denklem (10)-(13)'te verilen Maxwell denklemleri uygulanmaktadır (Szulborski, Lapczynski ve Kolimas, 2021).

$$\nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t} \quad (10)$$

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (11)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (12)$$

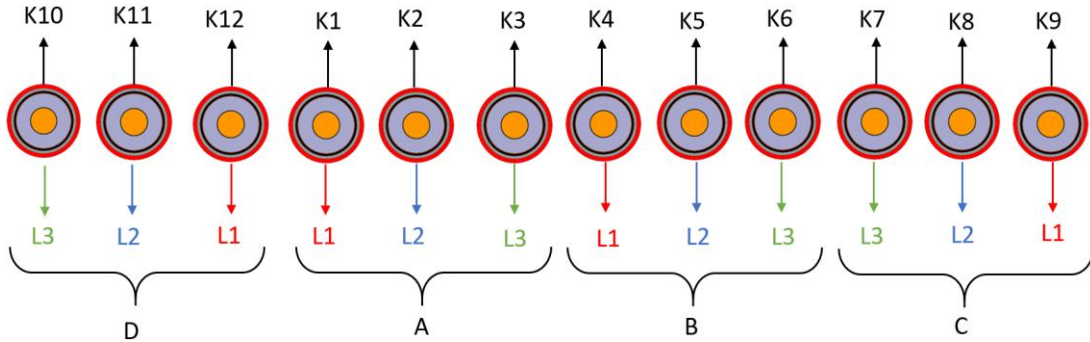
$$\nabla \cdot D = \rho \quad (13)$$

Burada,  $H$  manyetik alan şiddeti vektörü ( $A/m$ ),  $J$  akım yoğunluğu vektörü ( $A/m^2$ ),  $D$  elektrik akı yoğunluğu vektörü ( $C/m^2$ ),  $t$  zaman (s),  $E$  elektrik alan şiddeti vektörü ( $V/m$ ),  $B$  manyetik alan yoğunluğu vektörü,  $\rho$  yük yoğunluğu ( $C/m^2$ ) olarak tanımlanmaktadır.

Buna göre sonlu elemanlar yöntemi ile gerçekleştirilen hesaplamalarda iletkenlerin geometrisi, ekran durumu, iletkenlerin faz sıralaması ve konumu, deri etkisi, yakınlık etkisi, fazların yüklenme durumu, harmonik bileşenlerin durumu, gözlem noktasının model etrafında bulunan konumu detaylı olarak değerlendirilmeye alınabilmektedir. Bu sayede, bu uygulama gibi detay gerektiren analizlerde zaman tasarrufu sağlamak ve yüksek doğrulukta çözümler vermektedir.

### 3. Kablo Sisteminin Modellenmesi

Bu çalışmada incelenen gerçek bir uygulamada, transformatör merkezi ile dağıtım merkezi arasında

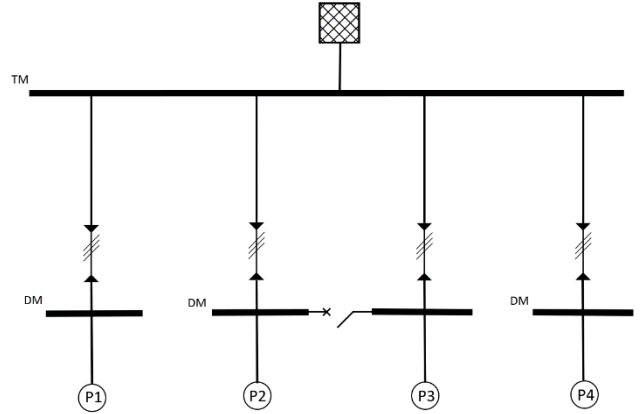


Şekil 3. Kablolar ve kablo gruplarının isimlendirilmesi ve faz sıralaması

Uygulamada kullanılan kabloların fiziksel boyut ve özellikleri Tablo 1'de verilmektedir. Kabloların dış kılıfları arasındaki mesafe 70 mm olacak şekilde tesis edilmiştir.

Her bir kablo grubundaki faz dizilimi incelenen uygulamadaki yerleşime uygun olarak tanımlanmıştır. Şekil 4'te, modellenen kablo grupları için oluşturulan uyarma devreleri ile ekran topraklama devresi gösterilmektedir. Burada K1...K12 olarak isimlendirilen endüktanslar güç kablolarını, R1...R12 olarak isimlendirilen dirençler ise her bir kabloya bağlı yükü temsil etmektedir. İncelenen uygulamada güç kabloları ekranlı ve zırlı yapıda olup çift taraftan topraklı biçimde tesis edilmiş olduğundan uyarma devresinde de

dört kablo grubu halinde toplam on iki adet kablo tesis edilmiş durumdadır. Şekil 2'de incelenen sistemin tek hat şeması gösterilmektedir.



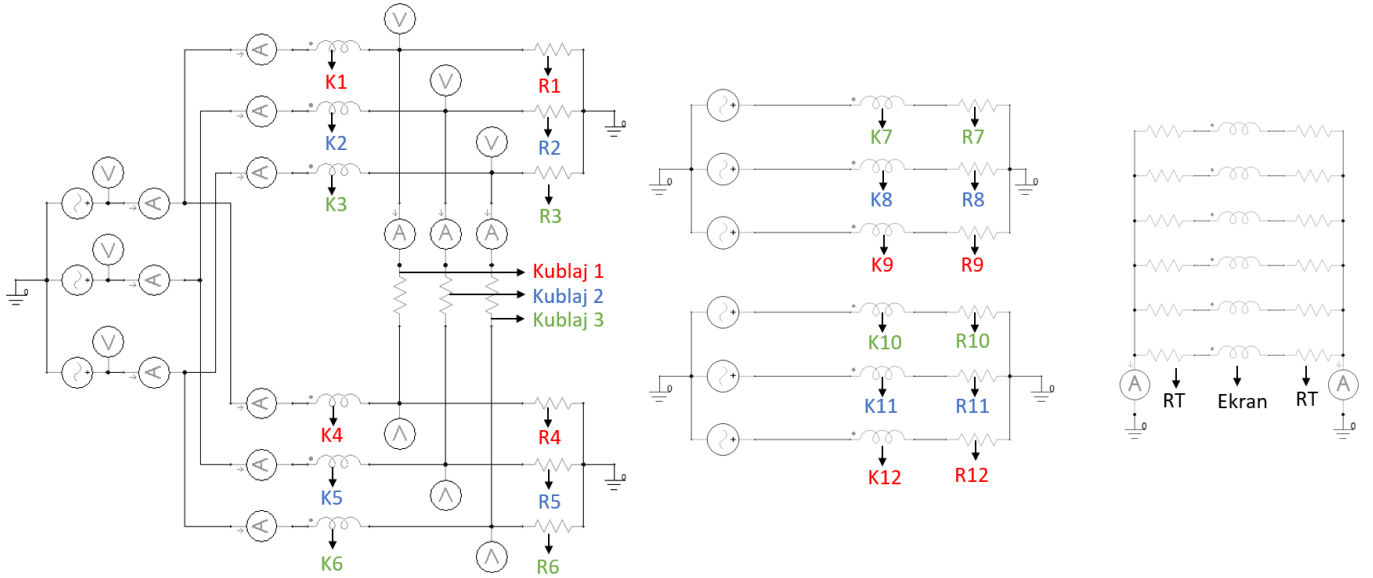
Şekil 2. Uygulamaya ait tek hat şeması

Uygulamadaki kablo sisteminin modellenmesi ve analizleri Ansys Electronics Suite yazılımı yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Şekil 3'te incelenen kablo sistemini oluşturan kablo gruplarının model içerisindeki isimlendirmesi ve her bir kablo grubundaki üç faza ait faz sıralaması verilmektedir. Buna göre, A ve B olarak adlandırılan kablo grupları kendi aralarında kuplaj bağlantısına sahip olup birbirinden bağımsız yükleri beslemektedir. C ve D olarak adlandırılan kablo grupları ise tamamen bağımsız sistemler olup diğer gruplar ile herhangi bir kuplaj bağlantısı bulunmamaktadır.

bu bağlantı biçimi oluşturulmuştur. Şekil 4(c)'de RT olarak isimlendirilen dirençler ise topraklama bağlantısının kontak direncini göstermektedir.

Tablo 1. Kablo boyut ve özellikleri

Parametre	Özellik
Kablo tipi	(N)2XSYR(A)Y
Kablo gerilimi	20.3/35 (42) kV
Kablo kesiti	1x240RM/25 mm <sup>2</sup>
İletken çapı (Bakır)	17.48 mm
İzolasyon çapı (XLPE)	37 mm
Ekran çapı (Bakır)	37.7 mm
İç kılıf çapı (PVC)	40.5 mm
Zırh çapı (Alüminyum)	44.32 mm
Dış kılıf çapı (PVC)	49.72 mm



Şekil 4. Kablo sistemi için oluşturulan uyarma devresi

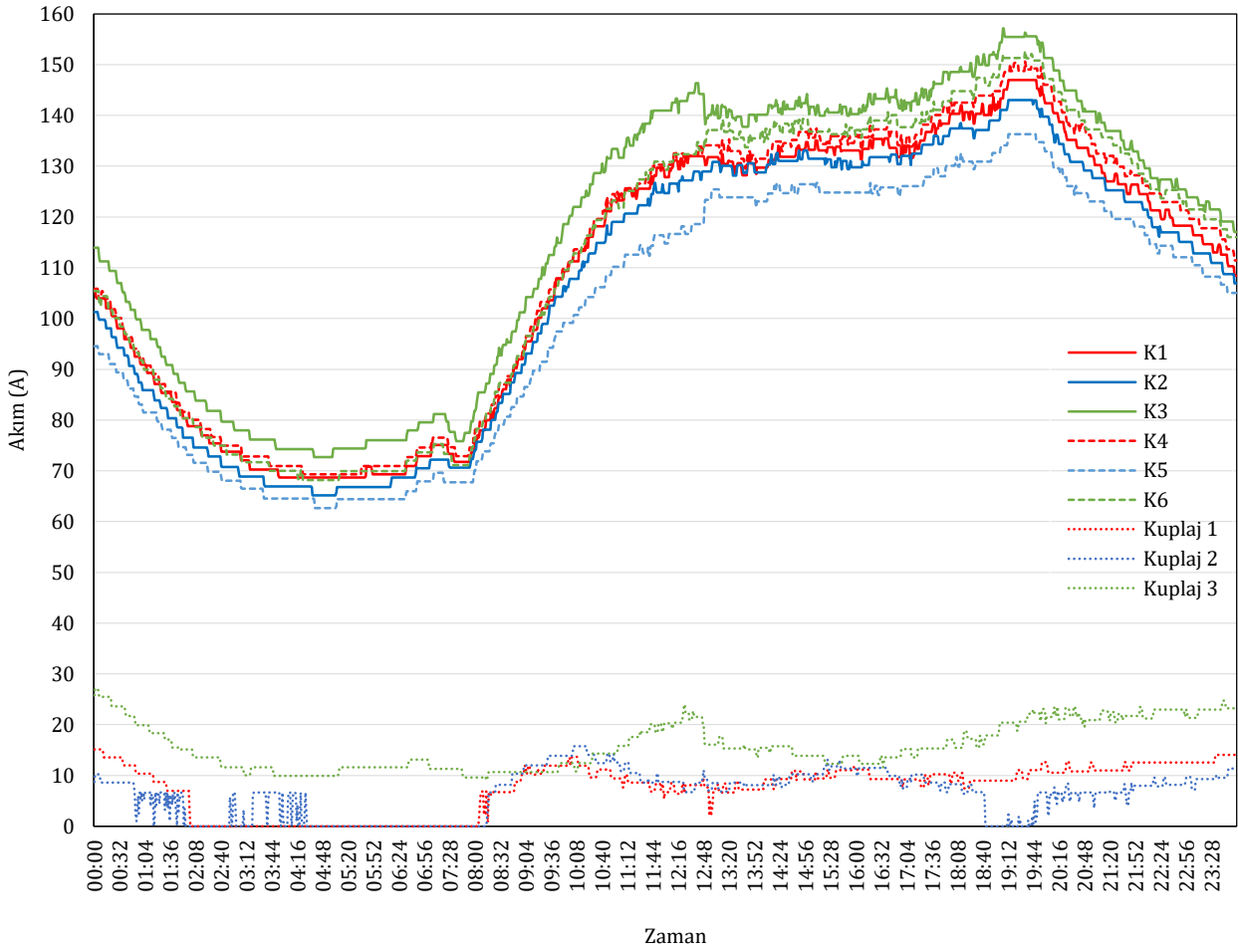
#### 4. Analiz Çalışmaları

Bu çalışmada incelenen kablo sistemi paralel devreler halinde işletilmekte olup paralel devreler üzerinde karşıt endüktans değerlerinin eşit olmaması nedeni ile oluşan ve kuplaj barasından geçen dengesizlik akımları kesicilerde hatalı açmalara neden olmaktadır. Bu dengesizliğin boyutu iletken içerisinde geçen akımın değerine bağlıdır.

Bu çalışmada, öncelikle yaşanan bu olay detaylı olarak analiz edilerek incelenmektedir. Kablo sistemi için oluşturulan modelin bu şekilde doğrulanmasının ardından ise kablolar arasındaki dengesiz yük akımlarının ve kuplaj barası üzerinden geçen akımların incelenen parametrelere göre etkilenme düzeyinin belirlenmesi hedeflenmiştir.

Oluşturulan modelin doğrulanması amacıyla sahadan elde edilen ve Şekil 5'te verilen 24 saatlik ölçüm verisi incelenmiş ve bu zaman içerisinde belirlenen bir

yüklenme durumu için analiz çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen analizlerde üç fazlı sisteme uygulanan gerilim dalga şekli saf sinüs biçiminde ve faz-nötr arası 19.2 kV değerinde olup aralarında  $120^\circ$  faz farkı bulunmaktadır. Kabloların ekran ve zırh ile topraklama barası arasında bulunan kontak geçiş direnci değeri  $0.001\Omega$  olarak kabul edilmiştir. Kuplajın kapalı olduğu durumda kuplaj direnç değeri  $1\mu\Omega$  olarak tanımlanmıştır. Analiz esnasında kablo iletkenlerinin sıcaklık değeri sabit  $90^\circ\text{C}$  olarak kabul edilmiş ve akıma bağlı değişimler ihmal edilmiştir. Yüksek gerilim yeraltı kablo sistemlerinde yüklenmeye ve toprağa gömülme derinliğine bağlı olarak kabloların sıcaklık değerleri değişecektir. Bu çalışmada modellenen sistemlerin gerçek hayatta uygulanabilirliğinin doğrulanması için termal analiz çalışmalarının da gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Bu çalışma kapsamında termal hesaplamalar incelenmemiştir.



Şekil 5. Kablo sisteminin 24 saatlik gerçek yüklenme eğrisi

Analiz çalışması sonucunda Şekil 4'te verilen uyarma devresinde de gösterilen kablo akımları ve kuplaj barası akımları ile saha ölçümlerinde elde edilen akım değerleri karşılaştırmalı olarak Tablo 2'de verilmektedir. Tablo 3'te bu durumda için yük dirençleri gösterilmiştir. Faz akımları ile kuplaj akımlarının 20ms'lik bir tam periyottaki akım dalga şekilleri Şekil 6-7'de verilmektedir.

Analizler sonucunda elde edilen akım değerlerinin saha ölçümü ile elde edilen akım değerleri ile büyük ölçüde örtüştüğü görülmektedir. Bu sayede, oluşturulan modelin ve elde edilen sonuçların geçerliliğinin doğrulanması sağlanmıştır. Buna dayanarak, kablo akımları ile kuplaj akımlarını etkileyen diğer parametrelerin etki düzeylerinin incelenmesine yönelik çalışmalar gerçekleştirilmiştir.

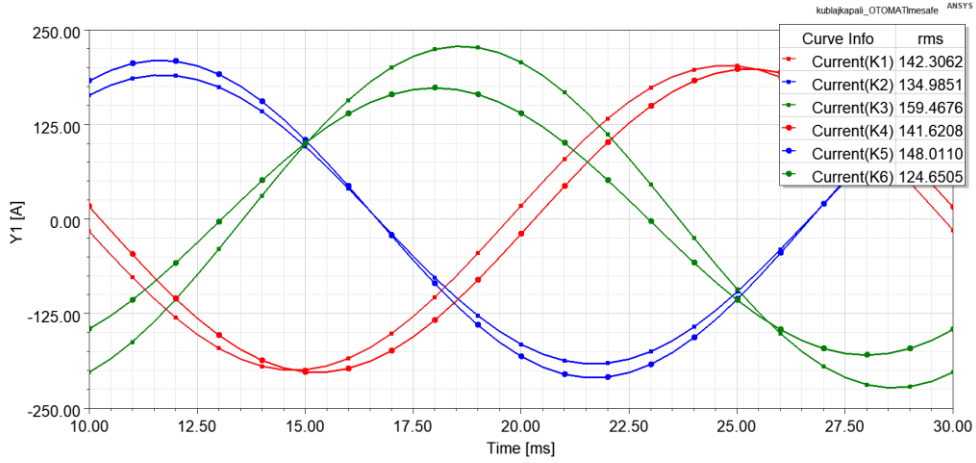
Tablo 2. A ve B grubu kablo ve kuplaj akımlarına ait ölçüm ve analiz değerlerinin karşılaştırması

Kablo	K1	K2	K3	K4	K5	K6	Kuplaj-1	Kuplaj-2	Kuplaj-3
Ölçüm	142.42	139.72	151.33	146.04	147.18	132.89	12.63	6.62	21.54
Analiz	142.30	134.98	159.46	141.62	148.01	124.65	12.20	8.02	20.97

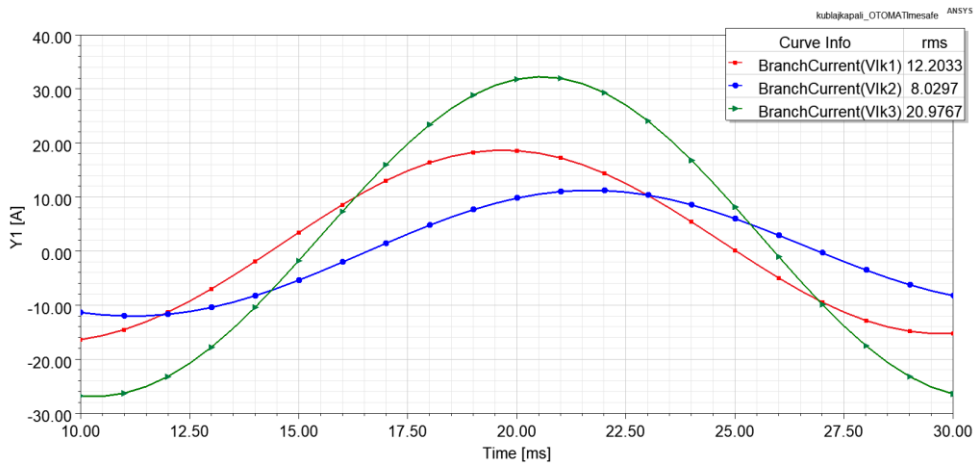
Tablo 3. Saha ölçümü ile doğrulanan model için yük dirençleri

Grup	D	A	B	C
R	10,11,12	1,2,3	4,5,6	7,8,9
Ohm	109.88	138.88	141.84	44.64





Şekil 6. Kablo akım dalga şekilleri



Şekil 7. Kuplaj bara akım dalga şekilleri

Tablo 2'de verilen analiz sonuçları kabloların dengesiz biçimde yüklendiğini ve kuplaj baralarından geçen akımları göstermektedir. Bu akımın büyüklüğü kablolar arasındaki uzaklığa, kontak direncine, kabloların yüklenme düzeyine ve faz dizilimine bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Bu bağlamda, doğrulanmış model yardımıyla kablolar ve kuplaj barasındaki akım değerlerinin topraklama barası kontak direncinin değerine, kablolar arasındaki mesafeye ve bağımsız kablo gruplarının yüklenme düzeylerine bağlı olarak değişiminin değerlendirilmesine yönelik analiz çalışmaları gerçekleştirilmiştir.

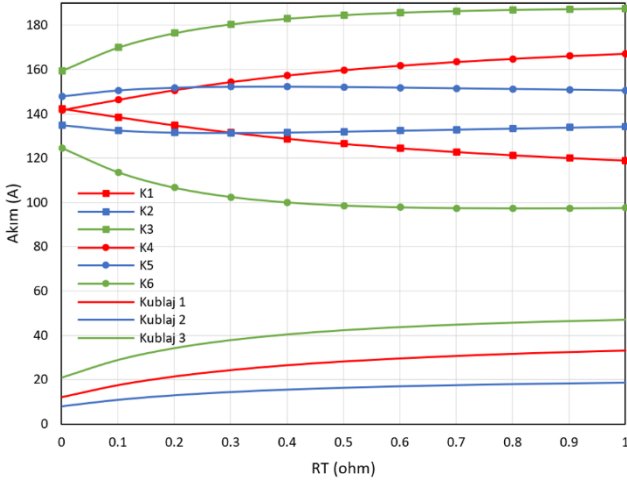
#### 4.1. Ekran topraklaması kontak direncinin etkisi

Enerji dağıtımında kullanılan yüksek gerilim yeraltı kabloları gerek elektriksel izolasyon gerekse mekanik koruma amacıyla ekran ve zırh yapılarına sahiptir. Bu bileşenlerin topraklanması tek veya çift taraftan yapılabilmektedir (Öztürk, Karacasu ve Hocaoğlu, 2010). Bu çalışmada modellenen güç kabloları da ekran ve zırh bileşenlerine sahip olup çift taraftan topraklı bir sistemdir. Topraklama tipine göre kablolar da meydana

gelen akım dağılımı, indüklenen gerilimler ve kabloların akım taşıma kapasiteleri gibi parametreler değişiklik göstermektedir (IEC 60502-4, 2010).

Ekran ve zırh topraklaması yapılırken ekran ve zırh iletkenleri kablo başlığından çıkartılmakta ve topraklama barasına bağlanmaktadır. Bu bağlantı yapılırken bağlantı noktasında bir kontak direnci meydana gelmektedir. Bu kontak direnci işletme sürecinde baranın korozyona uğramasına, bağlantı civatalarının gevşekliğine, bara malzemesine ve bara ile kablo arasında bulunan mesafeye bağlı olarak değişiklik göstermektedir. Bu bölümde bu direnç değerinin kablo akımları ve kuplaj barası akımlarına etkileri incelenmektedir.

Bu amaçla, model doğrulama sürecinde  $0.001\Omega$  olarak tanımlanan kontak direnci değeri yukarıda sıralanan faktörleri temsilen  $1\Omega$  değerine kadar artırılmıştır. Her bir analiz için elde edilen sonuçlar Şekil 8'de gösterilmektedir.



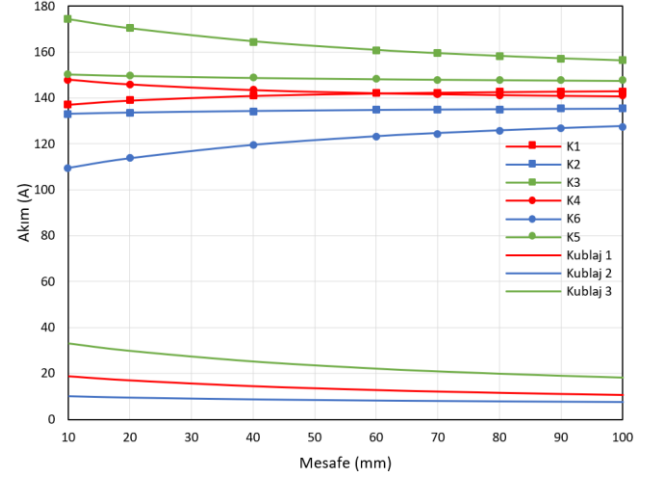
Şekil 8. Topraklama kontak direncine bağlı olarak hesaplanan kablo ve kuplaj barası akımları

Elde edilen sonuçlar topraklama kontak direncinin değerine bağlı olarak kablo akımları ile kuplaj barası akımlarının önemli ölçüde değiştiğini göstermektedir. Bu bağlamda kontak direnci değerinin artmasıyla birlikte aralarında kuplaj bağlantısı bulunan A ve B grubu kablolar arasında meydana gelen dengesizliğin büyük oranda arttığı gözlenmektedir. Benzer şekilde, bu dengesizliğin artışına paralel olarak kuplaj barasından akan akım değerlerinde de %100'e yaklaşan oranda artış görülmektedir.

Kontak direnci değişiminin akım dağılımlarına etkisi sistemin empedans matrisinin değişmesinden kaynaklanmaktadır. Kabloların ekranları arasında bulunan direnç değeri yükseldikçe, ekran ve zırhlardan geçen akım miktarı azalmaktadır. Çekirdek ve ekrandan geçen akım arasında bulunan fark arttıkça, kabloların birbirleri arasında bulunan karşıt indüktans değerleri yükselmektedir, bu sebepten dolayı kabloların kendi aralarında bulunan indüktans etkisi artmakta, bu durum da akım dağılımı dengesizliğinin yükselmesine sebep olmaktadır.

#### 4.2. Kablolar arasındaki mesafenin etkisi

Yüksek gerilim yeraltı kabloları flat veya trefoil düzende tesis edilmekte olup kablolar arasındaki mesafeye bağlı olarak karşıt endüktans değeri değişmektedir. Bu mesafenin kablolardan akan akıma ve kuplaj barası akımlarına etkisinin belirlenmesi için doğrulan modelde 70 mm olarak tanımlanan mesafe 10 mm ile 100 mm arasında 10 mm'lik adımlarla değiştirilerek analiz çalışmaları tekrarlanmıştır. Analizler sonucunda elde edilen kablo ve kuplaj bara akımı değerler Şekil 9'da gösterilmektedir.



Şekil 9. Kablolar arası uzaklığa bağlı olarak hesaplanan kablo ve kuplaj barası akımları

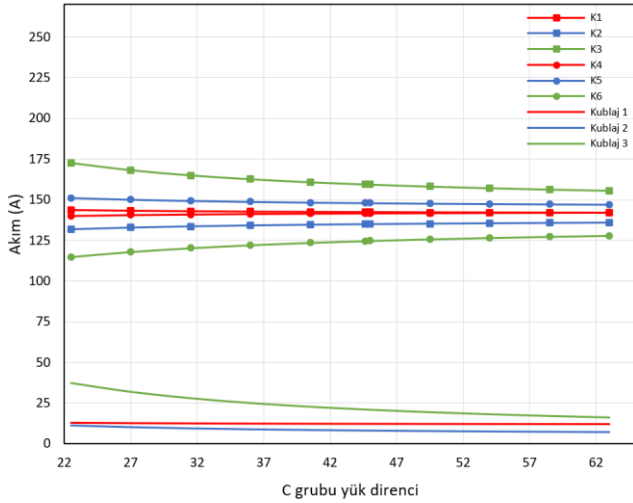
Buna göre, kablolar arasındaki uzaklığın artmasıyla birlikte karşıt endüktans etkisinde önemli ölçüde azalma gözlenmektedir, bu durum da akım dağılımlarının daha dengeli olmasına neden olmaktadır. Orijinal modelde 70 mm olarak düzenlenen kablolar arası uzaklığın azalması gerek kablo akımları arasındaki dengesizliğin gerekse kuplaj barası üzerinden akan akım değerlerinin artışıyla sonuçlanmaktadır.

#### 4.3. Sistemdeki bağımsız kablo gruplarının yüklenme oranına etkisi

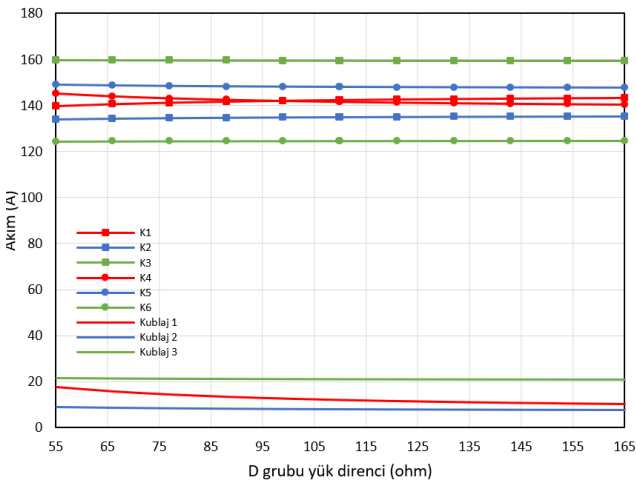
Dört kablo grubu halinde toplam on iki adet yüksek gerilim kablosundan oluşan ve Şekil 3'te gösterilen kablo yapısında sadece A-B grubu kablolar elektriksel olarak kuplaj bağlantısına sahip olup, C ve D gruplarındaki kablolar ile bir elektriksel bağlantı bulunmamaktadır. Bununla birlikte, kablo grupları arasındaki karşıt endüktans etkisinden dolayı C ve D gruplarında bulunan kabloların yüklenme değerine bağlı olarak taşıdıkları akımın A ve B gruplarındaki kablolar ile kuplaj barasından geçen akım üzerine etkilerinin belirlenmesi amacıyla analizler gerçekleştirilmiştir. C ve D grubunda bulunan kabloların yüklenme oranı, A ve B grubu kabloların üzerinde bir manyetik alan etkisi yapacağından ve kabloların kendi aralarında karşıt indüktans etkisi olduğundan dolayı akım dağılımlarına etki etmektedir. C ve D grubu kabloların yüklenme oranı arttıkça, karşıt indüktans matrisindeki etkisi de artacağı için kuplaj barasından geçen dengesizlik akımlarının artması beklenmektedir.

Saha ortamından elde edilen akım ölçümleri ile doğrulan modelde yükü simgeleyen direnç değerleri C grubu kablolar için  $44.64\Omega$ , D grubu kablolar için ise  $109.88\Omega$  olarak hesaplanmıştır. Bu kablo gruplarındaki yüklenme oranı değişimini temsil etmesi amacıyla bu direnç değerleri C grubu kablolar için  $44.64\Omega$  değerinin, D grubu kablolar için ise  $109.88\Omega$  değerinin %50'si ve %150'si aralığında %10'luk adımlar ile değiştirilip analizler tekrarlanmıştır.

Bu analizler sırasıyla sadece C grubu kabloların yüklenme değişimi, sadece D grubu kabloların yüklenme değişimi ve her iki gruptaki kabloların yüklenme oranlarının birlikte değişimi olmak üzere üç adımda gerçekleştirilmiştir. Her bir adımda on farklı yüklenme değeri için kablo ve kuplaj barası akımları hesaplanmıştır. Analiz çalışmaları sonunda elde edilen kablo akımları ve kuplaj barası akımlarının değişimleri Şekil 10-12'de verilmektedir.

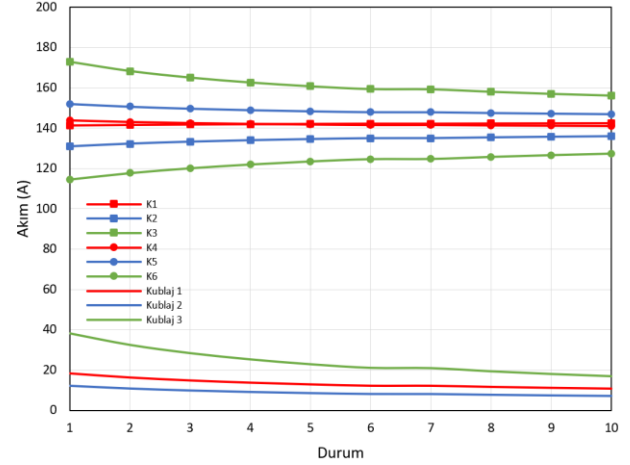


Şekil 10. Sadece C grubu kabloların yüklenme değişimine bağlı olarak hesaplanan kablo ve kuplaj barası akımları



Şekil 11. Sadece D grubu kabloların yüklenme değişimine bağlı olarak hesaplanan kablo ve kuplaj barası akımları

Buna göre, C ve D grubu olarak adlandırılan kablo grupları tarafından taşınan akımın birbirlerinden bağımsız olarak değişiminin Şekil 10 ve Şekil 11'de gösterildiği üzere gerek A ve B grubu kablo akımlarında gerekse kuplaj akımlarında değişime yol açtığı görülmektedir. A ve B grubu kablo akımlarında meydana gelen bu değişimin büyüklüğünün, C ve D grubu kablo akımlarının değişimiyle doğru orantılı olduğu göze çarpmaktadır.



Şekil 12. C ve D grubu kabloların yüklenme oranlarının birlikte değişimine bağlı olarak hesaplanan kablo ve kuplaj barası akımları

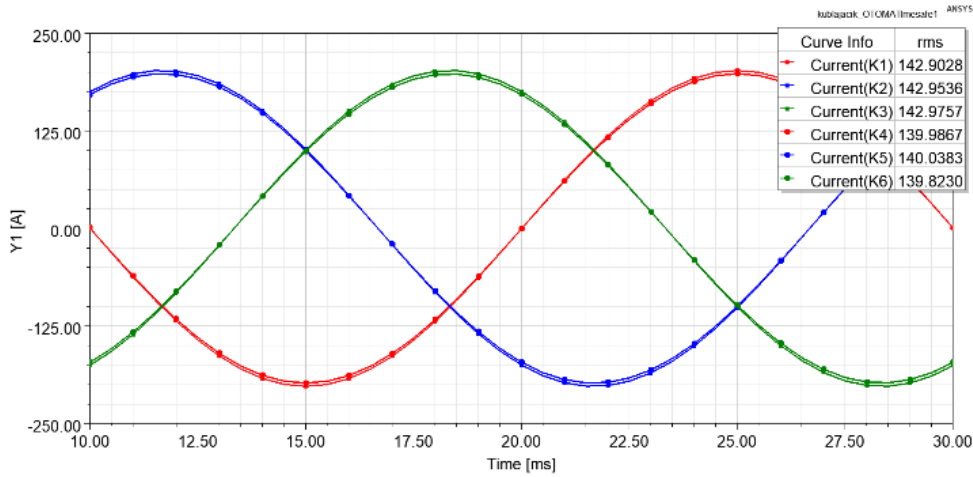
Buna göre, C grubu kablodaki yükü simgeleyen  $44.64\Omega$  'luk direnç değerinin %50'si olan  $22.32\Omega$  değeri yük akımının önemli ölçüde artışı ifade etmekte ve bu durumda akım dengesizliğinin daha yüksek olduğunu göstermektedir.

Benzer durum sadece D grubu kabloların yüklenme düzeyinde meydana gelen değişim için de geçerli olmaktadır. Bununla birlikte, bu kablo grubu için kablodaki yükü simgeleyen  $109.88\Omega$  'luk direnç değerinin bu çalışmada yük değişim aralığının alt sınırı olarak kabul edilen %50'sine karşılık gelen  $54.94\Omega$  değerine düşmesi yük akımında büyük miktarda artışa neden olmamaktadır. Bu sebeple Şekil 10'da  $22.32\Omega$  değeri için kablo ve kuplaj akımlarındaki dengesizlik artışı Şekil 11'de  $54.94\Omega$  değeri için gözlemlenebilir düzeyde olmamaktadır.

C ve D grubu kablo yük akımlarının aynı anda değişimi de beklendiği gibi özellikle yüksek yük akımları için A ve B grubu kablolar ve bu kablo grupları arasındaki kuplaj akımlarında artışa ve dengesizliğe sebebiyet verdiği gözlenmektedir.

#### 4.4. Kuplajın açık işletilmesi durumu

Oluşturulan modelde A ve B grubu kablolar arasında mevcut olan kuplaj bağlantısının açık olması durumu değerlendirilmiştir. Kuplajın açık olarak işletilmesi durumu Tablo-2'de gösterilmiş olan saha ölçümü ile analiz çalışmasının doğrulandığı senaryo için gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla uyarma devresinde kuplaj bağlantısını temsil eden direnç değeri açık devre durumunun benzetimi için  $1G\Omega$  olarak tanımlanmıştır. Bu durumda kuplaj barası üzerinden herhangi bir sirkülasyon akımının akması mümkün olmayıp bu durum için elde edilen kablo akımlarının değeri 20 ms'lik bir periyotta Şekil 13'teki biçimde hesaplanmaktadır.



Şekil 13. Kuplaj barasının açık olarak işletilmesi durumunda kablo akımları

## 5. Sonuçlar

Bu çalışmada, bir uygulama örneğinden yola çıkılarak topraklama barası kontak direnci değeri, kablolar arasındaki mesafe ve bağımsız kablo gruplarının yüklenme düzeylerine bağlı olarak sistemdeki kablo akımları ile kuplaj akımlarının değişimi incelenmiştir. Bu amaçla, bir transformatör merkezi ile dağıtım merkezi arasında tesis edilmiş olan ve çok sayıda paralel kablo içeren bir kablo sistemi göz önünde tutulmuştur.

Gerçekleştirilen analizler sonucunda, tüm bu parametrelerin hem kablo akımları hem de kuplaj akımları üzerinde etkisi olduğu gözlenmektedir. Uygulamada topraklama barasının korozyona uğraması, bağlantı terminallerinin gevşemesi gibi nedenlerle değiştiği gözlenen kontak direnci değerinin kablo akımları ve kuplaj akımlarını %100'e varan ölçüde etkilediği görülmektedir. Kablolar arasındaki mesafenin artması ise özellikle iletkenler arasındaki karşıt endüktans etkisinin azalması sebebiyle akım dengesizliğinin azaldığı gözlenmiştir.

Paralel olarak tesis edilen bağımsız kablo gruplarının yüklenme değerlerine bağlı olarak yapılan incelemede ise, yüklenme akımına bağlı olarak taşıdığı akımlar değerlendirilen kablo grupları ve aralarındaki kuplaj bağlantısı akımlarının değişen düzeylerde etkilendiği görülmektedir.

Bu çalışma kapsamında kablo seçimi için gerekli olan diğer parametrelerden sürekli yük akımı, toprak termal direnci, yüklenebilirlik katsayısı, kablo ekranlarının topraklama tipi ve yan yana tesis edilen sistem sayısı gibi faktörler göz önünde tutulmamıştır. Bununla birlikte, elde edilen sonuçlar sistem tasarımı yapılırken paralel tesis edilen kabloların gerek tesis edilme gerekse işletme koşullarında karşı karşıya kalabileceği durumların değerlendirilmesi ve buna göre karar alınmasının sistem güvenilirliği ve enerji temininde sürdürülebilirlik açısından önemli olduğunu göstermektedir.

## Araştırmacıların Katkısı

Çalışmada Yazar-1 analizlerin gerçekleştirilmesi ve derlenmesi, Yazar-2 analizlerin gerçekleştirilmesi ve yazım denetimi, Yazar-3 ise fikrin oluşması ve sonuçların yorumlanması aşamalarında katkı sunmuşlardır.

## Çıkar Çatışması

Hazırlanan makalede herhangi bir kişi/kurum ile çıkar çatışması bulunmamaktadır.

## Kaynaklar

- Akbal B. (2017). Yüksek gerilim kablolarında oluşan kılıf akımının yapay sinir ağı tabanlı melez yöntemlerle tahmin uygulamaları. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 23(2), 119-125. doi: [10.5505/pajes.2016.84669](https://doi.org/10.5505/pajes.2016.84669)
- Alboyacı B., Çınar M.A., Demiroğlu Y.B. ve İnce A. (2022). Evaluation of the Effect of Structural Defects in the Heat-Shrink Cable Terminal on Electric Field Distribution. *Engineering Failure Analysis*, 132, 105920. doi: [10.1016/j.engfailanal.2021.105920](https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2021.105920)
- Alboyacı B., Çınar M.A., Demiroğlu Y.B. ve Uzar M. (2022). Reducing the failures with adding glass insulators to composite insulators of 400 kV transmission line at high altitude. *Engineering Failure Analysis*, 141, 106678. Doi: [10.1016/j.engfailanal.2022.106678](https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2022.106678)
- Alboyacı B., Çınar M.A. ve Demiroğlu Y.B. (2023). Influence of busbar trunking system design on thermal performance operating with non-sinusoidal currents. *Electric Power Systems Research*, 214, 108815. Doi: [10.1016/j.epr.2022.108815](https://doi.org/10.1016/j.epr.2022.108815)
- Çürükova S., Demiroğlu Y.B., Sönmez O., Çınar M.A. ve Alboyacı B. (2022). Cer Transformatörlerinde

- Elektriksel Parametrelerin Sonlu Elemanlar Yöntemi ile Analizi. *Demiryolu Mühendisliği*, c. 0, sayı. 16, ss. 66-78, doi:10.47072/demiryolu.1110515
- Demirel Y.B., Çınar M.A. ve Albayacı B. (2021). Evaluation of cable and busbar system in multiconductor distribution systems in terms of current and magnetic field distributions. In: *2023 IEEE Belgrade PowerTech, Belgrade, Serbia*. doi: [10.3906/elk-2103-108](https://doi.org/10.3906/elk-2103-108)
- Demirel Y.B. ve Kalenderli Ö. (2023). Effect of Laying Parameters and Non-sinusoidal Loading Condition of High-Voltage Underground Cables on Electrical Performance by Finite Element Method. *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, 29(1), 3119-3132. doi: [10.1109/PowerTech55446.2023.10202686](https://doi.org/10.1109/PowerTech55446.2023.10202686)
- Dong X., Yang Y., Zhou C. ve Hepburn D.M. (2017). Online Monitoring and Diagnosis of HV Cable Faults by Sheath System Currents, *IEEE Transactions on Power Delivery*, 32(1), 2281-2290. doi: [10.1109/TPWRD.2017.2665818](https://doi.org/10.1109/TPWRD.2017.2665818)
- Fassarella J.E.V., Fortes M.Z. ve Sotelo G.G. (2018). Measurement, evaluation and proposed solution for power distribution arrangements with electrical cables in parallel. *Measurement*, 119(1), 196-204. doi: [10.1016/j.measurement.2018.01.056](https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.01.056)
- Gouda O.E. ve Farag A.A. (2011). Factors Affecting the Sheath Losses in Single-Core Underground Power Cables with Two-Points Bonding Method. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, 2(1), 7-16. doi: [10.1.1.1029.8180](https://doi.org/10.1.1.1029.8180)
- Gouramanis K., Demoulias C., Labridis D.P. ve Dokopoulos, P. (2009). Distribution of non-sinusoidal currents in parallel conductors used in three-phase four-wire networks. *Electric Power Systems Research*, 79(1), 766-780. doi: [10.1016/j.epsr.2008.10.012](https://doi.org/10.1016/j.epsr.2008.10.012)
- IEC 60287-1-1 Electric cables — Calculation of the current rating- Part 1-1: Current rating equations (100 % load factor) and calculation of losses — General, 2006.
- IEC. 60502-4 Power cables with extruded insulation and their accessories for rated voltages from 1 kV ( $U_m = 1.2$  kV) up to 30 kV ( $U_m = 36$  kV) – Part 4: Test requirements on accessories for cables with rated voltages from 6 kV ( $U_m = 7.2$  kV) up to 30 kV, 2010.
- Kong X., Wang Y., Zhang Z., Yin X. ve Deng X. (2010). Calculation of Induced Voltage in Metal Shield of Single-core Cable Operated in Parallel, In: *International Conference on Power System Technology*, 1-8, Zhejiang, China.
- Koroğlu S., Umrkan N. ve Kesler S. (2015). Yeraltı kablolarında silindirik ekranlamanın performans analizi. *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, 21(2), 41-46. doi: [10.5505/pajes.2015.64872](https://doi.org/10.5505/pajes.2015.64872)
- Li Z., Zhong X., Xia J. ve Bian R. (2016). Simulation of current distribution in parallel single-core cables based on finite element method. *5th International Conference on Instrumentation and Measurement, Computer, Communication, and Control*, 411-414, Qinhuanhdao, China.
- Mahdipour M., Akbari A., Khalilzadeh M. ve Werle P (2017). Impact of different bonding methods on high voltage cable shield induced voltage and current in normal and fault conditions. *25th Iranian Conference on Electrical Engineering*, 1308-1312, Iran.
- Öztürk O., Karacasu Ö. ve Hocaoglu M.H. (2010). Effects of parallel power cables on current distribution. Elektrik, Elektronik ve Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu, 133-136, Bursa.
- Szulborski M., Łapczyński S. ve Kolimas Ł. (2021). Thermal Analysis of Heat Distribution in Busbars during Rated Current Flow in Low-Voltage Industrial Switchgear. *Energies*, 14(1), 1-23. doi: [10.3390/en14092427](https://doi.org/10.3390/en14092427)
- Uzar M., Demirel Y.B., Çınar M.A. ve Albayacı A. (2023), Investigation on the Effect of Corona Ring Design Parameters on Electric Field Distribution by Finite Element Method. *Turkish Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 3: 20-27. doi: 10.5152/tepes.2023.22031
- Wu A.Y. (1984). Single-Conductor Cables in Parallel. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 20(1), 377-395. doi: [10.1109/TIA.1984.4504423](https://doi.org/10.1109/TIA.1984.4504423)
- Zhang P., Zhang A., Li W., Li B. ve Li L. (2022). Study on optimization of laying mode of two parallel high voltage cables in the same phase of two circuits. *Energy Reports*, 8(1), 1839-1846. doi: [10.1016/j.egyr.2021.12.076](https://doi.org/10.1016/j.egyr.2021.12.076)



## POLİLAKTİK ASİT/ POLİ (STİREN-KO-METİL METAKRİLAT) /HALLOYSİT NANOKOMPOZİTLERİNİN ÖZELLİKLERİ ÜZERİNE HALLOYSİT VE POLİLAKTİK ASİT MİKTARININ ETKİSİ

Dilan İSKENDER<sup>1\*</sup>, Ayla ALTINTEN<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Gazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, Türkiye, ORCID No : <https://orcid.org/0000-0002-5482-1854>

<sup>2</sup> Gazi Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Ankara, Türkiye, ORCID No : <https://orcid.org/0000-0002-2048-8811>

Anahtar Kelimeler	Öz
<p>Emülsiyon Polimerizasyonu Poli(Stiren-ko-Metil metakrilat), Halloysit, Polilaktik Asit, Biyobozunur Polimer.</p>	<p><i>Bu çalışmada stiren (St) ve metil metakrilat (MMA) monomerlerinden emülsiyon polimerizasyonu yöntemi ile poli(stiren-ko-metil metakrilat) (P(St-ko-MMA)) sentezlenmiştir. (P(St-ko-MMA))'ya kullanım ömrü süresince mekanik ve termal özelliklerinin geliştirilmesi amacıyla dimetil sülfoksit (DMSO) ile modifiye edilmiş nano takviye malzemesi olan modifiye halloysit nanotüp (m-HNT) ve biyobozunur özellik kazandırmak amacıyla polilaktik asit (PLA) katılmıştır. In-situ ve çözelti harmanlama yöntemleri ile kütlece 30:70 ve 50:50 oranlarında PLA/P(St-ko-MMA) içeren kütlece %5 ve %10 oranlarında m-HNT kullanılarak PLA/P(St-ko-MMA)/HNT nanokompozit sentezi gerçekleştirilmiştir. Kopolimer ve nanokompozitlerin % monomer dönüşümleri ve viskozite ortalama molekül ağırlıkları hesaplanmış ardından karakterizasyon çalışmaları gerçekleştirilmiştir. Kopolimer ve nanokompozitlerin termal özellikleri termogravimetrik analiz (TGA), yapısal özellikleri taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve mekanik özellikleri Shore D ile gözlemlenmiştir. PLA'nın nanokompozit üzerindeki etkisini gözlemleyebilmek için plaka haline getirilen numuneler kaktüs toprağı ve humuslu toprağı gömülmüştür. Çalışmanın sonunda HNT ve PLA miktarındaki değişimlerin ve nanokompozit sentezleme yöntemlerinin nanokompozitlerin özellikleri üzerindeki etkileri incelenmiştir. Karakterizasyon çalışmalarında nanokompozitlerin artan HNT katkısı ile termal ve mekanik özelliklerinin arttığı görülmüştür. Çözelti harmanlama yöntemi ile üretilen nanokompozitlerin mekanik dayanım konusunda daha iyi özellikler sergilediği fakat termal dayanım konusunda kullanılan nanokompozit sentezi yöntemlerinin birbirine üstünlüğü olmadığı görülmüştür. PLA miktarının artışı mekanik ve termal dayanımı negatif yönde etkilediği görülmüş fakat biyobozunma konusunda pozitif etkisi olduğu saptanmıştır.</i></p>

### THE EFFECT OF THE AMOUNT OF HNT AND PLA ON THE PROPERTIES OF POLYLACTIC ACID/ POLY (STYRENE-CO-METHYL METHACRYLATE)/HALLOYSITE NANOCOMPOSITES

Keywords	Abstract
<p>Emulsion Polymerization Poly(Styrene-co-Methyl Methacrylate), Halloysite, Polylactic Acid, Biodegradable Polymer.</p>	<p><i>In this study, poly(styrene-co-methyl methacrylate) (P(St-co-MMA)) was synthesized from styrene (St) and methyl methacrylate (MMA) monomers by emulsion polymerization method. Modified halloysite nanotube (m-HNT), a nano-reinforcing material modified with dimethyl sulfoxide (DMSO), and polylactic acid (PLA) were added to (P(St-co-MMA)) to give it biodegradable properties. PLA/P(St-co-MMA)/HNT using 5% and 10% m-HNT containing 30:70 and 50:50 mass ratios of PLA/P(St-co-MMA) by in-situ and solution blending methods HNT nanocomposite synthesis was carried out. The % monomer conversions and viscosity average molecular weights were calculated, and characterization studies were carried out. Thermal properties of copolymers and nanocomposites were observed by thermogravimetric analysis (TGA), structural properties were observed by scanning electron microscopy (SEM), and mechanical properties were observed by Shore D. For observe the effect of PLA on the nanocomposite, the plated samples were buried in cactus and humus soils. Finally, the effects of the amount of HNT and PLA and nanocomposite synthesis methods on the properties of nanocomposites were investigated. In characterization studies, it was observed that the thermal and mechanical properties of nanocomposites increased with increasing HNT</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/>).

*addition. It has been observed that nanocomposites produced by the solution blending method exhibit better properties in terms of mechanical strength, but nanocomposite synthesis methods used in thermal resistance are not superior to each other. It was observed that the increase in the amount of PLA negatively affected the mechanical and thermal strength, but it was found to have a positive effect on biodegradation.*

Araştırma Makalesi		Research Article	
Başvuru Tarihi	: 07.06.2023	Submission Date	: 07.06.2023
Kabul Tarihi	: 17.10.2023	Accepted Date	: 17.10.2023

\* Sorumlu yazar: [dilanarslan12.95@gmail.com](mailto:dilanarslan12.95@gmail.com)  
<https://doi.org/10.31796/ogummf.1311032>

## 1. Giriş

Polimerler canlı doğanın yanı sıra cansız doğada da çok fazla bulunmaktadır. Yer kabuğunun büyük bir kısmı polimer şeklinde bulunan silisyum-4-oksit ve alüminyum oksitten oluşmuştur (Basan, 2013). Teknoloji ilerledikçe var olan polimerlerden daha iyi özelliklere sahip farklı tiplerde polimerler geliştirilmektedir. Bu gelişimin en yaygın olan yollarından biri ise polimer kompozit malzemelerdir. Polimerler ve polimer esaslı kompozit malzemeler tıp, ilaç sanayisi, inşaat sanayi, uzay uçak sanayi, moleküler biyoloji gibi birçok alanda önemli yere sahiptir (Yalçınkaya, 2008). Günümüzde kompozit malzemeye talep ve ilgiler her geçen gün artış göstermektedir. Bu artışın sonucu olarak gerek endüstride gerekse gündelik hayatta alışagelmış birçok alaşımların yerini kompozit malzemeler almaya başlamıştır ve önemi giderek artmaktadır. Polimer/kil nanokompozitler katkı malzemesi içermeyen polimerle karşılaştırıldığında mekanik ve termal özellikler, gaz-bariyer, yanma dayanımı gibi özelliklerin daha iyi performans sergilemesinden dolayı fazlasıyla tercih edilme nedeni olmuştur (Ramani ve Dahoe, 2014). Khezri ve diğ. (2012) yaptığı çalışmada, miniemülsiyonda ters atom transfer radikal polimerizasyonu (RATRP) yöntemini kullanarak Kil/P(St-ko-MMA) nanokompoziti sentezlemişlerdir. Sentezledikleri nanokompozit ve saf kopolimerlerin termal kararlılığını karşılaştırdıklarında nanokompozitlerin termal kararlılığının saf kopolimerlerden daha yüksek olduğunu tespit etmişlerdir. Bhanvase ve diğ. (2014) tarafından yapılan çalışmada, emülsiyonlaştırıcı sodyum dodesil sülfat (SDS) ve başlatıcı potasyum persülfat (KPS) varlığında ultrason destekli yarı kesikli emülsiyon kopolimerizasyonu yöntemi ile MMA ve St'nin kopolimerizasyonun kinetik çalışmaları incelenmiştir. Sıcaklığın, akustik yoğunluğun, başlatıcı yüklemesinin, yüzey aktif madde ve monomer dönüşüm konsantrasyonunun etkisi araştırılmıştır. Polimerizasyon derecesi sıcaklık, başlatıcı, monomer ve yüzey aktif madde konsantrasyonlarının artışı ile arttığını gözlemlemişlerdir. Buruga ve Kalathi (2019) yaptıkları çalışmada monomer olarak stiren ve metil metakrilat, stabilizatör olarak HNT kullanarak ultrason destekli Pickering nanoemülsiyon polimerizasyonu yöntemiyle

P(St-ko-MMA) nanosferleri sentezlemişlerdir. Sentezlenen kopolimer nanosfer parçacıkları mükemmel bir küresel şekil, iyi stabilite, yüksek molekül ağırlığı ve mükemmel termal özellikler sergilediği tespit edilmiştir. Solorio-Rodríguez ve Vega-Rios (2019) yaptığı çalışmada, eriyik harmanlama yöntemi ile P(St-ko-MMA) kopolimerine değişik oranlarda (kütlece %50, %75 ve %90) amorf PLA katarak PLA/P(St-ko-MMA) harmanı elde etmişlerdir. 195 °C'de tek vidalı bir ekstrüder aracılığı ile PLA<sub>x</sub>/P (St-ko-MMA)<sub>y</sub> harman peletleri kullanılarak filamentler üretilmiştir. PLA<sub>x</sub>/P(St-ko-MMA)<sub>y</sub> harmanlarının termal ayrışması amorf PLA ve P(St-ko-MMA) kopolimeri ile karşılaştırıldığında daha düşük olduğu gözlemlenmiştir. PLA<sub>x</sub>/P(St-ko-MMA)<sub>y</sub> harmanları amorf PLA'dan daha yüksek bir young modülüne sahiptir. Özellikle PLA<sub>90</sub>/P(St-ko-MMA)<sub>10</sub> harmanının young modülü P(St-ko-MMA)'e oldukça yakın çıkmıştır. Buruga ve Kalathi (2018) yaptıkları çalışmada, camlar için ultrason destekli çözelti harmanlama yöntemi ile HNT esaslı polimerik nanokompozit kaplamalar (PS/HNT ve PMMA/HNT) sentezlemişlerdir. Kaplanacak malzemeler dört farklı soda-kireç türüne daldırılarak kaplanmıştır. Kaplanmış cam numuneleri doğal spektral özelliklerini değiştirmeden, kaplanmamış numunelere kıyasla daha yüksek çizilme direnci ve yüzey hidrofobikliği sergilediği gözlemlenmiştir. Nanokompozitlerin mekanik özellikleri saf polimere kıyasla artmıştır ve kaplamaların termal ve çizilme direncindeki iyileşme HNT'nin polimer matrisine dahil edilmesine bağlanmıştır.

Dünyamızın çevre kirlilikleri giderek artmaktadır. Plastikten kaynaklanan çevre kirliliği büyük bir paya sahiptir. Plastik atıkları ortadan kaldırmak için çeşitli yollar arasında biyolojik bozunma ve biyolojik geri dönüşüm çekici çözümler olarak görünmekte ve biyolojik olarak bozunabilir polimerlerin atık sorununun çözümünde yaygın olarak kullanımı kabul edilen bir görüş haline gelmiştir (Fukushima ve diğ., 2009). Biyobozunur polimerler, son zamanlarda bilim camiasında büyük ilgi görmektedir ve günümüzde en bilinen biyobozunur polimer PLA'dır. Biyolojik olarak parçalanabilen sentetik polimerler ailesinde PLA, yenilenebilir kaynaklardan elde edilen, iyi geliştirilmiş, ticari olarak temin edilebilen biyobazlı ve biyolojik

olarak parçalanabilen alifatik termoplastik bir polyesterdir (Nofar ve diğ., 2021).

Bu çalışmada St ve MMA monomerleri kullanılarak P(St-ko-MMA) kopolimeri sentezi emülsiyon polimerizasyonu yöntemi ile gerçekleştirilmiştir. Katkı malzemesi olarak tüpsü yapıya sahip HNT kullanılmıştır. Nano boyuttaki HNT organosülfür bileşiği olan DMSO ile yüzey modifikasyonu gerçekleştirilmiştir. Deneyler 70 °C sıcaklıkta sentezlenen polimerin kalitesi için sabit tutulmaya çalışılmıştır. Değişik oranlarda PLA/P(St-ko-MMA) ve HNT kullanarak in-situ ve çözelti harmanlama yöntemleri ile PLA/P(St-ko-MMA)/HNT nanokompozitleri sentezlenmiştir. Çalışmada yapıya katılan HNT ile malzemenin kullanım ömrü süresince mekanik ve termal dayanımın artırılması, kullanılan PLA ile de çevre kirliliğinin hızlı artış göstermesine neden olan polimerler yerine doğada kısa sürede bozunabilen ve çevreyi az kirleten biyobozunur malzeme üretilmesi amaçlanmıştır. Elde edilen nanokompozitlerin % monomer dönüşümleri ve viskozite ortalama molekül ağırlıkları hesaplanıp ardından termal özellikleri termogravimetrik analiz (TGA), yapısal özellikleri taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve sertliği Shore D cihazları ile karakterize edilerek bu malzemelerin yüzey, termal ve mekanik özellikleri incelenmiştir.

## 2. Materyal ve Yöntem

P(St-ko-MMA) kopolimeri ve PLA/P(St-ko-MMA)/HNT nanokompozit sentezinde kullanılan kimyasal maddeler, Halloysit (Sigma-Aldrich, nanotüp 30-70 nm x 1-3 µm), PLA (Total-Corbion, Luminy LX175, %96), Stiren (Merck, %99), Metil metakrilat (Merck, >%99), Potasyum persülfat (Merck, %99), Toluen (Merck, %99,5), Metanol (Merck, %99,9), Dimetil sülfoksit (Merck, 99%), Tetrahidrofuran (Merck, %99,5) olarak sıralanabilir.

### 2.1. HNT Modifikasyonu

HNT'nin yapıya daha iyi şekilde katılabilmesi için DMSO ile arasında yüzey modifikasyonu gerçekleştirilmiştir. HNT'nin yüzey modifikasyonu için 10 g HNT ve 100 ml DMSO 250 ml'lik cam erlene konulup ultrasonik homojenizatörde 5 dakika karıştırılmıştır. Daha sonra geri soğutucu takılarak manyetik karıştırıcı ile 8 saat boyunca 150 rpm hızda karıştırma işlemi gerçekleştirilmiştir. Karıştırma işlemi bittikten sonra elde edilen numune vakum yardımı ile süzülmüştür. Süzme işleminden sonra numune içindeki DMSO'yu uzaklaştırmak amacıyla izopropil alkol ile iki kere yıkama işlemi yapıp süzülmüştür. Süzülen kil bir gün boyunca oda sıcaklığında bekletildikten sonra vakum etüvde 50 °C'de 5 saat kurutma işlemine tabi tutulmuştur (Silis, 2019).

### 2.2. Kopolimer ve Nanokompozit Sentezi

Emülsiyon polimerizasyonu ile kopolimer ve in-situ üretim yöntemi ile nanokompozitlerin sentezi rodajlarına sırasıyla geri soğutucu, azot gazı ve termometre bağlanmış dört boyunlu cam balon reaktörde gerçekleştirilmiştir. Reaktörün ısıtılması için mantolu ısıtıcı kullanılmıştır. Monomer olarak molce eşit oranda (1:1) St ve MMA, başlatıcı olarak KPS (başlatıcı/monomer molar oranı 1/400), emülsiyon yapıcı madde olarak SDS, dağıtma ortamı olarak da deiyonize su kullanarak emülsiyon polimerizasyonu yöntemi ile P(St-ko-MMA) kopolimeri sentezlenmiştir. Nanokompozit sentezinde in-situ ve çözelti harmanlama olmak üzere iki farklı üretim metodu kullanılmıştır. In-situ yönteminde takviye malzemesi yapıya kopolimerleşmenin en başında katılarak nanokompozit yapıyı fiziksel olarak güçlendirirken, çözelti harmanlama yönteminde ise sentezlenmiş kopolimere çözücü yardımıyla dışarıdan takviye malzemesi eklenmektedir. Bu iki yöntem kullanılarak mekanik ve termal dayanım üzerindeki etkileri gözlemlenmiştir. Nanokompozitler elde edildikten sonra viskozite ortalama molekül ağırlıkları ve % monomer dönüşümleri hesaplanmıştır. Nanokompozit malzemelerin karakterizasyon yöntemi ile termal, yapısal, yüzey ve mekanik karakterizasyon özellikleri incelenmiştir. Termal özellikleri termogravimetrik analiz (TGA), yapısal özellikleri taramalı elektron mikroskobu (SEM) ve mekanik özellikleri Shore D sertlik ölçüm yöntemi ile analiz edilmiştir.

### 2.3. PLA/P(St-ko-MMA)/HNT Nanokompozit Sentezi

Bu çalışmada 1,59 g SDS ve HNT (kütlece %5 ve %10) bir behere alınarak manyetik karıştırıcıda karıştırılmıştır. Ardından HNT'nin iyi dağılabilmesi için 10 dakika daha ultrasonik homojenizatörde karıştırılıp ardından karışıma 1,29 g KPS başlatıcısı, molce eşit oranda (1:1) 17,85 ml St ve 17,25 ml MMA eklenerek 5 dakika daha manyetik karıştırıcıda karıştırılmıştır ve karıştırma işlemi sonunda oluşan çözelti dört boyunlu cam balon reaktöre alınarak mantolu ısıtıcıya yerleştirilmiştir. 4 saat boyunca 70 °C'de sıcaklık sabit tutularak polimerizasyon gerçekleştirilmiştir. Deney süresince düzenli olarak her saat deney düzeneğinden 5 ml'lik numuneler alınarak 50 ml metanol içerisinde çöktürülerek P(St-ko-MMA)/%5 HNT ve P(St-ko-MMA)/%10 HNT nanokompozitleri sentezlenmiştir. Daha sonra sentezlenen bu nanokompozitlerin viskozite ortalama molekül ağırlıkları ve % monomer dönüşümü değerleri hesaplanmıştır.

Sentezlenen bu nanokompozitlere kütlece %30 ve %50 oranlarında PLA eklenerek in-situ ve çözelti harmanlama yöntemleri ile 30:70 PLA/P(St-ko-MMA)/HNT ve 50:50 PLA/P(St-ko-MMA)/HNT nanokompozitleri elde edilmiştir. In-situ yöntemi ile

30:70 PLA/P(St-ko-MMA)/%5 HNT nanokompozit sentezlemek için 1,2 gr PLA, 8,4 ml tetrahidrofur (THF) ve 3,6 ml dimetilformamid (DMF) bir behere alınıp PLA çözünene kadar manyetik karıştırıcıda karıştırılmıştır. Aynı zamanda işlem sürerken daha önce in-situ yöntemi ile sentezlenmiş olan P(St-ko-MMA)/%5 HNT'den 2,8 gr alınıp üzerine 21 ml THF eklenip manyetik karıştırıcıda karıştırılmıştır. Karıştırma işlemi tamamlandıktan sonra PLA bulunan erlen içerisinde karışım boşaltılmıştır. Elde edilen karışımlar petri kaplarına dökülüp, oda sıcaklığında bekletilerek 30:70 PLA/P(St-ko-MMA)/%5 HNT nanokompozit plakalarının oluşması sağlanmıştır. Daha sonra aynı işlemler farklı miktardaki malzemeler ile 30:70 PLA/P(St-ko-MMA)/%10 HNT, 50:50 PLA/P(St-ko-MMA)/%5 HNT ve 50:50 PLA/P(St-ko-MMA)/%10 HNT nanokompozit plakaları elde etmek için tekrarlanmıştır.

Çözelti harmanlama yöntemi ile 30:70 PLA/P(St-ko-MMA)/%5 HNT nanokompoziti sentezlemek için ise bir behere 1,2 gr PLA, 8,4 ml THF ve 3,6 ml DMF bir behere alınıp PLA manyetik karıştırıcıda karıştırılmıştır. Bir yandan da emülsiyon polimerizasyonu yöntemi ile sentezlenen P(St-ko-MMA)'dan 2,8 gr tartılıp, bir behere alınıp üzerine 21 ml THF ve 0,14 gram m-HNT eklenip ultrasonik homojenizatörde karıştırılmıştır. Karıştırma işlemi tamamlandıktan sonra PLA bulunan erlen içerisinde karışım boşaltılmıştır. Daha sonra elde edilen karışımlar petri kaplarına dökülmüştür. Petriler oda sıcaklığında bekletilerek plakaların oluşması sağlanmıştır. Daha sonra aynı işlemler farklı miktardaki malzemeler ile 30:70 PLA/P(St-ko-MMA)/%10 HNT, 50:50 PLA/P(St-ko-MMA)/%5 HNT ve 50:50 PLA/P(St-ko-MMA)/%10 HNT nanokompozit plakaları elde etmek için tekrarlanmıştır.

#### 2.4. Oluşturulan Plakaların Toprağa Gömülmesi

Çözelti harmanlama ve in-situ yöntemleri ile sentezlenen nanokompozitlerden yaklaşık 50 mm çapında 2 mm kalınlığında plakalar hazırlanmıştır. Bu plakalar tartılıp ilk ağırlıkları kaydedildikten sonra her bir plaka polimer kaybını en aza indirebilmek adına ince filelere sarılmış toprak yüzeyinden 6 cm derinlik ayarlanarak gömülmüştür. Toprak içeriklerine göre mikroorganizma türlerinin değişmesi ve bu mikroorganizmalarında % biyobozunurluk değerlerini etkilemesinden dolayı humuslu ve kaktüs olmak üzere 2 çeşit toprak kullanılmıştır. Toprağa gömülen plakalar eşit derecede güneş ışığına maruz bırakılmış ve bozunma döneminde toprağın nemini koruyabilmek için haftada bir kez 500 ml su verilmiştir. 6 ay boyunca 30 günde bir plakalar topraktan çıkartılarak saf su ile yıkanıp, 1,5 saat 60 °C'de vakum etüv ile kurutulmuş ve ardından tartılarak değerleri kaydedilmiştir.

### 3. Deneysel Sonuçlar

#### 3.1. % Monomer Dönüşüm Sonuçları

Emülsiyon polimerizasyonu esnasında deney süresince her saat başı düzenli olarak 5 ml'lik numuneler alınarak 50 ml metanol içerisinde çöktürülmüştür. Çöktürülen numuneler daha sonra vakum altında süzülüp, etüvde kurutulduktan sonra tartılarak % monomer dönüşüm değerleri hesaplanmıştır ve Tablo 1'de verilmiştir.

Tablo 1. Sentezlenen Kopolimer ve Nanokompozitlerin % Monomer Dönüşüm Değerleri

Reaksiyon süresi	P(St-ko-MMA)	P(St-ko-MMA)/HNT	
		%5 HNT	%10 HNT
1.Saat	59,61	69,48	66,90
2.Saat	61,85	72,57	69,95
3.Saat	63,68	75,83	78,77
4.Saat	65,88	76,39	79,89

Tablo 1 incelendiğinde P(St-ko-MMA) kopolimeri ve kütlece %5 HNT ve %10 HNT içerikli P(St-ko-MMA)/HNT sentezi sırasında reaksiyonun birinci saatinden itibaren monomer dönüşümünün kademeli olarak arttığı görülmüştür. HNT katkılı nanokompozitlerde % monomer dönüşümü saf kopolimere göre daha yüksek çıkmıştır.

#### 3.2. Viskozite Ortalama Molekül Ağırlığı Sonuçları

Emülsiyon polimerizasyonu sonunda elde edilen numunelerin Ubbelohde viskozimetresi ve Mark-Houwink Eşitliği ( $[\eta] = K \bar{M}_v^\alpha$ ) kullanılarak viskozite ortalama molekül ağırlık ( $\bar{M}_v$ ) değerleri hesaplanmış ve sonuçlar Tablo 2'de verilmiştir (Silis, 2019).

Tablo 2. Sentezlenen Kopolimer ve Nanokompozitlerin Viskozite Ortalama Molekül Ağırlığı Sonuçları

Numune	Yöntem	$\bar{M}_v$ (g/mol)
P(St-ko-MMA)	Emülsiyon Polimerizasyonu	407551
P(St-ko-MMA)/%5 HNT	In-situ	145086
P(St-ko-MMA)/%10 HNT	In-situ	135138

Tablo 2'de görüldüğü gibi P(St-ko-MMA) kopolimerinin in-situ yöntemiyle sentezlenmiş HNT katkılı nanokompozitlere göre viskozite ortalama molekül ağırlık değeri daha yüksek çıkmıştır. P(St-ko-MMA) kopolimerinin molekül ağırlığı 407551 g/mol bulunmuştur. Polimerler yapıları gereği uzun zincirlidir ve bu uzun zincirlerden dolayı yüksek molekül ağırlığına sahiptir. Nanokompozit sentezi sırasında polimere kil gibi nano boyutlardaki yapıların takviye edilmesi polimerizasyon sırasında uzun zincirlerin oluşumunu engeller (Silis, 2019). Böylelikle sentezlenen nanokompozitlerin zincir yapısı daha kısa olduğu için

kopolimere göre molekül ağırlığı düşüktür. Bu çalışmada sentezlenen P(St-ko-MMA) kopolimerlerine HNT katkı malzemeleri takviye edildikçe oluşan nanokompozitlerin zincir yapılarının kopolimere göre daha kısa ve molekül ağırlıklarının daha düşük olduğu görülmüştür. Eklenen HNT miktarı arttıkça molekül ağırlığı düşmüştür. Benzer bir sonuç PS/SBA-15 kompozitlerinin in-situ emülsiyon polimerizasyonu yöntemi ile sentezlendiği Chen ve diğ. (2012) tarafından yapılan çalışmada da elde edilmiştir. SBA-15 miktarının artmasıyla polimerin molekül ağırlığı azalmış, monomer dönüşümü ise artmıştır. Reaksiyon ortamında bulunan mezogözenekli silikanın serbest radikal hareketini engellediğini, böylece zincir büyümesini kısıtlandığını belirtmişlerdir. Ne kadar çok silika parçacığı kullanılırsa, molekül ağırlığının o kadar düşük olduğu görülmüştür.

### 3.3. Sertlik Analizi Sonuçları

Nanokompozitlerin sertlikleri oluşturulan plakaların Bareiss HPE II markalı Shore D sertlik cihazıyla ölçülerek bulunmuştur. Sertlik sonuçları Tablo 3'te verilmiştir. In-situ ve çözelti harmanlama yöntemleri ile sentezlenmiş nanokompozitlerde HNT'nin artışıyla birlikte sertlik değerinin arttığı gözlemlenmiştir. Sertlikteki bu artış daha homojen bir dağılımın elde edildiğini göstermiş ve daha yüksek sertlik sonuçları elde edilmiştir. Ayrıca %30 PLA içeren nanokompozitler %50 PLA içeren nanokompozitlere göre daha iyi mekanik dayanım göstermiştir. PLA miktarının artışı mekanik dayanımı negatif yönde etkilemiştir. Bu konuda Mendoza-Duarte ve diğ. (2021) tarafından yapılan bir çalışmada P(St-ko-MMA)'nın uyumlulaştırıcı bir madde olarak önemli bir role sahip olduğu ve PLA'nın işlenebilirliğini artırdığı belirtilmiştir. Eriyik harmanlama yöntemi ile 15 dakika karıştırma süresinde hazırladıkları kütlece 99/1 ve 70/30 PLA/P(St-ko-MMA) örneklerinden PLA içeriği fazla olan örneğin mekanik dayanımı daha düşük çıkmıştır. Ancak her iki örneğinde mekanik dayanımı saf PLA'dan daha yüksek çıkmıştır. Teo ve Chow (2016) tarafından yapılan bir başka çalışmada PLA/PMMA/HNT (kütlece 70/30 PLA/PMMA) nanokompozitleri eriyik harmanlama yöntemi ile sentezlenmiş ve PLA'nın PMMA ile harmanlanmasından sonra darbe dayanımının yaklaşık %13,4 oranında arttığı gözlemlenmiştir. Bunun nedenini sert parçacıkların sertleştirme etkisi olarak belirtmişlerdir. PLA/PMMA karışımının darbe dayanımı HNT ilavesi ile daha da iyileşmiş ve 5 phr HNT ilavesi durumunda karışımın darbe dayanımı %9,6 oranında artmıştır. Darbe dayanımının artmasını, HNT'lerin darbenin neden olduğu çatlak parçasını engellemede rol oynamasına bağlamışlardır. Tuna ve Akkoyun (2022) tarafından yapılan bir çalışmada ise dört farklı oranda PLA/Poliamid 6 (PA6) (20:80, 30:70, 40:60, 70:30) içeren polimer karışımları arasında PLA oranının

artmasıyla mekanik özelliklerin zayıfladığı gözlemlenmiştir.

Nanokompozit elde etme yöntemleri kendi içinde karşılaştırıldığında ise çözelti harmanlama yöntemi ile sentezlenen nanokompozitlerin in-situ yöntemi ile elde edilen nanokompozitlere göre daha iyi mekanik dayanıma sahip olduğu görülmüştür. Çözelti harmanlama yöntemi ile HNT'nin homojen dağılımının daha iyi sağlandığı düşünülmektedir.

Tablo 3. Sentezlenen Kopolimer ve Nanokompozitlerin Shore D Sertlik Değerleri

	Numune	Yöntem	Sertlik Değeri
Kütlece 30:70 PLA/P(St-ko-MMA)	PLA/P(St-ko-MMA)	Emülsiyon Polimerizasyonu	19,3
	PLA/P(St-ko-MMA) /%5 HNT	Çözelti Harmanlama	24,1
	PLA/P(St-ko-MMA) /%10 HNT	Çözelti Harmanlama	25,5
	PLA/P(St-ko-MMA) /%5 HNT	In-Situ	21,2
Kütlece 50:50 PLA/P(St-ko-MMA)	PLA/P(St-ko-MMA) /%10 HNT	In-Situ	23,9
	PLA/P(St-ko-MMA)	Emülsiyon Polimerizasyonu	17,8
	PLA/P(St-ko-MMA) /%5 HNT	Çözelti Harmanlama	18,7
	PLA/P(St-ko-MMA) /%10 HNT	Çözelti Harmanlama	23,8
Kütlece 70:30 PLA/P(St-ko-MMA)	PLA/P(St-ko-MMA) /%5 HNT	In-Situ	18,4
	PLA/P(St-ko-MMA) /%10 HNT	In-Situ	21,9

### 3.4. Toprağa Gömme Testi Sonuçları

Toprağa gömülerek ayda bir çıkartılıp tartımı alınan nanokompozitlerin 6. ay sonundaki % kütle kaybı değerleri Tablo 4'te verilmiştir. Bu çalışmada humuslu toprağa gömülen plakalarda kaktüs toprağına gömülen plakalara kıyasla daha fazla kütle kaybı gözlemlenmiştir. Bu durum da humus bakımından zengin toprağın bozunma için daha iyi bir ortam sağladığı görülmüştür. HNT katkısı arttıkça saf kopolimere kıyasla daha fazla bozunma meydana gelmiştir. Bunun nedenine killerin ester bağlar kırma konusunda etkili olduğu ve miktarı arttıkçada bozunmayı arttırdığı söylenebilir (Fukushima ve diğ., 2013).



Tablo 4. Kopolimer ve Nanokompozitlerin % Kütle Kaybı Değerleri

Yöntem	Numune	Humuslu	Kaktüs	Humuslu	Kaktüs
		Toprak 30:70	Toprağı 30:70	Toprak 50:50	Toprağı 50:50
Emülsiyon Polimerizasyonu	PLA/P(St-ko-MMA)	10,90	6,04	19,67	10,38
In-situ	PLA/P(St-ko-MMA)/%5 HNT	19,10	12,48	29,00	16,36
	PLA/P(St-ko-MMA)/%10 HNT	21,62	12,56	23,15	22,27
Çözelti harmanlama	PLA/P(St-ko-MMA)/%5 HNT	15,65	7,79	20,88	11,97
	PLA/P(St-ko-MMA)/%10 HNT	17,34	9,12	24,81	11,92

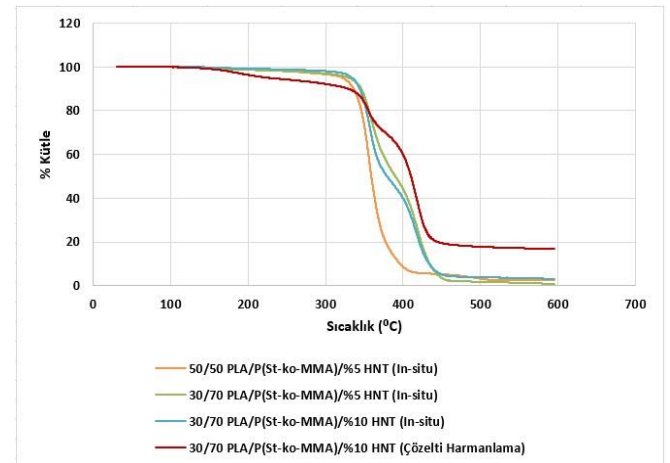
Ayrıca bozunmanın PLA miktarının artışıyla doğru orantılı olduğu tespit edilmiştir. %50 oranında PLA katkılı nanokompozitlerde biyobozunma miktarı daha fazla çıkmıştır. Genel olarak PLA'nın bozunması iki aşamalı bir süreçle gerçekleşir. Bozunmanın ilk aşamaları sırasında, yüksek moleküler ağırlıklı PLA zincirleri, daha düşük moleküler ağırlıklı oligomere hidrolize olur. Bu reaksiyon asitler veya bazlar tarafından hızlandırılabilir ve ayrıca hem sıcaklıktan hem de nemden etkilenir (Gürler, 2019). Toprak içerisindeki mikroorganizmalar bu düşük moleküler ağırlıklı bileşenleri karbondioksit (CO<sub>2</sub>), su ve humusa dönüştürerek bozunma sürecini başlatır. Bu nedenle, humus toprağının içerdiği mikroorganizmalar ve plakaların gömülmüş olduğu saksıların hafta bir sulanarak eşit derecede güneş ışına maruz bırakılması PLA'nın bozunmasını artıran faktörlerdendir. Nanokompozit sentezinde kullanılan in-situ ve çözelti harmanlama yöntemleri kendi içinde kıyaslandığında ise in-situ ile üretilen plakalarda % kütle kaybı miktarının daha yüksek olduğu görülmüştür.

### 3.5. Termogravimetrik Analiz Sonuçları

Elde edilen P(St-ko-MMA) ve PLA/P(St-ko-MMA)/HNT nanokompozitlerinin TGA analizleri Perkin Elmer STA 6000 markalı TGA-FTIR cihazı ile yapılmıştır. Şekil 1'de verilen TGA termogramlarından in-situ ve çözelti harmanlama yöntemiyle sentezlenen nanokompozitlerin başlangıç bozunma sıcaklığı, bitiş bozunma sıcaklığı, %50 kütle kaybı sıcaklığı ve bozunmadan kalan kütle miktarı değerleri okunarak Tablo 5'te verilmiştir.

Silis (2019)'in yapmış olduğu çalışmada yarı kesikli reaktörde emülsiyon polimerizasyonu yöntemi ile P(St-ko-MMA) kopolimeri sentezlemiştir. Daha sonra sentezlediği kopolimeri TGA'ya tabii tutmuş ve saf kopolimerin 310 °C civarlarında bozunmaya başladığını ve 438 °C'de bozunmanın bittiğini gözlemlemiştir. Saf P(St-ko-MMA) kopolimerine ait bu değerler referans alınıp yapılan bu deneysel çalışmada in-situ yöntemi ile sentezlenen 30:70 PLA/P(St-ko-MMA)/%5 HNT, 30:70 PLA/P(St-ko-MMA)/%10 HNT ve çözelti harmanlama yöntemi ile sentezlenen 30:70 PLA/P(St-ko-MMA)/%10 HNT nanokompozitleri ile kıyaslandığında başlama ve bitiş bozunma sıcaklıklarının HNT takviyesiyle arttığı görülmüş ve sentezlenen nanokompozitlerin saf kopolimere göre termal dayanımının daha iyi olduğu

sonucuna varılmıştır. Fakat in-situ yöntemi ile sentezlenen eşit oranda PLA ve P(St-ko-MMA) içeren HNT katkılı 50:50 PLA/P(St-ko-MMA)/%5 HNT nanokompozitinin bitiş bozunma sıcaklığının saf kopolimere göre daha düşük çıkmış ve artan PLA'nın termal dayanımı olumsuz yönde etkilediği düşünülmüştür. Ertaş ve diğ. (2019) yapmış olduğu çalışmada eriyik harmanlama ve ardından sıkıştırma kalıplama yöntemini kullanarak doğal elyaf dolgululu PLA-HNT nanokompozitleri sentezlemiştir.



Şekil 1. Sentezlenen Nanokompozitlere ait TGA Termogramları

Çalışmada saf PLA'nın TGA'sı incelendiğinde saf PLA'nın %5 kütle kaybı sıcaklığının 334.8 °C, %10 kütle kaybı sıcaklığının 344.9 °C ve maximum kütle kaybı sıcaklığının 373.4 °C olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca Zhao ve diğ. (2013) yapmış olduğu çalışmada PLA'nın termal bozunmasını azot atmosferi altında gerçekleştirilen TGA ile ağırlık kaybı açısından araştırmış ve saf PLA'nın tek aşamalı termal bozunmasının başlangıç sıcaklığının 320 °C olduğunu görmüştür. Yapılan bu deneysel çalışmada ise in-situ ve çözelti harmanlama yöntemleri ile sentezlenmiş PLA/P(St-ko-MMA)/HNT nanokompozitlerinde PLA'nın bozunma sıcaklıkları 417 °C olup bütün nanokompozitlerde aynı çıkmıştır. Ertaş ve diğ. (2019)'nin ve Zhao ve diğ. (2013)'nin yapmış olduğu çalışmalarda saf PLA'nın bozunma sıcaklığının 320 °C-373 °C aralığında olup bu çalışmada 417 °C olması kırılmalı yapıya sahip PLA'nın katılan HNT ile termal dayanımının arttığı görülmüştür.

Tablo 5. Nanokompozitlerin TGA Sonuçları

Numune	Yöntem	Başlangıç Bozunma Sıcaklığı (°C)		Bitiş Bozunma Sıcaklığı (°C)	%50 Kütle Kaybı Sıcaklığı (°C)	Bozunmadan Kalan Kütle Miktarı (%)
		1.	2.			
50:50 PLA/P(St-ko-MMA)/%5 HNT	In-Situ	362	-	406	359	2,39
30:70 PLA/P(St-ko-MMA)/%5 HNT	In-Situ	365	417	445	388	0,83
30:70 PLA/P(St-ko-MMA)/%10 HNT	In-Situ	359	417	449	378	3,13
30:70 PLA/P(St-ko-MMA)/%10 HNT	Çözelti Harmanlama	360	417	448	407	16,73

Çözelti harmanlama yöntemi ile sentezlenen 30:70 PLA/P(St-ko-MMA)/%10 HNT nanokompozitinde ve in-situ yöntemi ile sentezlenen 30:70 PLA/P(St-ko-MMA)/%5 HNT ve 30:70 PLA/P(St-ko-MMA)/%10 HNT nanokompozitleri incelendiğinde bu üç nanokompozitin TGA diyagramında iki aşamalı bir bozunma profili gözlemlenmiştir. Bu nanokompozitlerin ilk başlangıç bozunma sıcaklıkları birbirine çok yakın ve P(St-ko-MMA)'ya aittir. İkinci bozunma sıcaklığı her üç nanokompozitte de 417 °C olup PLA'nın bozunmasını göstermektedir. In-situ yöntemi ile sentezlenen 30:70 PLA/P(St-ko-MMA)/HNT nanokompozitlerini kendi içinde kıyaslandığında yapısına eklenen HNT miktarının artmasıyla termal dayanımın arttığı, %10 HNT içerikli nanokompozitin %5 HNT içerikli nanokompozite göre daha yüksek sıcaklıklara kadar dayanabildiği görülmüştür.

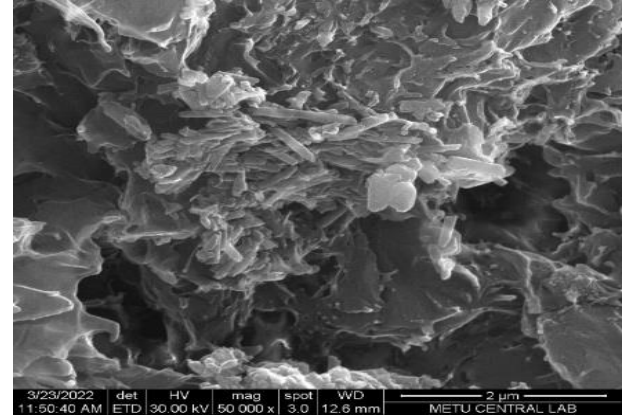
Sonuç olarak yapıya eklenen HNT'nin miktarının artması termal dayanımını bir miktar arttırdığı gözlemlenmiştir. 50:50 PLA/P(St-ko-MMA)/%5 HNT nanokompozitinde ise PLA miktarının artışıyla termal dayanımın düşmesi PLA'nın nanokompozitin termal dayanımını negatif yönde etkilediği şeklinde yorumlanmıştır. In-situ ve çözelti harmanlama olmak üzere her iki yöntemle sentezlenen 30:70 PLA/P(St-ko-MMA)/%10 HNT nanokompozitlerinin başlangıç ve bitiş bozunma sıcaklık değerleri kıyaslandığında değerlerin birbirine çok yakın olduğu gözlemlenmiştir. Bu sebeple termal dayanım konusunda her iki yöntemin birbirine üstünlüğü olmadığı görülmüştür.

### 3.6. Taramalı Elektron Mikroskopu Sonuçları (SEM)

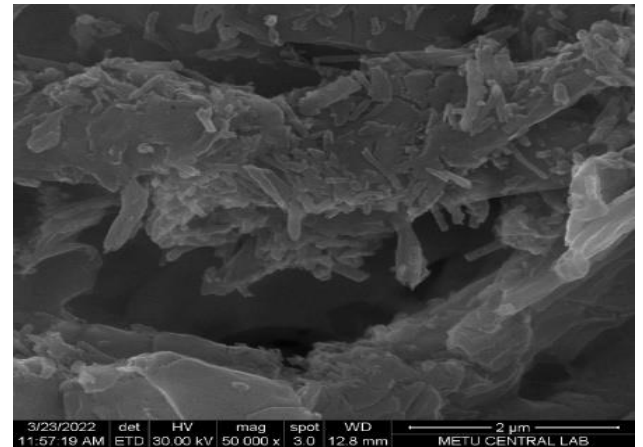
HNT, dış yüzeyi negatif yüklü siloksan (Si-O-Si) gruplarından, iç yüzeyi pozitif yüklü alüminol (Al-OH) gruplarından oluşan içi boş tüpsü geometriye sahiptir.

Şekil 2'de çözelti harmanlama yöntemi ile

Şekil 3'de in-situ yöntemi ile sentezlenmiş olan 30:70 PLA/P(St-ko-MMA)/%10 HNT nanokompozitlerine ait SEM analizlerinden görüntülere yer verilmiştir. Bu görüntülerde HNT'nin tüpsü yapısını koruduğu ve nanokompozitlerde çoklu tabakalar ve çeşitli boyutlarla homojen bir dağılım sergilediği görülmüştür.



Şekil 2. Çözelti Harmanlama Yöntemi ile Sentezlenen 30:70 PLA/P(St-ko-MMA)/%10 HNT Numunesi SEM Görüntüsü (2µm)



Şekil 3. In-situ Yöntemi ile Sentezlenen 30:70 PLA/P(St-ko-MMA)/%10 HNT Numunesi SEM Görüntüsü (2µm)

### 4. Sonuç ve Tartışma

Sonuç olarak bu çalışmada, PLA/P(St-ko-MMA) /HNT nanokompozitlerinin mekanik, termal ve yüzey özelliklerinin artan HNT ile arttığı görülmüştür. Modifiye edilmiş HNT katkı malzemesinin polimer matris içerisinde düzgün bir dağılım sergilemesi ve polimer dokusuna girebilmesi önem taşımaktadır. Ayrıca katılan PLA miktarları kendi arasında kıyaslandığında PLA miktarının artışı mekanik ve termal dayanımı negatif yönde etkilediği görülmüş fakat biyobozunma konusunda pozitif etkisi olduğu saptanmıştır. Çözelti harmanlama yöntemiyle

sentezlenen nanokompozitlerde iyi mekanik dayanım görülür iken biyobozunmada in-situ yöntemiyle sentezlenen nanokompozitler daha iyi performans sergilemiştir. Ayrıca nanokompozit sentezinde kullanılan in-situ ve çözelti harmanlama yöntemlerinin termal dayanım konusunda ise birbirine üstünlüğü olmadığı görülmüştür. Yapılan çalışmada yapıya katılan HNT ile malzemenin kullanım ömrü süresince mekanik ve termal dayanımın artırılması, kullanılan PLA ile de atıklar nedeniyle çevre kirliliğinin hızlı artış göstermesine neden olan petrol bazlı polimer kullanım miktarının azaltılarak doğada kısa sürede bozunabilen ve çevreyi az kirleten biyobozunur malzeme üretilmesi amacına ulaşılmıştır. HNT aynı zamanda PLA'dan kaynaklanan biyobozunmayı hızlandırmıştır.

### Teşekkür

TGA ve SEM analizleri ODTÜ Merkez Laboratuvarında gerçekleştirilmiştir.

### Araştırmacıların Katkısı

Bu çalışmada; D. İSKENDER ve A. ALTINTEN, bilimsel araştırmanın deneylerinin yapılması, deney sonuçlarının yorumlanması, makalenin oluşturulması konularında katkı sağlamıştır.

### Çıkar Çatışması

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir.

### Kaynaklar

Basan, S. (2013). Polimer kimyası. Ankara: Gazi Kitabevi.

Bhanvase, B. A., Sonawane, S. H., Pinjari, D. V., Gogate, P. R. & Pandit, A. B. (2014). Kinetic studies of semibatch emulsion copolymerization of methyl methacrylate and styrene in the presence of high intensity ultrasound and initiator. *Chemical Engineering and Processing*, 85, 168-177. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.cep.2014.08.014>

Buruga, K. & Kalathi, J. T. (2018). A facile synthesis of halloysite nanotubes based polymer nanocomposites for glass coating application. *Journal of Alloys and Compounds*, 735, 1807-1817. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.11.211>

Buruga, K. & Kalathi, J. T. (2019). Synthesis of poly (styrene-co-methyl methacrylate) nanospheres by ultrasound-mediated pickering nanoemulsion polymerization. *Journal of Polymer Research*, 26, 210. Doi: <https://doi.org/10.1007/s10965-019-1871-9>

Chen, Z., Song, C., Bai, R., Wei, Z. & Zhang, F. (2012). Effects of mesoporous SBA-15 contents on the properties of polystyrene composites via in-situ

emulsion polymerization. *Journal of Polymer Research*, 19, 9846-9854. Doi: <https://doi.org/10.1007/s10965-012-9846-0>

Ertaş, M., Altuntas, E. & Cavdar, A. D. (2019). Effects of halloysite nanotube on the performance of natural fiber filled poly(lactic acid) composites. *Polymer Composites*, 1-10. Doi: <https://doi.org/10.1002/pc.25284>

Fukushima, K., Abbate, C., Tabuani, D., Gennari, M. & Camino, G. (2009). Biodegradation of poly (lactic acid) and its nanocomposites. *Polymer Degradation and Stability*, 94, 1646-1655. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2009.07.001>

Fukushima, K., Tabuani, D., Arena, M., Gennari, M. & Camino, G. (2013). Effect of clay type and loading on thermal, mechanical properties and biodegradation of poly(lactic acid) nanocomposites. *Reactive and Functional Polymers*, 73, 540-549. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.reactfunctpolym.2013.01.003>

Gürler, N. (2019). Çapraz bağlı nişasta ve iki tabakalı polilaktik asit (PLA) biyofilmlerinin hazırlanarak, yapısal, mekanik ve kontrollü kompost ortamında biyobozunumlarının incelenmesi (Doktora Tezi). Dicle Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Diyarbakır.

Hamad, K., Kaseem, M. & Deri, F. (2010). Rheological and mechanical properties of poly(lactic acid)/polystyrene polymer blend. *Polymer Bulletin*, 65, 509-519. Doi: <https://doi.org/10.1007/s00289-010-0354-2>

Khezri, K., Haddadi-Asl, V., Mamaqani, H. & Kalajahi M. (2012). Synthesis of clay-dispersed poly (styrene-co-methyl methacrylate) nanocomposite via miniemulsion atom transfer radical polymerization: A reverse approach. *Journal of Applied Polymer Science*, 124, 2278-2286. Doi: <https://doi.org/10.1002/app.35279>

Mendoza-Duarte, M. E., Estrada-Moreno, I. A., Garcia-Casillas, P. E. & Vega-Rios, A. (2021). Stiff-elongated balance of PLA-based polymer blends. *Polymers*, 13, 4279. Doi: <https://doi.org/10.3390/polym13244279>

Nofar, M., Salehiyan, R. & Ray, S. S. (2021). Influence of nanoparticle and their selective localization on the structure and properties of polylactide-based blend nanocomposites. *Composites Part B*, 215, 108845. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2021.108845>

- Ramani A. & Dahoe A. E. (2014). On flame retardancy in polycaprolactam composites by aluminium diethylphosphinate and melamine polyphosphate in conjunction with organically modified montmorillonite nanoclay. *Polymer Degradation and Stability*, 105, 1-11. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2014.03.020>
- Silis, H. T. (2019). Yarı kesikli bir reaktörde poli(stiren-ko-metilmetakrilat)/halloysit nanokompozit sentezi ve karakterizasyonu (Yüksek Lisans Tezi). Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Solorio-Rodríguez, L. E. & Vega-Rios, A. (2019). Filament extrusion and its 3D printing of poly (lactic acid) / poly (styrene-co-methyl methacrylate) blends. *Applied Sciences*, 9, 5153. Doi: <https://doi.org/10.3390/app9235153>
- Teo, Z. X. & Chow, W. S. (2016). Impact, thermal, and morphological properties of poly(lactic acid)/poly(methyl methacrylate)/halloysite nanotube nanocomposites. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 55(14), 1474-1480. Doi:<https://doi.org/10.1080/03602559.2015.1132464>
- Tuna, S. & Akkoyun, M. (2022). Correlation Between Surface, Thermal, Mechanical and Morphological Properties of Polylactic Acid/Polypropylene and Polylactic Acid/Polyamide 6 Blends. *International Journal of Engineering Research and Development*, 14(1), 84-94. Doi: <https://doi.org/10.29137/umagd.950070>
- Yalçınkaya, S. E. (2008). Nanokil-polimer kompozitlerinin sentez ve karakterizasyonu (Yüksek Lisans Tezi). Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Zhao, H., Cui, Z., Sun, X., Turng, L. H. & Peng, X. (2013). Morphology and properties of injection molded solid and microcellular polylactic acid/polyhydroxybutyrate-valerate (PLA/ PHBV) blends. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 52, 2569-2581. Doi: <https://doi.org/10.1021/ie301573y>

## BOZULMA ETKİLİ VE TEK BAKIM EKİPLİ BAKIM ÇİZELGELEME PROBLEMİ İÇİN BİR MATEMATİKSEL MODEL

Tuğba SARAÇ<sup>1\*</sup>, Feriştah ÖZÇELİK<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Eskişehir, ORCID No : <https://orcid.org/0000-0002-8115-3206>

<sup>2</sup> Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Endüstri Mühendisliği Bölümü, Eskişehir, ORCID No : <https://orcid.org/0000-0003-0329-203X>

Anahtar Kelimeler	Öz
İlişkisiz paralel makine çizelgeleme problemi Kaynak kısıtı Planlı bakım Süre bozulması	<i>Karmaşıklığı arttırması nedeniyle makine çizelgeleme literatüründe genellikle, bakım ve kaynak kısıtları göz ardı edilmekte ya da sadece birisi dikkate alınmaktadır. Ancak özellikle bakım sırasında kaynak ihtiyacının olduğu durumlarda bu iki kısıt grubunun birlikte ele alınması kritiktir. Bu çalışmada ilişkisiz paralel makine çizelgeleme problemi, bakım ve kaynak kısıtları altında ele alınmıştır. Ele alınan problemde bakım, bir zaman penceresi içinde gerçekleştirilmelidir ve süresi, bakım zamanına bağlı olarak bozulmaktadır. Bu problemin çözümü için bir matematiksel model önerilmiştir. Önerilen modelin hangi boyuta kadar çözülebildiğini analiz edebilmek amacıyla rassal türetilen test problemleri kullanılmıştır. Önerilen model ile en fazla 25 işli problemlerin çözümlerini elde edebilmek mümkün olabilmektedir.</i>

## A MATHEMATICAL MODEL FOR MAINTENANCE SCHEDULING PROBLEM WITH DETERIORATION AND SINGLE MAINTENANCE CREW

Keywords	Abstract
Unrelated parallel machine scheduling problem Resource constraint Preventive maintenance Deterioration	<i>Because of its complexity, maintenance, and resource constraints are often ignored in the machine scheduling literature, or only one of them is considered. However, it is critical to consider these two constraint groups together, especially when resources are needed during maintenance. In this study, the unrelated parallel machine scheduling problem is handled under both maintenance and resource constraints. In the considered problem, maintenance must be performed within a time window and its duration increases as the maintenance time gets longer. A mathematical model is proposed to solve this problem. Randomly generated test problems are used to analyze the problem size that can be solved. With the proposed model, it was possible to obtain solutions for problems up to 25 jobs.</i>

Araştırma Makalesi

Başvuru Tarihi

: 03.02.2023

Kabul Tarihi

: 18.10.2023

Research Article

Submission Date

: 03.02.2023

Accepted Date

: 18.10.2023

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

<https://doi.org/10.31796/ogummf.1247165>

### 1. Giriş

Sanayi açısından verimliliği ve karlılığı yüksek tutacak biçimde üretim sürecinin aksamadan ilerleyebilmesi açısından bakım faaliyetleri önemlidir (Dündar, Sarıççek ve Yazıcı, 2021). Üretim sektöründe işletmeler makinelerini ve üretim ekipmanlarını çalışabilir durumda tutabilmek için planlı bakım çalışmaları kapsamında bakımların çizelgelenmesine gereksinim duymaktadırlar. Planlı bakımda her bir makine ya da ekipmanın bakımının ne zaman gerçekleştirileceği belirlenmektedir. Bakım zamanı pek çok açıdan önemlidir. Sözelimi çok sık bakım yapılması hem bakım süresince makinenin durmasına hem de bakım maliyetlerinin artmasına yol açarken,

bakımın seyrek yapılması ise arızalara ya da zamanla üretimin veriminin düşmesine ve bakım süresinin uzamasına (bozulmalara) yol açabilmektedir. Bakım zamanı ve sıklığı genellikle geçmiş arıza verilerinden yararlanılarak sabit aralıklı ya da bir zaman penceresi içinde esnek olarak planlanabilir. Eğer bakımın yapılabileceği bir zaman penceresi belirlenmiş ise, bakımın bu zaman penceresinin başında ya da sonunda başlaması bakım süresini etkileyebilir. Bu durum literatürde genellikle bakım zamanına bağlı bozulma olarak adlandırılmaktadır.



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/>).



Bakım faaliyetlerinde sıklıkla özel cihazlar veya uzmanlaşmış bir bakım ekibi gibi ek kaynaklar gerekmektedir. Bu kaynakları temin etmek çok maliyetli olabileceği için gerçek hayatta tüm makinelerin bakımını gerçekleştirecek tek bir bakım kaynağı bulunabilir. Eğer kaynak tek ise aynı anda birden fazla bakımın yapılması mümkün olmamaktadır. Bu nedenle bakımlar planlanırken çakışmalarına özen gösterilmelidir.

Bu çalışmada, makine çizelgeleme problemi ile bakımların ve bakım kaynağının çizelgenmesi problemleri birlikte ele alınmıştır. Literatürde en çok ele alınan makine çizelgeleme problemleri tek makine, paralel makine, akış tipi ve atölye tipi çizelgelemedir. Aynı işi yapabilen makinelerin çizelgenmesi, paralel makine çizelgeleme problemi olarak adlandırılmaktadır. Paralel makineler bir işi farklı sürelerde işliyor ise ilişkisizdir. Bu problem, paralel makine çizelgeleme problemlerinin en genel halidir.

Modern üretim sistemlerinde üretim çizelgenirken bakım faaliyetlerinin ve kaynak kısıtlarının dikkate alınması önemli olmasına rağmen problemin karmaşıklığını artırdığından, çizelgeleme literatüründeki çoğu çalışma, makinelerin her zaman kullanılabilir olduğunu varsayar veya kaynakları göz ardı eder. Geurtsen, Didden, Adan, Atan ve Adan (2022) tarafından belirtildiği gibi hem planlı bakım hem de kaynakları birlikte dikkate alan çalışmalar az sayıdadır. Bakım planlamasını dikkate alan çalışmalar ise genellikle bir makinede sadece bir bakımın yapılabildiği durumu dikkate almışlardır. Erişilebilen literatürden farklı olarak bu çalışma, ilişkisiz paralel makine çizelgeleme probleminde bir makinede birden fazla bakıma izin verilmesi, bakım süresinin bakım zamanına bağlı bozulması ve tek bakım ekibinin olması durumlarını birlikte dikkate alan ilk çalışmadır.

Çalışmanın izleyen bölümünde yapılan literatür taraması verilmiş, üçüncü bölümde, ele alınan problem tanımlanmış ve geliştirilen matematiksel model sunulmuştur. Deneysel sonuçlar dördüncü bölümde, sonuç ve öneriler ise son bölümde tartışılmıştır.

## 2. Bilimsel Yazın Taraması

Planlı bakım ve kaynakları birlikte dikkate alan ilk makine çizelgeleme çalışması 2000 yılında yapılmıştır (Lee ve Chen, 2000). Bu tarihten günümüze kadar yapılan çalışmalar Tablo 1'de sunulmuştur.

Planlı bakım ve kaynak kısıtlarının eklenmesi, çizelgeleme problemlerinin karmaşıklığını arttırmaktadır. Bu nedenle, Tablo 1'den görülebileceği gibi, bu kısıtları birlikte ele alan çalışmaların çoğu, özdeş paralel makine ortamındadır ( $P$ ).

Son işin tamamlanma zamanı ( $C_{enb}$ ) amaç fonksiyonu, makine verimliliğini arttırmaya hizmet ettiği için üretici odaklı bir amaç fonksiyonudur. Bu nedenle birçok

firma tarafından göz ardı edilemez. Ayrıca bu amaç fonksiyonu, paralel makine çizelgeleme problemlerinde makine yüklerinin dengelenmesine de hizmet etmektedir. Bu nedenle, çizelgeleme literatüründe en sık tartışılan amaç fonksiyonlarından biridir. Benzer şekilde Tablo 1'de görüldüğü gibi  $C_{enb}$ , planlı bakım ve kaynak kısıtlarının birlikte ele alındığı çalışmalarda en sık kullanılan amaç fonksiyonudur. Bu çalışmada literatürle uyumlu bir şekilde amaç fonksiyonu  $C_{enb}$  olarak alınmıştır.

Planlı bakımların çizelgenmesi, iki şekilde değerlendirilebilir; bir zaman penceresinde esnek veya sabit. İlgili literatürdeki çalışmaların çoğunda, bakım zamanlarının sabit olduğu varsayılmıştır, yani bakımların başlangıç ve bitiş zamanları önceden belirlenmiştir. Bununla birlikte, uygulamada, bakımların başlama zamanları genellikle esnek (Wang ve Yu, 2010). Bu, bakımların başlama zamanının önceden bilinmediği ve verilen zaman penceresi içinde belirlenmesi gerektiği anlamına gelmektedir. Lee ve Chen (2000) ve Yoo ve Lee (2016) özdeş paralel makine ortamında, Wang ve Yu (2010) atölye ortamında bakım başlama zamanlarının bir zaman penceresinde esnek olduğu durumu dikkate almıştır. Bu çalışmada ilk defa bu durum ilişkisiz paralel makine çizelgeleme probleminde ele alınmıştır.

Literatürde ilişkisiz paralel makine çizelgeleme probleminde planlı bakım ve kaynak kısıtlarını birlikte dikkate alan beş çalışma vardır. Liu ve Wang (2016), kontrol edilebilir işlem sürelerinin ve bozulan bakım sürelerinin olduğu ilişkisiz paralel makine çizelgeleme problemini incelemişlerdir. Planlama ufku boyunca, her makinede en fazla bir bakım faaliyeti planlanabilmektedir. Ayrıca, bakım faaliyetinin başlama zamanı ertelenirse, gerçekleştirilmesi gereken bakım faaliyetinin süresi de artacaktır. Problemin çözümü için polinom zamanlı bir algoritma önermişlerdir. Rebai, Kacem ve Adjallah (2013), tek bakım ekipli ilişkisiz paralel makine çizelgeleme problemini ele almışlardır. Planlama ufku boyunca her makineye bir kez bakım yapılmaktadır. İşlerin ağırlıklı tamamlanma sürelerinin toplamı ile önleyici bakım maliyetlerinin en küçüklmesi amaçlanmıştır. Problemin çözümü için bir matematiksel model, genetik algoritma ve sezgisel algoritma önermişlerdir. Tavana, Zarook ve Santos-Arteaga (2015) çalışmalarında, işlem sürelerinde sıraya bağlı bozulmaların olduğu ilişkisiz paralel makinelerde bakımların çizelgenmesi problemini ele almışlardır. Problemin çözümü için üç aşamalı bir çözüm yaklaşımı önermişlerdir. İlk aşamada, bakım ekibinin seçimi için bulanık AHP yaklaşımı kullanılmıştır. İkinci aşamada, çok amaçlı problemi iki amaca indirgemek için TOPSIS yaklaşımı kullanılmıştır. Üçüncü aşamada, problem önerilen iki amaçlı tamsayı doğrusal programlama modeli kullanılarak çözülmüştür. Li, Xiong ve Lei (2022) çalışmalarında ek kaynakların ve bakımların

dikkate alındığı ilişkisiz paralel makine çizelgeleme problemini ele almışlardır. Problemin çözümü için bir yapay arı koloni algoritması önermişlerdir. Lei ve He (2022) kaynak kısıtlı ilişkisiz paralel makine çizelgeleme problemini planlı bakım çizelgeleme problemi ile birlikte ele almışlardır. Amaç fonksiyonu, son işin tamamlanma zamanının enküçüklenmesidir. Ele alınan problemin çözümü için uyarlamalı yapay arı kolonisi algoritması önermişlerdir.

Bu beş çalışma genel olarak değerlendirildiğinde, Liu ve Wang (2016), Rebai ve diğ. (2013) ve Li ve diğ. (2022)

bir makinede en fazla bir bakım yapılabileceğini varsaymışlardır. Ancak bizim çalışmamızda bu varsayım kaldırılmış ve planlama periyodunda birden çok bakım olabilmeye izin verilmiştir. Tavana ve diğ. (2015) ve Lei ve He (2022) ise çalışmalarında bakım sürelerinin bozulması durumunu ele almamışlardır. Bu açıdan bakıldığında, literatürde birden fazla bakıma izin verilen ve bakım sürelerinin zamana bağlı bozulduğu ilişkisiz paralel makine çizelgeleme problemi ilk defa bu çalışmada ele alınmıştır.

Tablo 1. Planlı Bakım ve Kaynakları Birlikte Ele Alan Makine Çizelgeleme Çalışmaları

Kaynak	Makine Ortamı					Amaç Fonksiyonu		Çözüm Yöntemi	
	S	P	R	F	J	$C_{enb}$	diğer		
Touat, Tayeb ve Benhamou (2022)	✓						✓	GLS	
Shabtay (2022)	✓						✓	✓	YA
Lee ve Chen (2000)			✓					✓	B&B
Yoo ve Lee (2016)			✓					✓	DP
Belkaid, Dahane, Sair ve Khatab (2014)			✓				✓		GA, MIP
Wong, Chan ve Chung (2012)			✓				✓		GA
Wong, Chan ve Chung (2014)			✓				✓		GA
Wang ve Liu (2015)			✓				✓		GA
Fu, Chan, Niu, Chung ve Qu (2019)			✓				✓		PSO
Liu ve Wang (2016)				✓			✓	✓	PTA
Rebai ve diğ. (2013)				✓				✓	MIP, GA, H
Tavana ve diğ. (2015)				✓				✓	AHP, TOPSIS, IP
Li ve diğ. (2022)				✓			✓		ABC
Lei ve He (2022)				✓			✓		ABC
Aramon Bajestani ve Beck (2015)					✓			✓	ITA
Boufellouh ve Belkaid (2020)					✓		✓	✓	NSGA-II, BOPSO
Fekri, Heydari ve Mazdeh (2023)					✓			✓	GA
Wang ve Yu (2010)						✓	✓	✓	FBS
Fu, Chan, Niu, Chung ve Bi (2017)						✓	✓		PSO

S: tek makine, P: özdeş paralel makine, R: ilişkisiz paralel makine, F: akış tipi, J: atölye tipi, GLS: rehberli yerel arama, GA: genetik algoritma, B&B: dal-sınır algoritması, YA: yaklaşım algoritması, PTA: polinom zamanlı algoritma, DP: dinamik programlama, H: sezgisel, MIP: karma tamsayılı programlama, IP: tamsayılı programlama, FBS: filtreli ışın arama, PSO: parçacık sürü algoritması, ABC: yapay arı kolonisi, NSGA-II: bastırılmamış sınıflandırılmalı genetik algoritma, BOPSO: iki amaçlı parçacık sürü algoritması, ITA: bütünlük iki aşamalı algoritma.

### 3. Problem Tanımı ve Geliştirilen Matematiksel Model

Ele alınan problemde  $n$  iş,  $m$  adet paralel makineden birisinde işlem görmelidir. Her işin her makinedeki işlem süresi ( $p_{ji}$ ) farklı olabilir. Her makine bir zaman penceresi içinde bakım görmelidir. Bir başka deyişle, ardışık iki bakım arasında geçebilecek en küçük süre ( $g_i$ ) ve en büyük süre ( $\gamma_i$ ) bilinmektedir. Eğer makine en küçük süre sonunda bakıma girerse, bakım süresi normal bakım süresi ( $b_i$ ) olarak adlandırılır. Bu süre uzadıkça bakım süresi de belli bir oran ( $a_i$ ) dahilinde bozulmaya uğrar ve uzar. Bu nedenle bakımın zaman penceresi içinde kalmak koşuluyla ne zaman yapılacağı belirlenmelidir. Bir makinede ardışık iki bakım arasında geçen süre periyot olarak adlandırılmıştır. Tüm işler hazırlık süresine gereksinim duymaktadır. Her periyodun ilk sırasındaki işin hazırlık süresi ( $r_{ji}$ ) sadece makineye bağlı iken ikinci ve sonraki sıralardaki işlerin hazırlık süreleri ( $s_{hji}$ ), hem makine

*Küme ve indisler:*

$N = \{1, 2, \dots, n\}$  iş kümesi.  $j, h, k \in N$ .

$M = \{1, 2, \dots, m\}$  makine kümesi.  $u, i \in M$ .

$L = \{1, 2, \dots, \Omega\}$  periyot kümesi.  $f, l \in L$ .

*Parametreler:*

$p_{ji}$ :  $j$ . işin  $i$ . makinedeki işlem süresi

$r_{ji}$ :  $j$ . iş  $i$ . makinede ilk iş ise hazırlık süresi

$s_{hji}$ :  $h$ . işten  $j$ . işe  $i$ . makinede geçiliyorsa hazırlık süresi

$\theta$ : yeterince büyük pozitif sayı

$b_i$ :  $i$ . makinenin normal bakım süresi

$g_i$ :  $i$ . makinede ardışık iki bakım arasında geçebilecek en küçük süre

$\gamma_i$ :  $i$ . makinede ardışık iki bakım arasında geçebilecek en büyük süre

$a_i$ :  $i$ . makinenin bakım süresinin bozulma oranı

hem de sıraya bağlıdır. Bakımları gerçekleştirecek sadece bir bakım ekibi mevcuttur. Aynı anda iki makinede bakım yapılması gerekirse bakım ekibi sadece bir bakımı gerçekleştirebilmektedir. Bu nedenle mümkün olduğunca bakımların çakıştırılmaması gerekir.

Klasik paralel makine çizelgeleme probleminde işlerin hangi makinenin hangi sırasına atandığının belirlenmesi yeterli iken, ele alınan problemde, işlerin hangi makinenin hangi periyodunun hangi sırasına atandığı belirlenmelidir. Ayrıca her bir makinedeki bakımların çizelgenmesi gerekliliği, bakım sürelerinde bakım zamanına bağlı bozulmalar ve çakışma kısıtları, problemi klasik versiyondan çok daha karmaşık hale getirmektedir.

Ele alınan problemin matematiksel modeli ve bu modelde kullanılan küme, indis, parametre ve karar değişkeni tanımları aşağıda verilmiştir.

*Karar değişkenleri:*

$x_{jkl}$ :  $j$ . iş,  $i$ . makinedeki  $l$ . periyotta  $k$ . sırada yer alıyorsa, 1; diğer durumda, 0.

$\pi_{li}$ :  $i$ . makinede  $l$ . periyot tanımlanacaksa, 1; diğer durumda, 0.

$\mu_{li}$ :  $i$ . makinede  $l$ . bakım yapılacaksa, 1; diğer durumda, 0.

$Q_{li}^P$ :  $i$ . makinedeki  $l$ . periyodun süresi.

$C_j$ :  $j$ . işin tamamlanma zamanı.

$C_{enb}$ : son işin tamamlanma zamanı  $C_{enb} = enb\{C_j\}$ .

$C_{li}^P$ :  $i$ . makinedeki  $l$ . periyodun tamamlanma zamanı.

$e_{li}^B$ :  $i$ . makinedeki  $l$ . bakımın başlama zamanı.

$C_{li}^B$ :  $i$ . makinedeki  $l$ . bakımın tamamlanma zamanı.

$\gamma_{li}^B$ :  $i$ . makinedeki  $l$ . bakımın süresi.

$w_{ftui}$ :  $i$ . makinedeki  $l$ . bakım bitmeden  $u$ . makinedeki  $f$ . bakım başlamıyorsa, 0;  $u$ . makinedeki  $f$ . bakım bitmeden  $i$ . makinedeki  $l$ . bakım başlamıyorsa, 1.

$$enk z = C_{enb} \tag{1}$$

$$\sum_{k \in N} \sum_{l \in L} \sum_{i \in M} x_{jkli} = 1 \quad \forall j \in N \tag{2}$$

$$\sum_{j \in N} x_{j1li} = \pi_{li} \quad \forall l \in L, \forall i \in M \tag{3}$$

$$x_{jkli} \leq \pi_{li} \quad \forall j \in N, \forall k \in N, \forall l \in L, \forall i \in M \tag{4}$$

$$\mu_{li} \leq \pi_{li} \quad \forall l \in L, \forall i \in M \tag{5}$$

$$\mu_{li} \geq \pi_{l+1,i} \quad \forall l \in L, \forall i \in M \tag{6}$$

$$\sum_{j \in N} x_{j,k+1,li} - \sum_{h \in N} x_{hkli} \leq 0 \quad \forall k \in N, k < n, \forall l \in L, \forall i \in M \tag{7}$$

$$\pi_{l+1,i} - \pi_{li} \leq 0 \quad \forall l \in L, l < \Omega, \forall i \in M \tag{8}$$

$$C_j \geq r_{ji} + p_{ji} - \theta(1 - x_{j1li}) \quad \forall j \in N, \forall i \in M \tag{9}$$

$$C_j \geq C_{l-1,i}^B + r_{ji} + p_{ji} - \theta(1 - x_{j1li}) \quad \forall j \in N, \forall l \in L, l > 1, \forall i \in M \tag{10}$$

$$C_j \geq C_h + s_{hji} + p_{ji} - \theta(2 - x_{jkli} - x_{h,k-1,li}) \quad \forall h, j, k \in N, h \neq j, k > 1, \forall l \in L, \forall i \in M \tag{11}$$

$$C_{li}^P \geq C_j - \theta \left( 1 - \sum_{k \in N} x_{jkli} \right) \quad \forall j \in N, \forall l \in L, \forall i \in M \tag{12}$$

$$Q_{li}^P \geq C_{li}^P - \theta(1 - \pi_{li}) \quad \forall l \in L, l = 1, \forall i \in M \tag{13}$$

$$Q_{li}^P \geq C_{li}^P - C_{l-1,i}^B - \theta(1 - \pi_{li}) \quad \forall l \in L, l > 1, \forall i \in M \tag{14}$$

$$Q_{li}^P \geq g_i \pi_{li} \quad \forall l \in L, \forall i \in M \tag{15}$$

$$Q_{li}^P \leq \gamma_i \pi_{li} \quad \forall l \in L, \forall i \in M \tag{16}$$

$$e_{li}^B \geq C_{li}^P \quad \forall l \in L, \forall i \in M \tag{17}$$

$$C_{li}^B \geq e_{li}^B + b_i + (Q_{li}^P - g_i) a_i - \theta(1 - \mu_{li}) \quad \forall l \in L, \forall i \in M \tag{18}$$

$$y_{li}^B \geq C_{li}^B - e_{li}^B - \theta(1 - \mu_{li}) \quad \forall l \in L, \forall i \in M \tag{19}$$

$$C_{li}^B \leq e_{fu}^B + \theta(2 - \mu_{li} - \mu_{fu}) + \theta w_{ftui} \quad \forall l \in L, \forall f \in L, \forall i \in M, \forall u \in M, u \neq i \tag{20}$$

$$C_{fu}^B \leq e_{li}^B + \theta(2 - \mu_{li} - \mu_{fu}) + \theta(1 - w_{ftui}) \quad \forall l \in L, \forall f \in L, \forall i \in M, \forall u \in M, u \neq i \tag{21}$$

$$C_{enb} \geq C_j \quad \forall j \in N \tag{22}$$

$$x_{jkli} \in \{0,1\} \quad \forall j \in N, \forall k \in N, j \neq k, \forall l \in L, \forall i \in M \tag{23}$$

$$\pi_{li}, \mu_{li} \in \{0,1\} \quad \forall l \in L, \forall i \in M \tag{24}$$

$$w_{ftui} \in \{0,1\} \quad \forall l \in L, \forall f \in L, \forall i \in M, \forall u \in M, u \neq i \tag{25}$$

$$C_j, C_{enb} \geq 0 \quad \forall j \in N \tag{26}$$

$$Q_{li}^P, C_{li}^P, e_{li}^B, C_{li}^B, y_{li}^B \geq 0 \quad \forall l \in L, \forall i \in M \tag{27}$$

Amaç fonksiyonu (1), son işin tamamlanma zamanının enküçüklenmesidir. (2) numaralı kısıt,  $j$ . işin mutlaka bir makinenin bir periyodunun bir sırasına atanmasını garanti eder. (3) numaralı kısıt,  $i$ . makinede,  $l$ . periyot tanımlandıysa bu periyoda mutlaka bir ilk iş atar. (4) numaralı kısıt,  $i$ . makinede  $l$ . periyot tanımlandıysa bu periyoda iş atanabilmesine izin verir. (5) numaralı kısıt,  $i$ . makinede  $l$ . periyot tanımlandıysa o makinede  $l$ . bakımın yapılabilmesini sağlar. (6) numaralı kısıt, bir sonraki periyodun tanımlanabilmesi için öncesinde bakım yapılmasını garanti eder. (7) numaralı kısıt, her bir makinedeki işlerin sıra atlamadan atanmasını sağlar. (8) numaralı kısıt, aynı makinedeki periyotların sıra atlamadan tanımlanmasını sağlar. (9) numaralı kısıt, her makinenin ilk periyodunun ilk sırasına atanan işlerin tamamlanma zamanlarını hesaplatma kısıtıdır. İkinci ve sonraki periyotlar için yazılan (10) numaralı kısıt ilgili periyodun ilk sırasına ve (11) numaralı kısıt ikinci ya da sonraki sırasına atanan işlerin tamamlanma zamanlarını hesaplatma kısıtlarıdır. (12) numaralı kısıt,  $i$ . makinedeki  $l$ . periyodun tamamlanma zamanının hesaplanması içindir. (13) numaralı kısıt, her makinenin ilk periyodunun süresini hesaplatma kısıtıdır. (14) numaralı kısıt ise makinelerin ikinci ve sonraki periyotlarının sürelerini hesaplamaktadır. (15) numaralı kısıt  $i$ . makinenin  $l$ . periyodunun süresinin en az  $i$ . makinede ardışık iki bakım arasında geçebilecek en küçük süre kadar olmasını sağlarken, (16) numaralı kısıt ise bu sürenin en fazla  $i$ . makinede ardışık iki bakım arasında geçebilecek en büyük süre kadar olmasına izin verir. (17) numaralı kısıt, bakımların başlama zamanlarını hesaplatma kısıtıdır. (18) numaralı kısıt, bakımların tamamlanma zamanlarını hesaplatma kısıtıdır. (19) numaralı kısıt, gerçekleşen bakım süresini hesaplar. (20) ve (21) numaralı kısıtlar, bakımların çakışmalarını önlemek için yazılan ya/ya da kısıtlarıdır. Farklı makinelerde yer alan her iki bakımdan ya ilkinin ya da ikincisinin diğeri başlamadan tamamlanmasını garanti eder. (22) numaralı kısıt,  $C_{enb}$  değerini hesaplamaktadır. (23)-(27) numaralı kısıtlar, karar değişkenlerinin tanım kümelerini göstermektedir.

Bu çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.

#### 4. Deneysel Sonuçlar

Önerilen matematiksel model GAMS 24.0.2'de kodlanmıştır. Test problemleri 10800 saniye süre limiti ile CPLEX çözücüsü kullanılarak çözülmüştür. Tüm testler Intel (R) Core (TM) i7- 5700HQ CPU@2.70 GHz işlemcisi, 8 GB belleği olan bir bilgisayarda yapılmıştır. Bölüm 4.1'de, türetilen test problemlerinin özellikleri, bölüm 4.2'de örnek problem, bölüm 4.3'te elde edilen test sonuçları ve bölüm 4.4'te ise problem özelliklerinin son işin tamamlanma zamanına etkisi verilmiştir.

#### 4.1. Test Problemleri

Önerilen matematiksel modelin makul sürede hangi boyuta kadar çözüm sağlayabildiğini gösterebilmek için toplam 90 test problemi türetilmiştir.  $p_{ji}, r_{ji}, s_{nji}, b_i, g_i$  parametreleri 1 ile 100 arasında kesikli düzgün dağılıma uygun olarak türetilmiştir. Geri kalan parametrelerin özellikleri Tablo 2'de verilmiştir. Tablo 2'den de görülebileceği gibi iş sayısı ( $n$ ) 10 ile 30 arasında 5'er artacak şekildedir. Makine sayısı ( $m$ ) ise 2 ve 3 olarak belirlenmiştir.  $i$ . makinede ardışık iki bakım arasında geçebilecek en büyük süre ( $\gamma_i$ ) 100 ile  $100(\Delta - 1)$  arasında kesikli düzgün dağılıma göre türetilmiştir.  $\Delta$  parametresinin formülü Tablo 2'de verilmiştir.  $i$ . makinenin bakım süresinin bozulma oranı ( $a_i$ )  $\varphi$ 'ye bağlı olarak Tablo 2'de verildiği gibi türetilmiştir.  $\varphi$ , bozulma oranının hesaplanmasında kullanılan bir parametredir. Üç tipi vardır. İlk tipte, 1,2, ikinci tipte 1,5 ve üçüncü tipte 1,8 değerini almaktadır.

Test problemleri,  $n$ - $m$ - $\varphi$  tipi-örnek numarası şeklinde adlandırılmıştır. Örneğin 10-2-1-1 adlı test problemi, 10 işin ve iki makinenin olduğu  $\varphi$ 'nın 1. tip olduğu ilk örnek problemidir.

Tablo 2. Test Problemlerinin Özellikleri

$n$	10, 15, 20, 25, 30
$m$	2, 3
$\gamma_i$	$U\{100, 100(\Delta - 1)\}; \Delta = \begin{cases} 3; & \lfloor \frac{n}{m} \rfloor \leq 2 \\ \lfloor \frac{n}{m} \rfloor; & dd. \end{cases}$
$a_i$	$U[\varphi - 0.1, \varphi + 0.1]; \varphi \in \{1, 2, 1.5, 1.8\}$

#### 4.2. Örnek Problem

Örnek problemde 10 iş iki paralel makinede çizelgelenecektir. İşlerin makine bazında ilk iş hazırlık süreleri ( $r_{ji}$ ) ve işlem süreleri ( $p_{ji}$ ) Tablo 3'te, sıra bağımlı hazırlık süreleri ( $s_{nji}$ ) Tablo 4'te, makine bazında normal bakım süreleri ( $b_i$ ), iki bakım arasında geçebilecek en küçük ( $g_i$ ) ve enbüyük ( $\gamma_i$ ) süreler ve bozulma oranları ( $a_i$ ) Tablo 5'te verilmiştir.

Tablo 3. Örnek Problem için  $r_{ji}$  ve  $p_{ji}$  Parametre Değerleri

$j/i$	$r_{ji}$		$p_{ji}$	
	1	2	1	2
1	70	75	75	37
2	37	9	82	14
3	21	52	11	94
4	62	2	96	6
5	91	98	51	75
6	41	84	1	68
7	90	58	27	80
8	36	93	88	86
9	79	91	80	37
10	39	50	76	52



Tablo 4. Örnek Problem için  $s_{hji}$  Parametre Değerleri

$h/j$	$i=1$										$i=2$									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0	83	67	32	44	72	76	76	23	74	0	89	39	75	38	63	76	20	12	39
2	60	0	85	77	30	53	7	50	84	79	41	0	9	97	51	92	56	88	56	32
3	75	84	0	16	43	50	93	14	75	45	40	81	0	58	52	19	19	64	46	60
4	44	75	4	0	70	7	72	36	66	64	91	91	79	0	88	75	69	3	76	95
5	88	9	18	5	0	60	47	40	22	70	40	77	51	27	0	3	92	92	64	92
6	67	79	25	45	29	0	51	65	73	24	15	9	55	79	13	0	4	67	16	31
7	79	41	78	11	51	57	0	62	25	26	25	77	34	98	38	6	0	34	25	65
8	89	47	21	35	99	37	73	0	79	54	78	81	71	41	90	79	22	0	92	11
9	83	15	55	21	62	93	90	14	0	34	31	29	59	55	8	13	49	37	0	52
10	38	10	51	56	89	36	9	59	28	0	54	75	96	35	46	35	69	18	34	0

Tablo 5. Örnek Problem için  $g_i, \gamma_i, b_i, a_i$  Parametre Değerleri

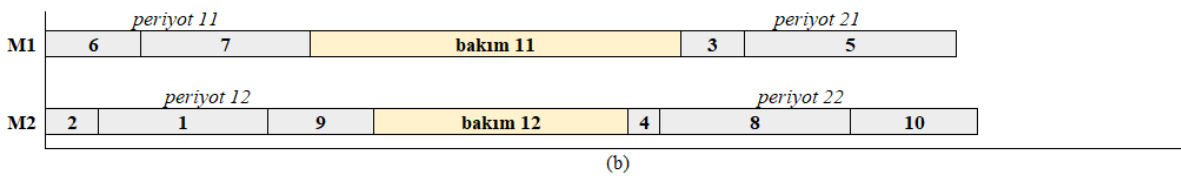
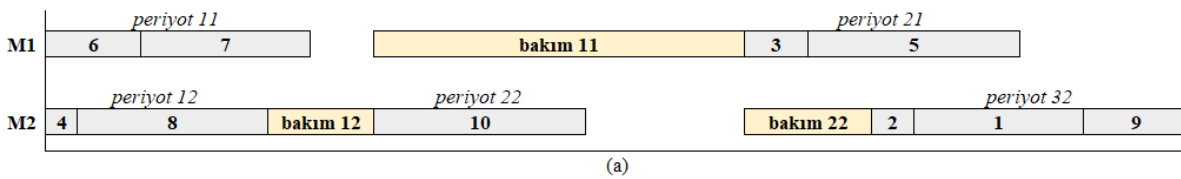
$i$	$g_i$	$\gamma_i$	$b_i$	$a_i$
1	16	135	43	1,22
2	61	193	6	1,28

Örnek problem, tek bakım ekibinin olduğu ve bu nedenle bakımların çakışmalarının istenmediği durum (a) ve kaynak kısıtının olmadığı durum (b) için ayrı ayrı çözülmüştür. Her iki durum için de sırasıyla 4632 ve 1429 saniye içinde eniyi çözüme ulaşılmıştır.

$C_{enb}$  değerleri ise sırasıyla 527,44 ve 429,92 olarak bulunmuştur. Elde edilen çözümler Tablo 6'da ve ilgili çözümlere karşı gelen Gantt şemaları ise Şekil 1'de verilmiştir. Şekil 1'den de görülebileceği gibi, tek bakım ekibi olduğunda, bakımlar çakıştırılamayacağından makine 1 (M1) bakım öncesinde makine 2 (M2)'deki bakımın bitmesini beklemek zorunda kalmıştır. Benzer şekilde, M2'de ikinci bakım öncesinde de ilk makinadaki bakımın bitmesi beklenmiştir. Bu nedenle son işin tamamlanma zamanı bakım ekibi kısıtının olmadığı duruma (b) kıyasla artmıştır.

Tablo 6. Örnek Problem için Elde Edilen Sonuçlar

$l$	$i$	(a)							(b)						
		$\pi_{li}$	$\mu_{li}$	$Q_{li}^B$	$C_{li}^B$	$e_{li}^M$	$C_{li}^M$	$y_{li}^M$	$\pi_{li}$	$\mu_{li}$	$Q_{li}^B$	$C_{li}^B$	$e_{li}^M$	$C_{li}^M$	$y_{li}^M$
1	1	1	1	120	120,00	149,08	318,96	169,88	1	1	120	120,00	120	289,88	169,88
1	2	1	1	97	97,00	97,00	149,08	52,08	1	1	150	150,00	150	269,92	119,92
2	1	1	0	126	444,96	-	-	-	1	0	126	415,88	-	-	-
2	2	1	1	102	251,08	318,96	377,44	58,48	1	0	160	429,92	-	-	-
3	2	1	0	150	527,44	-	-	-	0	0	-	-	-	-	-



Şekil 1. Örnek Problem için Gantt Şeması

### 4.3. Test Sonuçları

Test problemleri önerilen matematiksel model ile çözülmüş ve 10 işli problemlerin sonuçları Tablo 7’de,

Tablo 7. 10 İşli Problemlerin Sonuçları

<i>m=2</i>		
<i>problem</i>	<i>z</i>	<i>t</i>
10-2-1-1	527,44	7461
10-2-1-2	480,27	10800
10-2-1-3	428,17	10800
10-2-2-1	673,35	10800
10-2-2-2	608,17	10800
10-2-2-3	720,16	10800
10-2-3-1	560,21	10800
10-2-3-2	444,88	10800
10-2-3-3	678,80	10800

Tablo 8. 15 İşli Problemlerin Sonuçları

<i>m=2</i>		
<i>problem</i>	<i>z</i>	<i>t</i>
15-2-1-1	-	10800
15-2-1-2	-	10800
15-2-1-3	-	10800
15-2-2-1	1003,96	10800
15-2-2-2	1128,31	10800
15-2-2-3	1106,91	10800
15-2-3-1	1470,68	10800
15-2-3-2	1373,20	10800
15-2-3-3	-	10800

Tablo 7’den de görülebileceği gibi 10 işli problemlerin 6 tanesinin (10-2-1-1, 10-3-1-1, 10-3-1-2, 10-3-1-3, 10-3-3-1, 10-3-3-2) süre limiti içinde eniyi çözümüne ulaşılmıştır. Geri kalan problemler için uygun çözümlere ulaşılmıştır. Klasik ilişkisiz paralel makine çizelgeleme problemlerinde kısa sürede eniyi çözümlerine ulaşılabilen 10 işli problemlerin, ele alınan problemde süre limitinin 10800 saniye gibi çok kısa olmayan bir süre alınmasına rağmen önemli bir kısmının sadece uygun çözümlerine ulaşılabilmiş olması problemin karmaşıklığını ne kadar arttığını ortaya koymuştur.

Tablo 8’den de görülebileceği gibi 15 işli problemlerin hiçbirinin süre limiti içinde eniyi çözümüne ulaşılamamıştır. 18 problemde sadece 8 tanesinin uygun çözümleri elde edilebilmiştir.

Problem boyutu büyüdükçe uygun çözüm elde edilebilen problem sayısı hızla azalmıştır. Tablo 9’dan da görülebileceği gibi 20 işli problemlerin sadece ikisi, 25 işli problemlerin ise sadece birisi süre limiti içinde

15 işli problemlerin sonuçları Tablo 8’de verilmiştir. 20, 25 ve 30 işli problemlerden çözümü elde edilebilenlerin sonuçları ise Tablo 9’da verilmiştir.

<i>m=3</i>		
<i>problem</i>	<i>z</i>	<i>t</i>
10-3-1-1	354,00	7539
10-3-1-2	169,00	2812
10-3-1-3	208,00	6056
10-3-2-1	558,85	10800
10-3-2-2	474,31	10800
10-3-2-3	391,94	10800
10-3-3-1	197,00	4391
10-3-3-2	241,00	6983
10-3-3-3	442,42	10800

<i>m=3</i>		
<i>problem</i>	<i>z</i>	<i>t</i>
15-3-1-1	-	10800
15-3-1-2	767,88	10800
15-3-1-3	-	10800
15-3-2-1	-	10800
15-3-2-2	-	10800
15-3-2-3	441,04	10800
15-3-3-1	-	10800
15-3-3-2	-	10800
15-3-3-3	693,88	10800

çözülebilmiştir. 30 boyutlu problemlerin ise hiçbirine çözüm bulunamamıştır.

Tablo 9. 20 ve 25 İşli Problemlerin Sonuçları

<i>problem</i>	<i>z</i>	<i>t</i>
20-2-1-1	1759,86	10800
20-3-1-3	1502,61	10800
25-2-1-3	3418,86	10800

### 4.4. Problem Özelliklerinin Son İşin Tamamlanma Zamanına Etkisi

Problem özelliklerinin son işin tamamlanma zamanına etkisini inceleyebilmek amacıyla eniyi çözümlerin bilinmesine gereksinim duyulduğundan, 10 boyutlu problemlerin eniyi çözümleri süre limiti kaldırılarak elde edilmiş ve elde edilen sonuçlar Tablo 10’da verilmiştir.

Tablo 10. 10 İşli Problemlerin Eniyi Amaç Fonksiyonu Değerleri

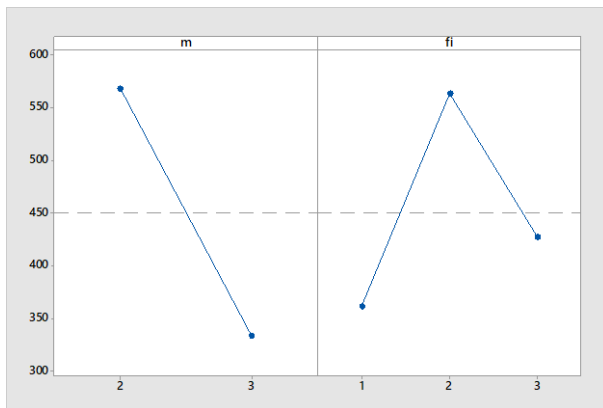
$m=2$			$m=3$		
<i>problem</i>	<i>z</i>	<i>t</i>	<i>problem</i>	<i>z</i>	<i>t</i>
10-2-1-1	527,44	7461	10-3-1-1	354,00	7539
10-2-1-2	480,27	12963	10-3-1-2	169,00	2812
10-2-1-3	428,17	10529	10-3-1-3	208,00	6056
10-2-2-1	673,35	20833	10-3-2-1	522,75	39019
10-2-2-2	608,17	38274	10-3-2-2	474,31	43034
10-2-2-3	708,10	25506	10-3-2-3	391,94	35765
10-2-3-1	560,21	16163	10-3-3-1	197,00	4391
10-2-3-2	444,88	18454	10-3-3-2	241,00	6983
10-2-3-3	678,80	15057	10-3-3-3	437,74	27770

Tablo 10'da verilen sonuçlar kullanılarak, makine sayısı ( $m$ )'nın ve bozulma oranı tipi ( $\varphi$ )'nin son işin tamamlanma zamanına ( $z$ ) etkisini belirleyebilmek amacıyla, varyans analiz yapılmıştır. Tablo 11'de verilen varyans analizi tablosundan da görülebileceği gibi hem makine sayısı ( $m$ ) hem de bozulma oranı tipi ( $\varphi$ ) faktörleri kritiktir ( $p < 0,050$ ).

Tablo 11. Varyans Analizi Tablosu

<i>Kaynak</i>	<i>sd</i>	<i>KT</i>	<i>KO</i>	<i>F</i>	<i>p</i>
$m$	1	248195	248195	30,37	0,000
$\varphi$	2	127406	63703	7,79	0,007
$m^* \varphi$	2	3589	1795	0,22	0,806
Hata	12	98074	8173		
Toplam	17	477265			

Şekil 2'de verilen ana etkiler grafiğinden de görülebileceği gibi makine sayısı az ve bozulma oranı tipi 2 olduğunda son işin tamamlanma zamanı uzamaktadır. Makine sayısı çok ve bozulma oranı tipi 1 olduğunda ise azalmaktadır.



Şekil 2. Ana Etkiler Grafiği

## 5. Sonuç ve Öneriler

Bu çalışmada, zaman penceresi kısıtı altında planlı bakım çizelgesinin oluşturulması problemi ele alınmıştır. Ele alınan problemde bakım süreleri bakım zamanına bağlı olarak bozulmaktadır. Tek kademeli üretim ortamında işlerin paralel makinelerde üretilebildiği durum dikkate alınmıştır. Paralel makinelerin işlem süreleri farklı olduğundan makineler ilişkisizdir. Bakım sırasında kullanılan kaynaklar kısıtlı olduğundan bir başka deyişle bakımları gerçekleştirebilecek tek bir bakım ekibi olduğu için bakımların eşzamanlı çizelgenmesi istenmemektedir. Ele alınan problem için bir matematiksel model geliştirilmiştir. Geliştirilen matematiksel modelin performansını gösterebilmek için farklı boyut ve özelliklerde rassal test problemleri türetilmiştir. Süre limiti içinde 25 iş sayısına kadar olan problemler çözülebilmektedir. Gelecekte daha büyük boyutlu problemlerin çözümü için ele alınan probleme sezgisel ya da metasezgisel algoritmalar önerilebilir. Ayrıca birden fazla bakım ekibinin olduğu durum da incelenebilir.

## Araştırmacıların Katkısı

Gerçekleştirilen çalışmada Tuğba SARAÇ fikrin oluşturulması, literatür taraması, matematiksel modelin geliştirilmesi, test problemlerinin türetilmesi, analizlerin gerçekleştirilmesi ve makalenin yazımı ve Feriştah ÖZÇELİK fikrin oluşturulması, literatür taraması, matematiksel modelin geliştirilmesi, test problemlerinin türetilmesi, analizlerin gerçekleştirilmesi ve makalenin yazımı başlıklarında katkı sunmuşlardır.

## Çıkar Çatışması

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir.

**Kaynaklar**

- Aramon Bajestani, M. & Beck, J. C. (2015). A two-stage coupled algorithm for an integrated maintenance planning and flowshop scheduling problem with deteriorating machines. *Journal of Scheduling*, 18(5), 471-486. doi: <https://doi.org/10.1007/s10951-015-0416-2>
- Belkaid, F., Dahane, M., Sair, Z., & Khatab, A. (2014). Efficient approach for joint maintenance planning and production scheduling under consumable resources constraints. *Proceedings of the 44th International Conference on Computers & Industrial Engineering*, 2242-2256, İstanbul. Erişim adresi: <https://www.computers-and-ie.org/conferences/44>
- Boufellouh, R. & Belkaid, F. (2020). Bi-objective optimization algorithms for joint production and maintenance scheduling under a global resource constraint: Application to the permutation flow shop problem. *Computers & Operations Research*, 122, 104943. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cor.2020.104943>
- Dündar, D. R., Sarıçiçek, İ. ve Yazıcı, A. (2021). Bakım faaliyetlerini dikkate alan makine çizelgeleme: Literatür araştırması. *Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*, 26(2), 737-756. doi: <https://doi.org/10.17482/uumfd.856513>
- Fekri, M., Heydari, M., & Mazdeh, M. (2023). Two-objective optimization of preventive maintenance orders scheduling as a multi-skilled resource-constrained flow shop problem. *Decision Science Letters*, 12(1), 41-54. doi: <https://doi.org/10.5267/j.dsl.2022.10.007>
- Fu, X., Chan, F. T., Niu, B., Chung, S. H., & Bi, Y. (2017). Minimization of makespan through jointly scheduling strategy in production system with mould maintenance consideration. *Proceedings of the 13<sup>th</sup> International Conference on Intelligent Computing*, 577-586, Liverpool. doi: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-63309-1\\_51](https://doi.org/10.1007/978-3-319-63309-1_51)
- Fu, X., Chan, F. T., Niu, B., Chung, N. S., & Qu, T. (2019). A three-level particle swarm optimization with variable neighbourhood search algorithm for the production scheduling problem with mould maintenance. *Swarm and Evolutionary Computation*, 50, 100572. doi: <https://doi.org/10.1016/j.swevo.2019.100572>
- Geurtsen, M., Didden, J. B. H. C., Adan, J., Atan, Z., & Adan, I. (2022). Production, maintenance and resource scheduling: A review. *European Journal of Operational Research*, 305(2), 501-529. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2022.03.045>
- Lee, C. & Chen, Z. (2000). Scheduling jobs and maintenance activities on parallel machines. *Naval Research Logistics*, 47(2), 145-165. doi: [https://doi.org/10.1002/\(sici\)1520-6750\(200003\)47:2%3c145::aid-nav5%3e3.0.co;2-3](https://doi.org/10.1002/(sici)1520-6750(200003)47:2%3c145::aid-nav5%3e3.0.co;2-3)
- Lei, D. & He, S. (2022). An adaptive artificial bee colony for unrelated parallel machine scheduling with additional resource and maintenance. *Expert Systems with Applications*, 205, 117577. doi: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2022.117577>
- Li, M., Xiong, H., & Lei, D. (2022). An artificial bee colony with adaptive competition for the unrelated parallel machine scheduling problem with additional resources and maintenance. *Symmetry*, 14(7), 1380. doi: <https://doi.org/10.3390/sym14071380>
- Liu, C. L. & Wang, J. J. (2016). Unrelated parallel-machine scheduling with controllable processing times and impact of deteriorating maintenance activities under consideration. *Asia-Pacific Journal of Operational Research*, 33(1), 1-16. doi: <https://doi.org/10.1142/S0217595916500019>
- Rebai, M., Kacem, I., & Adjallah, K. H. (2013). Scheduling jobs and maintenance activities on parallel machines. *Operational Research*, 13(3), 363-383. doi: <https://doi.org/10.1007/s12351-012-0130-1>
- Shabtay, D. (2022). Single-machine scheduling with machine unavailability periods and resource dependent processing times. *European Journal of Operational Research*, 296(2), 423-439. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2021.03.034>
- Tavana, M., Zarook, Y., & Santos-Arteaga, F. J. (2015). An integrated three-stage maintenance scheduling model for unrelated parallel machines with aging effect and multi-maintenance activities. *Computers and Industrial Engineering*, 83, 226-236. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2015.02.012>
- Touat, M., Tayeb, F. B. S., & Benhamou, B. (2022). Exact and metaheuristic approaches for the single-machine scheduling problem with flexible maintenance under human resource constraints. *International Journal of Manufacturing Research*, 17(1), 22-58. doi: <https://doi.org/10.1504/ijmr.2022.121594>
- Wang, S. & Liu, M. (2015). Multi-objective optimization of parallel machine scheduling integrated with multi-resources preventive maintenance planning. *Journal of Manufacturing Systems*, 37(1), 182-192. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2015.07.002>

- Wang, S. & Yu, J. (2010). An effective heuristic for flexible job-shop scheduling problem with maintenance activities. *Computers & Industrial Engineering*, 59(3), 436-447. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2010.05.016>
- Wong, C. S., Chan, F. T. S., & Chung, S. H. (2012). A genetic algorithm approach for production scheduling with mould maintenance consideration. *International Journal of Production Research*, 50(20), 5683-5697. doi: <https://doi.org/10.1080/00207543.2011.613868>
- Wong, C. S, Chan, F. T. S., & Chung, S. H. (2014). Decision-making on multi-mould maintenance in production scheduling. *International Journal of Production Research*, 52(19), 5640-5655. doi: <https://doi.org/10.1080/00207543.2014.900200>
- Yoo, J. & Lee, I. (2016). Parallel machine scheduling with maintenance activities. *Computers & Industrial Engineering*, 101, 361-371. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2016.09.020>



## EVALUATION OF ASPHALT PAVEMENT PERFORMANCE FOR DIFFERENT DIATOMITE CONTENT

Atakan AKSOY<sup>1</sup>, Mustafa Taha ASLAN<sup>2\*</sup>, Erol ISKENDER<sup>3</sup>, Dundar AYYILDIZ<sup>4</sup>, C. Ensar SENGUL<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Karadeniz Technical University Department of Civil Engineering, 61080, Trabzon,  
ORCID No : <http://orcid.org/0000-0001-5232-6465>

<sup>2</sup>Bentas Bentonite Mining Industry and Trade Joint Stock Company, 52400, Ordu,  
ORCID No : <http://orcid.org/0000-0002-0453-788X>

<sup>3</sup>Karadeniz Technical University, Faculty of Technology, Department of Civil Engineering, 61830, Trabzon,  
ORCID No : <http://orcid.org/0000-0001-7934-839X>

<sup>4</sup>Ayyildizlar Construction, Ayyildizlar Construction and Engineering LTD. STI.,61080, Trabzon,  
ORCID No : <http://orcid.org/0000-0002-6851-6914>

<sup>5</sup>General Directorate of State Hydraulic Works, Fourteenth Regional Directorate, 34696, Istanbul,  
ORCID No : <http://orcid.org/0000-0003-0998-028X>

Keywords	Abstract
Asphalt Pavements, Diatomite, Rutting, Repeated Creep	<i>The majority of steel and reinforced concrete bridges are produced with asphalt pavement. The reason for this is to protect steel and concrete structures from the effects of water and degrading salt additives and to increase their durability. Asphalt bridge superstructures are mostly manufactured with four layers. These layers are the primer bonding layer, waterproofing layer, protection layer and surface asphalt wearing layers. The superstructure must protect the supporting substructure. It should protect the life of the structure and ensure the integrity of the structure against permanent deformation, aging, raveling, water damage and chemical effects. Diatomite additive is used as a performance enhancer in various aspects. It is generally preferred in the region of 5%-15% according to the bitumen mass. The granulometric size and chemical properties of the diatomite additive are other effective factors. In this study, the rutting resistance of conventional and diatomite-modified asphalt pavement for 5% and 10% ratios for selected diatomite additive gradation is investigated. The rutting resistance of the pavements is investigated by repeated creep tests for two different additive ratios on water-damaged and control mixtures. In unconditioned samples, 5% diatomite-modified mixtures; in conditioned samples, 10% diatomite-modified mixtures showed the greatest deformation resistance.</i>

### FARKLI DIATOMİT İÇERİĞİ İÇİN ASFALT KAPLAMA PERFORMANSININ DEĞERLENDİRİLMESİ

Anahtar Kelimeler	Öz
Asfalt Kaplamalar, Diatomit, Tekerlek İzi, Tekrarlı Sünme	<i>Çelik ve betonarme köprülerin çoğunluğu asfalt kaplama ile üretilmektedir. Bunun nedeni çelik ve beton yapıları su ve bozunduruç tuz katkılarının etkilerinden korumak ve dayanıklılıklarını arttırmaktır. Asfalt köprü üst yapıları çoğunlukla dört katlı olarak imal edilmektedir. Bu tabakalar astar yapıdır, su yalıtım tabakası, koruma tabakası ve yüzey asfaltı giydirmeye tabakalarıdır. Üst yapı destekleyici alt yapıyı korumalıdır. Kalıcı deformasyona, yaşlanmaya, sökülme, su hasarlarına ve kimyasal etkilere karşı yapının ömrünü korumalı ve yapının bütünlüğünü sağlamalıdır. Diatomit katkı maddesi çeşitli yönlerden performans artırıcı olarak kullanılmaktadır. Genellikle bitüm kütlesine göre %5-15 aralığında tercih edilir. Diatomit katkı maddesinin granulometrik boyutu ve kimyasal özellikleri diğer etkili faktörlerdir. Bu çalışmada, seçilen diatomit katkı gradasyonu için %5 ve %10 oranlarında konvansiyonel ve diatomit-modifiyeli asfalt kaplamanın tekerlek izi direnci incelenmiştir. Kaplamaların tekerlek izi direnci, su hasarlı ve kontrol karışımları üzerinde iki farklı katkı oranı için tekrarlı sünme testleri ile araştırılır. Koşullandırılmamış numunelerde %5 diatomit-modifiyeli karışımlar; koşullandırılmış numunelerde, %10 diatomit ile modifiye edilmiş karışımlar en yüksek deformasyon direncini göstermiştir.</i>

Araştırma Makalesi

Başvuru Tarihi

Kabul Tarihi

: 16.01.2023

: 25.10.2023

Research Article

Submission Date

Accepted Date

: 16.01.2023

: 25.10.2023

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

<https://doi.org/10.31796/ogummf.1235737>



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

Bridge pavements can operate under very different load conditions. It is exposed to the loads of traffic vehicles and climatic conditions. Multidirectional forces act on the pavement. Also, different temperatures, water and deicing salts create additional stresses. The embankment load on bridge decks is much higher than the pavement on the sand. Wheeled vehicles cause compressive and tensile stresses in the outer layer of the pavement. They can cause permanent deformation and fatigue cracks in asphalt pavements. The stress and strain in the bridge pavement are greater than in the ground. Therefore, it poses more risk (Pokorski et al., 2016). In Europe, waterproofing is applied on bridge asphalt pavements. Asphalt pavement on bridges consists of a protective layer and a wear layer. These two layers are usually made of mastic asphalt (MA), asphalt concrete (AC), and stone mastic asphalt (SMA). Due to the special conditions of the loads on the bridge deck, asphalt mixtures with a high mastic content and a closed structure are preferred. A mixture of MA and SMA is used as a protective layer (EAPA, 2013).

The thickness of the asphalt layers in the soil is approximately 10 - 30 cm. In the typical superstructure layer above the soil, there are horizontal tensile stresses at the bottom of the asphalt pavements. Asphalt pavements on bridge decks are much thinner than pavements on the ground. Their thickness is approximately 8 - 12 cm. Due to the different stiffness values of stress and strain, concrete and asphalt slabs should be considered separately. The stress and strain in the bridge pavement vary depending on the deck type (Pokorski et al., 2016). Bridge deck pavements must resist permanent deformation. The pavement depth should be at the desired level. It should meet the requirements such as skid resistance, rigidity and smoothness. It should be resistant to heavy traffic loads and bad weather conditions (BPG, 2003). The deck should absorb the traffic loads and transfer them to the supporting structures.

It must be resistant to deformation and form an anti-skid floor for vehicles. In addition, it should protect the bridge structure from surface waters containing deicing salts that cause corrosion in winter. Due to the different conditions of the pavement structure in a bridge deck, these functions are often not fulfilled by a single material. A functional distinction can be made for the layers that make up the floor covering, it consists of several layers. This system consists of asphalt pavements. However, it can also include primer, membrane, and binder pavements (HBEBES, 2022). In general, asphalt bridge pavement systems can be divided into four different layers: Sealing/binding layer (primer), waterproofing layer, protective layer and surface layer (asphalt). Because the steel slab is more flexible than the concrete slab, the surface pavement

must have high abrasion resistance and meet the rigidity requirements without cracking.

In steel structures, large deformations occur in the bridge deck. Therefore, fatigue in the asphalt layer is a more important issue for steel bridges than for concrete bridges. Therefore, optimum values must be found in resistance to permanent deformation, rutting resistance and resistance to fatigue cracks. In some cases, epoxy asphalt can be used on steel bridges. In general, steel plate thicknesses vary between 10 - 14 mm and asphalt layer between 35 - 80 mm. In order to minimize dead loads, the weight of the bridge deck steel and cladding should be kept to a minimum. For concrete bridge pavements, low adhesion between the waterproofing membrane and asphalt pavement, moisture saturation in the asphalt pavement are the most important issues. Inappropriateness of these factors poses great problems. Premature deformation occurs if the asphalt pavement is not thick enough and the primer coat is not applied properly (EAPA, 2013). Repetitive loads, vibrations in the bridge deck, thin layers and severe weather conditions cause deformation of the pavement. In addition, such deformations reduce the service life of bridge systems and increase repair costs. The basic functional requirements in asphalt pavements are water tightness in all conditions, mechanical stability/strength that can withstand shear forces, especially during braking and acceleration in bends, and resistance to cracking and stratification under the influence of temperature changes and traffic loads. Ensuring and maintaining mechanical and chemical resistance between normal loads, weathering and deicing salts is very important (EAPA, 2013). Various applications can be made to increase the life of bridge deck pavements and reduce life cycle costs. One of these applications is the use of modified asphalt mixtures (Widyatmoko and Elliott, 2005; Park et al., 2009).

One of the asphalt modifiers used in the world is diatomite sedimentary rock. Diatomite is a naturally occurring, soft, siliceous sedimentary rock. It is a building material that can be easily turned into fine powder. The main chemical components of diatomite are silica, alumina, and iron oxide (Tan et al., 2012; Cong et al., 2016; Cong et al., 2012). Diatomite is widely used as an asphalt conditioner with its low cost, large reserves and high absorption ability and large storage area properties (Tan et al., 2012; Cong et al., 2016).

Diatomite is abundant in our country (Cubuk, 1998). It is generally used as a filtration material and the usage areas of diatomite have been rapidly investigated recently. It is mostly seen in the waste category, and with the use of diatomite additive in the construction industry, it has an important place for an economic and sustainable future. It is known that diatomite additive improves the performance of asphalt mixtures against water damage, fatigue, rutting and aging problems. It is

stated that it offers a healing mechanism with a physical mixture, not a chemical reaction, and is used as a bitumen stabilizer (Omur et al., 2021).

Constructive advantages in terms of production and recycling conditions because diatomite can be used as filler, added to bitumen, improved performance problems, suitable for multiple additive options, versatile function in storage stability in plants, homogeneous protection of bitumen film thickness, mixing regulation feature, and improving aging problems. Diatomite modified asphalt is considered to be an important current perspective for Turkey due to its convenience and prevalence in Turkey (Omur et al., 2021).

Diatomite modified asphalts have bitumen drainage preventive properties in mixtures, form a foam-like structure, can be used at rates up to 15% by weight of bitumen, provide adhesion by significantly increasing the specific surface area, strengthen adhesion to wet (moist) aggregates, low-temperature performance in use in cold areas. It can also be used with modifiers that form fiber structure, it functions in terms of preventing icing, increases fatigue performance and is advantageous in terms of long-term performance, due to its feature, it contributes to the improvement of production conditions-plant conditions-site conditions and to increase the quality of the asphalt industry, refinery and field. Diatomite-modification reduces the aging problem of asphalt mixtures under application conditions. In this way, diatomite additive strengthens recycling strategies, increases the homogeneity of the mixture with inorganic physical effect, and can be easily mixed with bitumen. Its effects on water damage, rutting and fatigue performance are being investigated (Omur et al., 2021). In the mixture gradation, instead of filler, porous asphalt mixtures containing 0%, 5%, 10% and 15% diatomite by weight were prepared and microstructure analysis and performance tests were carried out. It was stated that the porous asphalt mixture containing diatomite showed higher optimum asphalt content due to the low bitumen drainage property caused by the high specific surface area of the diatomite. Compared to normal mix, porous asphalt mixes prepared with diatomite provided better particle loss resistance, moisture damage resistance, rutting resistance and low-temperature cracking resistance (Huang et al., 2010). Diatomite is gaining increasing attention as a new source material as it has the potential to be a viable alternative to mineral fillers in asphalt pavement construction. Uniaxial fracture test, repeated creep test and low-temperature cracking test were applied to determine the mechanical properties, limestone dust content and optimum addition ratio content of sand-asphalt composites containing various proportions of diatomite. When the results were examined, it was revealed that the compressive strength, deformation properties and low-temperature

cracking resistance of asphalt composites were improved by the use of diatomite (Cheng et al., 2018).

In a study, diatomite and glass fiber were used as a performance enhancing additive in asphalt mixtures at the rates of 0.1%, 0.2% and 0.3% compared to the total asphalt mixture weight. The relationship between the rutting resistance property and the modifiers developed linearly when the amount of additives was low. It was also found that when diatomite is used in small proportions, it reduces the low-temperature tensile strength. The addition of diatomite may be the main cause of the decrease in the stiffness modulus. Diatomite is a light and elastic material, but asphalt is a viscoelastic material, the modulus of elasticity of asphalt depends on temperature. The modulus of elasticity of diatomite modifiers is less than that of asphalt at low-temperature. Therefore, the diatomite particles in asphalt are flexible, and these flexible particles cause the modulus of the diatomite-modified asphalt binder to drop. Ultimately, this result leads to a decrease in the modulus of stiffness of the modified asphalt mix (Qinglin et al., 2015).

In a study investigating the antifreeze performance effects of diatomite and SBS additives in ground rubber (CR) added stone mastic asphalt (SMA) mixtures, air gap, indirect tensile strength, indirect tensile stiffness modulus values were questioned. It was observed that the air void values increased, the indirect tensile strength and indirect tensile stiffness modulus values decreased with the increase of freeze-thaw cycles. The addition of diatomite and SBS decreased the air gap in the CR modified mixtures and increased the indirect tensile strength and stiffness modulus. By forming a thicker asphalt film and an anchored structure around the CR particles and aggregates, the diatomite is stated to absorb lower molecular groups and lower aromatic molecules and reduce air voids. Thus, the cohesion between aggregates increases and the internal resistance of the mixture increases (Wei et al., 2017). The viscosity of the asphalt binder increases significantly when diatomite powder is added. Dynamic shear rheometer test results indicate that the increase in the percentage of diatomite at high temperatures causes the value of the complex shear modulus to increase and the phase angle to decrease, which shows the effect of diatomite in reducing permanent deformations (Cong et al., 2012). The physical properties, dynamic rheological behavior, storage stability and aging criteria of asphalt binders modified with 4% diatomite by weight were investigated; It was observed that both the viscosity and modulus of elasticity of the bituminous binders increased rapidly with the addition of diatomite at high-temperatures. Compared with pure asphalt binders, positive results were obtained in the resistance of modified asphalt binders to high-temperature deformation and low-temperature cracking (Cong et al., 2012), moreover, the anti-icing performance of diatomite-modified asphalt

mixtures, improved fatigue life, is expressed (Wei et al., 2016; Chen et al., 2007). Diatomite has high absorption capacity and stability. It produces a low-cost solution and is a widely used mineral with significant storage. Widely used for asphalt modification in China (Tan et al., 2012; Song et al., 2011; Kietzman and Rodier, 1984; Tan et al., 2009).

The effect of diatomite/basalt fiber on the performance of asphalt mix was investigated through rutting test, low-temperature indirect tensile strength test, moisture damage susceptibility test, four point bending fatigue test and F-T loop test. The addition of basalt fiber and diatomite to the asphalt increased the high-temperature rutting, low-temperature cracking, freeze-thaw cycle damage and moisture damage resistance of the asphalt mixture in seasonal frozen regions. It also increased the fatigue life of the asphalt mixture (Cheng et al., 2018).

The OH- group is found in diatomite. It is an important parameter for the surface activity and absorptivity of diatomite. The porous structure of diatomite increases its adherence and wetting ability with asphalt. Small particle size, large number of mesopores, and large specific surface area increase the adsorbability of asphalt for lightweight components. The properties of diatomite also allow it to form a strong physical bond with asphalt additives. They provide a possible reason to improve asphalt mix performance. Moreover, due to its low cost and simple modification process, the economic benefits of diatomite-modified asphalt mixture have great advantages over conventional modified asphalt mixture (Cheng et al., 2018).

From the literature summary given above, it can be seen that the rutting resistance of diatomite-modified asphalt mixtures increases significantly. However, it can be seen that there is no consensus in the literature regarding the most appropriate diatomite ratio. It is stated that significant performance decreases are observed at usage rates greater than 13%, and good results can be obtained between 6% and 13%. The aim of this study is

to investigate the usability of low and medium dosage diatomite-modified asphalt mixtures in terms of deformation resistance in bridge pavement layers. For this purpose, the deformation resistance of bituminous asphalt mixture samples modified at 5% and 10% usage rates were investigated by repeated load creep tests.

## 2. Materials and Method

### 2.1. Material

In this study, asphalt cement with a penetration grade of 50-70 whose properties are presented in Table 1 and limestone aggregate whose properties are shown in Table 2 were used. According to the Highways Technical Specification (HTS, 2013), the aggregate granulometry suitable for the production of dense graded asphalt concrete has been determined. The aggregate granulometry curve is given in Figure 1.

In the study, diatomite materials, from Bentas Bentonit company, were used. XRF (X-Ray Fluorescence) main oxide analysis results of diatomite additives are shown in Table 3 and granulometry curves are shown in Figure 2. In addition, XRD (X-Ray Diffractometer) graph and SEM image of diatomite are given in Figure 3. EDS (Energy Dispersive Spectrometry) layered image of diatomite and EDS Map sum spectrum of diatomite additive are given in Figure 4.

Table 1. Pure bitumen properties

Test	Method	Value	Specification limits
Specific gravity (25°C)	ASTM D-70	1.011	
Softening point (°C)	TS EN 1427	52	46-54
Flash point (°C)	TS EN ISO 2592	240	Least 230
Penetration (25°C) 0.1mm	TS EN 1426	63	50-70
Ductility (25°C)	ASTM D-113	100+	

Table 2. Aggregate properties used in the experiment

Properties	Test method	Results	Specification limits
Specific gravity (coarse aggregate)	ASTM C 127		
Bulk		2.707	
Apparent		2.733	
Specific gravity (fine agg.)	ASTM C 128		
Bulk		2.763	
Apparent		2.776	
Specific gravity (grain)		2.242	
Los Angeles abrasion (%)	TS EN 1097-2	26.70	
Flakiness, (%)	BS 812	9.71	≤25
Stripping resistance (no additive) (%)	ASTM D-1664	60-65	≥60
Clay lumps and friables, %	ASTM C 142	negative	will not be found
Plasticity index for sandy aggregate	TS-1900-1	NP	NP
Organic matter for sandy aggregate	TS EN 1744-1	Negative	Negative

Table 3. Main oxide analysis results of diatomite additive

	Unit	Value
SiO <sub>2</sub>	%	73.955
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	8.989
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	2.899
MgO	%	2.485
CaO	%	2.270
Na <sub>2</sub> O	%	0.207
K <sub>2</sub> O	%	1.256
TiO <sub>2</sub>	%	0.511
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	PPM	0.206
MnO	%	0.102
SO <sub>3</sub>	%	0.014
Cl	PPM	94
BaO	%	0.032
CuO	%	0.194
NiO	%	0.227
SrO	%	0.038
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	%	0.0739
ZnO	%	ND
ZrO <sub>2</sub>	%	0.028

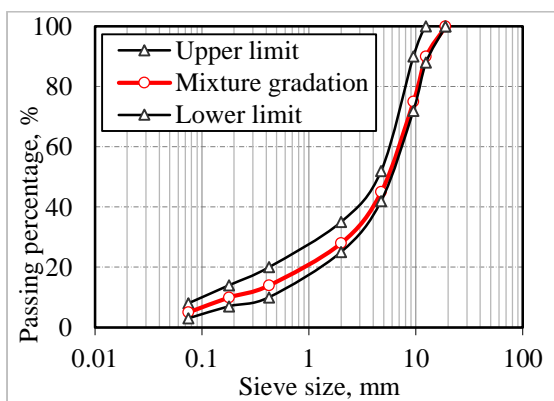


Figure 1. Aggregate granulometry curve

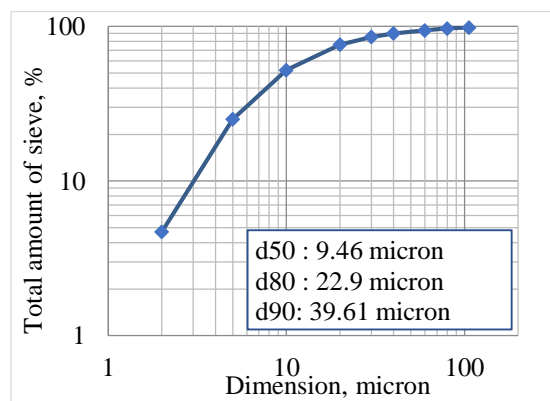
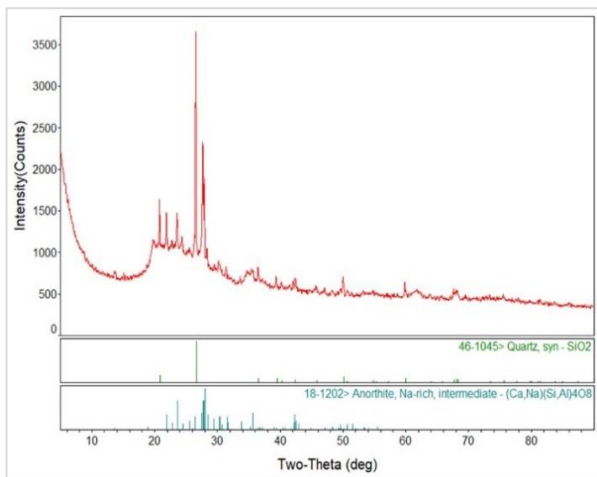
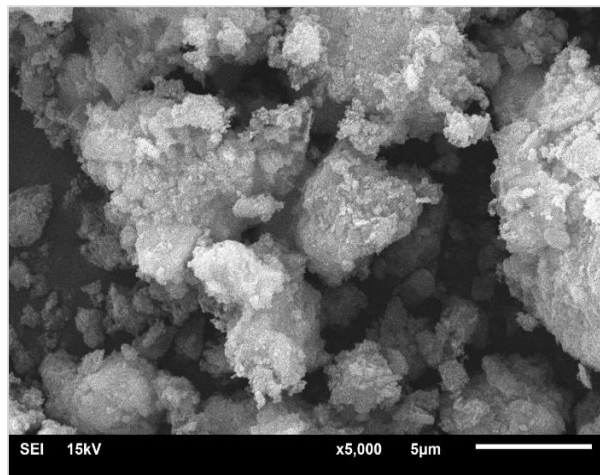


Figure 2. Granulometry curve of diatomite additive



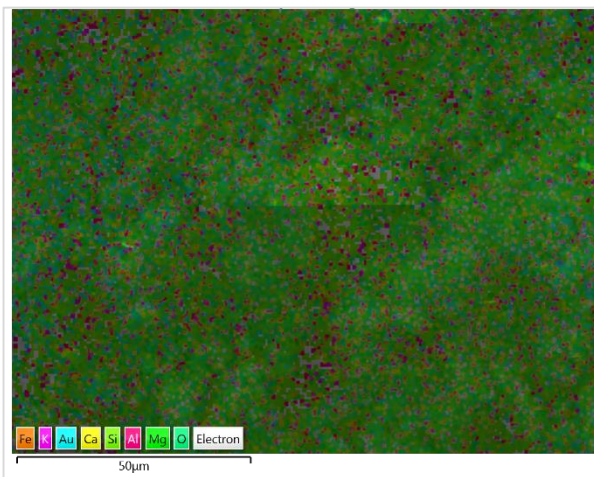


a)

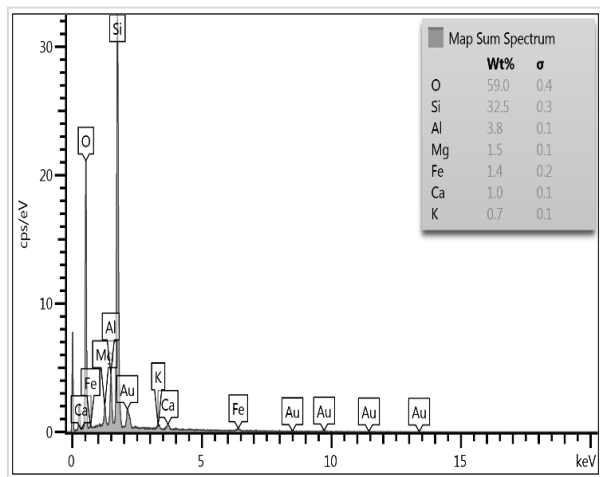


b)

Figure 3. For diatomite: a) XRD graph b) SEM images



a)



b)

Figure 4. Diatomite additive: a) EDS layered image b) EDS map sum spectrum of diatomite additive

## 2.2. Mix Design

In accordance with the Highway Technical Specification (HTS, 2013), the dense graded asphalt concrete design was made with pure bitumen according to the Marshall method. The bitumen content, which gives 4% air voids, was taken as the optimum bitumen content and

calculated as 5.10%. It was observed that other mixture properties in the calculated bitumen content also met the specification limits (Table 4). Control mixtures and diatomite-modified mixtures were produced in the same bitumen content.

Table 4. Asphalt concrete design results

Design parameters	Specification limits	Mixing values
Number of blows per face	75	75.00
Density, gr/cm <sup>3</sup>		2.44
Marshall stability, kg	Least 900	1189
Blank, Vh, %	3-5	4.00
Space filled with asphalt, Vf, %	65-75	71.64
Flowing, mm (mm)	2-4	3.48
Bitumen content, (%)	4-7	5.10
VMA, %	14-16	14.37

## 2.3. Method

Direct (dry) and indirect (wet) methods can be used to prepare the diatomite-modified asphalt mixture. When using the direct modification method, diatomite is added as a mineral powder to the asphalt and aggregate mixture. In the indirect method, it is important to prepare the asphalt binder to be modified with diatomite before the preparation of the mixture (Zhou, 2008). It is stated that the two mixing methods give approximately the same effect in view of mechanical performance. The bentonite addition rate was determined based on the studies in the literature (Yin, 2012). Bentonite additives of 5% and 10% by weight were added to the bitumen and diatomite-modified bitumen and asphalt mixtures were prepared. The wet method was used. The modification processes were decided by using the studies in the literature. In a study in the literature, a shearing temperature of 150°C, a mixing speed of 3000 rpm and a mixing time of 120 minutes were selected for the preparation of diatomite-modified asphalt (Cong et al., 2012). In another study, the shearing temperature was 150°C, the shearing speed was 4000 rpm, and the shearing time was 40 minutes (Guo et al., 2015). In another study, the shearing temperature is 160°C, the shearing speed is 5000 rpm and the shearing time is 40 minutes (Tan et al., 2012). In this study, diatomite-modified bitumen was prepared at 4000 rpm shearing speed at 160 °C. It was mixed during 40 minutes. Repeated creep testing can be used to determine the rutting resistance of asphalt mixtures. The test can be performed under different temperatures, loading stresses, loading times, test times and various loads (Aksoy and İskender, 2008). In the repeated creep test, the relationship between the cumulative permanent deformation and the number of load repetitions is read. As the amount of deformation

increases, the rutting resistance decreases. In this study, repeated creep tests were carried out on conditioned and unconditioned asphalt mixtures within the scope of EN-12697-25 (A) (BS EN 12697-25, 2016), test standard. Conditioning was performed using the AASHTO T 283 (AASHTO T 283, 2021), method. The tests were carried out at 40 °C, 95 kPa loading, 0.5 Hz frequency and 20000 loading cycles. Three identical asphalt briquettes were used for each experimental condition.

## 3. Test Results and Evaluations

Repeated creep curves of unconditioned asphalt mixture samples are shown in Figure 5 and conditioned ones in Figure 6. For the same mixture type, the area between the creep curves of the unconditioned samples was smaller than that of the conditioned samples. In other words, the difference between permanent deformations in the conditioned samples was higher than that of the unconditioned samples. This situation reveals that in the performance questioning, conditioned samples are more distinctive in the observed experimental method. In unconditioned mixtures, a distinction was made between control and 5% diatomite-modified mixtures; all of the modified mix samples showed smaller deformations than the control mix samples. However, when the modification dosage was increased (10%), the standard deviation between the deformations of identical samples increased and higher differences were observed between the results. Respectively; for control mixtures, 5% diatomite-modified mixtures and 10% modified mixtures, the standard deviation values of the unconditioned and conditioned mixtures were 0.024; 0.023; 0.044 and 0.062; 0.054; 0.058 was found

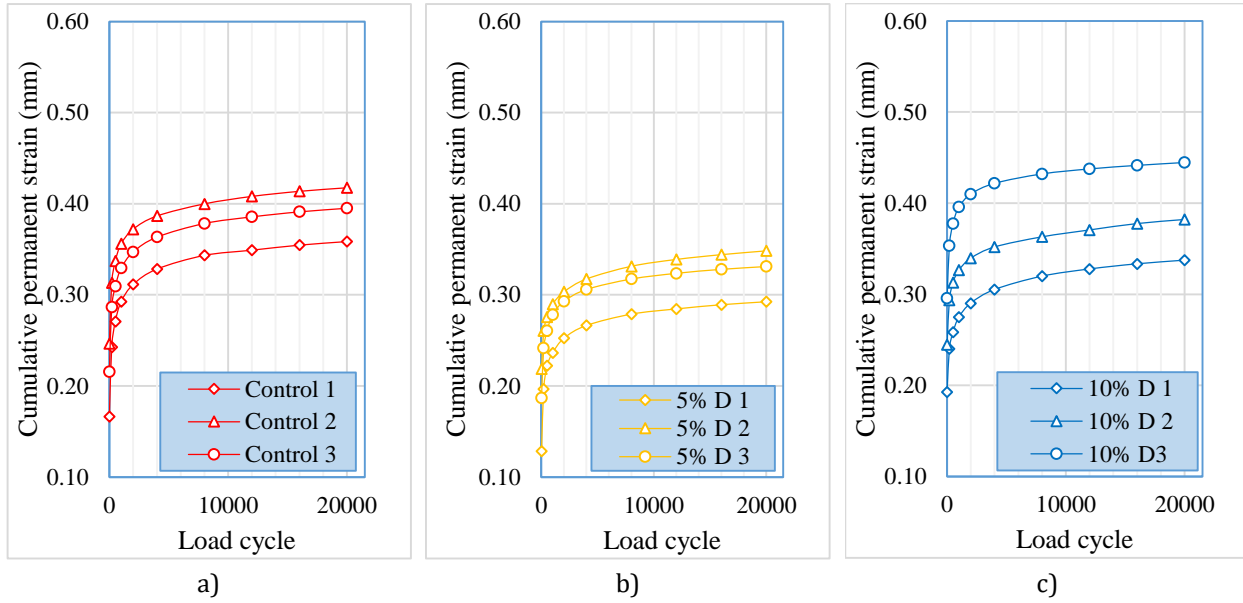


Figure 5. Deformation curves of unconditioned asphalt mixes: a) control mixtures b) 5% diatomite-modifiate mixtures c) 10 % modifiate mixtures

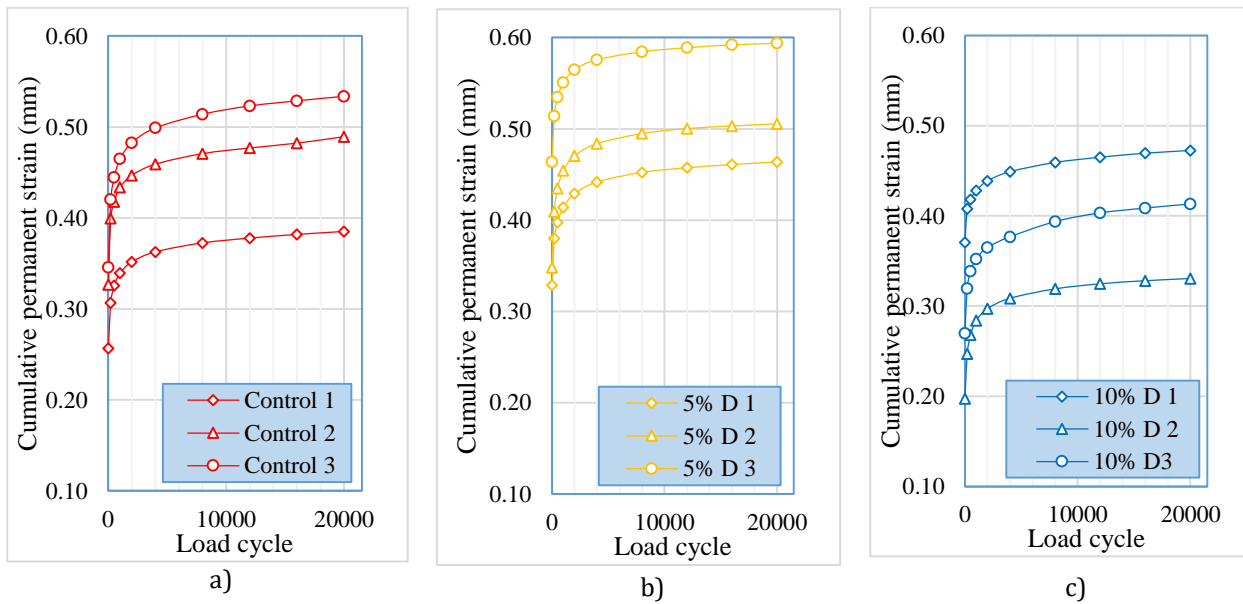


Figure 6. Deformation curves of conditioned asphalt mixes: a) control mixtures b) 5% diatomite-modified mixtures c) 10 % modified mixtures

The average deformation curves of unconditioned and conditioned asphalt mixture samples are shown in Figure 7. According to the test results, while 5% diatomite-modified asphalt mixtures showed the highest deformation resistances in unconditioned mixtures, there was no significant difference between the deformation resistances of control and 10%

diatomite-modified mixtures. It was determined that the amount of deformation observed as a result of the test increased and the deformation resistance decreased when conditioning was applied to the samples. On the other hand, 10% diatomite-modified mixtures showed the highest deformation resistance and 5% diatomite-modified mixtures showed the lowest deformation resistance in conditioned mixtures.

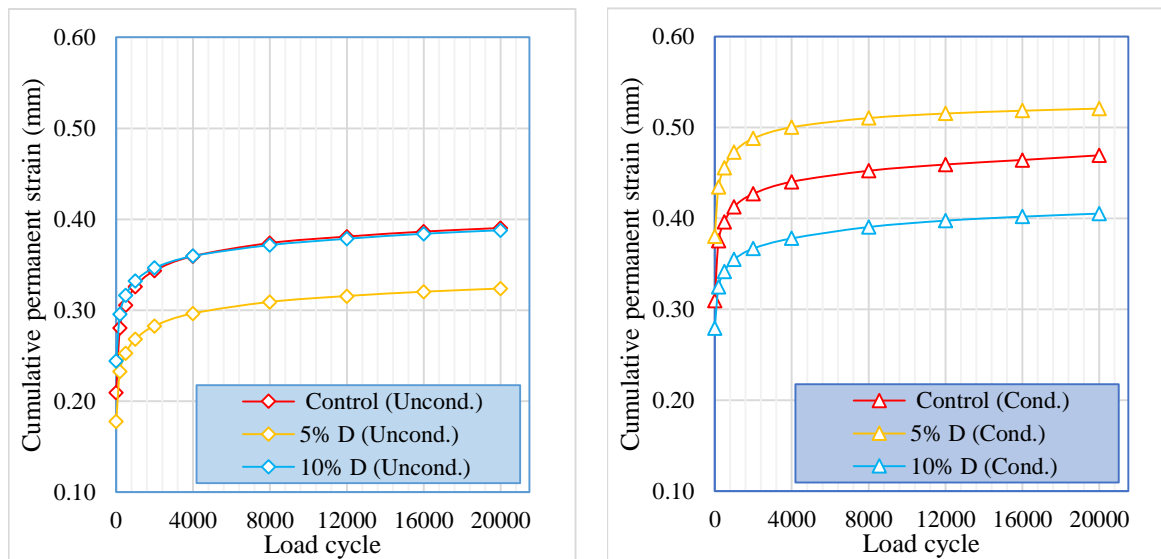


Figure 7. Comparison of deformation resistance of asphalt mixes

In a study conducted by Yang et al. (2018), 12% diatomite was modified by bitumen weight and it was observed that diatomite modification caused a significant increase in the high temperature performance of the asphalt mixture compared to reference samples. In a study by Chen et al. (2014), the high temperature performance and dynamic stability of asphalt mixtures produced with 6% diatomite modification by weight of bitumen increased significantly compared to samples without additives. In a study conducted by Luo et al. (2016), diatomite additive was used at the rates of 0-9-11 and 13% according to the weight of the bitumen, and the dynamic stability of the prepared samples compared to the reference samples increased by up to 13% at high temperatures and reached the maximum value at 13%. It has dropped significantly by 15%.

Du et al. (2022), the diatomite content (mass fraction) of the asphalt mixture was used at 10%, 13%, 20%, 23% and 25% ratios and a rutting test was performed. When the active diatomite content is less than 20%, the dynamic stability of the asphalt mix gradually increases with the increase of the content. However, when the ratio exceeds 20%, the dynamic stability decreases. For this reason, the most appropriate diatomite ratio was suggested as 13%. Chen et al. (2007), in a study, determined that the optimum content of diatomite modified bitumen is 10%. Zhang et al. (2011), in a study concluded that the optimum dosage of diatomite is 13% by analyzing the low temperature performance of binders and blends. Therefore, 10-13% was a reasonable dosage range. Diatomite significantly

improves the high temperature performance of asphalt mixes, but some studies reveal that the improvement in low-temperature performance of asphalt mixes is negligible, while others note poor behavior in low-temperature cracking resistance (Yue et al., 2019). Asphalt mixes modified with single additives cannot improve the overall properties of asphalt mixes. Dual modification technology in asphalt mixes is the best alternative to reduce low-temperature cracking and high-temperature rutting. To improve the overall performance of asphalt mixtures under environmental conditions, it is recommended to use asphalt mixtures modified with two types of additives (Yue et al., 2019).

In the studies in the literature, it is seen that there are various small cavities in the outer layer shell of the diatomite. This special structure of diatomite not only provides a large diatomite surface area on the asphalt mixture, but also facilitates the adsorption and wetting of the asphalt (Bao and Jiang, 2010; Yang et al., 2018). Studies have shown that the pore size of diatomite is mainly distributed by condensation between 1 nm and 8 nm. The average pore diameter of diatomite is 5.4895nm. The mesoporous structure can increase the capacity to absorb light components of asphalt, resulting in increased viscosity and high-temperature performance of asphalt (Bao and Jiang, 2010; Van Garderen et al., 2012).

One of the most important parameters in the evaluation of diatomite quality is  $\text{SiO}_2$  content (Li, 2008). In particular, the surface of the diatomite has a very strong bonding strength due to the presence of this amorphous  $\text{SiO}_2$ . In addition, the inert nature of  $\text{SiO}_2$  reduces the

transmission rate in the pavement and imparts thermal insulation functions to the pavement (Bao, 2005). This issue is attributed to the superior compatibility properties between asphalt and diatomite. High compatibility reduces the mixing time and aging of the modified asphalt (Li, 2008).

This study confirms the optimum diatomite ratio of 10% - 13% for diatomite modified asphalt mixtures in the literature. When the diatomite ratio was chosen as 10%, a significant increase in resistance for rutting was achieved, while higher deformations were observed in the conditioned mixtures at the 5% incorporation ratio. The low diatomite ratio is thought to be a worthwhile issue with binary modifications, especially fiber type additives. At moderate usage rates, diatomite-modified mixtures show high mechanical properties. It is considered that diatomite/fiber modified asphalt mixtures may be a suitable option in areas such as bridge pavements where temperature changes are rapid and freeze-thaw cycles are high.

#### 4. Conclusion and Recommendations

In this study, the deformation properties of diatomite-modified asphalt mixtures were investigated for low (5%) and medium (10%) usage rates of diatomite additive. Unconditioned and conditioned asphalt mixture samples were utilized. In unconditioned mixtures, 5% diatomite-modified mixtures demonstrated higher deformation resistances than control and 10% diatomite modified mixtures. Diatomite has the ability to trap heat due to the high silica content in it. It is also known to be used in thermal insulation materials. Therefore, as the diatomite content in bitumen increases up to a certain rate, the resistance to rutting at high temperatures increases. This is why 10% diatomite content is more successful than 5% diatomite modification. On the other hand, in the conditioned samples, the highest deformation resistance occurred at 10% modification rate. The 10% lower usage limit stated in the literature was confirmed in this study. According to the literature review, when 10% diatomite-modification made with fiber as basalt or lignin seems to be effective in terms of deformation resistance in bridge pavements where freeze-thaw cycles are frequent and severe and the effect of extreme climatic conditions is felt. In future studies, low usage rates of diatomite additive will be investigated with different fiber options and ratios. In addition, it is recommended to investigate diatomite-modified asphalt mixtures in terms of resistance to anti-icing additives and sulfate effects.

#### Acknowledgement

For their contribution to the material supply and experimental stage in this study; we would like to thank Turgay OMUR, CEO of Bentas Bentonite Company, and

Fatih OMUR, General Manager of Bentas Bentonite Company.

#### Declaration of Ethical Code

The authors declare that all of the rules stated to be followed within the scope of the "Higher Education Institutions Scientific Research and Publication Ethics Directive" were followed, and none of the actions specified under the title of "Actions Contrary to Scientific Research and Publication Ethics" have been carried out.

#### Author Contribution

In this study; Mustafa Taha ASLAN, Erol ISKENDER in the article's concept, design, data collection and preparation, literature review; Erol ISKENER, Atakan AKSOY, Mustafa Taha ASLAN data analysis, at the stage of evaluating the results; Mustafa Taha ASLAN, Erol ISKENDER, Dundar AYYILDIZ, Atakan AKSOY, C. Ensar SENGUL contributed to the writing of the article and converting it into the template.

#### Conflicts of Interest

"The authors declare that there is no conflict of interest."

#### References

- Aksoy, A., & Iskender, E. (2008). Creep in conventional and modified asphalt mixtures, *Proc. Inst. Civ. Eng. Transp*, 161, 185-195.
- Bao, Y. N. (2005). Study of asphalt mixture modified by diatomite (Master's Thesis). Chang'an University, Xi'an, China.
- Bao, Y. N., & Jiang, X. H. (2010). Study on laboratory test of road-performance of diatomite-asphalt mixture, *Highway Eng.*, 35, 018.
- Best Practice Guideline, (2003). Design of Concrete Bridge Deck Rehabilitation, Alberta Transportation, Canada.
- Bituminous mixtures. (2016). *Test Methods Cyclic Compression Test* (BS EN 12697-25).
- Chen, B., WANG, K., Wu, Q., & Qin, Z. (2014). Applied mechanics and materials, *Trans Tech Publications Ltd*, 706-710.
- Chen, W. F., Gao, P. W., Li, X.Y., Le, J., & Jin, S. (2007). Effect of the new type diatomite modifier on the pavement performance of asphalt mixture, *J. Mater. Sci. Eng.*, 25, 578-581.
- Cheng, Y., Yu, D., Gong, Y., Zhu, C., Tao, J., & Wang, W. (2018). Laboratory evaluation on performance of eco-friendly basalt fiber and diatomite compound



- modified asphalt mixture, *Materials (Basel)*, 11(12), 2400. doi: <https://doi.org/10.3390/ma11122400>
- Cheng, Y., Zhu, C., Tao, J., Jiao, Y., Yu, D., & Xiao, B. (2018). Effects of diatomite–limestone powder ratio on mechanical and anti-deformation properties of sustainable sand asphalt composite, *Sustainability*, 10(3), 808. doi: [10.3390/su10030808](https://doi.org/10.3390/su10030808)
- Cong, P., Liu N., Tian Y., & Zhang Y. (2016). Effects of long-term aging on the properties of asphalt binder containing diatoms, *Construction and Building Materials*, 123, 534–540.
- Cong, P., Chen S., & Chen H. (2012). Effects of diatomite on the properties of asphalt binder, *Construction and Building Materials*, 30, 495–499. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.11.011>
- Cubuk, M. K. (1998). The effect of an additive which is called diatomite on the behavior of asphaltic mixtures (Ph.D. Thesis). Gazi University Institute of Science and Technology, Ankara, Turkey.
- Du, T., Song, P., & Liu, L. (2022). Experimental study on activated diatomite modified asphalt pavement in deep loess area, *Processes*, 10, 1227. doi: <https://doi.org/10.3390/pr10061227>
- European Asphalt Pavement Association, EAPA. (2013). *Asphalt pavements on bridge decks*, EAPA Position Paper, Rue du Commerce, 77 1040 Brussels, Belgium. Access address: [https://www.academia.edu/42150164/Asphalt\\_pavements\\_on\\_bridge\\_decks\\_EAPA\\_Position\\_paper](https://www.academia.edu/42150164/Asphalt_pavements_on_bridge_decks_EAPA_Position_paper)
- Guo, Q., Li, L., Cheng, Y., Jiao, Y., & Xu, C. (2015). Laboratory evaluation on performance of diatomite and glass fiber compound modified asphalt mixture, *Materials and Design*, 66, 51-59. doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.10.033>
- HBEES-Highway Bridge Engineering and Bridge Engineering Software. (2022, 13 April). Access address: <https://www.bridgesite.com/softwarelinks.htm>
- Highway Technical Specification, (2013). *General Directorate of Highways*, Ankara.
- Huang, S., Shen, F., & Ding, Q. (2010). Effects of diatomite filler on the performance of porous asphalt mixture, *Guidelines for Preparation of Papers for the 10th International Conference on Asphalt Pavements*, 1-10.
- Kietzman, J. H., & Rodier, C. E. (1984). Effect of diatomite filler on performance of asphalt pavements, *Transp. Res. Rec.*, 8–19. doi: <http://worldcat.org/isbn/0309037506>
- Li, Z. S. (2008). A study on the performance of diatomite modified asphalt mixture (Master's Thesis). Jilin University, Changchun, China.
- Luo, S., Chen, N., Xu, H., Tan, B. & Chen, Q. (2016). Study on indoor pavement performance of diatomite-modified asphalt mixtur, *Proceedings of the International Conference on Innovative Material Science and Technology; Riga, Latvia*. <https://doi.org/10.2991/imst-16.2016.20>
- Omur, T., Aksoy A., Iskender, E., & Yıldırım, S. A. (2021). Diatomit modified asphalts: a new perspective for türkiye, *Road Technologies Magazine*, 68, 52-53.
- Park, H. M., Choi, J. Y., Lee, H. J., & Hwang, E. Y. (2009). Performance evaluation of a high durability asphalt binder and ahigh durability asphalt mixture for bridge deck pavements, *Construction and Building Materials*, 23(1), 219–225. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.01.001>
- Pokorski, P., Radziszewski, P., & Sarnowski, M. (2016). Fatigue life of asphalt pavements on bridge decks, *Procedia Engineering*, 153, 556 – 562. doi: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.08.191>
- Qinglin, G., Lili, L., Yongchun C., Yubo, J., & Chun, X. (2015). Laboratory evaluation on performance of diatomite and glass fiber compound modified asphalt mixture, *Materials and Design (1980-2015)*, 66, 51-59. doi:[10.1016/j.matdes.2014.10.033](https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.10.033)
- Song, Y., Che, J., & Zhang, Y. (2011). The interacting rule of diatomite and asphalt groups, *Petroleum Science and Technology*, 29(3), 254-259. doi: <https://doi.org/10.1080/10916460902882768>
- Standard Method of Test for Resistance of Compacted Asphalt Mixtures to Moisture-Induced Damage*. (2021). (AASHTO T 283).
- Tan, Y., Lei Z., & Zhou X. (2012). Investigation of low-temperature properties of diatomite-modified asphalt mixtures, *Construction and Building Materials*, 36, 787–795. doi: [10.1016/j.conbuildmat.2012.06.054](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.06.054)
- Tan, Y., Shan, L., Fang, J., & Zhang, X. (2009). Anti-cracking mechanism of diatomite asphalt and diatomite asphalt mixture at low temperature, *Southeast Univ.*, 25(1), 74–8.

- Van Garderen, N., Clemens, F. J., Kaufmann, J., Urbanek, M., Binkowski, M., Graule, T., & Aneziris, C. G. (2012). Pore analyses of highly porous diatomite and clay based materials for fluidized bed reactors, *Microporous Mesoporous Mater.*, 151, 255–263. doi: <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2011.10.028>
- Wei, H., He, Q., Jiao, Y., Chen, J., & Hu, M. (2016). Evaluation of anti-icing performance for crumb rubber and diatomite compound modified asphalt mixture, *Constr. Build. Mater.*, 107, 109-116. doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.01.003>
- Wei, H., Li, Z., & Jiao, Y. (2017). Effects of diatomite and sbs on freeze-thaw resistance of crumb rubber modified asphalt mixture, *Advances in Materials Science and Engineering*, 1-14. doi: <https://doi.org/10.1155/2017/7802035>
- Widyatmoko, I. R. C., & Elliott, J. M. (2005). Development of heavy-duty mastic asphalt bridge surfacing, incorporating trinidad lake asphalt and polymer modified binders, *Road Mater Pavement Des*, 6(4), 469–83. doi: <https://doi.org/10.1080/14680629.2005.9690016>
- Yang, C., Xie, J., Zhou, X., Liu, Q., & Pang L. (2018). Performance evaluation and improving mechanisms of diatomite-modified asphalt mixture, *Materials*, 11, 686. doi: [10.3390/ma11050686](https://doi.org/10.3390/ma11050686)
- Yin, H. Y. (2012). Research on the modification mechanism of diatomite and dry mixing of diatomite-modified asphalt mixture (Master's Thesis). Chongqing Jiaotong University, Chongqing, China.
- Yue, Y., Abdelsalam, M., Luo, D., Khater, A., Musanyufu, J., & Chen, T. (2019). Evaluation of the properties of asphalt mixes modified with diatomite and lignin fiber: a review, *Materials (Basel)*, 12(3), 400. doi: <https://doi.org/10.3390/ma12030400>
- Zhang, Y. B., Zhu, H. Z., Wang, G. A., & Chen, T. J. (2011). Evaluation of low temperature performance for diatomite modified asphalt mixture, *Adv. Mater. Res.*, 413, 246–251.
- Zhou, Z. (2008). Experimental study on mix design of diatomite modified asphalt mixture (Master's Thesis). Jilin University, Changchun, China.

## TARIMSAL SULAMADA RÜZGAR VE GÜNEŞ ENERJİ SİSTEMLERİNİN KULLANIM OLANAKLARININ ARAŞTIRILMASI: ESKİŞEHİR ÖRNEĞİ

Mahmut POLAT<sup>1</sup>, Tolga ARABACI<sup>2</sup>, Adnan CENGİZ<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup> Geçit Kuşağı Tarımsal Araştırma Enstitüsü Müd., Eskişehir,

<sup>1</sup>ORCID No: <https://orcid.org/0000-0003-4964-896>

<sup>2</sup>ORCID No: <https://orcid.org/0000-0001-9740-2978>

<sup>3</sup>ORCID No: <https://orcid.org/0000-0003-3221-8584>

Anahtar Kelimeler	Özet
Tarımsal Sulama Güneş Enerjisi Rüzgâr Enerjisi Fotovoltaik Sistemler Eskişehir	<i>Sera etkisi nedeniyle, iklim değişiklikleri gün geçtikte olumsuz etkilerini artan bir şekilde dünyamızda hissettirmeye başlamıştır. Dolayısıyla, fosil kaynaklı yakıt kullanımını azaltmak için güneş ve rüzgâr gibi temiz enerji ve kısıtlı olan su kaynaklarını tasarruflu kullanmak artık hayati bir değer taşımayı geçmiş durumdadır. Bu çalışmanın amacı, Eskişehir iklim şartlarında özellikle tarımsal sulamanın yapıldığı zaman periyodunda; güneş ve rüzgâr enerji sitemlerinin enerji üretim performanslarının ve sulama enerji etkinliklerinin araştırılmasıdır. Çalışmada sistemlerden elde edilen enerji kullanılarak sulama kuyularından çıkarılan su, 350 ton kapasiteli havuzda depolanmakta ve sulamanın gerektiği zamanlarda kullanılmaktadır. Projenin sonuçlarına göre, sistemlerin 1 kWe kurulu gücün üretmiş olduğu enerji; rüzgârda 974 kWh/kWe, güneşte ise 1.357,74 kWh/kWe olarak gerçekleşmiştir. Sistemlerin geri kazanım (kendini amorti) süresi, rüzgâr enerjisi sisteminde 12,5 yıl, PV güneş enerjisi sisteminde ise 7,1 yıl olarak hesaplanmıştır. Maliyet analizi açısından; sulama suyunun temininde alternatif enerji kaynakları olarak rüzgâr enerjisi, PV güneş enerjisine nazaran 1,87 kat daha pahalı olarak elde edilmiştir. Sonuç olarak; gerek birim enerji maliyeti ve gerekse kurulum ve bakım kolaylığı yönünden PV güneş enerjisi sistemi daha avantajlı olarak öne çıkmıştır.</i>

## INVESTIGATION OF USAGE OPPORTUNITIES OF WIND AND SOLAR ENERGY SYSTEMS IN AGRICULTURAL IRRIGATION: THE CASE OF ESKISEHIR

Keywords	Abstract
Agricultural Irrigation Solar Energy Wind Energy Photovoltaic Systems Eskisehir	<i>Due to the greenhouse effect, climate changes have begun to feel their negative effects on our world day by day. Therefore, to reduce the use of fossil fuels, using clean energy sources such as the sun and wind and the limited water resources economically has now passed as a vital value. This study aims to investigate the energy production performances and usage possibilities of solar and wind energy systems, especially in agricultural irrigation in Eskisehir climate conditions. In the project, the water extracted from the irrigation wells using the energy obtained from the systems is stored in the pool with a capacity of 350 tons and used when irrigation is required. According to the project results, the energy produced by the 1 kWe installed capacity of systems has been realized as 974 kWh/kWe of wind power and 1.357.74 kWh/kWe of PV solar systems. The system's self-payback period was calculated as 12,5 years for wind power and 7,1 years for solar PV systems. In terms of cost analysis, in the case of using wind and PV solar energy systems as alternative energy sources in the irrigation water supply, wind energy is obtained 1,87 times more expensive than PV solar energy. As a result, the PV solar energy system stood out as more advantageous in terms of unit energy cost, installation convenience, and maintenance.</i>

Araştırma Makalesi

Başvuru Tarihi : 14.02.2023

Kabul Tarihi : 04.11.2023

Research Article

Submission Date : 14.02.2023

Accepted Date : 04.11.2023

\* Sorumlu yazar: [polat.mahmut@tarimorman.gov.tr](mailto:polat.mahmut@tarimorman.gov.tr)

<https://doi.org/10.31796/ogummf.1251171>



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

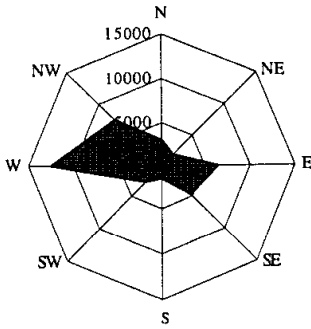
This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

## 1. Giriş

Tüm dünyada olduğu gibi Türkiye’de de etkilerini son zamanlarda etkin bir şekilde hissettiğimiz iklim değişiklikleri, tarımsal alanları da olumsuz yönde etkilemektedir. Düzensiz ve yetersiz yağış rejimlerine bağlı olarak, yerüstü sularının eksilmesi veya yetersiz olması nedenleriyle tarımsal sulamalarda yeraltı suyunun giderek etkin kullanılması kaçınılmaz hale gelmiştir. Bu durumda gerekli suyun yeraltından çıkartılarak tarımsal sulamada kullanılması ve pompa başta olmak üzere tüm sulama sisteminin çalışması için enerjiye ihtiyaç vardır. Bu enerjinin yenilenebilir kaynaklardan temin edilmesi de ayrı bir öneme sahiptir.

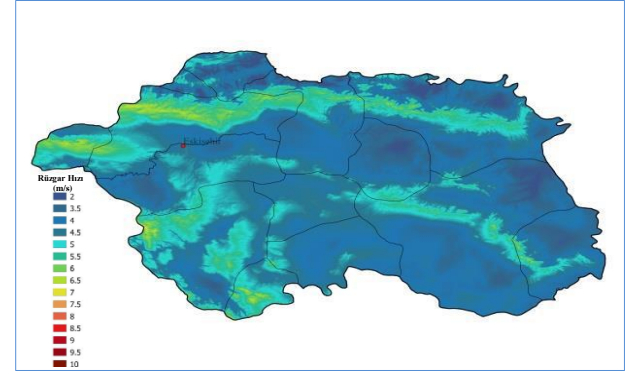
Türkiye’de tarımsal sulamada güneş ve rüzgar enerji sistemlerinin kullanılması ile ilgili çalışmalar mevcuttur. Bu çalışmanın diğerlerinden farkı; iki sistemin aynı anda suyun depolanmasında ve sulama pompalarının enerji gereksinimlerinin temin edilmesinde kullanılmasıdır.

Eskişehir, İç Anadolu, Batı Karadeniz ve Akdeniz iklimlerinin etki alanı içinde olması nedeniyle, kendine özgü karasal (kontinental) iklime sahiptir. İklim yarı kurak, birinci dereceden mezotermal (orta sıcaklık olan iklimler), su fazlası olmayan yahut çok az olan şartlara sahiptir. Uzun yıllar iklim verilerine göre, Eskişehir’de hakim rüzgar sektörü batıdır. Batı rüzgarları diğer yönlerden esen rüzgarların yaklaşık %40’nı meydana getirir. Eskişehir’de yıllık esme sayısı ortalamalarına göre çizilen rüzgar gülü diyagramından da açık bir şekilde görülebilir (Şekil 1), (Yıldırım, Ü., 2004).



Şekil 1. Eskişehir İli Rüzgar Gülü Diyagramı

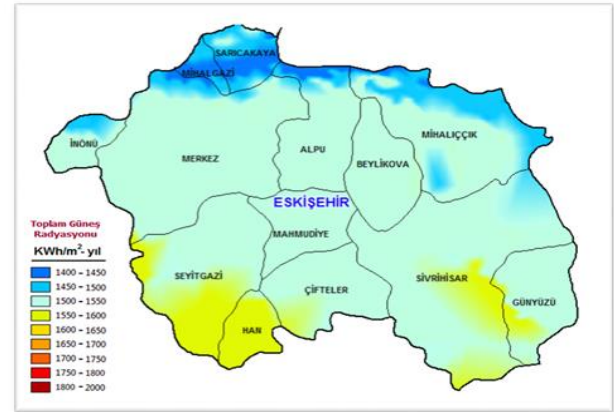
Eskişehir için rüzgar enerjisi potansiyeli yönünden (100 metre yükseklikte ölçülen ortalama değerler olmak üzere) rüzgar hızı 4,37 m/s, güç yoğunluğu 109,3 W/m<sup>2</sup> ve kapasite faktörü % 15,8 olarak belirlenmiştir (Şekil 2), (EİGM, 2023).



Şekil 2. Eskişehir İli Rüzgâr Enerjisi Kaynak Bilgileri (REPA)

Şekil 2’deki haritadan görüldüğü gibi Eskişehir, rüzgâr enerjisi potansiyeli yönünden kısmen iyi olmakla birlikte ortalama olarak düşük bir potansiyele sahip olduğunu söylemek mümkündür.

Eskişehir için 1 m<sup>2</sup>’lik (yeryüzüne paralel) yüzeye gelen güneş enerjisi miktarı yıllık ortalama olarak 3,934 kWh/m<sup>2</sup> dir. Bu miktar güneşe doğru açı değiştiğçe artacaktır. Eskişehir İli Güneş (GEPA) enerjisi kaynak bilgileri Şekil 3’de verilmiştir (YEGEM, 2017).



Şekil 3. Eskişehir İli Güneş Enerjisi Kaynak Bilgileri (GEPA)

Şekil 3’deki haritadan Eskişehir, güneş radyasyonu yönünden ortalama 1400-1600 kWh/m<sup>2</sup> .yıl bandında bir potansiyele sahip olduğu görülmektedir.

Eskişehir için rüzgâr ve güneş enerjisi potansiyellerinin belirlenmesi amacıyla yapılan bir çalışmada, enerji üretimi amacıyla yönelik rüzgâr ve güneş enerjisi verileri bölgesel olarak detaylandırılmıştır.

Verilerin değerlendirilmesi sonucunda rüzgâr ve güneş enerjisi kaynaklı elektrik üretiminin ekonomik olup olmadığı tespit edilmiştir. Çalışmada hafif sınıfta kalan rüzgâr hızlarıyla, su pompalarını çalıştırmak ve ikinci derece güç üretimi uygun bulunmuştur (Yıldızay, Aras ve Yılmaz, 2014).

Kazdaloğlu, Ünlü ve Öztürk, (2013), çalışmalarında, orta büyüklükteki bir işletmenin enerji ihtiyacına alternatif olabilecek, güneş-rüzgar enerjisi kaynaklı bir hibrit sistem uygulamasını analiz etmişlerdir. Rüzgar türbini ve güneş paneli kullanılarak işletmenin yük eğrisine uyan bir üretim eğrisi veren bir sistem üzerinde çalışılmıştır. Hibrit sistem olarak önerilen şebekeye paralel olarak çalışan 132 kW'lık rüzgar türbini ve 25 kW'lık güneş paneli uygulaması işletmenin enerji ihtiyacı için uygun bir çözüm olarak önerilmiştir.

PV-Rüzgar enerjisi hibrit sistemden elde edilen enerji kullanılarak su pompalama amacıyla yapılan araştırmada, İzmir İli için batarya yedekli PV-RES hibrit enerji sisteminin uygulanabilirliği araştırılmıştır.

Tablo 1. Eskişehir İli Uzun Yıllar Meteorolojik Veriler

ESKŞEHİR	Ocak	Şubat	Mart	Nisan	Mayıs	Haziran	Temmuz	Ağustos	Eylül	Ekim	Kasım	Aralık	Yıllık
Ölçüm Periyodu ( 1991 - 2021)													
Ortalama Sıcaklık (°C)	-0.1	1.6	5.3	9.9	14.9	18.9	21.9	21.9	17.5	12.1	5.8	1.7	11.0
Ortalama En Yüksek Sıcaklık (°C)	4.0	7.0	12.0	17.0	22.3	26.5	29.8	30.0	26.0	20.2	12.7	6.1	17.8
Ortalama En Düşük Sıcaklık (°C)	-4.0	-3.3	-0.8	2.9	7.2	11.0	13.7	13.6	9.2	5.0	0.0	-1.9	4.4
Ortalama Güneşlenme Süresi (saat)	2.6	3.9	5.2	6.3	8.2	9.8	11.3	10.4	8.7	5.9	4.3	2.4	6.6
Ortalama Yağış Gün Sayısı	11.71	10.00	11.43	9.14	13.29	12.57	3.29	4.71	4.43	9.00	9.29	13.14	112.0
Aylık Toplam Yağış Miktarı Ortalaması (mm)	44.63	29.49	30.46	32.43	39.66	63.11	15.53	16.36	14.01	25.14	24.09	30.06	365.0
Ölçüm Periyodu ( 1991 - 2021)													
En Yüksek Sıcaklık (°C)	20.3	21.8	28.1	31.1	35.0	36.8	40.6	39.0	38.4	34.2	25.4	21.4	40.6
En Düşük Sıcaklık (°C)	-27.8	-28.6	-12.0	-10.4	-2.2	0.5	5.0	4.8	-2.0	-6.8	-12.2	-19.2	-28.6

Bu projenin esas amacı; Eskişehir iklim koşullarında özellikle tarımsal sulamanın yoğun olarak yapıldığı (Mayıs-Ekim) zaman periyodunda, 1 kWe kurulu güç esas olmak üzere, güneş (PV) ve rüzgâr enerjisi (rüzgâr türbininin) enerji üretim performansının belirlenmesi ve uygulamada çiftçi koşullarında kullanım imkânının araştırılmasıdır. Enerji üretme sistemleri ile sulama havuzu aynı yerdedir. Sulama havuzu tepelik (muhkem) bir noktada olup; Enstitü 'ye ait deneme ve üretim tarlaları, ortalama 32 m kot farkıyla 850 m mesafededir. Dolayısıyla havuzda biriken su, enerji harcamadan (kendi cazibesiyile) damla sulama sistemlerini besleyebilmektedir.

Bu çalışma; TAGEM Ar-Ge projesi olarak; TAGEM/TSKAD/14/A13/P08/03 proje numarasıyla Geçit Kuşağı Tarımsal Araştırma Enstitüsü Müdürlüğü (GKTAEM) tarafından 2014-2019 yılları arasında Eskişehir'de yürütülmüştür.

## 2. Materyal ve Yöntem

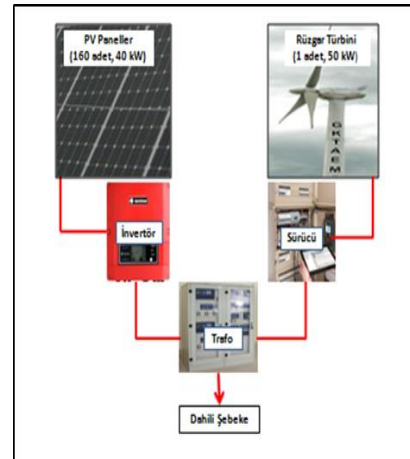
### 2.1. Materyal

Enerji üretme sistemlerinin kurulduğu noktaya ait koordinatlar: 39°46'00 57"K, 30°24'17 4"D boylamları olup yükselti ise 836 m'dir. Çalışmada, 50 kW nominal

PV-RES hibrit sistemiyle su pompalama için "MATLAB Simulink" programı yardımıyla yapılan simülasyon sonuçları verilmiştir. Günlük ortalama elektrik tüketimi 12,1 kWh olan ve en yüksek tüketimi 3,7 kW olan örnek ev otonom yük kabul edilmiştir. Çalışma sonucunda PV-RES hibrit sistemin elektrik üretme amacı için uygun çözüm olduğu anlaşılmıştır. Hibrit sistemde ayrıca invertör, şarj cihazı, dönüştürücü (convertor) ve kontrol ünitesi de mevcuttur. Yapılan simülasyonda iki sistem birlikte enerji üretmek su pompasını çalıştırdığı görülmüştür (Engin, 2004).

Eskişehir ili uzun yıllar (1991-2021) meteorolojik veriler Tablo 1'de verilmiştir (MGM, 2023).

güçte 1 adet rüzgâr türbini ve 40 kWe kurulu güçte güneş enerjisi (PV) sistemleri olmak üzere; toplam 90 kW kurulu güçte enerji üretme sistemi kullanılmıştır (Şekil 4), (Polat, Arabacı ve Cengiz, 2019).



Şekil 4. RES ve GES Ortak Sistem Şeması

Şekil 4'teki görselden görüleceği üzere, sistemlerden elde edilen elektrik enerjisi, ayrı hatlardan trafoya oradan da sulama kuyularına ve dahili şebekeye verilmektedir.



Rüzgar türbini, 50 kW nominal güçte ve 16 m çaplı rotora sahip, değişken hızlı pitch (yunuslama) ve yaw (sapma) kontrollü, 3 kanatlı bir yapıya sahiptir. Türbin çelik boru tipinde 1 adet kule, 1 adet gövde (nacelle), 1 adet pervane konisi (hub) ve 3 adet 7,35 m metre uzunluğunda kanattan oluşmaktadır. Kanat ve makine grubunu taşıyan kule 1 m çapında ve 22 m uzunluğundadır. Kule 5 parça olarak imal edilmiştir.

GES'te 160 adet 250 We nominal gücünde PV modül ve her biri 20 kW güce sahip 2 adet invertör kullanılmıştır. PV modüller, her sırada 40 adet olmak üzere 4 sıralı paneller şeklinde dizilmiştir.

### 2.1.1. Rüzgar Enerjisi Sistemi

Genel bir bilgi olarak, tipik bir rüzgâr türbinin çalışma prensibi kısaca şöyledir; rüzgârın kanatlarda uyguladığı baskı kanatlarda dönme hareketi meydana getirir. Dönme hareketi kanatların bağlı oldukları pervane konisi ve rotor flanşı vasıtasıyla rotora aktarılır. Rotorda oluşan hareket enerjisi ise sırasıyla dişli kutusu, kaplin, alternatör ve enerji çevrim ünitesi yardımıyla elektrik enerjisine dönüşerek güç panosuna, buradan da şebekeye iletilmektedir.

Çalışmada kullanılan rüzgâr türbini, 3-20 m/s rüzgâr hızı aralığında çalışabilmektedir. Kanat açıları, rüzgâr hızına göre en verimli olduğu (maksimum) güç ürettiği açı 0° ve durma noktası konumuna yaklaşık 90° gelmektedir. Kanatlar ile alternatör devirleri arasındaki senkronizasyon, düşük devir ve yüksek devir saftları üzerinde bulunan devir sensörleri vasıtası ile sağlanır. Kanatlar aktif pitch sistemi sayesinde aerodinamik fren yapma imkânına da sahiptir. Pitch pinyon dişlisi, her 3 kanadın da açısını senkronize bir şekilde 90° ye çıkarıp kanatların rüzgârı dik almasını sağlayarak aerodinamik frenleme imkânı tanır.

Türbin gövde dönüş kontrol (yaw) sistemi, türbinin rüzgâra emniyetli bir şekilde yönelmesini sağlayacak dişli sistemi ve frenleri ile donatılmıştır. Pervane konisi gövdesi çelik konstrüksiyondan imal edilmiştir. Pervane konisinin burun kısmı açılabilir kapağa sahiptir.

Türbinin genel teknik özellikleri Tablo 2, rotor teknik özellikleri Tablo 3 ve türbin operasyon verileri, rotor, alternatör ve teorik güç eğrisi özellikleri Şekil 5'te verilmiştir (Northel, 2013).

Tablo 2. Rüzgar Türbininin Genel Teknik Özellikleri

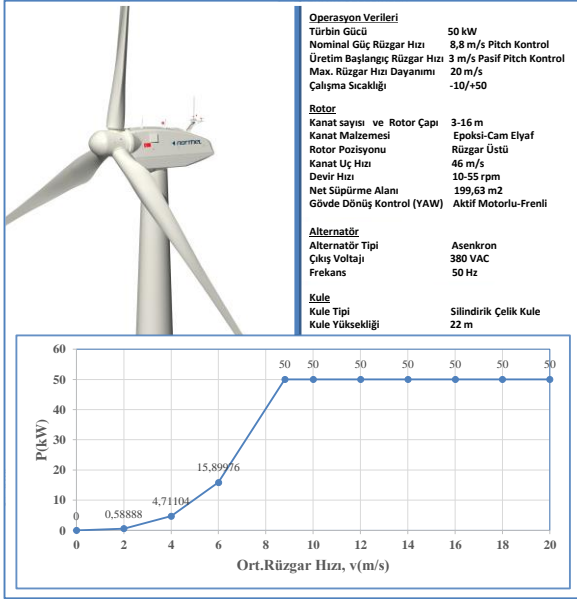
Rotor Çapı ve Kanat Sayısı	16 m-3
Devreye Girme-Çıkma Hızı	3-20 m/s
Anma Gücü Çıkışı(AG)	50 kW
Çalışma Ortam Sıcaklığı	-20 °C /+50 °C
Kule Tipi	Boru Tipli Çelik Kule
Göbek Mer. Yerden Yüksekliği	22,7 m
Ort. Pervane Devir Sayısı	53,5 d/d
Fren Sistemi	Pnömatik Tahrikli Fren
Alternatör/Dönüştürücü Tipi	Asenkron / Yoktur
Jeneratör Özellikleri	50 kW-1500 d/d-380 V 50 Hz-Asenkron

Tablo 2'de teknik özellikleri verilen türbinde, asenkron alternatör kullanıldığı için sistemde dönüştürücü bulunmamaktadır. Asenkron jeneratör, 50 kW gücünde ve 1500 d/d devir sayısına sahiptir.

Tablo 3. Rotor Teknik Özellikleri

Kanatların Süpürdüğü Net Alan	199,63 m <sup>2</sup>
Rotor Hız Aralığı	52-55 m/s
Kanat Uçlarındaki Max. Hız	46 m/s
Hız Regülasyonu	Dişli Sistemi
Aerodinamik Fren	Pitch Kontrol ile Kanat Açısı Kontrolü
Koni Açısı /Rotor Eksen Eğim	0°/3°
Kanat Uzunluğu	7,35 m
Kanat Açısı Kontrolü (PITCH)	Dişli Sistem Tek Motor Tahrikli
Ana Dişli Kutusu Anma Gücü	59,5 kW
Dişli Kutusu Tipi/ Yağlama Sistemi	2 Kademeli Planet Sistem/Aktif Elektrikli Yağlama

Tablo 3'te pervanenin maksimum devrinde kanat uçlarındaki hız 46 m/s'dir. Sistem üzerinde fren diski, basınç şalteri, fren pompası ve pistonu bulunmaktadır. Rotor mili devri 54,8 d/d'nin üzerine çıktığı anda, öncelikle kanatlar pitch kontrol yaparak devri düşürmeye çalışacaktır.



Şekil 5. Türbin Kule ve Kanat Geometrisi, Operasyon Verileri ve Teorik Güç Eğrisi Özellikleri (Northel, 2013).

Şekil 5'te türbinin enerji üretimi başlangıç rüzgar hızı 3 m/s, nominal rüzgar hızı ise yaklaşık 8,8 m/s dir. Türbin, bu değer üzerindeki tüm hızlarda en fazla teorik güç (50 kW) değeri kadar enerji üretebilecek ve bu durum rüzgar hızı 20 m/s oluncaya kadar sabit olarak devam edecektir.

Türbinin üreteceği enerji, rüzgar hızının küpü " $v^3$ " ile orantılı olarak artar. Rüzgar hızı yaklaşık olarak 8,8 m/s'ye ulaştığında türbinin zarar görmemesi için frenleme sistemi (APS, Aktif Pitch Sistemi) devreye girerek kanat açılarını değiştirmek suretiyle aerodinamik kuvveti azaltacak ve sistemi koruyacaktır. APS sayesinde enerji üretimi rüzgar hızı 20 m/s değerine ulaşıncaya kadar devam edecek ve bu değer üzerine çıktığında ise rotor devre dışı bırakılarak türbinin emniyeti sağlanacaktır.

GES ve RES sistemlerinin kurulduğu yer, tepe ve kayalık bir alan olduğundan, ilk olarak zemindeki kayalar temizlenerek alanın kaba tesviyesi, sonra da rüzgâr türbininin kurulacağı alanda temel kazısı ve beton işlemleri yapılmıştır. Akabinde de kule ve türbin kurulum çalışmaları yapılmıştır (Şekil 6-9), (Polat, Arabacı ve Cengiz, 2019).



Şekil 6. Zemin Kazı Çalışmaları Gösterimi



Şekil 7. Betonlama Çalışmaları Gösterimi

Şekil 6 ve 7'deki zemin kazı, temel ve betonlama çalışmalarında, türbinin devrilme momenti de dikkate alınarak statik ve betonarme projelerine göre yapılmıştır.



Şekil 8. Kule Montajı Çalışmaları Gösterimi



Şekil 9. Türbin Göbeği (Hub) Montaj Gösterimi

Şekil 8 ve 9'daki kule montajı görsellerinde, servis, bakım ve onarım gibi hizmetler için kulenin içerisinde bir insanın rahatlıkla çıkabileceği bir servis merdiveni mevcuttur. Kule bir bütün olarak vinç yardımıyla kolayca indirilebilecek mafsallı ve kollu bir sistemle donatılmıştır.

### 2.1.2. Güneş Enerjisi Sistemi

GES; temel ve zemin inşaatı, PV modüller, evirici (invertör) üniteleri, kumanda panoları, panel taşıyıcı konstrüksiyonu, kablolar ve kablolama işleri, koruma, şalt malzemeleri, röleler, sayaçlar, veri kayıt ve uzaktan izleme sistemi ve enerji iletim sistemi temel sistem bileşenlerinden meydana gelmiştir.

PV panel sistem kurulumunda ilk olarak zemin düzeltme ve temel betonu inşaatı gerçekleştirilmiştir. Sonra panel taşıyıcı konstrüksiyon temele civatalarla bağlanarak sabitlenmiştir (Şekil 10), (Polat, Arabacı ve Cengiz, 2019).



Şekil 10. PV Panel Taşıyıcı Konstrüksiyon Kurulumu  
Şekil 10'deki görselde görüldüğü gibi; PV paneller sabit (38°) eğimli, yerden 30 cm yükseklikte monte edilmiştir.

Panel sıraları arası mesafe 3 m olup her panel sırasında toplam 26 adet ayak kullanılmıştır. Çalışmada kullanılan PV modül ve invertörlere ait teknik özellikler Tablo 4 ve 5'te verilmiştir.

Tablo 4. PV Modül Teknik Özellikleri

Tüm teknik veriler Standart Test Koşulları olan 1000 W/m <sup>2</sup> 'ya göre hazırlanmıştır	
Model	LCS Solarstrom AG-M255-JA/SI
Boyut	1650x991x40mm
Ağırlık	19,5 kg
Hücre Sayısı	60 (Monokristal)
Mak. Güçte Voltaj	31,16 V
Mak. Güçte Akım	8,18 A
$P_{max}$ ( $P_{max}=V_{max} \times I_{max}$ )	255 Wp -0/+5 Wp
Kısa Devre Akımı	8,64 A
Devre Açılış Voltajı	38,10 V
Sistem Max. Voltajı	1000 V
Sigorta Değeri	15 A
Modül Uygulaması	A Sınıfı
NOCT	+45°C ± 2°C
Ölçüm Toleransı	± %3

Tablo 4'te görüldüğü gibi; maksimum güçte volataj ve akım 31,16 V ve 8,18 A'dir. Buradan da maksimum güç 255 W olarak hesaplanabilir.

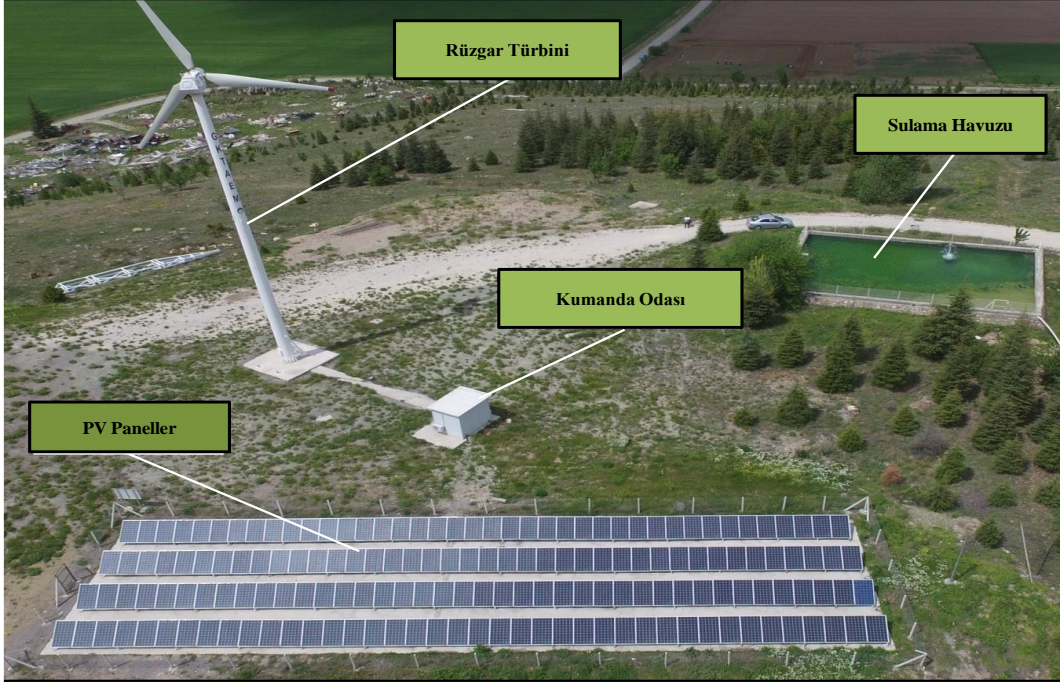
Tablo 5. İnvirtör Teknik Özellikleri

DC (Doğu Akım)-Giriş	
MODEL NO. : INFPV 1000	
Maksimum Giriş Voltaj	1000 V
Min. MPP Voltaj	370 V
Maksimum MPP Voltaj	850 V
Maksimum Giriş Akımı	2x14,3 A
AC (Alternatif Akım)-Çıkış	
Nominal Çıkış-Voltaj-Frekans	3/N/PE-230V-50 Hz
Nominal Çıkış Gücü	20 kW
Maksimum Çıkış Akımı	3x17 A
Nominal Çıkış Akımı	3x14,49 A
Max. Dayanım Gücü ( $S_{Emax}$ )	22 kW
Çevirme	IP 65
Uyum	VDE 0126-1-1, VDE-AR-N 4105

Tablo 5'te, invertörler, DC ve AC akım seçeneklerinde maksimum 22 kW dayanım güçlerine sahiptir.

Kurulumu gerçekleştiren rüzgar-güneş enerji sistemine ait 1 adet kumanda odası mevcuttur. Kumanda odasında kumanda ve güç panoları, invertörler, data logger cihazı ve USB bağlantılı cihazlar vardır. Sistemin kurulumu gerçekleştirildikten sonra araştırma çalışmalarına başlanmıştır (Şekil 11), (Polat, Arabacı ve Cengiz, 2019).





Şekil 11. Rüzgâr-Güneş (PV) Enerji Üretim ve Sulama Suyu Depolama Sistemi

## 2.2. Yöntem

### 2.1. Ölçüm ve Hesaplama

Rüzgâr türbininde rüzgâr hızını ölçen anemometre ve rüzgâr yönünü ölçen rüzgâr yön sensörleri bulunmaktadır. Her iki cihazdan gelen bilgiler PLC (programlanabilir mantık denetleyicisi) sistem yazılımı sayesinde optimum rotor hızını elde etmek için kanat pitch açıları otomatik olarak ayarlamak için kullanılmaktadır. Bu ayarlama, pervane konisi içinde bulunan elektrik motoru ve dişli sistemi vasıtasıyla yapılmaktadır. Sistem kanat açılarını değiştirerek hız kontrolü sağlama yanında aerodinamik fren işlevi de görür. Aerodinamik fren olarak kullanma kanat açılarının 90° ye getirilmesi ile sağlanır. Rüzgâra dik konumda kalan kanat dönme kabiliyetini yitireceğinden dolayı fren görevi görmüş olur.

Her sistem üzerinde veri ölçme ve kaydetme cihazları mevcuttur. İnternet üzerinden de izlenebilen uygulama sayesinde istenilen verileri grafik veya tablo olarak elde etmek ve sistemlerin çalışma durumlarını takip etmek mümkündür. Elde edilen veriler, araştırmaya esas olarak, bitkilerin vejetasyon süreleri gereği aylık olarak değerlendirilmiştir.

Sistemlerden elde edilen enerji, sayaç üzerinden trafoya gelmektedir. Trafoya gelen enerji kullanım durumuna göre sulamada ve sulamanın olmadığı durumlarda da şebekeye verilmektedir. Sistemlerin ürettiği enerji

enerjiyle beslenen ve sulama havuzunun yanında bulunan derin kuyudaki dalgıç tipi pompanın bastığı su havuzu doldurmakta ve bu su tarımsal sulamada kullanılmaktadır.

Herhangi bir rüzgâr türbininin üretebileceği maksimum (teorik) güç;

$$P_{teo} = \frac{1}{2} * \rho_{rüz} * A_{rnet} * C_p * v_{rüz}^3 \quad (1)$$

eşitliği yardımıyla hesaplanabilir (Kıncay, O., Yumurtacı, Z., Bekiroğlu, N. (2018).

Burada  $P_{teo}$ ; türbin teorik gücü [W],  $\rho_{rüz}$ ; Rüzgâr (hava) yoğunluğu [ $kg/m^3$ ],  $A_{rnet}$ ; rotor net süpürme alanı)  $v_{rüz}$ ; rüzgâr ortalama hızı [m/s],  $C_p$ ; güç katsayısı [%].

Kullanılan türbinin rotor net süpürme alanı,  $A_{rnet}$  ;

$$A_{rnet} = \frac{\pi(D_{rot}^2 - d_g^2)}{4} \quad (2)$$

eşitliği yardımıyla bulunabilir.

Burada  $D_{rot}$  ; rotor çapı [m],  $d_g$  ; kanat göbek çapı [m].

Herhangi bir enerji santralinin enerji üretim verimi veya gerçek kapasite faktörü (KF), santralin bir yılda ürettiği gerçek enerji miktarının, santralin tam kapasitede (teorik) üretebileceği enerji miktarına oranı şeklinde ifade edilebilir. Enerji verimli açısından kapasite faktörünün yüksek olması arzu edilir.

Rüzgâr türbininde kapasite faktörü KF, türbinin mevcut rüzgâr hızı değerleriyle bir yılda üretebileceği enerji

miktarının, türbinin tam güçteyken (teorik) üretebileceği enerji miktarına oranıdır.

Rüzgar türbini için KF;

$$KF = \frac{E_{ger}}{E_{teo}} = \frac{E_{ger}}{P_{teo} * 8760} \quad (3)$$

Şeklinde ifade edilebilir.

Burada; KF; kapasite faktörü [%],  $E_{ger}$ ; türbinin ürettiği yıllık elektrik enerji miktarı [kWh],  $E_{teo}$ ; türbinin üretebileceği yıllık maksimum (teorik) elektrik enerji miktarı [kWh],  $P_{teo}$ ; türbinin teorik (nominal) gücü [kW].

Rüzgar türbini tarafından üretilebilecek teorik enerji miktarı  $E_{teo}$ ; 1 yıl (8.760 saat), 50 kW kurulu güç ve %28 türbin verimi esas olmak üzere; 122.640 kWh olarak hesaplanır.

Çalışmada kullanılan rüzgar türbini verimi %28 olarak alınmıştır (Nortel, 2013; Yücel M., Özder S., 2018).

Bu veriler doğrultusunda rüzgar türbini için KF;

$$KF_{RES} = \frac{E_{RESg}}{122640} \quad (4)$$

şeklinde yazılabilir.

Benzer şekilde GES'te kapasite faktörü, santralin 1 yılda (mevcut güneşlenme şartlarında) ürettiği enerjinin tam kapasitede üretebileceği enerjiye oranı olarak tanımlanır.

PV sistemi için için  $E_{teo}$ ; 365 gün, 40 kW nominal güç, Eskişehir için yıllık ortalama güneşlenme süresi (6,5 saat/gün) dikkate alındığında; 94.900 kWh olarak hesaplanır.

Bu veriler doğrultusunda Eşitlik (4), GES için tekrar düzenlenirse;

$$KF_{GES} = \frac{E_{ger}}{E_{teo}} = \frac{E_{GESg}}{94900} \quad (5)$$

olarak bir ifade ortaya çıkar.

## 2.2. Sistemlerin Maliyet Hesabı

Çalışmada "Sabit Yıllık Sermaye Masrafı Metodu" kullanılmıştır (Kıncay, O., Yumurtacı, Z., Bekiroğlu, N., 2018).

Bu metotta kullanılan eşitlikler:

### 1. İlk Yatırım Maliyeti ( $I_d$ ):

$$I_d = C_s * N_e \quad (6)$$

Burada  $I_d$ ; ilk yatırım maliyeti [TL,\$],  $C_s$ ; birim tesis bedeli [TL,\$/kW],  $N_e$ ; baz alınan güç, [kW<sub>e</sub>].

### 2. Eskalasyon (Fiyat Farkı) Yükü ( $Y_e(t)$ ):

$$Y_e(t) = Y(t) * (1 + e)^{t_{ins}} \quad (7)$$

Burada  $Y_e(t)$ ; inşaat süresince eskalasyon yükü [TL,\$],  $Y(t)$ ; yatırım tutarı [TL,\$],  $e$ ; eskalasyon yükü [%6],  $t_{ins}$ ; inşaat süresi [yıl].

### 3. İnşaat Süresince Faiz Yükü ( $T(t)$ ):

$$T(t) = Y_e(t) * [(1 + i)^{t_{ins}}] \quad (8)$$

Burada  $T(t)$ ; inşaat süresince faiz yükü [TL,\$],  $Y(t)$ ; yatırım tutarı [TL,\$],  $e$ ; eskalasyon yükü [%6].

### 4. Sabit Yıllık Sermaye Masrafı ( $C_k$ ):

$$C_k = I_k * \left[ \frac{f * (1 + f)^t}{(1 + f)^t - 1} \right] \quad (9)$$

Burada  $C_k$ ; sabit sermaye masrafı [TL,\$],  $I_k$ ; eskalasyon ve faiz yükleri de dahil olmak üzere inşaatın bitiminde toplam yatırım bedeli [TL,\$],  $f$ ; yıllık faiz oranı [%],  $t$ ; santral ömrü [yıl].

### 5. Yıllık Üretilen Enerji Miktarı ( $E$ ):

$$E = 24 * 365 * N_e * L_f \quad (10)$$

Burada  $E$ ; yıllık üretilen enerji miktarı [kWh],  $N_e$ ; baz alınan güç [kW],  $L_f$ ; yük faktörü.

### 6. Birim Yatırım Maliyeti ( $g_k$ ):

$$g_k = \frac{C_k}{E} \quad (11)$$

Burada  $g_k$ ; birim yatırım maliyeti [TL,\$/kWh].

### 7. Birim İşletme ve Bakım Maliyeti ( $g_m$ ):

Toplam yıllık işletme ve bakım maliyeti, başlangıç maliyetinin %2'i olup şu şekilde hesaplanır:

$$C_m = I_d * 0,02 \quad (12)$$

$$g_m = \frac{C_m}{E} \quad (13)$$

Burada  $C_m$ ; toplam yıllık bakım ve işletme masrafı [\$],  $g_m$ ; birim işletme ve maliyeti [\$/kWh].

### 8. Birim Elektrik Enerji Maliyeti ( $g$ ):

$$g = \frac{C_k + C_m}{E} = \frac{C_T}{E} \quad (14)$$

Burada  $g$ ; birim elektrik enerji maliyeti [\$/kWh].

### 9. Sistemlerin Geri Kazanım Süresinin Belirlenmesi (GÖS):

Paranın zaman değerini hesaba katan aşağıdaki genel ifadedden yararlanılmıştır (Finansal Analiz, 2016).

$$I = \sum_{i=1}^N \frac{A_i}{(1 + i)^i} \quad (15)$$

Burada  $I$ ; yatırım tutarı [TL],  $A_i$ ;  $t$  zamandaki getiri [TL], önceden saptanmış iskonto haddi [%].



Sistemin geri kazanım (geri dönüş, geri ödeme, amorti) süresi GÖS (Geri Ödeme Süresi, 2016);

$$GÖS = \frac{I_d}{G_{sy}} \quad (16)$$

Burada GÖS; sistemin geri dönüş süresi [yıl],  $I_d$ ; sistemin ilk yatırım maliyeti [TL,\$],  $G_{sy}$ ; sistemden yıllık olarak elde edilen gelir (elde edilen enerjinin kWh cinsinden ilk yatırım tarihindeki birim fiyat üzerinden değeri), [TL,\$].

Üretilen enerjinin yıllık getirisi ise aşağıdaki eşitlik yardımı ile bulunur.

$$G_{sy} = E_{sger} * ebf \quad (17)$$

Burada  $E_{sger}$ ; sistemin üretmiş olduğu yıllık (gerçek) enerji miktarı [kWh/yıl],  $ebf$ ; elektriğin birim fiyatı [TL/kWh].

### 3. Bulgular ve Tartışma

#### 3.1. Sistemlerin Elektrik Üretim Performansı

Proje sonunda 3 yıllık verilerin ortalaması olarak GES'ten 54.310 kWh, RES'ten ise 48.700 kWh enerji elde edilmiştir. Sistemlerin enerji üretim performansı şu şekilde hesaplanabilir;

$$r_s = \frac{E_{sger}}{P_{teo}} \quad (18)$$

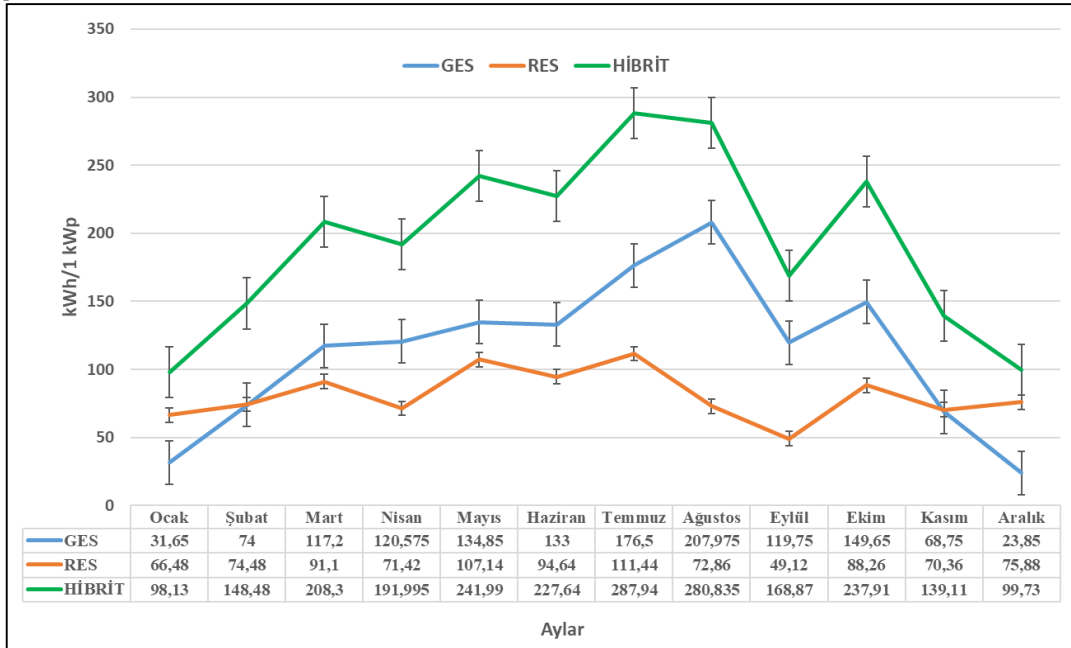
Burada  $r_s$ ; sistemin elektrik enerji üretim performansı [kWh/kWp],  $E_s$ ; sistemden yıllık üretilen (gerçek) enerji miktarı [kWh],  $P_{teo}$ ; Sistemin kurulu (teorik) gücü [kWp].

Eşitlik (18)'de  $P_{teo}$ , GES için 40, RES için ise 50 kW olarak alındığında, sistemlerin enerji üretim performansı; GES için; 1.357,342 kWh/kWp, RES için; 974 kWh/kWp olarak hesaplanır.

Aylar itibarıyla enerji üretim performansları Şekil 12'de verilen grafikte daha net olarak görülmektedir.

Şekil 12'de sulama sezonu boyunca sistemlerden elde edilen toplam elektrik enerjisinin, Enstitü 'ye ait sulama kuyuları için gerekli olan elektrik enerjisinin yaklaşık olarak %50'sini karşıladığı tespit edilmiştir.

Proje süresince rüzgâr türbininin kurulduğu (GKTAEM) yerde (25 m yükseklikte) rüzgâr hızı ölçümleri yapılmış olup elde edilen sonuçlar Tablo 5'te verilmiştir.



Şekil 12. Aylar itibarıyla sistemlerin enerji üretim performansları (kWh/1 kWp).

Tablo 5. Proje Süresince Ölçümü Yapılan Rüzgâr Hızı Aylık Ortalama Değerleri

Aylar	Ocak	Şubat	Mart	Nisan	Mayıs	Haziran	Temmuz	Ağustos	Eylül	Ekim	Kasım	Aralık	Ort.
<b>Rüzgâr Hızı (m/s)</b>													
	4,27	4,59	4,70	4,59	4,17	4,81	4,91	4,49	3,31	3,31	3,52	4,59	4,27

Tablo 5'ten projenin sürdüğü 3 yılın aylık ortalamaları görülmektedir. Rüzgâr hızı yıllık ortalama olarak 4,27 m/s olarak gerçekleşmiştir.

EİGM (2023) verilerine göre; Eskişehir İli uzun yıllar yıllık rüzgâr hızı ortalaması 4,37 m/s olarak verilmiştir.

### 3.2. Sistemlerin Enerji Üretim Verimleri (KF)

Eşitlik (4) yardımıyla RES için kapasite faktörü KF, 0,397 ve eşitlik (5) yardımıyla da GES için KF, 0,572 olarak hesaplanmıştır.

Tipik bir rüzgâr türbinin kapasite faktörü; rüzgâr türbininin kurulduğu yerin rüzgâr kapasitesine bağlı olarak %20 ile %35 arasında değişir. Türkiye için rüzgâr türbinlerinin kapasite faktörünün %25 ve üzerinde olması yatırım için uygun görülmektedir (YEGM, 2017).

Çalışmada kullanılan rüzgâr türbininin enerji üretim veriminin yaklaşık %40 olarak çıkması enerji verimliliği açısından iyi bir sonuç olarak değerlendirilebilir.

Aynı yorumu GES için de yapmak mümkündür.

### 3.3. RES Maliyet Analizi

Maliyet analizlerinde Mart 2013 tarihi itibarıyla elektriğin birim fiyatı; güncel olan EPDK tarifesine göre, tek zamanlı mesken tarife kullanan aboneler için

elektrik kWh fiyatı, tüm bedeller, fonlar ve vergiler dâhil 0,32 TL olarak baz alınmıştır (Gazete Elektrik, 2016).

RES le ilgili maliyet verileri Tablo 6'da verilmiştir.

Tablo 6. RES Maliyet Analiz Verileri

Faiz Oranı (f)	0,05
Santral Ömrü (l)	20 Yıl
Yük Faktörü ( $L_f$ )	0,3
Baz Alınan ( $N_e$ )	50 kW
Birim Tesis Bedeli ( $C_s$ )	2 500 \$/kW <sub>e</sub>
Eskalasyon Oranı (e)	0,06
İnşaat (Kurulum süresi) (t)	0,5 Yıl

Maliyet analizi ile ilgili yukarıda verilen (6-17) nolu eşitlikler kullanılarak; Birim Elektrik Maliyeti (g): 28 cent\$/kWh olarak hesaplanmıştır.

GÖS, RES için 12,5 yıl olarak gerçekleşmiştir.

### 3.4. GES Maliyet Analizi:

GES le ilgili maliyet verileri Tablo 7'de verilmiştir.

Tablo 7. GES Maliyet Verileri

Faiz Oranı (f)	0,05
Santral Ömrü (l)	20 Yıl
Yük Faktörü ( $L_f$ )	0,4
Baz Alınan ( $N_e$ )	40 kW
Birim Tesis Bedeli ( $C_s$ )	2 000 \$/kW <sub>e</sub>
Eskalasyon Oranı (e)	0,06
İnşaat (Kurulum süresi) (t)	3 ay (0,25 yıl)

Maliyet analizi ile ilgili yukarıda verilen (6-17) nolu eşitlikler kullanılarak; Birim Elektrik Maliyeti (g): 15 cent\$/kWh olarak hesaplanmıştır.

GÖS; GES için 7,1 yıl olarak gerçekleşmiştir.

Sistemlerin 6 aylık sulama sezonu (Mayıs-Ekim) boyunca 1 kWe kurulu güçlerinin enerji üretim performansı karşılaştırıldığında GES'in RES'e göre 1,761 kat daha verimli olduğu ortaya çıkmıştır.

Maliyet analizi açısından sulama suyunun temininde rüzgâr enerjisi, güneş enerjisine nazaran 1,87 kat daha pahalı olarak elde edilmiştir. Buradaki farkın yüksek olması, projenin başladığı yıl (2014) itibarıyla rüzgâr türbininin ilk yatırım maliyetinin yüksek olmasından kaynaklanmıştır.

Sistemlerden elde edilen enerji sürekli olarak (7/24) sulama suyunun temininde kullanılmıştır. Dolayısıyla kuyulardan çıkarılan suyun, 350 ton kapasiteli havuzda depo edilerek gerekli zamanlarda kullanılması sağlanmıştır.

Tarımsal sulamada YEK'dan faydalanarak kendi enerjisini üreten ve bu enerjiyi suyun kuyulardan çıkarılması, depolanması ve sulamanın yapılması için kullanan bu tür sulama suyu depolama sistemleri; "Proje Sonuç Raporun" da tarımsal sulamalar için bir model olarak önerilmiştir.

Proje süresince, sistemlerin kurulum, montaj, de-montaj, bakım, onarım ve servis kolaylığı açısından GES daha avantajlı olarak öne çıkmıştır.

Çiftçilerin tarımsal sulama amaçlı olarak RES ve GES sistemlerini tercih ederken, yukarıda açıklanan bütün

hususları ve kendi uygulama şartlarını da göz önünde bulundurmaları gerekir.

#### 4. Sonuç

Çalışmayla elde edilen sonuçlar aşağıda maddeler halinde sıralanmıştır:

##### 4.1. RES ile İlgili Sonuçlar

1. RES'te enerji üretim verimliliği (KF) %40 olarak gerçekleşmiştir.
2. 50 kW kurulu güce sahip RES'ten yıllık ortalama 48.700 kWh enerji elde edilmiştir.
3. Sistemin 1 kWe kurulu gücünün üretmiş olduğu enerji; 974 kWh/kWe, olarak hesaplanmıştır.
4. Rüzgâr türbinini bulunduğu yerin 3 yıllık ortalama rüzgâr hızı (25 metrede) 4,27 m/sn. olarak ölçülmüştür.
5. Birim enerji üretim maliyeti 28 cent/ kWh olarak gerçekleşmiştir.
6. Sistemin geri kazanım (geri dönüş) süresi 12,5 yıl olarak hesaplanmıştır.
7. Uygulamada türbinin rotor kısmında meydana gelen arızaların giderilmesi için rotorun özel (büyük kapasiteli) bir vinçle indirilmesi, tamir atölyesine gönderilmesi, tamir edilmesi ve tekrar geri getirilerek yerine monte edilmesi zaman ve maliyet açısından bir yük getirmiştir.

##### 4.2. GES ile İlgili Sonuçlar

1. RES'te enerji üretim verimliliği (KF) %40 olarak gerçekleşmiştir.
2. 40 kW kurulu güce sahip GES'ten yıllık ortalama 54.309,7 kWh enerji elde edilmiştir.
3. Sistemin 1 kWe kurulu gücünün üretmiş olduğu enerji 1.357,34 kWh/kWe olarak hesaplanmıştır.
4. GES'te birim enerji üretim maliyeti 15 cent/ kWh olarak gerçekleşmiştir.
5. Sistemin geri kazanım (geri dönüş) süresi 7,1 yıl olarak gerçekleşmiştir.
6. Güneş Enerjisi Sistemi'nin anlık şebeke gücü olarak en düşük değer 9.079 W, en büyük değer ise 38.720 W olarak ölçülmüştür.
7. Kaydedilen anlık şebeke gücü açısından en yüksek değerler Mart ve Nisan, en düşük değerler ise Aralık ve Ocak aylarında ölçülmüştür.

#### Teşekkür

Bu çalışma, TAGEM Ar-Ge projesi olarak; TAGEM/TSKAD/14/A13/P08/03 proje numarasıyla Geçit Kuşağı Tarımsal Araştırma Enstitüsü Müdürlüğü (GKTAEM) tarafından 2014-2019 yılları arasında Eskişehir'de yürütülmüştür.

Desteklerinden dolayı, Tarımsal Araştırmalar ve Politikalar Genel Müdürlüğü (TAGEM)'e ve Eskişehir Geçit Kuşağı Tarımsal Araştırma Enstitüsü Müdürlüğü (GTAEM)'e teşekkür ederiz.

#### Yazarların Katkısı

Bu çalışmada; proje lideri olarak Mahmut POLAT, projenin hazırlanması, Enstitü ve Bakanlık Araştırma Komitelerine sunulması, projenin uygulanması, elde edilen verilerin işlenmesi, değerlendirilmesi ve "Proje Sonuç Raporu" nun hazırlanması ile ilgili görevleri yapmıştır. Tolga ARABACI, yardımcı araştırmacı olarak; literatür araştırması, proje süresince sistemlerin özellikle elektriksel arızalar yönünden takip ve kontrol edilmesi, verilerin işlenmesi ve değerlendirilmesi görevlerini yapmıştır. Adnan CENGİZ, projenin tarımsal sulama ile ilgili çalışmaları yapma ve verilerin değerlendirilmesi çalışmalarına katkı sağlamıştır.

#### Çıkar Çatışması

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir.

*\* Bu çalışmada araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur.*

#### Kaynaklar

Engin, M. (2004). Güneş-Rüzgâr Hibrit enerji ile su pompalama. *Ege Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*. ISSN 1018-8551, 41(3):155-164.

EİGM, (2023). Eskişehir rüzgar enerjisi potansiyeli. Erişim adresi: <https://repa.enerji.gov.tr/REPA/iller/ESKISEHIR-REPA.pdf>.

Finansal Analiz, (2016). Erişim adresi: <https://finansal analiz/s-s-s/geri odeme suresi>

Gazete Elektrik, (2016). Erişim adresi: <https://gazelektrik.com/s-s-s/epdk-elektrik-tarifeleri>.

Geri Ödeme Süresi, (2014). AÜ ders notları. Erişim adresi:

[https://acikders.ankara.edu.tr/pluginfile.php/101488/mod\\_resource/content/0/12%20Geri%20%C3%96deme%20S%C3%BCresi.pdf](https://acikders.ankara.edu.tr/pluginfile.php/101488/mod_resource/content/0/12%20Geri%20%C3%96deme%20S%C3%BCresi.pdf).

Kazdaloğlu, A. ve ark., (2013), Orta büyüklükteki bir İşletme için güneş-rüzgar hibrit enerji santrali uygulaması. Erişim adresi:  
<http://www.emo.org.tr/ekler/>.

Kıncay, O., Yumurtacı, Z., Bekiroğlu, N. (2018). YTE ders notları. Erişim Adresi:  
<http://www.yildiz.edu.tr/~okincay/yen.html>.

Koç, E., Şenel, M.C., (2012). Dünyada ve Türkiye’de enerji durumu -genel değerlendirme.  
Erişim adresi:  
[http://www1.mmo.org.tr/resimler/dosya\\_ekler/a8c16d2696b35f9\\_ek.pdf](http://www1.mmo.org.tr/resimler/dosya_ekler/a8c16d2696b35f9_ek.pdf).

MGM, (2023). Eskişehir İli uzun yıllar meteorolojik veriler. Erişim adresi:  
<http://www.mgm.gov.tr>.

Northel, (2013). Firma ürün kataloğu. Erişim Adresi:  
<http://www.northel.com.tr/>.

Polat, M., Arabacı, T., Cengiz, A. (2019). Tarımsal sulama amaçlı rüzgar ve PV güneş enerji sistemlerinden elektrik üretimi ve kullanım imkanlarının araştırılması (Eskişehir örneği) başlıklı Proje Sonuç Raporu. Proje No:TAGEM/TSKAD/14/A13/P08/03 Yayın No: GKTAEM-2019/001. Erişim adresi:  
<http://projepaylasim.tagem.gov.tr/>

YEGEM, (2017), Erişim adresi:  
<http://www.yegm.gov.tr>,

Yıldırım, Ü. (2004). Erişim adresi:  
<https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/198542>.

Yıldızay, H.D., Aras, H., Yılmaz, V. (2014), Eskişehir de güneş ve rüzgar enerjisinin potansiyelinin belirlenmesi. *Dicle Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Dergisi*. Cilt 5, Sayı 1, 49-58.

Yücel, M., Özder, S. (2018), Yaw ve pitch kontrollü dişli kutusuz 5kw rüzgâr türbini üretilmesi ve verimliliği. Çanakkale Onsekiz Mart Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi, 2018:4,1, 74-87.  
Erişim adresi:  
<https://dergipark.org.tr/tr/download/article-file/473650>.

## ODAKLAMA DERİNLİĞİNİN ARTIRILMASINDA DERİN ÖZELLİKLERİN ODAKLAMA DEĞERLERİNİN ÇIKARILMASINDAKİ ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

Sibel DANIŞMAZ<sup>1</sup>, Sümeyye Nur EMİR<sup>2</sup>, Hülya DOĞAN<sup>3\*</sup>, Ramazan Özgür DOĞAN<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü,  
ORCID No : <https://orcid.org/0000-0001-6945-6493>

<sup>2</sup>Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Bilgisayar Mühendisliği Bölümü,  
ORCID No : <https://orcid.org/0000-0002-7331-2406>

<sup>3</sup>Karadeniz Teknik Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Yazılım Mühendisliği Bölümü,  
ORCID No : <https://orcid.org/0000-0003-3695-8539>

<sup>4</sup>Gümüşhane Üniversitesi, Mühendislik ve Doğa Bilimleri Fakültesi, Yazılım Mühendisliği Bölümü,  
ORCID No : <https://orcid.org/0000-0003-3695-8539>

Anahtar Kelimeler	Öz
Odaklama derinliği Odaklama derinliğinin artırılması Derin öğrenme Odaklama ölçüm operatörü	<i>Mikroskobik sistemlerde var olan odaklama derinliğinden dolayı numunenin tüm alanının odaklandığı görüntü elde etmek imkânsız olabilmektedir. Bu durum, mikroskobik sistemlerde görüntü işleme ve yapay zekâ algoritmaları kullanılarak gerçekleştirilen sınıflandırma, bölütleme, hizalama (registration), panoramik birleştirme (stitching) gibi uygulamalarının başarılarını olumsuz yönde etkilemektedir. Literatürde numunenin tüm alanının odaklandığı görüntüyü elde etmek için odaklama derinliğinin artırılması yaklaşımları geliştirilmektedir. Literatür çalışmaları, bu yaklaşımların, görüntülerdeki eğrilerin ve kenarların düşük kesinlikte karakterizasyonu, daha yüksek koşma süresi ve incelenen numuneye ve kullanılan mikroskoba göre performans değişimi gibi çeşitli kısıtlamalara sahip olduklarını ortaya koymaktadır. Ek olarak, bu yaklaşımlar odaklama bilgilerini genelde görüntülerin gri seviye değerlerini kullanarak hesaplamaktadırlar. Bu çalışmada bu kısıtlamaları minimize etmek için yeni bir odaklama derinliğinin artırılması yaklaşımı geliştirilmekte ve odaklama derinliğinin artırılmasında derin özelliklerin odaklama değerlerinin çıkarılmasındaki etkileri incelenmektedir. Çalışmada elde edilen sonuçlar derin özelliklerin piksellerin odaklama değerlerini hesaplamada gri seviye değerlerine göre daha etkin olduğunu göstermektedir.</i>

## INVESTIGATION OF EFFECTS OF DEEP FEATURES ON FOCUS VALUES EXTRACTION IN EXTENDED DEPTH OF FOCUS

Keywords	Abstract
Depth of focus Extended depth of focus Deep learning Focus measurement operator	<i>Due to the focusing depth in microscopic systems, it may be impossible to obtain an image in which the entire area of the sample is focused. This situation negatively affects the success of applications such as classification, segmentation, registration, panoramic stitching, which are performed using image processing and artificial intelligence algorithms in microscopic systems. In the literature, approaches are developed to increase the focusing depth to obtain an image in which the entire area of the sample is focused. Literature studies reveal that these approaches have several limitations, such as low-precision characterization of curves and edges in images, higher running time, and performance variation according to the sample examined and the microscope used. In addition, these approaches often calculate focusing information using the gray level values of the images. In this study, a new approach to increasing the focusing depth is developed in order to minimize these limitations and the effects of deep features on the extraction of focusing values in increasing the focusing depth are examined. The results obtained in the study show that the deep features are more effective in calculating the focusing values of the pixels than the gray level values.</i>

Araştırma Makalesi

Research Article

Başvuru Tarihi : 20.05.2023

Submission Date : 20.05.2023

Kabul Tarihi : 04.11.2023

Accepted Date : 04.11.2023

\* Sorumlu yazar: [hulya@ktu.edu.tr](mailto:hulya@ktu.edu.tr)

<https://doi.org/10.31796/ogummf.1299670>



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

Mikroskobik sistemlerde görüntüleme ekipmanı sabitken numune tablasının odak kaybı olmadan hareket ettiği, aksel aralık olarak tanımlanan odaklama derinliği mevcuttur. Numune boyutu mikroskobun odaklama derinliğinden daha geniş olduğu durumda, numunenin tüm alanının odaklandığı bir görüntü yakalamak imkânsız olmaktadır. Odaklama derinliği dışında kalan numune alanları bulanık görünmektedir. Araştırmacılar mikroskobik sistemlerde görüntü işleme ve yapay zekâ algoritmaları kullanarak gerçekleştirilen sınıflandırma, bölütleme, hizalama (registration), panoramik birleştirme (stitching) gibi uygulamaları geliştirirken, numune boyutunun odaklama derinliğinden daha geniş olduğu durumlarda yakalanan görüntüyü (bölgesel bulanıklıklara sahip) tercih etmemektedirler. Mikroskobik sistemlerde görüntü işleme ve yapay zekâ algoritmalarının etkinliğini artırmak için odaklama derinliğinin artırılması ile numunenin tüm alanının odaklandığı (optimum odaklı) görüntü oluşturulmaktadır.

Literatürde odaklama derinliğinin artırılması için geliştirilen yaklaşımlar wavefront kodlama ve imge füzyonu tabanlı olmak üzere iki kategoriye ayrılmaktadır (Ambikumar ve diğ., 2016). Wavefront kodlama tabanlı yaklaşımlarda mikroskop objektifinin arka odaklama düzlemine elemanlar yerleştirilerek odaklama derinliği artırılmaktadır (Dowski ve Cathey, 1995). Avantajları: mükemmel hassasiyet ve gerçek zamanlı performans. Dezavantajları: yüksek maliyet ve ek donanım gerektirmesi (Akpınar ve diğ., 2021; Mo ve diğ., 2019; Cohen ve diğ., 2014). İmge füzyonu tabanlı yaklaşımlar ise odaklama derinliğinin artırılması sürecinde farklı bölgeleri odaklanmış görüntü serisi kullanarak optimum odaklı görüntüyü oluşturmaktadır. Literatür araştırmalarına göre imge füzyonu tabanlı yaklaşımlar, mikroskop sistemlerinde numunenin tüm alanının odaklandığı görüntünün üretilmesi (odaklama derinliğinin artırılması) için en sık tercih edilenlerdir (Mo ve diğ., 2019; Hermessi ve diğ., 2021). Avantajları: Düşük maliyetli ve ek donanım gerektirmemesi. Dezavantajları: İncelenen numune ve kullanılan mikroskop çeşidine (ışıklı, floresan, konfokal) göre performans değişimi. İmge füzyonu tabanlı yaklaşımlar üç temel aşamadan oluşmaktadır:

1. Farklı bölgeleri odaklanmış görüntü serisinin oluşturması: Bu aşamada mikroskobun tablası Z ekseninde hareket ettirilerek birden fazla sayıda, aynı perspektif ve farklı odaklamalara sahip görüntüler elde edilmektedir.
2. Görüntü serisindeki piksellerin odaklama değerlerinin hesaplanması: Bu aşamada, her bir pikselin odaklama bilgisi hakkında bilgi veren değerler, odaklama ölçüm operatörleri kullanılarak hesaplanmaktadır. Literatürde

odaklama ölçüm operatörlerini altı sınıfa ayrılmaktadır:

- Gradyan tabanlı: Bu operatörler, odaklama değerlerini belirlemek için piksellerin birinci derece türevlerini kullanmaktadırlar. Gauss Türevi, Tenengrad ve Gradyan Enerjisi literatürde sıklıkla kullanılan gradyan tabanlı operatörlere bazı örneklerdir.

- Laplacian tabanlı: Bu operatörler, odaklama değerlerini çıkarmak için piksellerin ikinci derece türevlerini kullanmaktadırlar. Laplacian Varyansı, Laplacian Enerjisi ve 3B Laplacian bu ölçüm operatörlerine örnek olarak verilebilmektedirler.

- Dalgacık dönüşümü tabanlı: Bu operatörler, piksellerin odaklama değerlerini hesaplamak için ayrık dalgacık dönüşümü katsayılarını kullanmaktadırlar. Dalgacık Katsayısı Toplamı ve Dalgacık Katsayısı Varyansı bu ölçüm operatörlerinin literatürde kullanılan bazı örnekleridir.

- İstatistik tabanlı: Bu operatörler, piksellerin odaklama değerlerini belirlemek için görüntünün yoğunluk ve histogram gibi verilerini kullanmaktadırlar. Chebyshev Momentleri, Öz Değerler, Varyans ve Histogram Entropisi popüler istatistik tabanlı ölçüm operatörlerindedir.

- Kosinüs dönüşümü tabanlı: Bu operatörler, piksellerin odaklama seviyelerini hesaplamak için ayrık kosinüs dönüşümünü kullanmaktadırlar. Literatürde yaygın olarak kullanılan kosinüs dönüşümü tabanlı ölçüm operatörleri Ayrık Kosinüs Dönüşümü Azaltılmış Enerji Oranı ve Ayrık Kosinüs Dönüşümü Enerji Oranı'dır.

- Diğer operatörler: Bu operatörler, odaklama derecelerini hesaplamak için piksellerin belirli özelliklerini kullanmaktadırlar. Yerel İkili Model, Uzamsal Frekans, Ayrık Eğri (Curvelet) Dönüşümü ve Görüntü Eğriliği bu ölçüm operatörlerine örnek olarak verilebilmektedir.

3. Maksimum odaklama değerlerine sahip piksellerin seçilmesi: Bu aşamada, görüntü serisinde maksimum odaklama değerlerine sahip pikseller seçilerek tek bir görüntüde birleştirilmektedir. Araştırmacılar, maksimum odaklama değerine sahip pikselleri belirlemek için füzyon seçim kurallarını kullanmaktadırlar. Klasik füzyon seçim kurallarına örnek olarak Ortalama ve Maksimum Seçme verilebilmektedir.

Bu çalışmanın genel yapısı şu şekilde tasarlanmıştır. Bölüm 2'de odaklama derinliğinin artırılması için

geliştirilen çalışmaların genel literatür taraması verilmektedir. Bölüm 3'te çalışmada önerilen danışmansız öğrenme tabanlı odaklama derinliğinin artırılması yaklaşımı detaylı şekilde anlatılmaktadır. Bölüm 4'te çalışmada elde edilen bulgular verilmektedir. Bölüm 5'te elde edilen bulgular hakkında genel tartışma gerçekleştirilmektedir. Çalışmamızın son kısmı olan Bölüm 6'da ise çalışmanın sonuçları ve gelecekteki çalışmalar için öneriler verilmektedir.

## 2. Bilimsel Yazın Taraması

Daha önce belirtildiği gibi, odaklama derinliğinin artırılması için geliştirilen yaklaşımlar wavefront kodlama ve imge füzyonu tabanlı olmak üzere iki kategoriye ayrılmaktadır. Wavefront kodlama tabanlı yaklaşım öneren çalışmalara örnekler şu şekilde verilebilmektedir: Dowski ve Cathey (1995) çalışmalarında geniş bir odaklama derinliğine sahip görüntüleme performansı sunan optik-dijital sistem üretmişlerdir. Pan ve diğ. (2008) çalışmalarında odaklama derinliğinin artırılması için kübik faz maskeli wavefront kodlama tabanlı görüntüleme teknolojisi geliştirmişlerdir. Wavefront kodlama tabanlı odaklama derinliğinin artırılması yaklaşımı oluşturmak için Zhao ve diğ. (2013) ticari optik tasarım yazılımına dayalı iki ana optimizasyon tekniği geliştirmişlerdir. Gierlak ve diğ. (2013) wavefront kodlama tabanlı odaklama derinliğinin artırılması yaklaşımı tasarlamak için uzamsal ışık modülatörü kullanmışlardır. Akpınar ve diğ. (2021) çalışmalarında odaklama derinliğinin artırılması için kırınımlı optik eleman ve konvolüsyonel sinir ağı kullanarak wavefront kodlama gerçekleştirmişlerdir. Cao ve diğ. (2017) üniform olmayan spektruma maruz kalırken sistemin performansını artırmak için mikroskop sistemine wavefront kodlama eklenmesini önermişlerdir. Mikroskopik sistemlerde odaklama derinliğinin artırılmasında karşılaşılan kısıtlamaları en aza indirmek için Elmalem ve diğ. (2018) tarafından hesaplamalı görüntüleme tabanlı bir teknik önerilmiştir. Du ve diğ. (2019) mikroskopta açıklığı ve odaklama derinliğini aynı anda artırmak için lensle birleştirilmiş wavefront kodlama tabanlı teknik önermişlerdir. Wei ve diğ. (2019) entegre wavefront kodlama sisteminin görüntüleme özelliklerini gözlemlemek için çeşitli optik sistem yüzeylerine adapte edilmiş faz plakası ile iki alternatif sistem kurmuşlardır. Li ve diğ. (2022) odaklama derinliğinin artırılması için genetik algoritma kullanarak odak dışı tutarlılığı artıran yüksek dereceli polinom faz maskesi önermişlerdir. Bu çalışmalarda wavefront kodlama tabanlı yaklaşımların gerçek zamanlı performans sağlayabildiği ancak yüksek maliyet ve ek donanım gerektirmesi gibi çeşitli kısıtlamaları olduğu dikkat çekmektedir.

Literatür çeşitli odaklama ölçüm operatörleri ve imge füzyonu teknikleri öneren çok sayıda çalışma içermektedir (Hermessi ve diğ., 2021; Tan ve diğ., 2020; Liu ve diğ., 2020). Araştırmacılar özellikle tıbbi görüntüleme (Wang ve diğ., 2020; Jose ve diğ., 2021; Liu ve diğ., 2022) ve uzaktan algılama (Ye ve diğ., 2019; Huang ve diğ., 2022) gibi diğer araştırma alanlarında imge füzyonu için birçok algoritma önermişlerdir. Literatür araştırmalarında numunenin tüm alanının odaklandığı görüntüyü üretmek için mikroskop sistemlerinde en sık tercih edilen yöntemin imge füzyonu tabanlı yaklaşımların olduğu görülmektedir. Ancak maliyeti düşük ve ek ekipman gerektirmeyen bu yaklaşımlarla ilgili sınırlı sayıda çalışma bulunmaktadır. İmge füzyonu tabanlı yaklaşımlara yönelik literatür çalışmaları şu şekilde örneklendirilebilmektedir: Valdecasas ve diğ. (2001) odaklama derinliğinin artırılması için yeni bir yöntem geliştirmişler ve çalışmalarında önerilen yöntem değerlendirmesi ve testi için üç farklı test ve 10 alternatif yöntem kullanmışlardır. Aguet ve diğ. (2008) tarafından parlak alan optik kesit koleksiyonundan numunenin dokusunu ve topografyasını ortaklaşa değerlendiren görüntü oluşturma modeline dayalı bir yaklaşım önerilmiştir. Mikroskopik sistemden elde edilmiş görüntü serisinin odaklama özelliklerini çıkarmak için Forster ve diğ. (2004) karmaşık değerli ayrık dalgacık dönüşümüne (KDADD) dayalı bir yaklaşım geliştirmiştir. Fakat, bu yaklaşımın görüntülerden eğri ve kenar bilgilerinin çıkarılması söz konusu olduğunda bazı kısıtlamaları olduğu kaydedilmiştir. Tessens ve diğ. (2007) bu kısıtlamaları en aza indirmek amacıyla ayrık curvelet dönüşümü (ACD) kullanarak odaklama ölçüm operatörü geliştirmişlerdir. Forster ve Tessens'in bulgularına göre, ayrık dalgacık dönüşümü ve ayrık curvelet dönüşümü tarafından üretilen frekans katsayılarının boyutları, serideki görüntülerinin boyutlarından farklıdır. Bu durum odaklama bilgilerinin giriş görüntülerinden yeterince çıkarılmamasına neden olmaktadır. Dogan ve diğ. (2018) mikroskopik sistemlerde odaklama derinliğinin artırılması için, mevcut çok ölçekli dönüşümlerden (ayrık dalgacık dönüşümü, ayrık curvelet dönüşümü) daha hızlı ve daha iyi seyrek temsile sahip, alt örnekleme shearlant dönüşümüne (AÖSD) dayalı yeni bir yaklaşım önermişlerdir. Alanda görünen her basil odakta olacak şekilde genişletilmiş odaklı bir mikroskop görüntüsü oluşturmak için, Costa ve diğ. (2019) çok odaklı bir görüntü füzyon yöntemi önerilmişlerdir. Piccinini ve diğ. (2012) mikroskopik sistemlerde odaklama derinliğinin artırılması için yeni bir teknik geliştirmişlerdir. Araştırmacılar, en yüksek odaklama değerine sahip pikselleri belirlemek için daha önce değindiğimiz gibi füzyon seçim kurallarını kullanmaktadırlar. Klasik füzyon seçim kurallarına (Ortalama ve Maksimum Seçim) ek olarak, çok ölçekli dönüşümlere dayalı yaklaşımlar öneren son

çalışmalarda (Chen ve diğ., 2020; Li ve diğ., 2020; Ramlal ve diğ., 2019) odaklama özellikleri düşük ve yüksek frekans katsayıları kullanılarak hesaplandığından, bu yaklaşımlara uygun füzyon seçim kuralları da ortaya çıkmıştır.

Bu çalışmada, farklı bölgeleri odaklanmış görüntülerden oluşan seri kullanılarak numunenin tüm alanının odaklandığı görüntü üreten yeni bir odaklama derinliğinin artırılması yaklaşımı geliştirilmekte ve odaklama derinliğinin artırılmasında derin özelliklerin odaklama değerlerinin çıkarılmasındaki etkileri incelenmektedir. Literatürde odaklama derinliğinin artırılması için wavefront kodlama tabanlı yaklaşım öneren pek çok çalışma bulunmaktadır. Ayrıca, özellikle tıbbi görüntüleme ve uzaktan algılama gibi diğer araştırma alanlarında, piksellerin odaklama derecesini hesaplamak için literatürde çeşitli odaklama ölçüm operatörleri ve imge füzyonu teknikleri önerilmiştir. Fakat, daha düşük maliyetli olmalarına ve ek ekipman gerektirmemelerine rağmen, odaklama derinliğinin artırılması için sınırlı sayıda imge füzyonu tabanlı yaklaşımlar gerçekleştirilmiştir. Literatürde Varyans ve Tenengrad gibi klasik operatörleri kullanan odaklama derinliğinin artırılması yaklaşımlarının başarıları oldukça düşüktür. Klasik operatörlerle (Varyans, Tenengrad) karşılaştırıldığında, KDADD, ACD, AÖSD'ye dayalı yeni yaklaşımlar, odaklama derinliğinin artırılması için daha keskin odaklama dereceleri sunmaktadır. Fakat, literatür çalışmaları bu yaklaşımların, görüntülerdeki eğrilerin ve kenarların düşük kesinlikte karakterizasyonu, daha yüksek koşma süresi ve incelenen numuneye ve kullanılan mikroskoba göre performans değişimi gibi çeşitli kısıtlamalara sahip olduklarını ortaya koymaktadır. Ek olarak, bu yaklaşımlar odaklama bilgilerini genelde görüntülerin gri seviye değerlerini kullanarak hesaplamaktadırlar. Derin öğrenmeye dayalı yaklaşımlar diğer araştırma alanlarında (özellikle odaklama ölçüm operatörleri ve imge füzyonu teknikleri) popüler hale gelmesine ve tatmin edici performans sağlamasına rağmen, bu tür yaklaşımlar odaklama derinliğinin artırılması için geliştirilmemiştir. Bunun nedeninin ise derin öğrenme ağını modellemek için farklı bölgeleri odaklanmış görüntü serisinden oluşan kapsamlı bir veri setinin bulunmamasıdır. Bu kısıtlamaların üstesinden gelmek için araştırmamız şu katkıları sağlamaktadır.

- Literatürdeki farklı bölgeleri odaklanmış görüntü serisi içeren veri seti kısıtlamasından dolayı, bu çalışmada danışmansız derin öğrenme tabanlı odaklama derinliğinin artırılması yaklaşımı oluşturulmaktadır. Bu çalışma odaklama derinliğinin artırılması için derin öğrenme yaklaşımlarının kullanıldığı ilk çalışmalardandır.

- Odaklama derinliğinin artırılmasında derin özelliklerin odaklama değerlerinin hesaplanmasındaki etkileri incelenmektedir.
- Odaklama bilgilerini hesaplarken genelde görüntülerin gri seviye değerlerini kullanan literatür çalışmalarına aksine bu çalışma derin özellikleri kullanarak hesaplanmaktadır.

### 3. Yöntem

Bu çalışmada, bilimsel araştırma ve yayın etiğine uyulmuştur. Bu çalışma numunenin tüm alanının odaklandığı tek görüntü üretmek için danışmansız derin öğrenme tabanlı odaklama derinliğinin artırılması yaklaşımı sunmaktadır. Bu yaklaşım derin özelliklerin çıkarımı için ağ tasarımı ve füzyon olmak üzere iki ana aşamadan oluşmaktadır. İlk aşamada, giriş görüntülerinin (farklı bölgeleri odaklanmış görüntüler) derin özelliklerini çıkarmak için bir otomatik kodlayıcı modeli tasarlanmaktadır. Füzyon aşamasında, derin özellikler kullanılarak piksellerin odaklama değerleri hesaplanmakta ve farklı bölgeleri odaklanmış görüntü serisi kullanılarak numunenin tüm alanının odaklandığı tek bir görüntü üretilmektedir. Bu aşamalar hakkındaki detaylar şu şekilde açıklanabilmektedir:

#### 3.1. Derin Özelliklerin Çıkarımı için Ağ Tasarımı Aşamaları

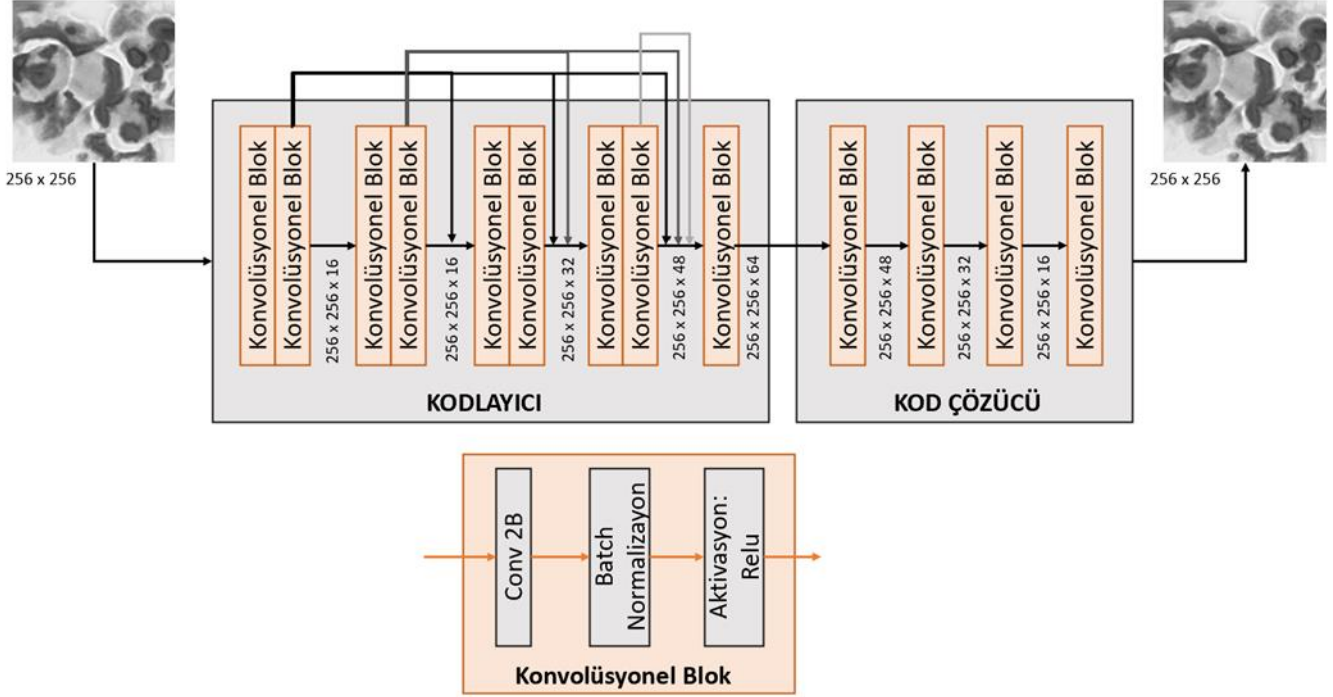
Bu aşamada farklı bölgeleri odaklanmış görüntülerin derin özelliklerini elde etmek için otomatik kodlayıcı modeli oluşturulmaktadır. Derin özelliklerin çıkarılması için oluşturulan otomatik kodlayıcı modelinin yapısı Şekil 1'de gösterilmektedir. Oluşturulan otomatik kodlayıcı modeli bu aşamada eğitilmekte ve modelin eğitilebilir parametreleri sabitlenmektedir. Şekil 1'de gösterildiği gibi, otomatik kodlayıcı modeli kodlayıcı ve kod çözücü olmak üzere iki ana faz içermektedir.

##### 3.1.1. Kodlayıcı

Kodlayıcı fazının birincil önceliği piksellerin odaklama bilgileri hakkındaki özelliklerini elde etmektir. Giriş görüntüleri 256 x 256 boyutuna küçültülerek gri seviyeye çevrildikten sonra bu faz için giriş olarak alınmaktadır. Çıkış olarak toplamda 64 derin özellik matrisi (256 x 256) elde etmektedir. Çıkışları birbirine bağlı olan konvolüsyonel bloklarını içeren 5 bölüm vardır. Konvolüsyonel blok, 3 x 3 filtre boyutu ve 1 stride içeren 1 konvolüsyon katmanı (Conv 2B), 1 batch normalizasyon katmanı ve 1 Relu katmanı içermektedir. Literatür çalışmalarında daha küçük filtre boyutlarının görüntülerden detaylı bilgileri çıkarmak için daha verimli olduğu iddiası nedeniyle, tüm konvolüsyon katmanlarının filtre boyutları 3 x 3 olarak atanmaktadır. Şekil 1'de gösterildiği gibi, konvolüsyonel bloklarının filtre sayıları sırasıyla 16,

16, 32, 48 ve 64'tür. Literatürde odaklama derinliğinin artırılması için gerçekleştirilen çalışmalarda ayrı dalgacık dönüşümü ve ayrı kurvelet dönüşümü tarafından üretilen frekans katsayılarının boyutları (odaklama bilgisi hesaplamak için kullanılan özellik matrisleri), serideki görüntülerinin boyutlarından farklıdır. Piksellerin odaklama bilgileri hesaplanırken bu matrisler yeniden boyutlandırılmaktadır. Bu durum

odaklama bilgilerinin giriş görüntülerinden yeterince çıkarılmamasına neden olmaktadır. Bu kısıtlamayı ortadan kaldırmak için bu çalışmada geliştirilen otomatik kodlayıcı modeli giriş görüntüsü ile aynı boyutta derin özellik matrisleri üretmektedir. Bu nedenle, görüntü boyutunu değiştirmemek için kodlayıcı fazında havuzlama gibi farklı katmanlar kullanılmamaktadır.



Şekil 1. Derin Özelliklerin Çıkarılması için Oluşturulan Otomatik Kodlayıcı Modelinin Yapısı

### 3.1.2. Kod Çözücü

Kod çözücü fazı, kodlayıcı fazında üretilen özellik matrislerini kullanarak giriş görüntüsünü ( $256 \times 256$ ) yeniden oluşturmaktadır. Bu faz derin özellik matrislerini ( $256 \times 256 \times 64$ ) giriş olarak almakta ve çıkış olarak  $256 \times 256$  boyutunda bir görüntü üretmektedir.  $3 \times 3$  filtre boyutu ve 1 stride içeren 1 konvolüsyon katmanı (Conv 2B), 1 batch normalizasyon katmanı ve 1 Relu katmanı içeren 4 konvolüsyonel blok vardır.

### 3.2. Füzyon Aşaması

Füzyon aşaması, farklı bölgeleri odaklanmış görüntü serisi kullanarak numunenin tüm alanının odaklandığı tek bir görüntü üretmektedir. Şekil 2 füzyon aşamasının şematik diyagramını göstermektedir. Şekil 2'de gösterildiği gibi, bu aşama dört temel adımdan oluşmaktadır; (1) Farklı bölgeleri odaklanmış görüntü serisinin oluşturulması, (2) Derin özellik matrislerinin elde edilmesi, (3) Piksellerin odaklama değerlerinin hesaplanması ve (4) Maksimum odaklama değerlerine

sahip piksellerin seçilmesi. Bu adımlar detaylı olarak şu şekilde açıklanabilmektedir:

1. Farklı bölgeleri odaklanmış görüntü serisinin oluşturulması:

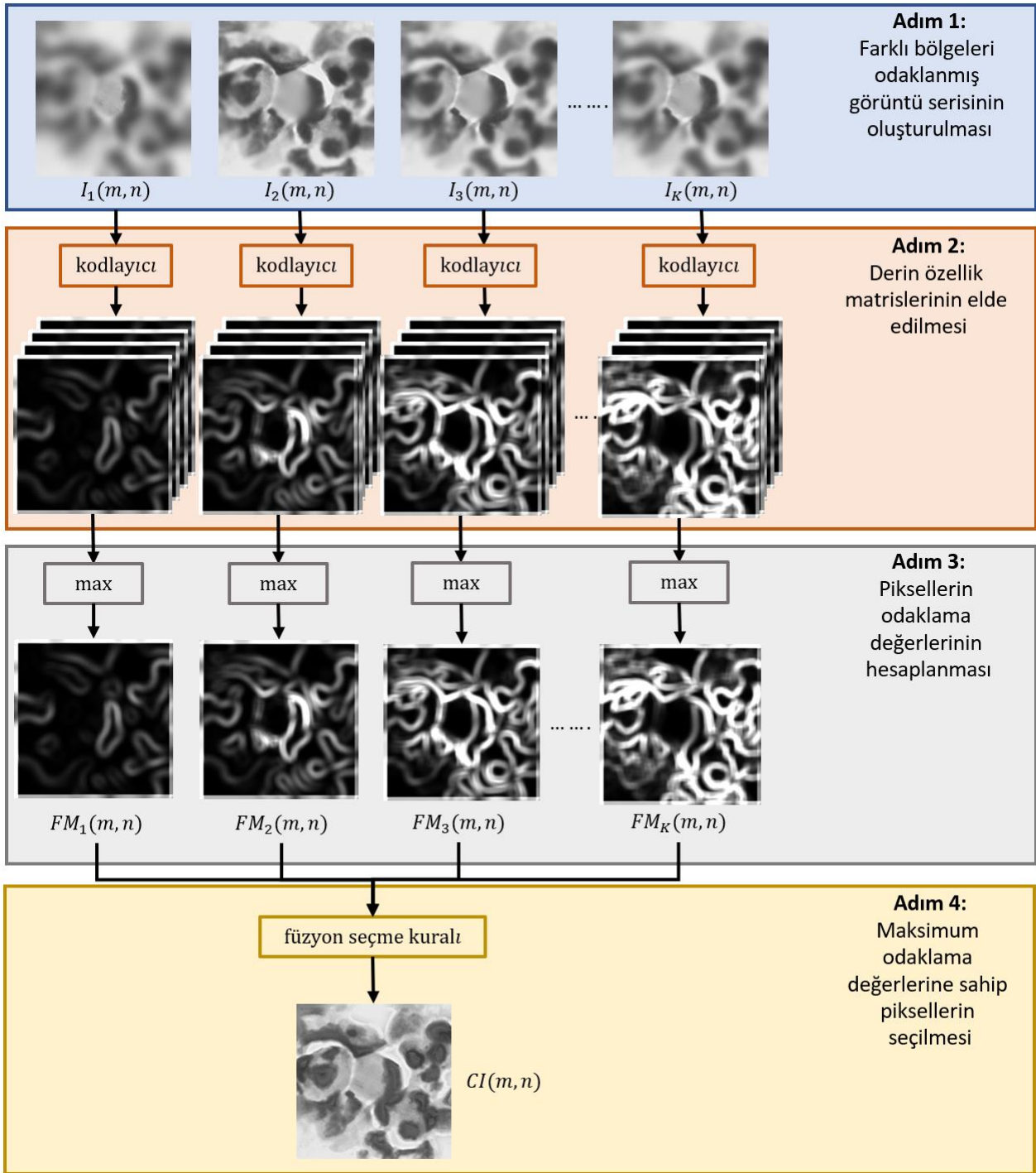
Bu adımda birden fazla sayıda, aynı perspektif ve farklı odaklamalara sahip görüntüler ( $I_1(m, n), I_2(m, n), \dots, I_K(m, n)$ ) elde edilmektedir. Burada  $K$  görüntü sayısını,  $m$  ve  $n$  ise piksel koordinatlarını temsil etmektedir.

2. Derin özellik matrislerinin elde edilmesi:

Bu adımda farklı bölgeleri odaklanmış görüntüler önceki aşamada eğitilmiş otomatik kodlayıcı modeline giriş olarak verilmekte ve kodlayıcı fazından çıkış olarak alınarak her görüntü için 64 tane derin özellik matrisi elde edilmektedir.

3. Piksellerin odaklama değerlerinin hesaplanması:

Odaklama derinliğinin artırılması yaklaşımları farklı bölgeleri odaklanmış görüntüler (giriş görüntüleri) arasında pikselden piksele hizalama gerektirmektedir. Bu durum odaklama bilgilerinin hesaplandığı özellik matrislerinin giriş görüntüleri ile aynı boyutta olması



Şekil 2. Füzyon Aşamasının Şematik Diyagramı; (1) Farklı Bölgeleri Odaklanmış Görüntü Serisinin Oluşturulması, (2) Derin Özellik Matrislerinin Elde Edilmesi, (3) Piksellerin Odaklama Değerlerinin Hesaplanması ve (4) Maksimum Odaklama Değerlerine Sahip Piksellerin Seçilmesi

anlamına gelmektedir. Çok ölçekli dönüşümleri kullanan (KDADD, ACD ve AÖSD) önceki çalışmalarda giriş görüntüsü ile aynı boyutta özellik matrisleri oluşturulamamaktadır. Bu yüzden pikselden piksele hizalama sağlamak için özellik matrisleri yeniden boyutlandırılmaktadır. Bu durum görüntülerden önemli karakteristik detayların çıkarılmasını imkânsız

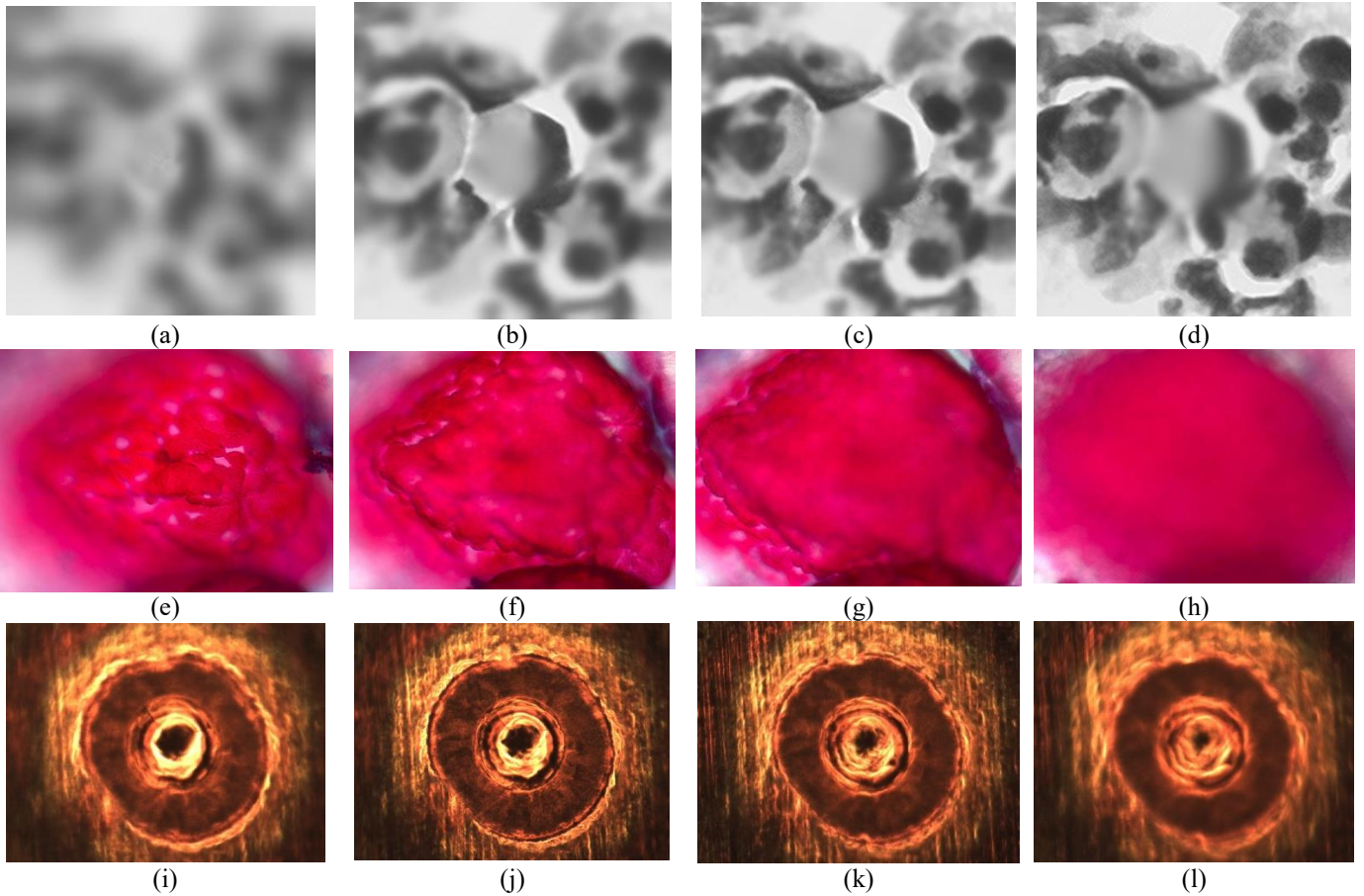
hale getirebilmektedir. Bu sorunu çözmek için çalışmada giriş görüntüleri ile aynı boyutlara sahip derin özellik matrisleri kullanılmaktadır. Her giriş görüntüsü için derin özellik matrislerinden maksimum değerler seçilerek piksellerin odaklama ölçüm değerleri ( $FM_1(m, n), FM_2(m, n), \dots, FM_K(m, n)$ ) elde edilmektedir.



#### 4. Maksimum odaklama değerlerine sahip piksellerin seçilmesi:

Dördüncü adımda numunenin tüm alanının odaklandığı tek bir görüntü oluşturmak için füzyon seçme kuralı kullanılmaktadır. Bu adımda kullanılan füzyon seçme kuralı Eşitlik 1 ile tanımlanmaktadır.

$$CI(m, n) = \max(FM(m, n)) \quad (1)$$



Şekil 3. Çalışmada Oluşturulan Serilerdeki Farklı Bölgeleri Odaklanmış Görüntülere Örnekler. Sentetik Görüntü Serisi (a, b, c, d), Mikroskop Görüntü Serisi - 1 (e, f, g, h), Mikroskop Görüntü Serisi - 2 (i, j, k, l)

Çalışmada önerilen odaklama derinliğinin artırılması yaklaşımının etkinliğini değerlendirmek için sentetik ve gerçek mikroskop görüntü serilerini içeren veri seti oluşturulmuştur. Detayları Tablo 1'de verilen serilerdeki farklı bölgeleri odaklanmış görüntülere örnekler Şekil 3'te gösterilmektedir. Sentetik Görüntü Serisi, Pertuz ve diğ. (2013) tarafından oluşturulan simülasyon modeli kullanılarak oluşturulmuştur. Bu seri 50 mm ile 500 mm odaklama mesafesinden elde edilen 30 görüntü içermektedir. Bu serideki her görüntünün boyutu 256 x 256 pikseldir. Görüntülerin elde edilmesi için 3.3 odak uzaklığına sahip kamera kullanılmaktadır. Bu çalışmada kullanılan mikroskop görüntü serileri EPFL Biyomedikal Görüntüleme Grubu (Biomedical Imaging Group -

#### 4. Bulgular

Çalışmada önerilen otomatik kodlayıcı modelinin gerçekleştirilmesi için Intel Core i7-9750 ve 2.60 GHz işlemci, 16 GB RAM ve NVIDIA GeForce RTX 3060 GPU'ya sahip bir PC üzerinde çalışan Python 3.6 yazılımı Keras arka uç Tensorflow'dan oluşan bir cihaz konfigürasyonu kurulmuştur.

<http://bigwww.epfl.ch/demo/edf/index.html>) aracılığıyla oluşturulmaktadır. Mikroskop Görüntü Serisi- 1 için membran etiketleyici boya kullanılarak boyanmış Peyer yamalarını içeren fare bağırsağı slaytı hazırlanmaktadır (Aguet ve diğ. 2008). Zeiss Plan-Neofluar mikroskobunda 0,75 NA büyütme objektifi kullanılmaktadır. Farklı bölgeleri odaklanmış görüntüler QImaging Retiga CCD kamera kullanılarak elde edilmektedir. Bu seri, boyutu 1996 x 1450 piksel olan 20 renkli görüntü içermektedir. Mikroskop Görüntü Serisi- 2, lazer kaynak etkisi araştırmasından derlenmiştir (Aguet ve diğ. 2008). Bu seri, boyutları 1024 x 768 piksel olan, farklı bölgeleri odaklanmış 13 renkli görüntü içermektedir.

Tablo 1. Veri Seti ve Detayları

Görüntü Serisi	Detayları
Sentetik Görüntü Serisi	30 görüntü, 256 x 256 piksel, 3.3 odak uzaklığına sahip kamera, 50 mm ve 500 mm arasında odaklama mesafesi
Mikroskop Görüntü Serisi- 1	20 görüntü, 1996 x 1450 piksel, Zeiss Plan-Neofluar mikroskop, QImaging Retiga CCD kamera, 0.75 NA büyütme objektifi
Mikroskop Görüntü Serisi- 2	13 görüntü, 1024 x 768 piksel, lazer kaynak etkisi

Sentetik görüntü serisi odaklama derinliğinin artırılması yaklaşımlarının etkinliğini değerlendirmek için kullanılabilir bir referans görüntü içermektedir. Bu nedenle çalışmada sentetik görüntü serisini kullanarak en optimum performansı sağlayan yaklaşımı belirlemek için referans görüntü gerektiren performans analiz metrikleri tercih edilmektedir. Çalışmada kullanılan referans görüntü gerektiren performans analiz metrikleri aşağıdaki gibidir:

#### 1. Kök Ortalama Kare Hatası (Root Mean Squared Error - RMSE)

RMSE, odaklama derinliğinin artırılması yaklaşımı ile oluşturulan görüntü ile referans görüntü arasındaki benzerliği tanımlamaktadır. İdeal yaklaşımla oluşturulan görüntünün RMSE değerinin diğer yaklaşımlara göre daha küçük olması beklenmektedir. RMSE'nin hesaplanması şu şekilde verilmektedir:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{K \cdot L} \sum_{i=0}^K \sum_{j=0}^L (RI_{i,j} - CI_{i,j})^2} \quad (2)$$

Eşitlik 2'de  $CI$  ve  $RI$ , odaklama derinliğinin artırılması ile oluşturulan görüntüyü ve referans görüntüyü,  $K$  ve  $L$  ise görüntülerin boyutlarını ifade etmektedir.

#### 2. Tepe Sinyal Gürültü Oranı (Peak Signal Noise Ratio - PSNR)

PSNR, odaklama derinliğinin artırılması yaklaşımı ile oluşturulan görüntü ile referans görüntü arasındaki ilişkiyi temsil eden bir ölçüdür. İdeal yaklaşımla oluşturulan görüntünün PSNR değerinin diğer yaklaşımlara göre daha yüksek olması beklenmektedir. PSNR ölçüsü şu şekilde hesaplanmaktadır:

$$PSNR = 20 * \log_{10} \frac{H^2}{\sqrt{\frac{1}{K \cdot L} \sum_{i=0}^K \sum_{j=0}^L (RI_{i,j} - CI_{i,j})^2}} \quad (3)$$

Eşitlik 3'te  $CI$  ve  $RI$ , odaklama derinliğinin artırılması ile oluşturulan görüntüyü ve referans görüntüyü,  $H$  oluşturulan görüntüdeki ( $CI$ ) maksimum değeri,  $K$  ve  $L$  ise görüntülerin boyutlarını temsil etmektedir.

#### 3. Evrensel Kalite Endeksi (Universal Quality Index - UQI)

UQI, odaklama derinliğinin artırılması yaklaşımı ile oluşturulan görüntü ile referans görüntü arasındaki bozukluğu ölçmek için kullanılmaktadır. Görüntünün UQI değerinin 1'e yakın olması yaklaşımın ideal olduğunu göstermektedir. UQI ölçüsü şu şekilde hesaplanmaktadır:

$$UQI = \frac{4\sigma_{RI,CI}\overline{RICI}}{(\sigma_{RI}^2 + \sigma_{RCI}^2)(\overline{RI}^2 + \overline{CI}^2)} \quad (4)$$

Eşitlik 4'te  $CI$  ve  $RI$ , odaklama derinliğinin artırılması ile oluşturulan görüntüyü ve referans görüntüyü,  $\overline{CI}$  ve  $\overline{RI}$  odaklama derinliğinin artırılması ile oluşturulan görüntü ve referans görüntü değerlerinin ortalamalarını,  $\sigma_{RI,CI}$ ,  $\sigma_{RI}$  ve  $\sigma_{CI}$  odaklama derinliğinin artırılması ile oluşturulan görüntü ve referans görüntü değerlerinin varyans ve kovaryansını göstermektedir.

#### 4. Korelasyon Katsayısı (Correlation Coefficient - CC)

CC, odaklama derinliğinin artırılması yaklaşımı ile oluşturulan görüntü ile referans görüntü arasındaki ilişki hakkında bir değer vermektedir. İdeal yaklaşımla oluşturulan görüntünün CC değerinin diğer yaklaşımlara göre daha yüksek olması beklenmektedir. CC değerinin hesaplanması şu şekilde verilmektedir:

$$CC = \frac{\sum_i \sum_j (RI_{i,j} - \overline{RI})(CI_{i,j} - \overline{CI})}{\sqrt{(\sum_i \sum_j (RI_{i,j} - \overline{RI})^2)(\sum_i \sum_j (CI_{i,j} - \overline{CI})^2)}} \quad (5)$$

Eşitlik 5'te  $CI$  ve  $RI$ , odaklama derinliğinin artırılması ile oluşturulan görüntüyü ve referans görüntüyü,  $\overline{CI}$  ve  $\overline{RI}$  odaklama derinliğinin artırılması ile oluşturulan görüntü ve referans görüntü değerlerinin ortalamalarını ifade etmektedir.

Sentetik görüntü serisine ek olarak, odaklama derinliğinin artırılması yaklaşımlarının etkinliğini değerlendirmek için çalışmada iki farklı mikroskop görüntü serisi kullanılmaktadır. Mikroskopik sistemlerde referans olarak kabul edilebilecek herhangi görüntü (tüm alanı odaklanmış) mevcut olmadığından, Mikroskop Görüntü Serisi- 1 ve 2 için hangi yaklaşımın daha performanslı olduğunu belirlemede referans görüntü gerektirmeyen performans analiz metrikleri kullanılmaktadır. Çalışmada kullanılan referans

görüntü gerektirmeyen performans analiz metrikleri hakkındaki detaylar şu şekildedir:

### 1. Bulanıklık Metriği (Blur Metric - BM)

BM, odaklama derinliğinin artırılması yaklaşımı ile oluşturulan görüntüdeki bulanıklık hakkında değer sağlayan metriktir (Crete ve diğ. 2007). İdeal yaklaşımla oluşturulan görüntünün BM değerinin diğer yaklaşımlara göre daha düşük olması beklenmektedir.

### 2. Kurtosis Metriği (KM)

KM, odaklama derinliğinin artırılması yaklaşımı ile oluşturulan görüntünün monotonluğu hakkında bir ölçüm değeri vermektedir. İdeal yaklaşımla oluşturulan görüntünün KM değerinin diğer yaklaşımlara göre daha düşük olması beklenmektedir. KM ölçüsü şu şekilde verilmektedir:

$$KM = \frac{\frac{1}{KL} \sum_i^K \sum_j^L (c_{i,j} - \bar{CI})^4}{(\frac{1}{KL} \sum_i^K \sum_j^L (c_{i,j} - \bar{CI})^2)^2} \quad (6)$$

Eşitlik 6'da  $CI$ , odaklama derinliğinin artırılması ile oluşturulan görüntüyü,  $\bar{CI}$  odaklama derinliğinin artırılması ile oluşturulan görüntü değerlerinin ortalamasını,  $K$  ve  $L$  ise piksel koordinatlarını ifade etmektedir.

### 3. N Görüntü için Evrensel Kalite Endeksinin Genişletilmesi (Extension of Universal Quality Index for N Images - UQIN)

UQIN, odaklama derinliğinin artırılması yaklaşımı ile oluşturulan görüntüye farklı bölgeleri odaklanmış görüntülerden aktarılan veriler hakkında bir değer elde edilmesi için kullanılmaktadır. İdeal yaklaşımla oluşturulan görüntünün UQIN değerinin diğer yaklaşımlara göre daha yüksek olması beklenmektedir. UQIN ölçüsü şu şekilde hesaplanmaktadır:

$$UIQN(I_1, I_2, \dots, I_N, CI) = \frac{1}{T} \sum_{\omega \in T} \sum_{k=1}^N \lambda_{I_k}(\omega) \times UQI(I_k, CI|\omega) \quad (7)$$

$$\lambda_{I_k} = \frac{Y(I_k|\omega)}{\sum_{k=1}^N Y(I_k|\omega)} \quad (8)$$

Eşitlik 7 ve 8'de  $I_1, I_2, \dots, I_N$  farklı bölgeleri odaklanmış görüntüleri,  $CI$  odaklama derinliğinin artırılması ile oluşturulan görüntüyü,  $\omega$  görüntünün alt bir bölgesini,  $Y(I_k|\omega)$  ise alt görüntünün varyansını ifade etmektedir.

Çalışmanın ilk aşamasında, farklı bölgeleri odaklanmış görüntülerin belirgin özelliklerini çıkarmak için Bölüm 3'te ayrıntıları verilen bir otomatik kodlayıcı modeli kurulmaktadır. Çalışmada geliştirilen odaklama derinliğinin artırılması yaklaşımı 150 odaklanmış görüntü kullanılarak eğitilmektedir. Bu model eğitildikten sonra parametreleri sabitlenmekte ve ikinci (füzyon) aşamada görüntüleri birleştirmek için kullanılmaktadır. Batch size ve epoch sayıları sırasıyla 48 ve 40 olarak atanmaktadır. Her epoch, bu aşamanın eğitimi ve doğrulanması için 110 ve 40 görüntü kullanılmaktadır. Her giriş görüntüsünün boyutu 256 x 256 piksele ölçeklenmekte ve gri seviyeye dönüştürülmektedir.

Çalışmada önerilen odaklama derinliğinin artırılması yaklaşımının etkinliğini değerlendirmek ve odaklama derinliğinin artırılmasında derin özelliklerin odaklama değerlerinin çıkarılmasındaki etkilerini incelemek Tablo 1'de detayları verilen görüntü serilerine 5 farklı kategoriden seçilmiş toplam 10 odaklama derinliğinin artırılması yaklaşımı uygulanmaktadır. Tablo 2 - 4 tüm görüntü serileri için odaklama derinliğinin artırılması yaklaşımlarıyla elde edilen performans analiz metriklerinin niceliksel sonuçlarını göstermektedir.

Tablo 2. Sentetik Görüntü Serisi için Odaklama Derinliğinin Artırılması Yaklaşımlarıyla Elde Edilen Performans Analiz Metriklerinin Niceliksel Sonuçları

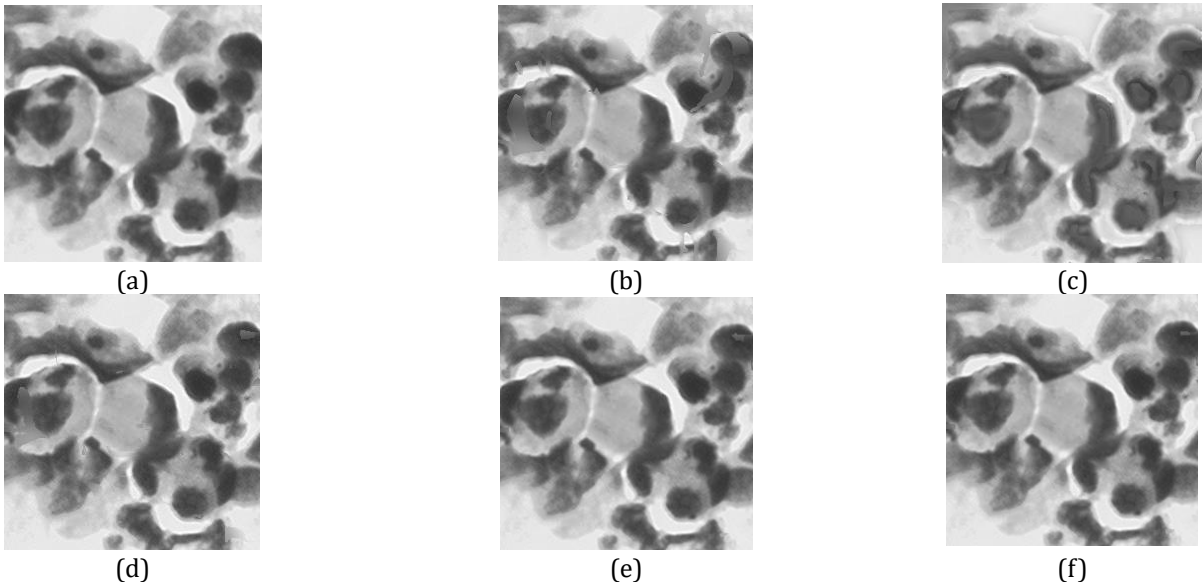
Kategori	Yaklaşım	RMSE	PSNR	UQI	CC
Gradyan	Gauss Türevi	2.3253	33.2116	0.9716	0.9711
	Tenengrad	2.2281	33.6631	0.9753	0.9744
Laplacian	Laplacian Enerjisi	2.6983	32.0665	0.9660	0.9463
	Diagonal Laplacian	2.5672	32.2112	0.9672	0.9508
Dalgacık	KDADD	2.1675	33.5110	0.9746	0.9734
İstatistik	Varyans	2.4208	32.8588	0.9680	0.9672
	Değiştirilmiş Varyans	2.4375	32.7940	0.9676	0.9550
Diğer	Uzaysal Frekans	2.4954	32.7967	0.9554	0.9560
	ACD	2.0278	33.9026	0.9801	0.9811
	AÖSD	1.9112	34.8010	0.9824	0.9831
<b>Önerilen</b>	<b>Otomatik Kodlayıcı</b>	<b>1.5183</b>	<b>36.4008</b>	<b>0.9987</b>	<b>0.9987</b>

Tablo 3. Mikroskop Görüntü Serisi- 1 için Odaklama Derinliğinin Artırılması Yaklaşımlarıyla Elde Edilen Performans Analiz Metriklerinin Niceliksel Sonuçları

Kategori	Yaklaşım	RMSE	PSNR	UQI	CC
Gradyan	Gauss Türevi	0.4111	0.1972	0.2415	0.4111
	Tenengrad	0.4018	0.1873	0.2474	0.4018
Laplacian	Laplacian Enerjisi	0.4120	0.2044	0.2355	0.4120
	Diagonal Laplacian	0.4232	0.2155	0.2340	0.4232
Dalgacık	KDADD	0.3811	0.1809	0.2504	0.3811
İstatistik	Varyans	0.4198	0.2090	0.2455	0.4198
	Değiştirilmiş Varyans	0.4187	0.2072	0.2410	0.4187
Diğer	Uzaysal Frekans	0.4018	0.1955	0.2359	0.4018
	ACD	0.3809	0.1674	0.2654	0.3809
	AÖSD	0.3642	0.1442	0.2691	0.3642
<b>Önerilen</b>	<b>Otomatik Kodlayıcı</b>	<b>0.3072</b>	<b>0.1055</b>	<b>0.2944</b>	<b>0.3072</b>

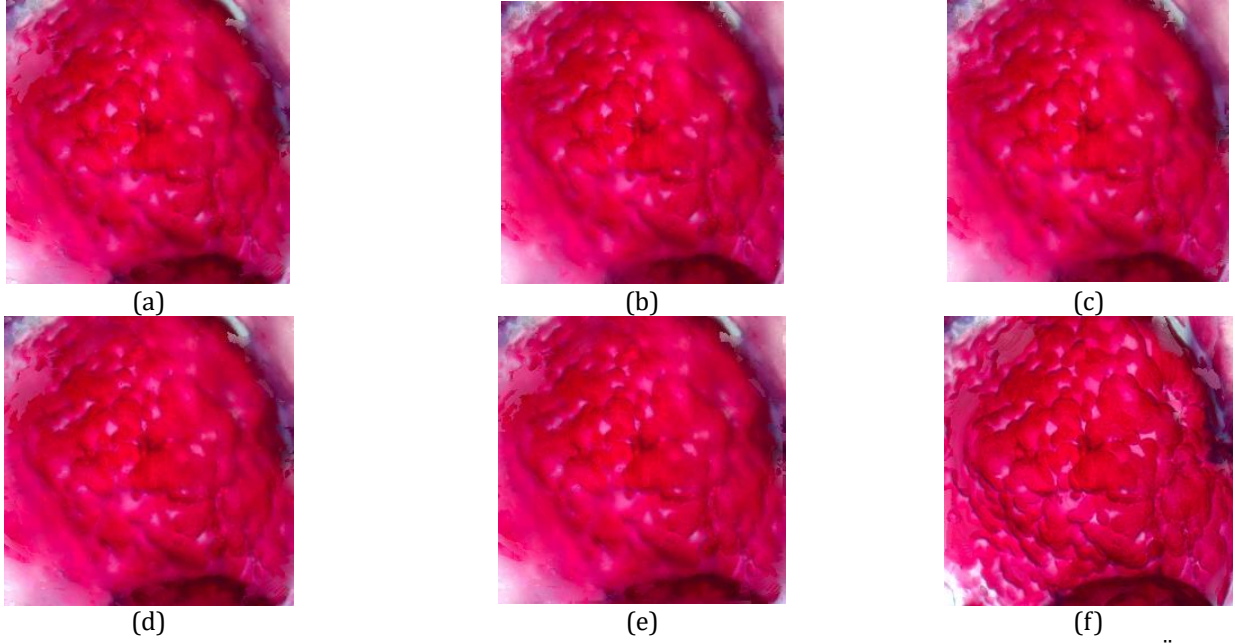
Tablo 4. Mikroskop Görüntü Serisi- 2 için Odaklama Derinliğinin Artırılması Yaklaşımlarıyla Elde Edilen Performans Analiz Metriklerinin Niceliksel Sonuçları

Kategori	Yaklaşım	RMSE	PSNR	UQI	CC
Gradyan	Gauss Türevi	0.3211	0.1140	0.7612	0.3211
	Tenengrad	0.3388	0.1152	0.7750	0.3388
Laplacian	Laplacian Enerjisi	0.3465	0.1155	0.7589	0.3465
	Diagonal Laplacian	0.3376	0.1099	0.7810	0.3376
Dalgacık	KDADD	0.3191	0.1051	0.7995	0.3191
İstatistik	Varyans	0.3400	0.1158	0.7698	0.3400
	Değiştirilmiş Varyans	0.3387	0.1165	0.7612	0.3387
Diğer	Uzaysal Frekans	0.3414	0.1152	0.7663	0.3414
	ACD	0.3108	0.1021	0.8150	0.3108
	AÖSD	0.3052	0.0985	0.8199	0.3052
<b>Önerilen</b>	<b>Otomatik Kodlayıcı</b>	<b>0.2805</b>	<b>0.0844</b>	<b>0.8640</b>	<b>0.2805</b>

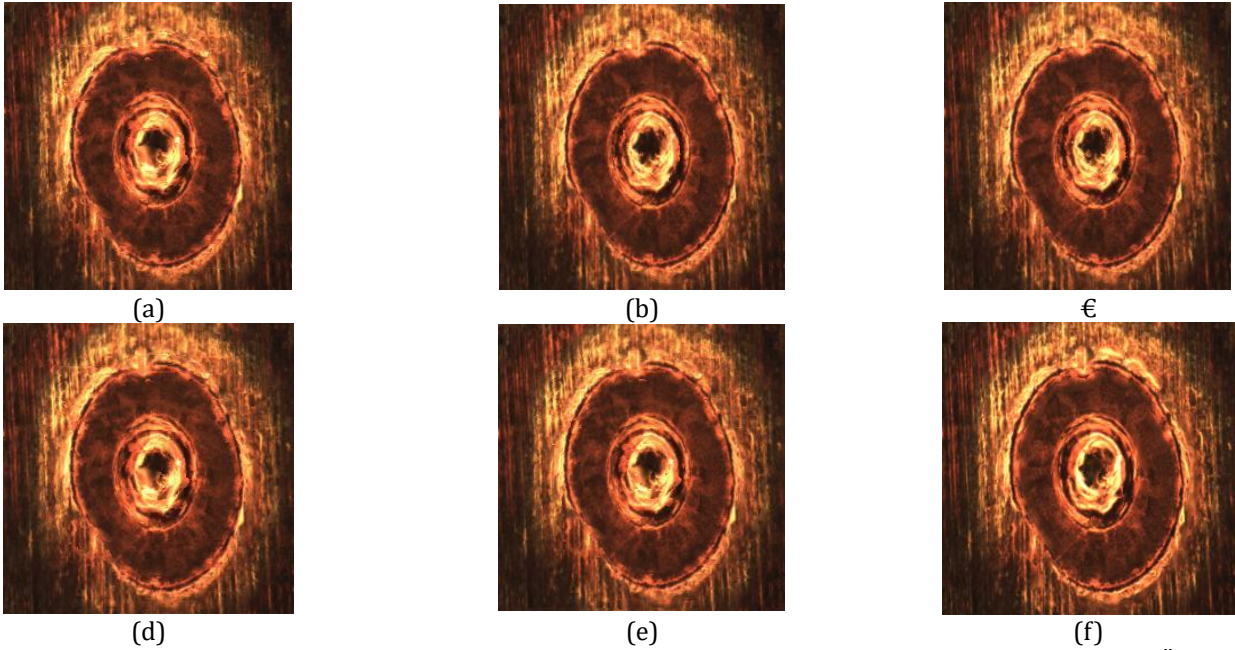


Şekil 4. Sentetik Görüntü Serisi için Referans Görüntü (a), Gauss Türevi (b), KDADD (c), ACD (d) ve Önerilen Otomatik Kodlayıcı (e) Tabanlı Odaklama Derinliğinin Artırılması Yaklaşımları ile Elde Edilen Görüntüler





Şekil 5. Mikroskop Görüntü Serisi- 1 için Gauss Türevi (a), KDADD (b), ACD (c), Uzaysal Frekans (d) ve Önerilen Otomatik Kodlayıcı (e) Tabanlı Odaklama Derinliğinin Artırılması Yaklaşımları ile Elde Edilen Görüntüler



Şekil 6. Mikroskop Görüntü Serisi- 2 için Gauss Türevi (a), KDADD (b), ACD (c), Uzaysal Frekans (d) ve Önerilen Otomatik Kodlayıcı (e) Tabanlı Odaklama Derinliğinin Artırılması Yaklaşımları ile Elde Edilen Görüntüler

Sentetik ve mikroskop görüntü serileri için referans görüntü, Gauss Türevi, KDADD, ACD, Uzaysal Frekans ve önerilen Otomatik Kodlayıcı tabanlı odaklama derinliğinin artırılması yaklaşımları ile elde edilen görüntüler Şekil 4 - 6'da gösterilmektedir.

## 5. Tartışma

Daha önce de belirtildiği gibi ideal bir odaklama derinliğinin artırılması yaklaşımının daha yüksek

PSNR, UQI, CC, UQIN ve daha düşük RMSE, BM, KM değerlerine sahip görüntü üretmesi beklenmektedir. Tablo 2 - 4'teki performans analiz metriklerinin sonuçları, önerilen yaklaşımın literatürde odaklama derinliğinin artırılması için geliştirilen en popüler yaklaşımlardan daha iyi performans sağladığını göstermektedir. En yüksek RMSE, BM, KM ve en az PSNR, UQI, CC, UQIN ile gradyan, laplacian ve istatistik tabanlı yaklaşımların en kötü performansı sağlamaları dikkat çekicidir. Farklı bölgeleri odaklanmış



görüntülerden elde edilen derin özelliklerin gri seviye değerlerine göre odaklama bilgilerinin çıkarılmasında daha etkin oldukları görülmektedir.

Şekil 4.a'daki referans görüntü ile odaklama derinliğinin artırılması yaklaşımları ile elde edilmiş görüntüler karşılaştırıldığında, otomatik kodlayıcı tabanlı yaklaşımın daha iyi bir performansa sahip olduğu açıkça görülmektedir. Önerilen odaklama derinliğinin artırılması yaklaşımı ile elde edilen görüntüler daha az bulanıklığa ve gürültü seviyesine sahip olup, referans görüntüye en çok benzeyendir. Danışmansız derin öğrenmenin RMSE, PSNR, UQI, CC, BM, KM ve UQIN açısından tüm görüntü serileri için optimum verimliliği sağladığını gösteren nicel sonuçlar, Şekil 4 - 6'daki öznel görsellerle uyumludur.

Bölüm 2'de belirtildiği gibi, çalışmada önerilen odaklama derinliğinin artırılması yaklaşımının literatüre birçok katkısı mevcuttur. Fakat bu yaklaşım bazı kısıtlamalara da sahiptir. Bu kısıtlamalar şu şekilde özetlenebilmektedir: Odaklama derinliğinin artırılması yaklaşımının uygulanması için bu çalışmada 2,60 GHz hızında çalışan Intel Core i7-9750 işlemcili, 16 GB RAM'li ve 12 GB GPU VRAM'li NVIDIA GeForce RTX 3060 GPU'lu bir bilgisayar içeren bir donanım yapılandırması kullanılmıştır. Görüntü işleme, bilgisayarlı görme ve tıbbi görüntüleme analizinde derin öğrenme ve CNN tabanlı tekniklerin kullanıldığı literatür çalışmaları ile karşılaştırıldığında, GPU'muz daha düşük kapasiteye sahiptir. Bu donanım yapılandırması kısıtlamasını en aza indirmek için giriş görüntüsü boyutunu 256 x 256'ya düşürerek GPU tüketimi optimize edilmiştir. Daha önce de belirtildiği gibi, derin özelliklerden yararlanarak piksellerin odaklama derecelerinin elde edilmesine yönelik odaklama derinliğinin artırılması yaklaşımı sunan ilk çalışmadır. Derin öğrenmeyi ve CNN tabanlı görüntü işleme tekniklerini geliştiren önceki çalışmaların aksine, bu çalışmada farklı odaklamalara sahip görüntülerden yüksek boyutlu öznetelikler elde etmek için temel bir otomatik kodlayıcı modeli oluşturulmuştur. Bu model yalnızca konvolüsyonel bloklarından oluşmaktadır.

## 6. Sonuçlar

Numunenin tüm alanının odaklandığı (optimum odaklı) görüntü üretmek için, bu çalışmada yeni bir odaklama derinliğinin artırılması yaklaşımı geliştirilmektedir. Önerilen yaklaşım derin özelliklerin çıkarımı için ağ tasarımı ve füzyon olmak üzere iki ana aşamadan oluşmaktadır. İlk aşamada farklı bölgeleri odaklanmış görüntülerin belirgin özelliklerini çıkarmak için otomatik kodlayıcı tasarlanmaktadır. Füzyon aşaması farklı bölgeleri odaklanmış görüntü serisini kullanarak numunenin tüm alanının odaklandığı görüntü üretmektedir.

Literatürdeki çalışmalar yeni odaklama derinliği artırılması yaklaşımı önermek yerine, genellikle daha yüksek doğruluk ve daha düşük bulanıklık elde etmek için bir ön veya son işleme algoritması geliştirmektedirler. Bu çalışmada, danışmansız derin öğrenmeye dayalı yeni odaklama derinliği artırılması yaklaşımı önerilmektedir. Literatürdeki çalışmaların aksine, önerilen yaklaşım daha iyi odaklama gösterimi ve daha yüksek performans sunmaktadır. İşlem öncesi veya sonrası bir algoritma gerektirmediğinden, minimum hesaplama maliyeti ve karmaşıklığı vardır. Ayrıca, önerilen yaklaşım piksellerin odaklama bilgilerini hesaplarken yalnızca görüntülerin gri seviye değerlerini kullanan önceki çalışmaların aksine, derin özellikleri kullanmaktadır.

Sentetik ve mikroskop görüntü serilerinden oluşan veri seti, önerdiğimiz yaklaşımın hem nicel hem de nitel analizi için test edilmektedir. Hangi odaklama derinliğinin artırılması yaklaşımının, sentetik görüntü serisi için giriş görüntülerinden daha önemli ayrıntıları çıkarabileceğini belirlemek için, referans gerektiren performans analiz metrikleri olarak RMSE, PSNR, UQI ve CC değerleri kullanılmaktadır. Yüksek performanslı yaklaşımla oluşturulan görüntünün daha düşük RMSE ve daha yüksek PSNR, UQI ve CC değerleri üretmesi beklenmektedir. Sentetik görüntü serisi için performans analiz metriklerinin sonuçları, önerdiğimiz yaklaşımın diğerlerinden daha etkili olduğunu göstermektedir. Çünkü en yüksek PSNR, UQI ve CC ve en düşük RMSE değerlerine sahiptir. Ayrıca görsel bulgular, önerilen yaklaşımın danışmansız derin öğrenme modeli kullanılarak üretilen görüntünün en az bulanıklık ve gürültüye sahip olduğunu ve referans görüntüye en çok benzediğini göstermektedir. Sentetik görüntü serisine ek olarak, hangi odaklama derinliği artırılması yaklaşımının, mikroskop görüntü serileri için giriş görüntülerinden daha önemli ayrıntıları çıkarabileceğini belirlemek için referans gerektirmeyen performans analiz metrikleri olarak BM, KM ve UQIN kullanılmaktadır. Yüksek performansa sahip yaklaşımla oluşturulan görüntünün daha düşük BM, KM ve daha yüksek UQIN değerleri vermesi beklenmektedir. Daha düşük BM ve KM değerlerine ve daha yüksek UQIN değerlerine sahip olan önerdiğimiz yaklaşımın diğer literatür operatörlerinden daha iyi performans gösterdiği açıktır.

## Araştırmacıların Katkısı

Bu araştırmada; Yazar1, anketin tasarımı, uygulanması, bilgisayara ortamına aktarılması, ... ; Yazar2, bilimsel yayın araştırması, makalenin oluşturulması, ... ; Yazar3, istatistiki analizler, makalenin sonuçlar.... hazırlanması konularında katkı sağlamışlardır.

**Çıkar Çatışması**

Yazarlar tarafından herhangi bir çıkar çatışması beyan edilmemiştir.

**Kaynaklar**

- Aguet, F., Van De Ville, D. ve Unser, M. (2008). Model-based 2.5-D deconvolution for extended depth of field in brightfield microscopy. *IEEE Transactions on Image Processing*, 17(7), 1144-1153. doi: <https://doi.org/10.1109/TIP.2008.924393>
- Akpinar, U., Sahin, E., Meem, M., Menon, R. ve Gotchev, A. (2021). Learning wavefront coding for extended depth of field imaging. *IEEE transactions on image processing*, 30, 3307-3320. doi: <https://doi.org/10.1109/TIP.2021.3060166>
- Ambikumar, A. S., Bailey, D. G. ve Gupta, G. S. (2016). Extending the depth of field in microscopy: A review. *2016 International Conference on Image and Vision Computing New Zealand (IVCNZ)*, 1-6.
- Cao, Z., Zhai, C., Li, J., Xian, F. ve Pei, S. (2017). Combination of color coding and wavefront coding for extended depth of field. *Optics Communications*, 392, 252-257. doi: <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2017.02.016>
- Chen, J., Li, X., Luo, L., Mei, X. ve Ma, J. (2020). Infrared and visible image fusion based on target-enhanced multiscale transform decomposition. *Information Sciences*, 508, 64-78. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ins.2019.08.066>
- Cohen, N., Yang, S., Andalman, A., Broxton, M., Grosenick, L., Deisseroth, K., Horowitz, M. ve Levoy, M. (2014). Enhancing the performance of the light field microscope using wavefront coding. *Optics express*, 22(20), 24817-24839. doi: <https://doi.org/10.1364/OE.22.024817>
- Costa, M. G. F., Pinto, K. M. B., Fujimoto, L. B., Ogusku, M. M. ve Costa Filho, C. F. (2019). Multi-focus image fusion for bacilli images in conventional sputum smear microscopy for tuberculosis. *Biomedical Signal Processing and Control*, 49, 289-297. doi: <https://doi.org/10.1016/j.bspc.2018.12.018>
- Crete, F., Dolmiere, T., Ladret, P. ve Nicolas, M. (2007). The blur effect: perception and estimation with a new no-reference perceptual blur metric. In *Human vision and electronic imaging XII*, 6492, 196-206.
- Dogan, H., Baykal, E., Ekinici, M., Ercin, M. E. ve Ersoz, S. (2018). A novel extended depth of field process based on nonsubsampling shearlet transform by estimating optimal range in microscopic systems. *Optics Communications*, 429, 88-99. doi: <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2018.08.006>
- Dowski, E. R. ve Cathey, W. T. (1995). Extended depth of field through wave-front coding. *Applied optics*, 34(11), 1859-1866. doi: <https://doi.org/10.1364/AO.34.001859>
- Du, H., Dong, L., Liu, M., Zhao, Y., Wu, Y., Li, X., Jia, W., Liu X., Hui, M. ve Kong, L. (2019). Increasing aperture and depth of field simultaneously with wavefront coding technology. *Applied Optics*, 58(17), 4746-4752. doi: <https://doi.org/10.1364/AO.58.004746>
- Elmalem, S., Giryas, R. ve Marom, E. (2018). Learned phase coded aperture for the benefit of depth of field extension. *Optics express*, 26(12), 15316-15331. doi: <https://doi.org/10.1364/OE.26.015316>
- Forster, B., Van De Ville, D., Berent, J., Sage, D. ve Unser, M. (2004). Complex wavelets for extended depth-of-field: A new method for the fusion of multichannel microscopy images. *Microscopy research and technique*, 65(1-2), 33-42. doi: <https://doi.org/10.1002/jemt.20092>
- Gierlak, M., Albrecht, S., Kauer, J., Leverenz, E. ve Beckers, I. E. (2013). Wavefront coding using a spatial light modulator for extended depth of field microscopy. In *European Conference on Biomedical Optics*, p. 879803.
- Hermessi, H., Mourali, O. ve Zagrouba, E. (2021). Multimodal medical image fusion review: Theoretical background and recent advances. *Signal Processing*, 183, 108036. doi: <https://doi.org/10.1016/j.sigpro.2021.108036>
- Huang, M., Liu, S., Li, Z., Feng, S., Wu, D., Wu, Y. ve Shu, F. (2022). Remote sensing image fusion algorithm based on two-stream fusion network and residual channel attention mechanism. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2022, 1-14. doi: <https://doi.org/10.1155/2022/8476000>
- Jose, J., Gautam, N., Tiwari, M., Tiwari, T., Suresh, A., Sundararaj, V. ve Rejeesh, M. R. (2021). An image quality enhancement scheme employing adolescent identity search algorithm in the NSST domain for multimodal medical image fusion. *Biomedical Signal Processing and Control*, 66, 102480. doi: <https://doi.org/10.1016/j.bspc.2021.102480>
- Li, L., Si, Y., Wang, L., Jia, Z. ve Ma, H. (2020). A novel approach for multi-focus image fusion based on SF-PAPCNN and ISML in NSST domain. *Multimedia Tools and Applications*, 79, 24303-24328. doi: <https://doi.org/10.1007/s11042-020-09154-4>

- Li, Y., Wang, J., Zhang, X., Hu, K., Ye, L., Gao, M., Cao, Y. ve Xu, M. (2022). Extended depth-of-field infrared imaging with deeply learned wavefront coding. *Optics Express*, 30(22), 40018-40031. doi: <https://doi.org/10.1364/OE.471443>
- Liu, S., Wang, M., Yin, L., Sun, X., Zhang, Y. D. ve Zhao, J. (2022). Two-scale multimodal medical image fusion based on structure preservation. *Frontiers in Computational Neuroscience*, 15, 133. doi: <https://doi.org/10.3389/fncom.2021.803724>
- Liu, Y., Wang, L., Cheng, J., Li, C. ve Chen, X. (2020). Multi-focus image fusion: A survey of the state of the art. *Information Fusion*, 64, 71-91. doi: <https://doi.org/10.1016/j.inffus.2020.06.013>
- Mo, X., Zhang, T., Wang, B., Huang, X., Kuang, C. ve Liu, X. (2019). Alleviating image artifacts in wavefront coding extended depth of field imaging system. *Optics Communications*, 436, 232-238. doi: <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2018.12.006>
- Pan, C., Chen, J., Zhang, R. ve Zhuang, S. (2008). Extension ratio of depth of field by wavefront coding method. *Optics express*, 16(17), 13364-13371. doi: <https://doi.org/10.1364/OE.16.013364>
- Pertuz, S., Puig, D. ve Garcia, M. A. (2013). Analysis of focus measure operators for shape-from-focus. *Pattern Recognition*, 46(5), 1415-1432. doi: <https://doi.org/10.1016/j.patcog.2012.11.011>
- Piccinini, F., Tesei, A., Zoli, W. ve Bevilacqua, A. (2012). Extended depth of focus in optical microscopy: Assessment of existing methods and a new proposal. *Microscopy research and technique*, 75(11), 1582-1592. doi: <https://doi.org/10.1002/jemt.22104>
- Ramlal, S. D., Sachdeva, J., Ahuja, C. K. ve Khandelwal, N. (2019). An improved multimodal medical image fusion scheme based on hybrid combination of nonsubsampling contourlet transform and stationary wavelet transform. *International Journal of Imaging Systems and Technology*, 29(2), 146-160. doi: <https://doi.org/10.1002/ima.22310>
- Tan, W., Tiwari, P., Pandey, H. M., Moreira, C. ve Jaiswal, A. K. (2020). Multimodal medical image fusion algorithm in the era of big data. *Neural Computing and Applications*, 1-21. doi: <https://doi.org/10.1007/s00521-020-05173-2>
- Tessens, L., Ledda, A., Pizurica, A. ve Philips, W. (2007). Extending the depth of field in microscopy through curvelet-based frequency-adaptive image fusion. In *2007 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing-ICASSP'07*, 1, 1-861.
- Valdecasas, A. G., Marshall, D., Becerra, J. M. ve Terrero, J. J. (2001). On the extended depth of focus algorithms for bright field microscopy. *Micron*, 32(6), 559-569. doi: [https://doi.org/10.1016/S0968-4328\(00\)00061-5](https://doi.org/10.1016/S0968-4328(00)00061-5)
- Wang, K., Zheng, M., Wei, H., Qi, G. ve Li, Y. (2020). Multi-modality medical image fusion using convolutional neural network and contrast pyramid. *Sensors*, 20(8), 2169. doi: <https://doi.org/10.3390/s20082169>
- Wei, X., Han, J., Xie, S., Yang, B., Wan, X. ve Zhang, W. (2019). Experimental analysis of a wavefront coding system with a phase plate in different surfaces. *Applied Optics*, 58(33), 9195-9200. doi: <https://doi.org/10.1364/AO.58.009195>
- Ye, F., Li, X. ve Zhang, X. (2019). FusionCNN: a remote sensing image fusion algorithm based on deep convolutional neural networks. *Multimedia Tools and Applications*, 78, 14683-14703. doi: <https://doi.org/10.1007/s11042-018-6850-3>
- Zhao, T., Mauger, T. ve Li, G. (2013). Optimization of wavefront-coded infinity-corrected microscope systems with extended depth of field. *Biomedical optics express*, 4(8), 1464-1471. doi: <https://doi.org/10.1364/BOE.4.001464>